

Estrategias y soluciones en logística: Modelos avanzados y tecnología para un mundo en constante cambio

Miguel Gaston Cedillo-Campos
María Paz Guadalupe Acosta-Quintana
Carlos Daniel Martner-Peyrelongue
Coordinadores



Estrategias y soluciones en Logística: Modelos avanzados y tecnología para un mundo en constante cambio

Coordinadores:

Miguel Gaston Cedillo-Campos
María Paz Guadalupe Acosta-Quintana
Carlos Daniel Martner-Peyrelongue





Instituto Tecnológico de Sonora
5 de febrero, No. 818 sur, colonia Centro
Ciudad Obregón, Sonora, México; 85000

www.itson.mx

Email: rectoria@itson.mx

Teléfono: (644) 410-90-00

Primera edición

Agosto, 2025

ISBN para ebook: 978-607-609-267-5

Gestión editorial y maquetación

Marisol Cota Reyes

Oficina de publicaciones ITSON

marisol.cota@itson.edu.mx

Cubierta diseñada por Freepik D.R.

La presente publicación ha sido dictaminada por pares académicos expertos en el tema.

Reservados todos los derechos conforme a la ley.

Hecho en México



OFICINA DE
PUBLICACIONES
ITSON



MéxicoLogístico[®]

Asociación Mexicana de Logística & Cadena de Suministro, A.C



International Congress on
Logistics & Supply Chain

Directorio

Dr. Jesús Héctor Hernández López
Rector

Dr. Jaime Garatuza Payán
Vicerrectoría Académica

Dr. Rodolfo Valenzuela Reynaga
Vicerrectoría Administrativa

Dr. Ernesto Uriel Cantú Soto
Secretario de la Rectoría

Mtro. Mauricio López Acosta
Dirección Unidad Navojoa

Mtro. Humberto Aceves Gutiérrez
Dirección Unidad Guaymas

Dra. María Dolores Moreno Millanes
Dirección Académica de la División de Ciencias
Económico Administrativas

Dr. Armando Ambrosio López
Dirección Académica de la División de
Ingeniería y Tecnología

Dr. Pablo Gortares Moroyoqui
Dirección Académica de la División de
Recursos Naturales

Dra. Sonia Verónica Mortis Lozoya
Dirección Académica de la División de Ciencias Sociales
y Humanidades

Consejo dictaminador

Dra. Lorena Bearzotti
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso

Dr. Miguel Gastón Cedillo Campos
Tecnológico de Monterrey

Dra. Rosa G. Gonzalez-Ramirez
Universidad de los Andes, Chile

Dr. Ernesto Alonso Lagarda Leyva
Instituto Tecnológico de Sonora

Dra. Elizabeth De La Torre
Instituto Mexicano del Transporte

Dr. Agustín Bustos Rosales
Instituto Mexicano del Transporte

Dr. Juan José Méndez Palacios
Universidad Autónoma de Querétaro

Dr. Carlos Daniel Martner Peyrelongue
Instituto Mexicano del Transporte

Dra. Maria Paz Guadalupe Acosta Quintana
Instituto Tecnológico de Sonora

Dra. Sandra Téllez Vázquez
Universidad Politécnica de Guanajuato

Dr. Jose Alfredo Jiménez García
Instituto Tecnológico Nacional de México

Dra. Mayra Elizondo Cortés
Universidad Nacional Autónoma de México

Dra. Alejandra Gomez Padilla
Universidad de Guadalajara

Dr. Giovanni Lizarraga Lizarraga
Universidad Autónoma de Nuevo León

Dr. Luis David Berrones Sanz
Universidad Autónoma de la Ciudad de México

Dra. María Loecelia Ruvalcaba
Universidad Autónoma de Aguascalientes

Dr. Ricardo Torres Mendoza
Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Raúl Soto-Peredo
Universidad Autónoma de la Ciudad de México

Dr. Benito Sanchez Lara
Universidad Nacional Autónoma de México

M.C. Jared Piña Bárcenas
Instituto Mexicano del Transporte

Dra. Jania Astrid Saucedo Martínez
Universidad Autónoma de Nuevo León

Dr. Jöns Sánchez Aguilar
Instituto Tecnológico Nacional de México

Dr. Jonás Velasco Álvarez
Centro de Investigación en Matemáticas

Dr. Carlos Mario Pérez González
Instituto Mexicano del Transporte

Dr. José Elias Jiménez Sánchez
Instituto Mexicano del Transporte

Dr. Cesar Jaime Montiel Moctezuma
Instituto Mexicano del Transporte

Dra. Edith Lucero Ozuna Espinosa
Universidad Autónoma de Nuevo León

Dr. Carlos Alberto Ochoa-Zezatti
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Dr. Raúl Perez Gallardo
Centro de Investigación en Matemáticas

Dr. José Manuel Velarde Cantú
Instituto Tecnológico de Sonora

Dra. Lourdes Loza-Hernández
Universidad Autónoma del Estado de México

Dr. Leopoldo David Tapia Torres
Instituto Tecnológico Nacional de México

Contenido

Prólogo

8

SECCIÓN I. Optimización, Simulación y Métodos Avanzados

CAPÍTULO 1

12

Aplicación de simulación orientada a objetos y su impacto en la productividad mediante Flexsim

Luis Ángel Toledo Aguilar, Juan Gerardo Anaya Silva, José Alfredo Jiménez García, Sandra Téllez Vázquez, Juan Antonio Lara Mireles y Claudia Tinajero Ramírez

CAPÍTULO 2

29

Optimización de rutas en logística: Un enfoque metaheurístico con GRASP

Danisa Romero-Ocaño, Víctor M. Valenzuela - Alcaraz, M.A. Cosío-León y Luis Josue Casillas Ramírez

CAPÍTULO 3

56

Optimización de la recolección de residuos urbanos en un municipio fronterizo mediante Algoritmos Genéticos: un enfoque basado en el problema de rutas de arcos con capacidad limitada

Víctor M. Valenzuela-Alcaraz, A. Danisa Romero-Ocaño, Luis Ruvalcaba Urías y Jorge Luis García Cantón

CAPÍTULO 4

78

Optimal location of new business entities in urban areas

Jesús Escalante Euán, Miguel Escalante Solís, Ileana Monsreal Barrera, Jorge Santos Flores, José Castillo Caamal y Miriam Chan Pavón

CAPÍTULO 5

93

Performance Comparative Study of Human-Inspired Algorithms: Harmony Search Algorithm (HSA) and Golf Optimization Algorithm (GOA)

Jesús Carlos Carmona Frausto, Adriana Mexicano Santoyo, Oscar Alejandro Hernández Cruz, Pascual Noradino Montes Dorantes y Juan Antonio Vargas Enríquez

SECCIÓN II. Estudio y Mejora de Procesos

CAPÍTULO 6 **114**

Análisis estadístico de tiempos de conducción en el autotransporte con respecto al cumplimiento de la NOM-087

Carlos Mario Pérez-González, Martha Elizabeth De la Torre Romero, Jared Piña-Barcenas y Marisol Barrón Bastida

CAPÍTULO 7 **139**

Método de medición del índice de accidentabilidad de los operadores del autotransporte de carga

José Elías Jiménez Sánchez, Elizabeth de la Torre Romero, José Carlos Martínez Vázquez y Carlos Daniel Martner Peyrelongue

CAPÍTULO 8 **174**

Potencial de intermodalismo de la carga movida por autotransporte en México

Agustín Bustos Rosales, Miguel Gastón Cedillo Campos, José Alejandro Ascencio Laguna y Alma Rosa Zamora Domínguez

CAPÍTULO 9 **192**

Explorando la eficiencia de métodos de pronóstico: Un estudio comparativo en la predicción de la demanda

Leonardo Gabriel Hernández Landa, Carolina Solís Peña, José Daniel Mosquera Artamanov, Jorge Octavio Vega Gámez y Pablo Cesar Oviedo Salazar

CAPÍTULO 10 **210**

Análisis de tiempos de carga de camiones en empresa manufacturera

María de los Ángeles Martínez-Mercado, Elva Patricia Puente-Aguilar, Azucena Minerva García-León y Daniela del Carmen Bacre-Guzmán

SECCIÓN III. Gestión de Almacenes y Logística Esbelta

CAPÍTULO 11 **229**

Propuesta de reacondicionado semifijo de materiales en almacén de una empresa manufacturera del sector automotriz

Lourdes Loza-Hernández, Sergio Vázquez Aranda y Agustín Bustos Rosales

CAPÍTULO 12 **246**

Logística Esbelta en el proceso de galvanizado: Caso de Estudio

Rogelio Zarza Díaz, Tere Itzell Martínez Martínez y Anel Sánchez Maldonado

CAPÍTULO 13 **264**

Inventory reduction in the central warehouse of an energy generating company in Mexico

Belen Mejia Rasso, Lourdes Loza-Hernández y Javier Romero-Torres

CAPÍTULO 14 **278**

Determinación de la capacidad de producción de harina en una empresa recicladora de residuos cárnicos

Ernesto Alonso Vega Telles, Ernesto Alonso Lagarda Leyva, Alfredo Bueno Solano y María del Pilar Lizardi Duarte

SECCIÓN IV. Desarrollo de Infraestructura y Tecnología

CAPÍTULO 15 **293**

Exploración preliminar del potencial de los aeropuertos de Minatitlán e Ixtepec para atender la demanda de pasajeros y carga en el Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec (CIIT)

Alfonso Herrera García y Abraham Cortés Ronquillo

CAPÍTULO 16 **309**

Tecnologías automatizadas de aforos vehiculares para proyectos de análisis de movilidad urbano-portuaria

José Alfonso Balbuena Cruz, María Aurora Moreno Martínez, Jorge Jerónimo Martínez Antonio y Agustín Bustos Rosales

CAPÍTULO 17 **326**

Caracterización del centro de acopio y su contribución a la economía circular. Estudio de caso: RSU de botellas de PET

Juan José Méndez Palacios y Erick Álvarez Alfaro

CAPÍTULO 18 **347**

Analysis of the LITHIUM model of the Lithium Battery Supply Chain

Roberto Hernández Torres, Alberto A. Aguilar Lasserre, Constantino Gerardo Moras Sánchez, Ulises Juárez Martínez, Rubén Posada Gómez y Miguel Gastón Cedillo Campos

COORDINADORES **369**

Prólogo

Vivimos una era de transformación profunda en la manera en que concebimos, diseñamos y gestionamos los sistemas logísticos. El entorno actual, marcado por la digitalización acelerada, la incertidumbre geopolítica, la urgencia ambiental y la reconfiguración de las cadenas de suministro globales, exige nuevas respuestas interdisciplinarias. En este contexto, el presente libro se erige como una contribución relevante y oportuna al pensamiento científico y al ejercicio profesional en los diversos campos que toca la logística, la ciencia de la organización de los flujos.

Esta obra colectiva reúne investigaciones que exploran soluciones innovadoras ante problemáticas contemporáneas mediante el uso de modelos matemáticos avanzados, algoritmos de optimización, metodologías “Lean”, inteligencia artificial, dinámica de sistemas y tecnologías emergentes. Los capítulos aquí presentados no solo responden a preguntas técnicas, sino que también interpelan a los investigadores sobre su papel en la generación de conocimiento útil para mejorar la eficiencia, la resiliencia y la sostenibilidad de nuestros sistemas productivos y logísticos.

El lector encontrará en estas páginas estudios rigurosos que abordan desafíos de optimización de rutas, pronóstico de demanda, reconfiguración de almacenes, intermodalismo, cumplimiento normativo en el autotransporte, y modelos de cadena de suministro circular. También se incluye una visión prospectiva sobre infraestructuras clave —como el Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec— y se exploran aplicaciones de tecnologías como los algoritmos genéticos, la simulación orientada a objetos o los sistemas multiagente en escenarios reales.

Esta obra no es solo una compilación académica: es una invitación a pensar en red, a colaborar entre disciplinas y a aplicar el conocimiento técnico con sentido estratégico y responsabilidad social. Las contribuciones que aquí se presentan nacen de universidades, centros de investigación y experiencias de profesionales en campo, lo cual refleja la vitalidad del pensamiento logístico y su capacidad para incidir en la transformación de territorios y sectores productivos.

A los lectores —investigadores consolidados, jóvenes académicos, profesionales en busca de soluciones rigurosas— les invitamos a abordar esta obra con espíritu crítico y constructivo. Cada capítulo es una pieza en el rompecabezas de la logística del futuro, una que nos exige combinar excelencia científica, sensibilidad práctica y una visión sistémica del cambio. El

equipo editorial espera que este libro sirva no solo para informar, sino para inspirar nuevas preguntas, fomentar colaboraciones, y potenciar el impacto del conocimiento en los sistemas logísticos e industriales de América Latina y del mundo.

La estructura de esta publicación se organiza en cuatro secciones temáticas que reflejan la complejidad multidimensional de la logística actual: optimización, simulación y métodos avanzados, estudio y mejora de procesos, gestión de almacenes y logística esbelta, y desarrollo de infraestructura y tecnología. En conjunto, estas secciones ofrecen una cartografía del pensamiento y la práctica logística avanzada, anclada en datos, algoritmos y modelado predictivo.

Sección I. Optimización, Simulación y Métodos Avanzados

Esta primera sección abre con una aplicación de FlexSim para mejorar procesos de manufactura en la industria cerámica, integrando principios de manufactura esbelta con simulación orientada a objetos. Le sigue un estudio que aplica el enfoque metaheurístico GRASP a la optimización de rutas con ventanas de tiempo, una problemática central en la logística. El tercer trabajo introduce un algoritmo genético para abordar el Capacitated Arc Routing Problem (CARP) en la recolección de residuos urbanos. A continuación, se presenta un modelo para la localización óptima de unidades de negocio en zonas urbanas, y se cierra con un análisis comparativo entre algoritmos de optimización inspirados en la conducta humana, que evalúa su desempeño en funciones de prueba de diversa complejidad.

Sección II. Estudio y Mejora de Procesos

Los trabajos aquí reunidos incluyen una evaluación estadística del cumplimiento de la NOM-087 mediante datos GPS, que revela patrones operativos en el autotransporte de carga. Le sigue un análisis sobre la relación entre los rasgos de personalidad de los operadores y su nivel de accidentabilidad. Otro capítulo estima el volumen de carga con potencial para ser transferido a esquemas intermodales, aportando a la eficiencia ambiental del sistema logístico. También se presenta un estudio comparativo de modelos clásicos y modernos para el pronóstico de la demanda, y un caso aplicado que logra reducir significativamente los tiempos de carga en una empresa manufacturera mediante metodologías DMAIC.

Sección III. Gestión de Almacenes y Logística Esbelta

Esta sección examina el reacomodo semifijo de materiales en almacenes del sector automotriz utilizando modelos de programación lineal, así como la aplicación de principios de logística esbelta para optimizar procesos y reducir re-trabajos. También, presenta un estimulante caso de estudio donde se aplica logística esbelta en el proceso de galvanizado.

Se incluye también un estudio sobre la gestión de inventarios en una empresa del sector energético, donde se identifican oportunidades de mejora a partir del análisis del ciclo de vida de los productos. Finalmente, se analiza la capacidad de producción en una planta recicladora de residuos cárnicos a través de modelos de dinámica de sistemas, en un contexto de aprovechamiento sostenible.

Sección IV. Desarrollo de Infraestructura y Tecnología

Esta última sección ofrece una mirada prospectiva sobre la infraestructura logística. Inicia con un estudio que evalúa el potencial de los aeropuertos de Minatitlán e Ixtepec para atender la demanda generada por el Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec. Le sigue una comparativa de tecnologías automatizadas de aforo vehicular para proyectos de análisis de movilidad urbano-portuaria. Posteriormente, se analiza el rol de los centros de acopio en la logística inversa del PET en el marco de la economía circular. Finalmente, se presenta un análisis integral del modelo LITHIUM aplicado a la cadena de suministro global de baterías de litio, evaluando vulnerabilidades y proponiendo estrategias para mejorar su eficiencia y resiliencia.

Sin duda los temas son de interés no solo para investigadores y docentes de posgrado, sino también para consultores especializados y formuladores de políticas públicas. Este libro aspira a constituirse como una referencia esencial en la agenda académica y profesional de la logística contemporánea. La densidad técnica y el valor aplicado de sus contribuciones invitan a una lectura reflexiva y a su incorporación como insumo en el diseño de soluciones para afrontar los retos logísticos del siglo XXI.

El Comité Editorial Científico

SECCIÓN I

*Optimización,
Simulación y
Métodos Avanzados*

CAPÍTULO 1

Aplicación de simulación orientada a objetos y su impacto en la productividad mediante Flexsim

*Luis Ángel Toledo Aguilar
Juan Gerardo Anaya Silva
José Alfredo Jiménez García
Sandra Téllez Vázquez
Juan Antonio Lara Mireles
Claudia Tinajero Ramírez*

Resumen— El presente documento de investigación fue realizado con el propósito de formular un sistema de producción mediante simulación orientado a objetos aplicando el software FlexSim. El sistema refleja la fabricación de productos cerámicos con el objetivo de reducir los costos y tiempos de producción, así como el incremento en un rango de 1 a 3% en la productividad actual de la línea. El estudio se realizó en 3 etapas fundamentales para la representación de la problemática. La cual se encuentra por debajo del 80% durante el primer trimestre del año 2024. Esto significa que la capacidad de producción proyectada durante ese mismo año se encontrará alrededor de 65% si no se toman medidas necesarias. La fase 1 (F1) comienza con la representación del estado actual de la línea de producción de pisos cerámicos. La fase (F2) busca mejorar el aprovechamiento de los recursos y cumplimiento de la demanda diaria, mediante un estudio de tiempo y movimiento de tal modo que se pueda llegar a un tiempo estándar de producción diaria mediante el estado de las máquinas de forma que se identifiquen las causas comunes que afectan la productividad. Por último, La Fase 3 (F3) del estudio también permitió la aplicación de técnicas de “Lean Manufacturing” el Value Stream Mapping (VSM). En esta etapa se mapeó el estado actual y futuro de la línea de revisión y empaque hasta encontrar una mejora sustancial en el área con mayor detención y demoras que incrementan los tiempos de entrega.

Palabras Clave— Simulación orientada a objetos, Modelación, Productividad, Escenarios, VSM.

Introducción

Actualmente las organizaciones están en una constante búsqueda por expandir su mercado a nuevos clientes, posicionarse en los primeros lugares de la industria en la que se especializan y desarrollar mejores niveles de productividad es de sus principales objetivos empresariales. La productividad se puede resumir en la óptima utilización de los recursos, es decir, la posibilidad de producir más usando los mismos o menores recursos [1]. Por otra parte, la simulación orientada a objetos para analizar procesos en el flujo de productos tiene la ventaja de obtener soluciones a corto plazo, empleado un modelado de simulación permite realizar planteamientos hipotéticos para la representación de comportamientos y sistemas complejos [1]. Los modelos de simulación matemáticas también son útiles para la representación de sistemas robustos con características particulares [2], sin embargo en la industria el desarrollo de los proyectos de simulación requieren de especialistas para su realización por lo que la adopción ha sido más lenta. La ventaja de los sistemas de producción simulados es que permite tomar decisiones a bajo costos, así como menores riesgos de inversión. Por otra parte, una simulación es la imitación del funcionamiento de un proceso o sistema del mundo real a lo largo del tiempo. [3]. La simulación como herramienta alternativa de cambio se ha empleado en múltiples trabajos de investigación donde se han mejorado los resultados en las metas propuestas por las organizaciones [4]. Los modelos matemáticos y la simulación por computadora son una forma de analizar y estudiar el comportamiento de los sistemas, incorporando los criterios aplicables a continuación. Actualmente la industria 4.0 requiere nuevas tecnologías para la realización de estudios empleando herramientas combinatorias aplicadas por algunos autores tal es el caso de Breznik et al. que destaca los siguientes objetivos en la modelación de sistemas [5]:

1. Obtener información sobre el funcionamiento de un sistema,
2. Desarrollar estrategias operativas o de recursos para mejorar el rendimiento del sistema,
3. Probar nuevos conceptos y/o sistemas antes de su implementación y medir su rendimiento,
4. Obtención de información sin interferir con el sistema real.

Flex Sim, es un software de simulación 3D que modela, analiza, predice y visualiza cualquier sistema de un proceso industrial. El software se orienta a objetos, lo que permite una mejor visualización del flujo de producción y tomar mejores decisiones en la operación de los sistemas industriales, buscando mejorar su rentabilidad. [6]

Para el Análisis de la situación a simular se empleó la metodología de mapeo de la cadena de valor también conocida como VSM (por sus siglas en inglés), esta técnica auxilia para obtener un diagnóstico mediante un mapeo inicial y para este caso también nos sirve para recopilar los datos y condiciones iniciales para la simulación. [7]. Posteriormente también se presenta el mapeo de la cadena de valor propuesto.

Otras publicaciones muestran la utilidad del mapeo de la cadena de valor, algunos ejemplos son:

Camacero-Peña, 2021 aplicó la metodología de la cadena de valor, identificó desperdicios en el proceso de cosecha y post cosecha de la piña, posteriormente definió un plan de acción que fue simulado utilizando el software Flexsim, donde compara el antes y el después con el fin de mostrar los beneficios potenciales de la implementación de la propuesta [8]. Paredes-Rodríguez, 2017 utilizó la metodología VSM en una empresa embaladora de productos de vidrio para detectar y eliminar las actividades que no agregan valor a su proceso y mejorar el desempeño de la logística de la compañía, al final concluye que esta herramienta permite proponer mejoras que ayuden a un comportamiento ideal del sistema, donde las actividades que generan desperdicio sean mínimas [9].

Metodología

Método de simulación

La metodología empleada en el desarrollo de la modelación de los escenarios se basa en los pasos descritos por Moraleda et al. [10] como se muestra en la Figura 1.

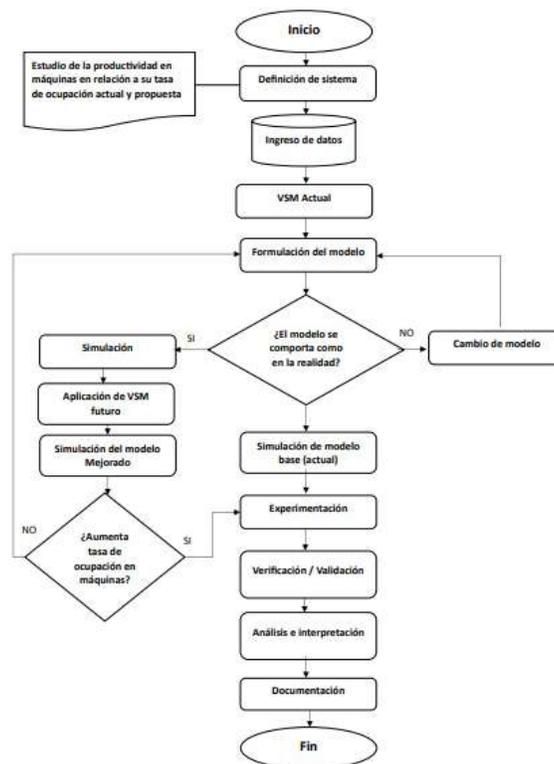


Figura 1. Método de simulación de simulación

Así mismo la integración del documento sigue un estricto sentido partiendo de 3 etapas de construcción, primeramente se define el sistema a modelar mediante la identificación de las variables de entrada, proceso y salida del sistema. La segunda etapa consta de la descripción de la modelación conceptual; en este se desarrolla mediante una serie de análisis de los elementos que interactúan en el modelo. Por último, la tercera etapa se centra en la programación y desarrollo del modelo de simulación, implementación de códigos de ejecución, validación y verificación del modelo, lo que conlleva a la experimentación y análisis de los resultados [11] como se aprecia en la Figura 2.

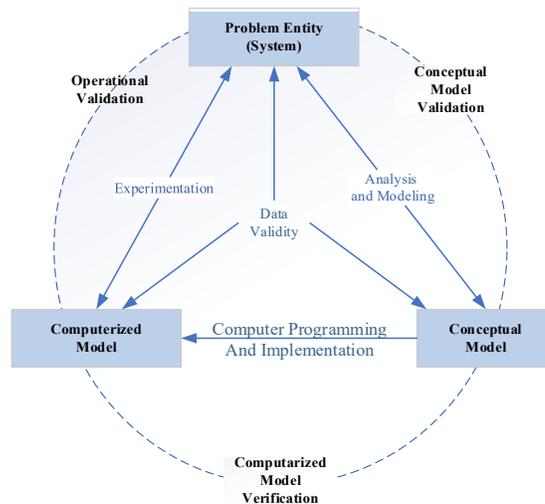


Figura 2. Etapas para un proyecto de simulación. Fuente: Recuperado de Sargent (2011) p.186

Construcción del modelado de simulación

Descripción del problema

La productividad en el área de revisión y empaque, refleja que la capacidad instalada está por debajo del 80%, situación que genera una problemática financiera. Los datos del porcentaje de productividad del primer trimestre del año 2024 (enero- marzo) se muestran en la Figura 3. Generar movimientos en el área de revisión y empaque, podría ser un agravante en la situación de la empresa tales como, actividades re-trabajadas o no realizadas. Lo anterior, refleja la necesidad de buscar mejoras en el área de tal forma que estos indicadores se puedan incrementar el flujo de los productos sin afectar los costos de modo que se ponga en riesgo la inversión. Una de las limitantes es mantener el mismo número de recursos actuales con los que cuenta la empresa. Con base en lo anterior, se han detectado alimentadores de cuellos de botella que ralentizan el flujo de productos en el área, lo que impide un crecimiento de la producción al tener 40 tarimas producidas al día. Estas limitantes se deben a los constantes paros de línea de las máquinas. La máquina denominada Synthesis y Paletizadora

reflejan una recurrencia de fallas por falta de material, deficiente tasa de ocupación y un mal balanceo de línea. Actualmente no se cumple con la demanda diaria de 40 tarimas por turno trabajado. Por tal motivo se produce un efecto de sobreproducción e ineficiencias en el proceso acudiendo incluso a incrementar horas de trabajo lo que impacta negativamente en las metas del turno, así como también la productividad en el área de estudio.

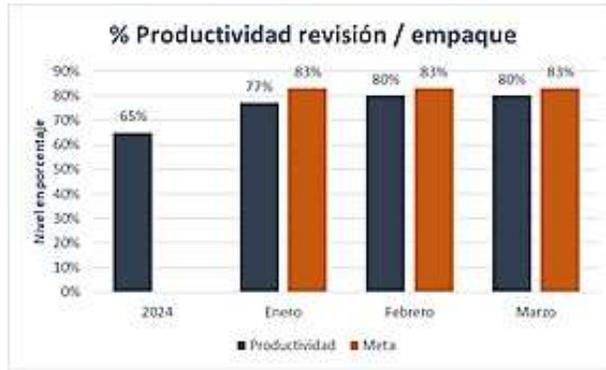


Figura 3. Comparación actual de % de productividad en el área

Para ello, la propuesta de este trabajo se realizó empleando Simulación Orientada a Objetos (SOB) con apoyo del software FlexSim. Lo que se pretende, es describir la situación actual y futura, midiendo los niveles de productividad en el área de revisión y empaque, pudiendo mejorar en un rango de 1 a 3% durante el primer semestre del año del estudio. El flujo de productos que salen de la máquina paletizadora hacia el equipo que coloca el fleje a la tarima, genera retardos por factores de distancia, paros no programados y una desactualización de tasa de ocupación de las máquinas en el área descrita (Ver Figura 4). Actualmente la empresa no cuenta con estudios de diseño, específicamente mediante simulación, lo cual permite crear un rediseño de los flujos de productos que se dirigen hacia el almacén. La justificación de dicho proyecto sugiere que mediante el uso de simulación orientada a objetos se reduzcan los costos operativos, se rediseñe el área y se incremente el porcentaje de productividad

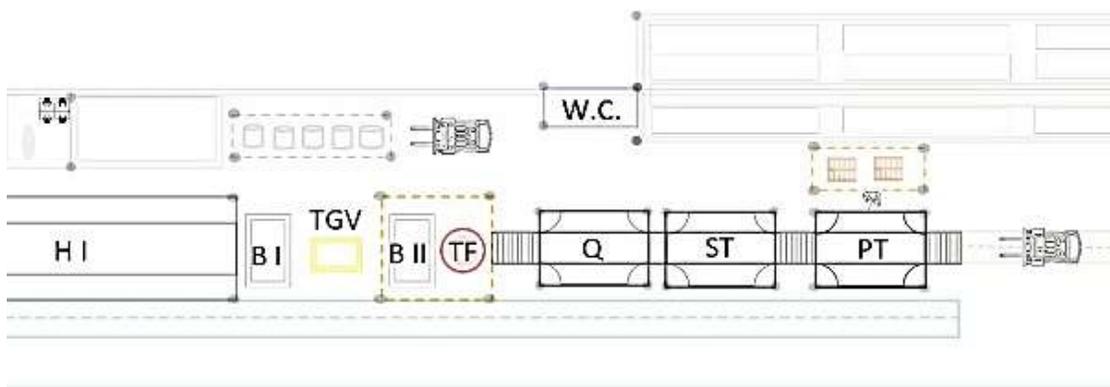


Figura 4. Layout del área estudiada

De acuerdo a los datos históricos en el área de revisión y empaque el nivel de productividad se ve afectado por dos motivos; saturación y falta de material tal como se puede observar en la Figura 5 a través de un diagrama de Pareto. Con la revisión de las fallas, se pueden plantear la hipótesis de la investigación: Al crear un modelo mejorado propuesto a través del uso de dos herramientas como Value Stream Mapping (VSM) y Statistics Experimenter se incrementará la productividad en al menos en un rango de 1% a 3%, para dar cumplimiento de la demanda diaria sin sobreproducción en el área de revisión y empaque en un turno de 8 horas.

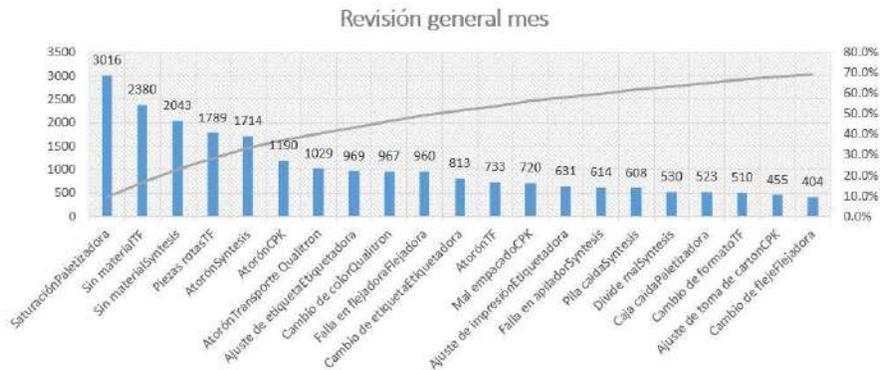


Figura 5. Revisión mensual de fallas

Identificación de limitaciones

Como en todo modelo real existen limitaciones sujetas a la realidad analizando el método, medio ambiente, máquina, mano de obra y materia prima como se observa en la figura 6, mediante el diagrama de Ishikawa. Para la recolección de los datos, se dispuso de la información que actualmente maneja la empresa, también se tomaron datos relevantes en el área de revisión y empaque en relación a las horas de trabajo de 8 horas diarias. Los datos que se levantaron fueron: producción diaria, cantidad de pisos que ingresan a las máquinas, tiempo de operación de los procesos, frecuencias de flujos de materiales en cada equipo, tamaño de los lotes, número de operarios.

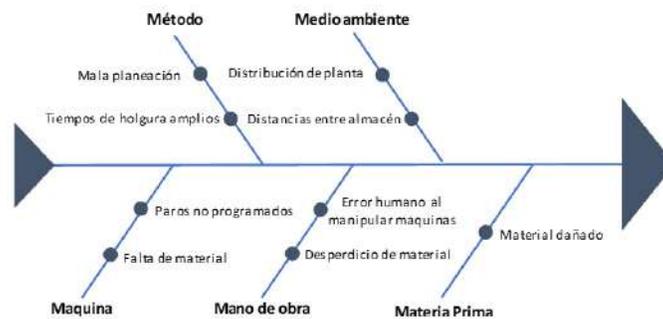


Figura 6. Layout del área estudiada

Construcción del modelo

Para la construcción del modelo orientado a objetos, se utilizó el simulador FlexSim en su versión 2022. En cuanto al ingreso de los datos se realizó un análisis previo del área de revisión y empaque; respecto a las máquinas y operarios que componen la línea como se puede observar en el diagrama de operación (Figura 7-8). De manera detallada se puede observar el análisis del flujo de producción por medio de un curso grama analítico, para identificar cada uno de las actividades que intervienen en el mismo como lo son, Operación, Inspección, Demora y Transporte como se muestra en la figura 8. A partir de dicha información recabada se crearán dos modelos como plantea la metodología propuesta por Moraleda et al. [6], para posteriormente contrastar resultados, por una parte, modelo base (situación actual) y modelo mejorado donde se evaluarán los niveles finales de producción.

Simulación actual

En la simulación base se muestra a detalle la creación del modelo en su estado actual. Antes de la realización de modelo y para hacer cumplir el plan de estudio del proyecto se procede a mapear el estado actual de la línea de revisión y empaque, lo cual ayudará a identificar las posibles mejoras en el proceso para aumentar la tasa de productividad de las máquinas. La realización del VSM actual puede ser observada en la Figura 8. En la Tabla 1 se muestra el orden de las 9 estaciones de trabajo, cabe aclarar que dichas estaciones están compuestas por máquinas automatizadas y solo dos procesos internos son manuales (operario de supervisión y montacarguista), importante a considerar son los 408 minutos reales brutos por motivos de comida y desperdicio del 2%, y la demanda esperada a cumplir son 40 tarimas por turno, estos datos son representados en el siguiente cálculo para el balanceo estándar de producción mediante la técnica cálculo del Takt time.

Tabla 1
Estaciones de trabajo

Estación	Máquina	Recurso en Flexsim
1	Horno	Source
2	Banco I	Queue
3	Banco II	Combiner
4	Tecnoferrari	Processor
5	Qualitron	Processor
6	Synthesis	Multiprocessor
7	Paletizadora	Processor
8	Flejadora	Processor
9	Almacen	Queue

$$\text{Takt time} = (\text{Tiempo disponible}) / \text{Demanda} \quad (1)$$

Takt time = 408 minutos/40 tarimas

Takt time = 10.20 min/Unidad

Takt time $9.95 \times 60 = 597$ seg/ Unidad

DIAGRAMA DE RRCCORRIDO								
Cursograma analítico								
Empresa: Grupo Daltille			RESUMEN					
			Actividad	Actual				
Actividad: Revisión y Empaque			Operación	6				
Método: cursograma analítico actual			Demora	2				
Lugar: Salamanca			Almacenamiento	3				
Máquinas: Equipos encargados de procesar o transformar materia prima a producto terminado			Transporte	2				
			Distancia	29.5				
Elaborado por: Gerardo Anaya		Fecha: 12/02/2024		Tiempo	15.002			
				Mano de Obra	2			
				TOTAL				
Descripción	Cantidad	Tiempo (min)	Distancia (mts)	Actividad				OBSERVACIONES
				●	◐	◑	➔	
Entrada de material (horno)	1	0	30	X				
Arribo de material a bancon I	1	5			X			
Transporte de pisos	1	0.2	8				X	
Arribo de material a bancon II	1	5			X			
Inspección automatizada de pisos	1	0.002		X				
Agrupación de pisos	1	0.56		X				
Empaque	1	1.1		X				
Pegamento en cajas	1	0.1		X				
Colocación de tarimas	1	0.1	0.5		X			
Paletización	1	2.50	1	X				La operación puede mejorarse
Flejadora	1	0.12			X			
Transporte de tarimas terminadas	1	0.31	30				X	La distancia puede ser acortada
Almacén final	1	0.00					X	
TOTAL	-	15.002	29.5					

Figura 7. Diagrama de recorrido del área estudiada

Los resultados obtenidos del modelo actual se muestran en la Tabla 2, a través de las estadísticas de salida del modelo con contadores numéricos, para fines prácticos demuestran los datos, en atributos de producción como: pisos, cajas y tarimas completas.

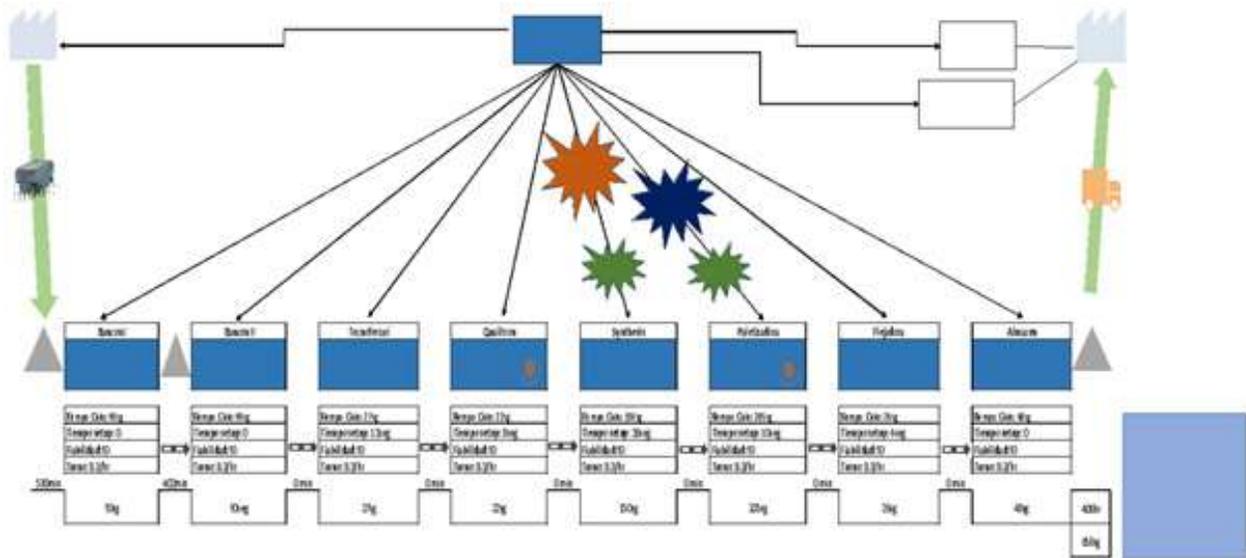


Figura 8. VSM del área estudiada

Tabla 2
Salidas del modelo actual

Producción	Total
Pisos	6660
Cajas	1332
Tarimas	37

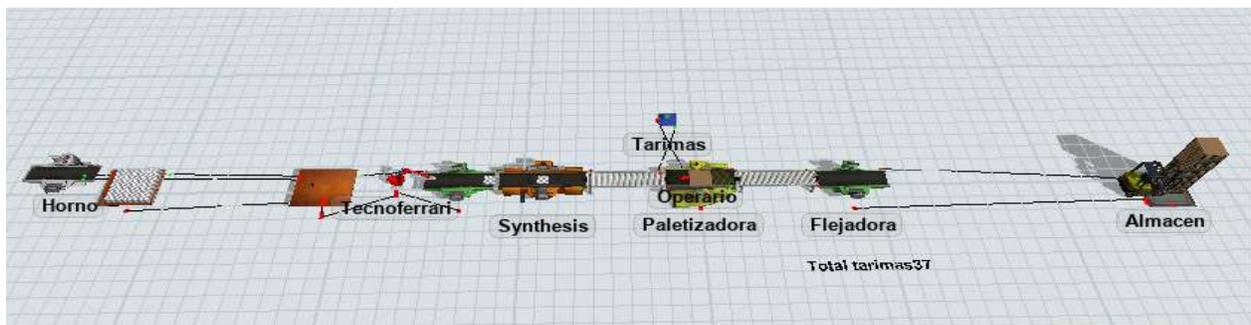


Figura 9. Modelo actual

Propuesta de mejora

Para la propuesta de mejora se hará uso de un mapa de flujo de valor futuro, para determinar el Tack Time, técnica para determinar el tiempo medio entre el inicio de la producción de una unidad y el inicio de la producción de la siguiente, con el motivo de cumplir la demanda diaria, a su vez la metodología será apoyada a través de la simulación por Software2 en Flex-Sim para tener certeza aproximada al comportamiento real de dicho escenario.

En relación a los datos arrojados por el modelo del estado actual, se puede determinar que no se cumple la demanda diaria, quedando a tan solo 3 tarimas de alcanzar dicha demanda, además de un cuello de botella en las maquinas Synthesis y Paletizadora respecto a la tasa de ocupación esperada de dicha máquina, se pretende realizar el cálculo Tack Time para balancear cuantas tarimas deben ser producidas respecto a un tiempo estándar y pueda contribuir a cumplir la demanda. Para fines prácticos se retoman los datos iniciales, se tiene un turno de 8.50 horas, el cual comprende de 6:30am a 3:00pm, lo cual expresado en minutos es el equivalente a 510 minutos.

Gráfico de balanceo de línea

De acuerdo a la comparativa entre el tiempo actual establecido para elaborar una sola tarima con 36 cajas empacadas, y el escenario propuesto a través del cálculo Tack Time se puede determinar que 46 segundos no han sido aprovechados de forma óptima para cumplir con la demanda de 40 tarimas de producto empacado durante un turno de 8 horas. La comparación del tiempo estándar se muestra en la Figura 11, en esta se visualiza la situación actual en comparación al modelo propuesto mejorado balanceado mediante la técnica Tack time.

Una vez obtenido el tiempo estándar para poder cumplir con la demanda se procede a establecer la configuración en las máquinas, el enfoque principal a mejorar es en las maquinas Synthesis y Paletizadora ya que son las que generan más cuellos de botella por motivos de falta de material, deficiente configuración de procesamiento, y tiempos de ciclo no balanceados.

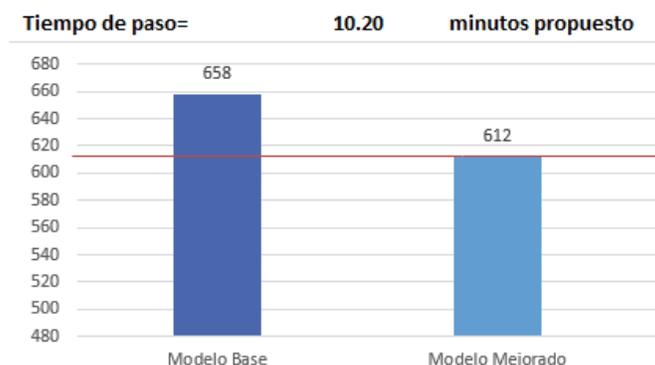


Figura 10. Balanceo de línea mediante técnica tack time

En la Tabla 3 se muestra a mayor detalle dicho balanceo calculado los tiempos ciclo para cumplir la demanda diaria. La comparación se realizó con el estado actual y el estado propuesto, lo que se observa que para las máquinas: Synthesis y Paletizadora; se encuentran por debajo de su máxima tasa de ocupación.

Tabla 3
Tiempo estándar actual vs propuesto

Proceso	Actual	Propuesto		Tc por estación (seg/lote)	% Mejora por proceso
	Tc (seg/lote)	Estaciones	Tc (seg/lote)		
Agrupación	66	Synthesis	58	134	8 %
Empaque	70.8		56		14.8 %
Pegamento	22		20		2 %
Paletización	195	Paletizadora	189	189	6 %
Total	353.8		323		30.8 %

Se mejoró el tiempo estándar de algunos procesos, particularmente en las máquinas Synthesis y Paletizadora donde se habían identificado las causas más comunes de cuellos de botella explicados en el planteamiento del problema. En el estado actual, el tiempo de Valor Añadido (VA) es de 353.8 segundos por lote, mientras que con el método propuesto se logra reducir a 125.32 minutos por lote, representando una mejora del 30.8% para la línea de empaque de 36 cajas por tarima. La mayor reducción se dio en el proceso de empaque, el cual tuvo una mejora significativa del 14.8%.

Simulación del modelo propuesto

En cuanto a la simulación del modelo propuesto se realizó el mapeo de valor de estado de línea futura, así como los cálculos propuestos explicados anteriormente. En la Figura 12 se muestra el desarrollo del mapa de flujo de valor futuro. Posteriormente se replicarán las mejoras identificadas al modelo propuesto a través de Flexsim.

Para atacar los cuellos de botella generados en las máquinas Synthesis y Paletizadora se procede a configurar los nuevos tiempos de ciclo para cada una de las tareas que realizan dichas máquinas, esto con respecto a los cálculos obtenidos en la propuesta de mejora.

Resultados

Los resultados obtenidos a través del método de estudio planteado descrito en el capítulo anterior. Para fines prácticos se muestra la relación de resultados y análisis costo – beneficio de la implementación (Observar Figuras 13-16).

Comparación de modelos de simulación

A continuación, se presenta la comparación del estado actual respecto a la propuesta de mejora por balanceo, de línea en el cual se puede distinguir el aumento de productividad en la tasa de ocupación de la línea de revisión y empaque. Escenario 1, en cuanto a la dispersión de los valores por réplica en el modelo base (situación actual), se obtuvo un promedio de 37 tarimas producidas en un turno de 8 horas (Observar Figura 17). Por otra parte, el escenario 2, presenta una dispersión de los valores por réplica en el modelo propuesto mejorado, se obtuvo un promedio de 40.1 tarimas producidas en un turno de 8 horas (Observar tabla 4).

Tabla 4
Resultados de simulación modelo estado actual

Producción	Total
Pisos	6660
Cajas	1332
Tarimas	37

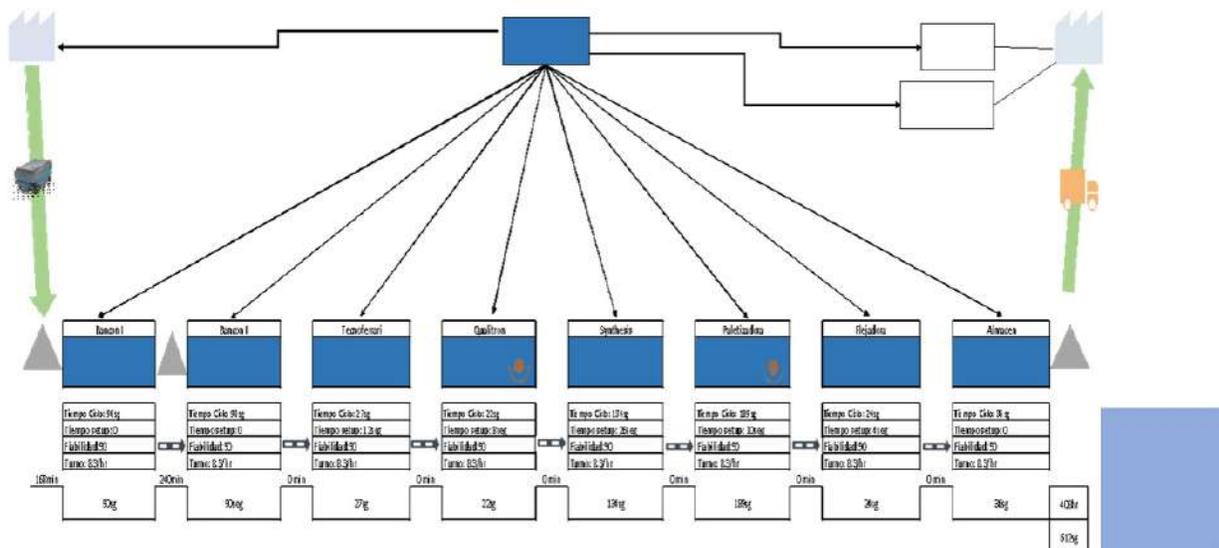


Figura 12. VSM del modelo propuesto



Figura 13. Tasa de productividad en máquina synthesis



Figura 14. Tasa de productividad en máquina Synthesis II



Figura 15. Tasa de productividad en máquina paletizadora



Figura 16. Tasa de productividad en máquina paletizadora II

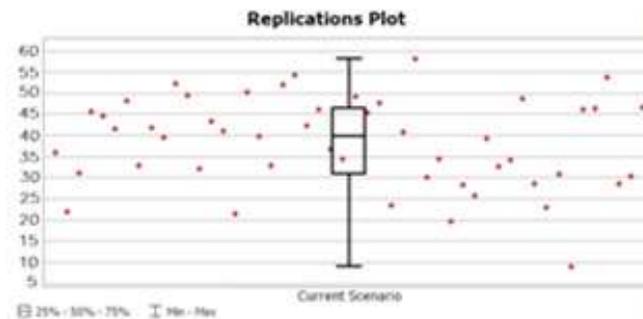


Figura 17. Resultado de la productividad del modelo

Tabla 5

Resultados de la estimación futura con simulación

Producción	Total
Productos	7200
Cajas	1440
Tarimas	40

El costo beneficio del estudio se realizó comparando el modelo actual con el que cuenta la empresa versus la mejora. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla VI, en este se visualiza un incremento del 3% de productividad que para los lotes de producción representa un incremento por lo menos de 300 mil pesos mexicanos.

Tabla 6
Análisis costo-beneficio de la implementación

Descripción	Antes de la propuesta	Después de la propuesta
Producto empaquetado	1332	1440
Tarimas (Demanda)	37	40
Tasa de ocupación maquina <u>Synthesis</u>	76%	81%
Tasa de ocupación en maquina paletizadora	78%	81%
Productividad de línea	80%	83%
Costo – Beneficio del proyecto	\$278,388.00 MXN	\$300,960.00 MXN

Conclusiones

Al inicio de este proyecto, el estado actual de la línea de revisión y empaque presentaba varios problemas que podían visualizarse en la simulación del estado inicial tales como: los cuellos de botella en la máquina Synthesis y Paletizadora, la gran cantidad de producto en los almacenes y de producto en curso a lo largo de la línea de producción, así como una considerable saturación entre cada máquina por mencionar algunos ejemplos.

Con el apoyo de los mapas de la cadena de valor (VSM) actual y futuro en apoyo a los modelos de simulación inicial versus propuesto, se encontró que la hipótesis planteada inicialmente en el que se mencionaba que el incremento en la productividad podría ser por lo menos incrementada en un rango de 1 a 3% se aprueba. Lo anterior dado que se eliminaron movimientos y tiempos que no agregan valor al proceso, alcanzando un nivel productividad superior que con el que se contaba inicialmente. El incremento en la productividad se ve reflejado en la demanda diaria atendida con una capacidad actual de 40 tarimas con producto empacado. La simulación propuesta obtuvo outputs promedio de 40 tarimas finalizadas al término del turno (de estudio) aumentando su tasa productiva en un 3% como se había propuesto, ciertamente responde ante la capacidad instalada de la planta, sin generar un cuello de botella que afecte a los procesos posteriores o que anteceden al á.

A partir de la implementación de las mejoras en el modelo propuesto a través de la estandarización de la máquina Synthesis a un tiempo ciclo de 134 segundos se pudo reducir un 14.8% de actividad de ocio, también se logró balancear el tiempo ciclo de la máquina Paletizadora hasta un 6%, haciendo está más productiva, mejorando hasta un 30.8% el proceso estudiado. De esta forma, se ha podido demostrar las ventajas que ofrece la Simulación Orientada a Objetos (SOB), mediante la implementación y comparación de escenarios para analizar las variables del problema detectadas en el área de estudio. Por otra parte, al combinar las técnicas de Lean Manufacturing con la simulación, favorece la evaluación de alter-

nativas de mejora en los procesos productivos de la industria, esto sin alterar la marcha de los procesos de producción, en el que se pueden evaluar los puestos de trabajo mediante tecnologías de información que favoreciendo la productividad y desempeños de los recursos de la organización.

Tabla 7
Análisis de comparación de escenarios

Descripción	Antes de la propuesta	Después de la propuesta
Producto empaquetado	1332	1440
Tarimas (Demanda)	37	40
Tasa de ocupación maquina Synthesis	76%	81%
Tasa de ocupación en maquina paletizadora	78%	81%
Productividad de línea	80%	83%
Costo – Beneficio del proyecto	\$278,388.00 MXN	\$300,960.00 MXN

Bibliografía

- [1] J. Harrison, Z. Lin, G. Carroll y K. Carley, «Simulation modeling in organizational and management research,» *Academy of Management Review*, n° 32, pp. 1229-1245, 2007.
- [2] T. Kalmár-Nagy y I. Stanciulescu, «Can complex systems really be simulated?,» *Appl. Math. Comput.*, vol. 227, pp. 199-211, 2014.
- [3] X. Zhiwei y L. Yongxian, «Mechanical production line simulation and optimization analysis,» *International Conference on Automation and Logistics*, pp. 2925-2930.
- [4] J. Banks and L. Carson , *Discrete-event System Simulation*, USA: PrenticeHall , 2005.
- [5] M. Breznik, B. Buchmeister y N. Vujica Herzog, «Assembly Line Optimization Using MTM Time Standard and Simulation Modeling—A Case Study,» *Applied Sciences*, vol. 13, n° 10, pp. 1-18, 2023.
- [6] A. Vega Anzules «Construcción de Modelos de Simulación en FlexSim que implemente Herramientas Lean Manufacturing en una Línea de Ensamblaje» *Universidad de Valladolid*, pp. 42-43, 2021.

[7] I.M Bedoya-Diaz; V.L. Chud-Pantoja y A.M. Paredes-Rodriguez, «Simulación de mejoras en el sistema productivo de una curtiembre basada en el mapeo de su cadena de valor,» *Scientia et Technica*, vol. 25, n° 3, pp. 394-403, 2020.

[8] M.A. Camacaro-Peña; A.M. Paredes-Rodriguez, C.D. Aulestia-Potes y M.G.Henao-Guerrero, «Mapa de cadena de valor como una herramienta para la mejora de los procesos de cosecha y postcosecha en una empresa productora de piña,» *Entramado*, vol. 7, n° 2, pp. 226-242, 2021

[9] A.M. Paredes Rodriguez, «Aplicación de la herramienta Value Stream Mapping a una empresa embaladora de productos de vidrio,» *Entramado*, vol. 13, n° 1, pp. 262-277, 2017

[10] A. Moraleda y C. Villalba, *Métodos de simulación y modelado.*, México: UNED-Universidad Nacional de Educación a Distancia., 2016.

[11] R. G. Sargent, «Verification and validation of simulation models. » *IEEE Engineering Management Review*, vol. 37, n° 2, pp. 60-66, 2011.

CAPÍTULO 2

Optimización de rutas en logística: Un enfoque metaheurístico con GRASP

Danisa Romero-Ocaño
Víctor M. Valenzuela - Alcaraz
M.A. Cosío-León
Luis Josue Casillas Ramírez

Resumen— El presente estudio aborda un desafío logístico crucial: la optimización de rutas para la distribución eficiente de bienes y servicios, considerando la distancia y las restricciones de ventanas de tiempo impuestas por los clientes. Se presenta un algoritmo metaheurístico, GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure, por sus siglas en inglés), y se evalúa su rendimiento comparándolo con casos de prueba reconocidas en la literatura. La efectividad del enfoque se valida con un conjunto selecto de casos de prueba del problema de rutas con ventanas de tiempo de la literatura, proporcionando una perspectiva valiosa sobre la eficiencia y la optimización en la logística empresarial. Los resultados ofrecidos por el algoritmo en un subconjunto de casos de prueba de 25 y 50 clientes mejoran en promedio a los reportados en la literatura.

Palabras Clave—: Logística, GRASP, VRPTW, Solomon, Taguchi

Introducción

El sistema de transporte desempeña un papel fundamental en el funcionamiento de las organizaciones, ya que su eficiencia repercute directamente en el rendimiento empresarial, la satisfacción del cliente y la competitividad en el mercado. Mejorar los servicios de transporte y distribución se convierte en algo indispensable para aquellas empresas que buscan expandirse y conquistar nuevos mercados. La optimización de la cadena de suministro se establece como un desafío estratégico, donde la reducción de costos y el cumplimiento de los requerimientos de los clientes se vuelven objetivos primordiales [1].

En este contexto, el diseño de rutas que minimicen los costos de transporte emerge como una prioridad. Uno de los problemas más estudiados en el ámbito de la logística operativa es el problema de ruteo de vehículos (VRP, por sus siglas en inglés) [2], el cual plantea el desafío de encontrar la solución óptima considerando diversas restricciones, como el número de vehículos, su capacidad de carga, los destinos a visitar y la demanda de los clientes.

La complejidad de estos problemas radica en la gran cantidad de variables y parámetros involucrados, así como en su pertenencia a la clase NP-difícil, lo que implica que no pueden resolverse en tiempo polinomial [3-5]. Desde los primeros planteamientos, como el clásico Problema del Viajante (TSP) propuesto por Flood en 1956 [6], hasta las formulaciones más recientes utilizando inteligencia artificial, se han desarrollado numerosas investigaciones y algoritmos para abordar estas problemáticas, adaptándose a las realidades específicas de cada contexto empresarial y generando avances significativos en la optimización de rutas y la eficiencia logística [7].

En el ámbito empresarial contemporáneo, la eficiente planificación de rutas para la distribución de bienes y servicios se ha vuelto crucial, dado el impacto significativo de los costos de transporte en la competitividad del mercado. La necesidad de minimizar estos gastos, que incluyen producción, almacenamiento y transporte, sin comprometer la calidad del producto ni la satisfacción del cliente, es imperativa.

La optimización de las rutas de transporte se convierte así en una estrategia clave para reducir costos y mejorar la eficiencia logística de las empresas. Este enfoque cobra aún más relevancia en un contexto donde los costos de combustible experimentan un aumento constante a lo largo del tiempo.

El presente proyecto se fundamenta en la premisa de que la mejora en la estructura de planificación operacional, mediante la implementación de metodologías que generen ahorros en los costos de transporte actuales, proporciona una ventaja competitiva significativa. Este artículo aborda el problema común de asignación de rutas de reparto en empresas de dis-

tribución, donde la optimización de las rutas es crucial para minimizar costos de transporte. Los problemas de rutas de vehículos en la realidad son complejos, con múltiples condiciones como la capacidad del vehículo, el número de depósitos, la demanda del cliente, el tráfico y las ventanas de tiempo para las entregas. En este estudio, se evaluó un algoritmo metaheurístico que considera estas restricciones, con el objetivo de minimizar la distancia recorrida y, por consiguiente, los costos de transporte.

El presente artículo está estructurado en cinco secciones, la sección dos define el problema y sus antecedentes, la sección tres describirá la metodología empleada en el desarrollo del trabajo. La sección cuatro presenta los resultados obtenidos y finalmente, la sección cinco muestra las conclusiones obtenidas.

Antecedentes del Problema

La optimización de las rutas de distribución para flotas de vehículos representa un desafío central en la gestión operativa de empresas dedicadas a la entrega de bienes o servicios. Cada día, estas organizaciones se enfrentan a la tarea crucial de diseñar rutas que minimicen la distancia recorrida, reduciendo así los costos asociados al transporte. Sin embargo, la complejidad de los problemas de enrutamiento vehicular en el mundo real no puede ser subestimada. Estos escenarios presentan una multiplicidad de condiciones que afectan la formulación matemática del problema, lo que lo convierte en un desafío aún mayor para su resolución exacta. Estas condiciones incluyen la capacidad de los vehículos, que puede ser homogénea (uniforme) o heterogénea (variada), así como el número de puntos de recolección de carga, la demanda de los clientes, las condiciones del tráfico, las distancias involucradas y, crucialmente, los tiempos de entrega definidos por los clientes [8].

En este estudio, se realizó una evaluación exhaustiva de un algoritmo metaheurístico diseñado para enfrentar las complejas restricciones de capacidad y demanda, así como incorporar ventanas de tiempo que se ajusten a los horarios especificados por los clientes. El objetivo principal es atender a los clientes en una sola visita, minimizando la distancia recorrida y, en consecuencia, reduciendo los costos de transporte. El enfoque del algoritmo se centra en una variante del Problema de Rutas de Vehículos (VRP), conocida como el Problema de Rutas de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRPTW), introducida por Pullen y Webb en 1967. Esta variante añade restricciones temporales a la entrega de bienes [7].

El VRPTW presenta varias restricciones: la capacidad de los vehículos, la necesidad de visitar cada cliente una sola vez, y el requisito de iniciar y finalizar el recorrido en un depósito central. Además, se deben considerar las ventanas de tiempo, que definen los intervalos

durante los cuales cada cliente puede recibir su mercancía. La Figura 1 ilustra un esquema de tres rutas en el que los vehículos parten y regresan al depósito, las ventanas de tiempo para cada cliente representadas por los intervalos entre los tiempos de inicio (a) y fin (b) de cada ventana [9].

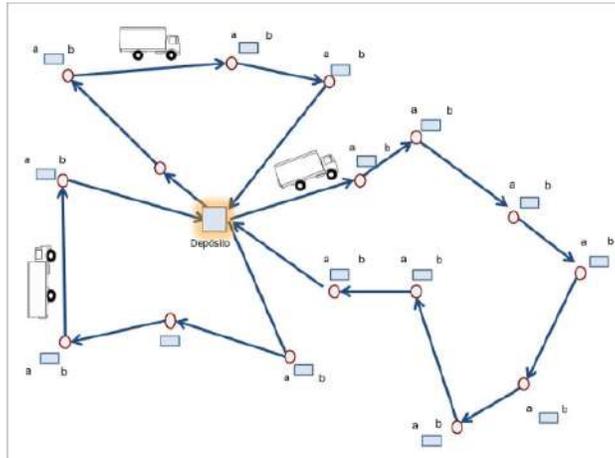


Figura 1. Representación de un problema VRPTW

Problema de ruta de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW)

El VRPTW considera una restricción adicional que consiste en asociar una ventana de tiempo a cada cliente, definiendo un intervalo de tiempo en el que cada cliente debe ser atendido. Al contar con ventanas de tiempo, el costo total de ruteo considera [5]:

- La distancia entre clientes. Se considera una velocidad de los vehículos igual a uno, por lo que el tiempo y la distancia son iguales. Este valor se determina calculando el tiempo que tarda el vehículo en transportarse de un cliente a otro.
- El tiempo de servicio a cada cliente. Es de suma importancia considerar el tiempo en el que se inicia el servicio a un cliente. Siempre debe ser mayor o igual al inicio de su ventana de tiempo y menor o igual al final de la misma. Si un vehículo llega a la ubicación de un cliente antes del inicio de su ventana de tiempo, debe esperar hasta el tiempo inicial para atender a ese cliente [9].
- El tiempo de espera. Si el vehículo llega antes del tiempo de entrada según el intervalo de tiempo asignado por el cliente, se debe de considerar ese tiempo como costo de transporte.

La literatura sobre el problema del VRPTW comienza con enfoques específicos. En [7], se describe un sistema basado en la simulación, diseñado para gestionar los costos asociados a los conductores de furgonetas en entornos con restricciones horarias, donde el principal objetivo era identificar los momentos y lugares donde se producían tiempos muertos. Por otro lado, en el estudio presentado en [10], examina el caso de una empresa de transporte que utilizó una heurística manual para abordar el problema.

En el trabajo presentado en [11], se desarrolló un algoritmo basado en la simulación Monte Carlo [12] para resolver un problema específico relacionado con la distribución de revistas y periódicos para una compañía determinada. Diversos investigadores han dedicado sus esfuerzos al estudio del VRPTW utilizando tanto técnicas exactas como de aproximación. Entre ellas, el trabajo de [13] destaca uno de los métodos exactos más eficientes para abordar el VRPTW, logrando resolver casos de prueba de hasta 100 clientes. No obstante, hasta la fecha, no se ha desarrollado ningún algoritmo capaz de optimizar todos los casos de prueba del VRPTW con 100 clientes o más. Es importante destacar que los métodos exactos muestran mayor eficiencia en situaciones donde el espacio de soluciones está limitado por ventanas de tiempo estrechas, ya que el número de combinaciones de clientes para definir rutas viables es menor [14]. La investigación sobre la optimización combinatoria mediante metaheurísticas ha experimentado un aumento de popularidad, especialmente desde la década de los noventa. Las metaheurísticas, tales como los algoritmos genéticos [14, 15], las estrategias de evolución [16], el recocido simulado [17] y la búsqueda tabú [18], han sido objeto de atención. Entre las técnicas más efectivas para abordar el VRPTW se encuentra el desarrollo de algoritmos híbridos en dos fases, los cuales dividen la búsqueda en dos etapas: la minimización del número de rutas y la reducción de los costos de viaje. Este enfoque en dos fases generalmente implica el diseño de algoritmos que emplean dos procedimientos de búsqueda local distintos. Estos se enfocan primero en la minimización de la distancia de las rutas, seguida de minimización de los costos asociados.

En el trabajo de [16], se introduce una búsqueda híbrida en dos etapas que aborda primero la minimización del número de vehículos utilizando una estrategia de evolución, seguida por la minimización de la distancia mediante una búsqueda tabú. La búsqueda tabú en dos fases se presenta en [19], donde la primera fase se centra en reducir el número total de vehículos al eliminar clientes de las rutas, mientras que la segunda fase se enfoca en intercambios entre clientes para reducir el costo total de la distancia. En [20], se propone una búsqueda híbrida que combina el recocido simulado y la búsqueda tabú. Además, los estudios de [21] y [22] comparan los resultados obtenidos en el VRPTW mediante la aplicación de algoritmos genéticos y búsqueda tabú. Por otro lado, en [14] examinan una aplicación del VRPTW multi-objetivo, donde se minimiza en primer lugar el número de vehículos y después se reduce al mínimo el tiempo total de viaje, logrando este enfoque mediante la adaptación del sistema de colonia de hormigas (ACS) [23].

Entre los artículos más citados en la literatura se destacan los siguientes: “Waste Collection Vehicle Routing Problem with Time Windows” (Problema de ruteo de vehículos de recolección de residuos con ventanas de tiempo) del año 2005 [24], que desarrolla un algoritmo aplicado a la recolección de basura considerando las restricciones de tiempo. Asimismo, “Multi-Objective Genetic Algorithms for Vehicle Routing Problem with Time Windows” (Algoritmos genéticos multiobjetivo para el problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo) del año 2006 [25], presenta una solución al problema de rutas con ventanas de tiempo como un problema multiobjetivo. En esta solución, se abordan dos dimensiones objetivo: el número de vehículos y el costo total (distancia), utilizando la técnica de clasificación de Pareto en un algoritmo genético.

Aplicado en VRPTW

GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedures) es un método desarrollado a finales de la década de 1980 por Feo y Resende [26], diseñado específicamente para abordar problemas de alta complejidad combinatoria. Este enfoque, cuya traducción literal sería “Procedimientos de Búsqueda Ávidos, Aleatorios y Adaptativos” [27], ha demostrado ser efectivo en una amplia gama de aplicaciones.

El método GRASP opera en dos etapas claramente definidas, como se ha documentado en trabajos previos [26, 28]. La primera fase, conocida como fase de construcción, se dedica a generar iterativamente una solución factible mediante la incorporación gradual de clientes. En este proceso, cada cliente se añade a la solución en función de un criterio voraz, que evalúa el beneficio o el costo asociado con su inclusión.

Para llevar a cabo esta tarea, se utiliza una función voraz que crea una Lista Restringida de Candidatos (*LRC*), compuesta por un subconjunto de clientes. Estos clientes son seleccionados aleatoriamente de la *LRC* y añadidos a la solución parcial en curso. Una vez seleccionados, se eliminan de la lista, para después actualizar la *LRC* antes de calcular el costo total de la solución parcial. Este proceso iterativo se repite hasta que todos los clientes hayan sido incluidos. La composición de la *LRC* se determina mediante (1), donde *LC* representa el número total de clientes y α es un parámetro que varía entre 0 y 1. Este parámetro controla el grado de aleatoriedad en la selección de los clientes a agregar a la solución. Un valor de $\alpha=0$ indica un enfoque completamente voraz, mientras que $\alpha=1$ refleja un enfoque completamente aleatorio. En general, α permite equilibrar el tiempo de computación con la efectividad de las soluciones obtenidas: cuanto más voraz sea la fase de construcción, mayor será el tiempo de ejecución [28].

$$LRC = LC * \alpha \quad (1)$$

La segunda fase del método se enfoca en mejorar la solución generada durante la etapa de construcción. Para este propósito, es común emplear algoritmos de búsqueda en vecindarios. Esta fase se lleva a cabo de manera iterativa, sustituyendo sucesivamente la solución actual por otras soluciones que se encuentren en su vecindario. Después de ejecutar ambas etapas, se almacena la solución obtenida y se procede a realizar una nueva iteración del algoritmo, conservando la mejor solución encontrada hasta el momento. Consultar el Algoritmo 1.

Algoritmo 1. Forma general del algoritmo GRASP

D= caso de prueba, α =condición de parada;
mientras (no se cumpla la condición de parada) **hacer**
 | S = Algoritmo constructivo (D);
 | S = Búsqueda local (S);
 | Registrar mejor solución (S, MS);
 | Regresar la mejor solución (MS);
Fin GRASP;
D=datos de entrada, S= solución, MS= mejor solución

Lim y Wang [29] utilizan el método GRASP para generar soluciones heurísticas mediante la creación de múltiples soluciones en cada iteración. Para ello, emplean cuatro enfoques distintos: (1) inician seleccionando aleatoriamente un vértice, generando la primera ruta, van insertando clientes que cumplan con las restricciones de tiempo hasta que no sea posible agregar más a esa ruta. (2) Comienzan con el cliente más cercano al depósito y construyen una ruta para cada vehículo, añadiendo sucesivamente el cliente que cumpla con las restricciones de tiempo y distancia menor al último cliente de la ruta, repitiendo este proceso hasta que no sea posible agregar más clientes a la ruta en construcción. (3) Utilizan otro procedimiento de ordenación basado en los clientes con menor tiempo de espera para recibir el servicio, y construyen ruta por ruta. (4) Empiezan la siguiente ruta con el cliente más lejano y continúan agregando a los vértices necesarios, hasta completar la ruta.

Zhiye Li [30] amplía el enfoque GRASP al introducir seis formas de inicializar soluciones, siendo las primeras cuatro similares a las de Lim y Wang [29]. Las dos últimas utilizan métodos aleatorios, incluyendo la selección de clientes al azar y la construcción aleatoria de rutas, bloqueando estas últimas cuando no es posible insertar más clientes. Además, en cada iteración, se modifica el método GRASP al reutilizar la solución de la iteración anterior como entrada para la construcción aleatoria en la iteración actual.

Yong Mao [31], utiliza del GRASP la parte voraz con la finalidad de construir soluciones a las cuales después les aplica un método genético y finalmente el método PSO (Optimización de enjambre de partículas).

La Tabla I presenta un resumen de las investigaciones identificadas en la literatura que abordan el problema del VRPTW utilizando el algoritmo GRASP, detallando el nombre del artículo, el método utilizado y la diferencia donde se destacan las distinciones en la metodología utilizada por cada artículo en comparación con el algoritmo aplicado en esta investigación. En la Tabla I se hace referencia en algunas investigaciones al método de Solomon [32], el cual se basa en la construcción secuencial de soluciones, es decir, una ruta a la vez. Este método comienza por dividir los vértices en dos listas: una que contiene los clientes más distantes del depósito y otra con los restantes. La ruta inicial se forma seleccionando un cliente de la lista de los más alejados, quien encabeza la primera ruta. Después, se procede a recorrer la otra lista, insertando clientes en la ruta siempre que cumplan con las restricciones de las ventanas de tiempo, minimicen la distancia y requieran el servicio más temprano. Una vez que no sea posible insertar más clientes en la ruta, se selecciona otro cliente de la lista de los más alejados del depósito, y así sucesivamente, hasta que ambas listas estén vacías.

Tras investigar los desafíos resueltos por el VRPTW mediante GRASP, este estudio destaca sus contribuciones: (1) se introduce un algoritmo original que fusiona diversas estrategias de ordenamiento en la fase de construcción de soluciones. (2) Además, se aplican tres métodos de mejora específicos para abordar el VRPTW bajo la metodología GRASP. (3) Se realiza una calibración detallada de los parámetros iniciales para la construcción de soluciones.

A diferencia de trabajos anteriores que emplean una lista de candidatos estática de tres clientes [33, 34], este estudio ajusta dinámicamente la lista de candidatos en función del valor de α .

Tabla 1
Resumen de investigaciones que utilizan el algoritmo GRASP

Nombre del Artículo	Método	Diferencia
A GRASP for VRPTW, [33].	GRASP	La fase de construcción la realiza determinando el mínimo de rutas necesarias, después inserta los clientes de acuerdo al método de Solomon [32], y aplica el método 2 opts.
Grasp with a new local search scheme for VRPTW, [34].	GRASP	Determina rutas e inserta clientes de acuerdo a la distancia máxima al depósito y al cliente que requiera servicio más temprano, en la búsqueda local elimina rutas sobrantes y aplica la heurística 2 opts.
A Smoothed Dynamic Tabu Search Embedded GRASP for m-VRPTW, [29].	GRASP/ TABU	Crea diferentes parámetros de inicialización, y una vez que tiene la mejor solución vuelve a considerarla como base para construir nuevamente otra ruta. En la búsqueda local se utilizan varias consideraciones.

Improved GRASP with Tabu Search for VRP with Both TW and Limited Number of Vehicles, [30].	GRASP	La fase de construcción la realiza con diferentes formas de inicializar las ruta y en búsqueda local elimina un ruta y acomoda los clientes en otra.
A Reactive Greedy Randomized Variable Neighborhood Tabu Search for the VRPTW [35].	GRASP/TABU	Utiliza un esquema de construcción de solución de inserción paralela junto con una función codiciosa basada en penalidades que combina de manera ponderada un conjunto de criterios, la búsqueda local aplica el VNS y búsqueda Tabú.
A GRASP VNS Hybrid for the Fuzzy VRPTW, [36].	GRASP VNS	No especifica como construyó la solución en la primera fase del GRASP, en la búsqueda local utiliza VNS.
Solving VRPTW with Hybrid Evolutionary Algorithm, [31].	Algoritmo Genético y GRASP	Construye la ruta con el método GRASP, se escogen las mejores soluciones para aplicar el PSO, seleccionando dos padres y aplicar algoritmo genético.
A GRASP \times ILS for the VRPTW, synchronization and precedence constraints, [37].	GRASP	Construye rutas simultáneamente, priorizando clientes con tiempo. La búsqueda local ajusta la distribución de clientes y realiza intercambios para minimizar la distancia total.
An ACO hybrid metaheuristic for close - open VRPTW and fuzzy constraints, [38].	ACO, GRASP VNS	Construye la solución de forma aleatoria y siguiendo la técnica ACO y en búsqueda local aplica la técnica del VNS.
A hybrid GRASP-VNS for ship routing and scheduling problem with discretized time windows, [39].	GRASP VNS	Se construye una solución realizando una ruta a la vez, con el objetivo de disminuir la flota de buques y la distancia, en la búsqueda local se aplica el VNS, en 3 fases , realiza el movimiento, evalúa la F.O. y después se hace el cambio.
VRPTW and multiple service workers: a systematic comparison between ACO and GRASP, [40].	ACO GRASP	Utiliza es la técnica de Solomon y la búsqueda local determinista que consiste en reubicar y cambiar los clientes.

Se enfatiza la importancia de la selección de parámetros en los algoritmos metaheurísticos, ya que el teorema de optimización No Free Lunch (NFL) [41] establece que no existe un conjunto óptimo de parámetros para todos los problemas de optimización. Por lo tanto, se requiere una estrategia rigurosa y adaptativa en el diseño de parámetros para garantizar una calibración precisa y eficiente [42].

Modelo Matemático

El modelo matemático que define el VRPTW se describe a continuación [5]: se define para una flota homogénea de vehículos K , un conjunto de clientes V y un grafo orientado G . El gra-

fo contiene $|V+2|$ vértices o clientes, que corresponden a $V= 1,2,3,4,\dots,n$, y el almacén está representado por dos nodos 0 y $n+1$. Al conjunto de todos los nodos se le denomina N . El conjunto de los arcos A , representa las posibles conexiones entre los nodos, todas las rutas empiezan en 0 y terminan en $n+1$. Cada arco $i, j, \in A, i \neq j$ de la red, tiene un costo asociado C_{ij} y una duración de viaje t_{ij} [5, 27]. El tiempo t_{ij} incluye el tiempo de servicio del cliente i . Cada vehículo tiene una capacidad de carga Q , a cada cliente se le asocia una demanda $d_i, i \in V$ [5, 27].

Para cada uno de los clientes, el inicio de servicio debe realizarse en el intervalo de tiempo definido por el cliente llamado ventana de tiempo $[a_i, b_i], i \in V$. Se especifica que, si un vehículo llega demasiado temprano a la cita con el cliente, deberá esperar a que sea el inicio de la ventana temporal a_i . Los vehículos deberán de llegar antes del cierre del tiempo de la ventana, b_i . Se asume que todos los datos $(Q, d_i, C_{ij}, t_{ij}, a_i, b_i)$ son números enteros conocidos y no negativos [5, 27]. Se debe asignar a cada cliente un vehículo y una secuencia de clientes para cada vehículo de tal forma que sea mínimo el costo de transporte, todo ello sujeto a las restricciones definidas anteriormente [5, 27].

El modelo matemático tiene dos variables de decisión, X y T [27], para cada arco (i,j) , donde $i \neq j, j \neq n+1, j \neq 0$, y para cada vehículo k se define X_{ij} como:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si el vehículo } k \text{ viaja directamente desde } i \text{ a } j \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

La variable de decisión T_{ij} se define para cada nodo i y para cada vehículo k e indica el momento en que empieza el servicio.

En caso de que no exista el servicio, la variable no tiene significado. Se asume que $T_{0k} = 0 \forall k$, y, $T_{n+1,k}$ denota la llegada del vehículo k a la base. El objetivo consiste en minimizar el costo de transporte (distancia), diseñando un conjunto de rutas, una para cada vehículo, de tal forma que se cumpla con lo siguiente: el cliente sea atendido una sola vez, cada ruta empiece y termine en el depósito, se respeten las demandas, capacidad de los vehículos y ventanas temporales, de tal forma que el modelo matemático se define como [5]:

Minimizar:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} C_{ij} X_{ijk} \quad (2)$$

Identifique a los patrocinadores aquí. En caso de no existir, elimine este cuadro de texto. (patrocinadores).

sujeto a:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} X_{ij} = 1 \quad \forall_i \in V \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V} d_i \sum_{j \in N} X_{ijk} \leq Q \quad \forall_k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N} X_{ojk} = 1 \quad \forall_k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N} X_{ihk} - \sum_{j \in N} X_{jhk} = 0 \quad \forall_h \in V, \forall_k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N} X_{i,n+1,k} = 1 \quad \forall_k \in K \quad (7)$$

$$X_{ij}(T_{ik} + t_{ij} - T_{jk}) \leq 0 \quad \forall_{ij} \in N, \forall_k \in K \quad (8)$$

$$a_i \leq T_{ik} \leq b_i \quad \forall_{ij} \in N, \forall_k \in K \quad (9)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall_{ij} \in N, \forall_k \in K \quad (11)$$

La función objetivo (2), indica que el costo total del recorrido deberá ser mínimo. La restricción (3), asegura que cada cliente sea visitado solo una vez por un vehículo. Por su parte con la restricción (4) se asegura que cada vehículo no excede su capacidad. El conjunto de restricciones (5,6,y 7) son ecuaciones que van a garantizar que el vehículo inicia en el nodo 0 una sola vez, abandona cualquier nodo i , $i \in V$, si y sólo si se ha entrado antes a él, finalizando en el nodo $n+1$. Con la restricción (8) se asegura que el vehículo k no puede llegar al cliente j antes que T_{ij} cuando se viaja de i a j . La restricción (9) asegura que la ventana de tiempo sea cumplida, es decir que el vehículo no llegue antes de a_i , ni después de b_i , y la condición (11) garantiza que las variables X_{ijk} son enteras

Metodología

La metaheurística GRASP fue seleccionada como una estrategia para obtener soluciones iniciales diversas y cercanas al óptimo por su capacidad de exploración. En su etapa de construcción, GRASP genera múltiples alternativas, lo que resulta ventajoso en problemas de rutas de vehículos, donde pueden ocurrir eventos inesperados, y evitar estancarse en

óptimos locales. Además, GRASP destaca por su competitividad en comparación con otras metaheurísticas, ya que solo requiere ajustar dos parámetros: el tamaño de la lista de candidatos y el criterio de parada. Esto, junto con la efectividad de las soluciones obtenidas y la baja complejidad de implementación, hace de GRASP una opción atractiva para problemas de optimización [43].

Construcción de Soluciones

En términos generales, el algoritmo GRASP aplicado al VRPTW (G-VRPTW) construye soluciones de manera simultánea, es decir, genera varias rutas a la vez. Se conecta el primer cliente seleccionado al depósito. A partir del segundo cliente seleccionado de la Lista Restringida de Candidatos (*LRC*), se evalúa la posibilidad de añadirlo al final de las rutas ya construidas, esto es si cumple con las restricciones de capacidad de carga de los vehículos y la de ventanas de tiempo se añade a un subconjunto de rutas de interés. Se realiza una evaluación del subconjunto de sub-rutas en función del tiempo. Se calcula el tiempo acumulado hasta llegar al último cliente de cada ruta, sumado al tiempo necesario para recorrer la distancia desde ese cliente hasta el cliente seleccionado, considerando el tiempo que se tarda en atender al cliente visitado. Esta suma debe ser menor o igual al tiempo de la ventana de salida del cliente seleccionado. Si al agregar este último cliente a las rutas disponibles no se cumplen estas condiciones, se crea una nueva sub-ruta conectando el cliente seleccionado al depósito.

El cliente seleccionado se inserta al final de la sub-ruta que haya cumplido con todas las restricciones previas y que ofrezca el menor tiempo de recorrido desde el último cliente de la ruta hasta el cliente seleccionado. Es importante tener en cuenta que, si el vehículo llega antes del inicio de la ventana de servicio del cliente, debe esperar. Este proceso se repite hasta que se agote la Lista Restringida de Candidatos (*LRC*), y la solución final será aquella que ofrezca el menor tiempo total de recorrido.

Mejora de Soluciones – Búsqueda Local

El algoritmo G-VRPTW implementa diversas estrategias de búsqueda local. Primero, examina las sub-rutas que constan de un solo cliente y considera la posibilidad de insertarlos en otras rutas existentes. Segundo, evalúa si reubicar un cliente al final de su sub-ruta actual mejoraría la solución. Tercero, analiza la viabilidad de eliminar una sub-ruta completa al redistribuir a sus clientes en otras sub-rutas. Antes de realizar estos ajustes, se verifica si cumplen con las restricciones del VRPTW y, al mismo tiempo, minimicen la distancia total recorrida en la sub-ruta.

Casos de Prueba

Los casos de prueba son conjuntos de datos empleados para evaluar los resultados obtenidos al aplicar métodos de optimización, y se utilizan frecuentemente en el ámbito científico para comparar resultados propios con aquellos obtenidos en la literatura. Estos casos de prueba están vinculados a las características específicas de los problemas y se emplean en la formulación de modelos específicos. El conjunto de casos propuesto por Solomon [44] representan un recurso valioso y un punto de referencia importante en la validación de técnicas heurísticas para el VRPTW. Como se ilustra en la Tabla I, los casos de prueba de Solomon [44] son las más comúnmente utilizadas para comparar la eficacia de los algoritmos aplicados al VRPTW. En [44], se presentan las soluciones del VRPTW más destacadas hasta la fecha.

El banco de pruebas comprende 168 casos distribuidos entre 25, 50 y 100 clientes, cada uno asociado con diferentes capacidades de carga de los vehículos y notaciones. Las capacidades de 200 se identifican como C1(19), R1(12) y RC1(8), las de 700 como C2(8), y las de 1000 como R2(11) y RC2(8). La cantidad entre paréntesis indica el número de casos de prueba en cada grupo. Estos casos difieren en el ancho de las ventanas de tiempo, algunas con ventanas estrechas (1) y otras con ventanas amplias (2). Además, varían en la ubicación de los clientes según sus coordenadas y en la densidad de las ventanas de tiempo, que indica el porcentaje de clientes que no comienzan en el depósito. En los casos de prueba de tipo R1 y R2, las coordenadas geográficas se generan aleatoriamente (Random). Los grupos C1 y C2 (Clúster) presentan problemas donde los clientes están agrupados por zonas o clústeres. Por otro lado, los grupos RC1 y RC2 (Random-Clúster) representan problemas de semi-clúster, una combinación de los dos anteriores.

En un caso de prueba pueden existir clientes cuyo inicio de ventana tiene valor cero. El conjunto de clientes que tienen inicio de ventana de tiempo diferente de cero, son clientes que poseen corto horizonte de tiempo para programarlos en una ruta parcial. Para un caso de prueba de 100 clientes con densidad de ventana del 25 %, significa que existe un conjunto de 25 clientes con inicio de ventana diferente de cero. Para los casos de prueba de largo horizonte existe densidad de ventana baja de 25 y 50 %. Para la mayoría de los casos de prueba de corto horizonte de programación, las densidades de ventana son del orden del 75 % y 100 %. Los casos de prueba del conjunto de problemas 1 (R1, C1 y RC1) tienen un horizonte de programación corto, mientras que las del conjunto de problemas 2 (R2, C2, RC2) tienen un horizonte de programación largo, lo que significa que muchos clientes pueden ser atendidos por un solo vehículo (hasta 30 clientes), generando menos rutas en comparación con el conjunto de problemas 1 (entre 5 y 10 clientes por ruta).

Evaluación de Efectividad de las Soluciones

El porcentaje Gap (% Gap) es la métrica utilizada para medir la efectividad de las soluciones en este trabajo, se calcula con (12), y se define como la variación porcentual de la solución encontrada por el algoritmo Sol_{alg} a una de las siguientes soluciones: (a) solución inferior (entre más alto él % Gap, la solución es considera inferior), (b) solución óptima, y (c) solución mejor conocida, como se describe en la Figura 2. En este trabajo la efectividad de las soluciones se mide con respecto a la solución mejor conocida Sol_{MC} [17, 45].

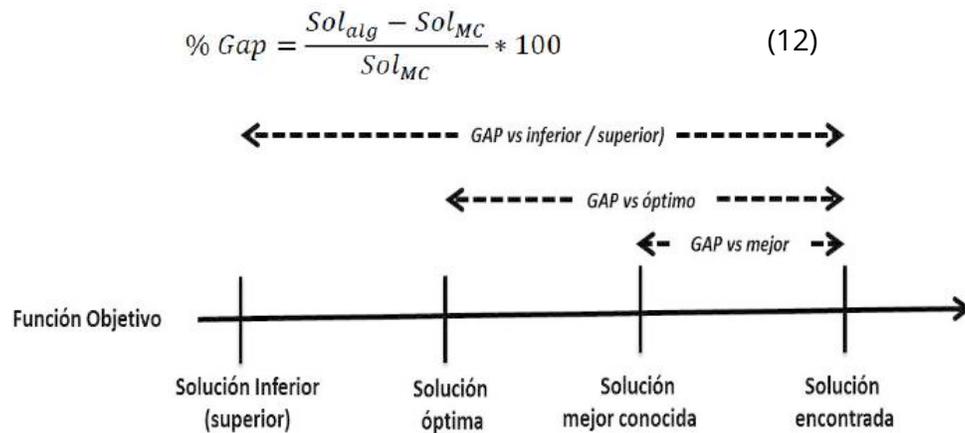


Figura 2. Evaluación del desempeño respecto a la efectividad de la solución en un problema de minimización

Calibración del Algoritmo G-VRPTW

La calibración del G-VRPTW se realizó con el enfoque de Diseño de Experimentos Taguchi (DOE Taguchi) [46], ya que el número de experimentos puede ser significativamente reducido, y por lo tanto, el tiempo y los costos causados por múltiples experimentos también se reducen [47]. Se calibraron los parámetros de ordenamiento, α , y el número de iteraciones, se seleccionó un arreglo ortogonal L934-2 de los propuestos por Taguchi que permite estudiar máximo cuatro factores a tres niveles cada uno. Los factores y niveles utilizados se pueden observar en la Tabla 2.

Tabla 2
Factores y Niveles Utilizados

Factor	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Ordenamiento	α de menor a mayor	Cliente más cercano al depósito al más alejado	Mixto (considerando nivel 1 y 2)

α	Variable	0.90	3 clientes
Iteraciones	50,000	100,000	150,000

Para el ajuste de parámetros, se consideró el 20 % de los casos de prueba seleccionados aleatoriamente, realizando 10 réplicas. Finalmente, al resolver el DOE Taguchi sugiere que los parámetros sean establecidos como se muestra en la Tabla III, para obtener valores menores del % Gap [48].

Tabla 3
Parámetros G-VRPTW

Factor	Nivel
Ordenamiento	Mixto
α	0.90
Iteraciones	50,000

El ordenamiento se refiere a la forma de organizar la lista de candidatos en la fase de construcción de las rutas. El nivel mixto consiste en una combinación de dos formas de ordenar: el 20 % de los clientes son ordenados de menor a mayor distancia respecto al depósito, esto es, las rutas se construyen considerando la distancia entre los clientes. Después, el 60 % se ordena según su tiempo de inicio de atención, esto es, ordenados de menor a mayor con respecto a a_i . El 20 % restante nuevamente se ordena con respecto a la distancia, esto se hace con el fin de iniciar y terminar la construcción de las rutas con los clientes más cercanos al depósito y, en la fase intermedia de la construcción de las rutas, ir considerando a los clientes que solicitan el servicio más temprano.

El parámetro α , determina qué tan voraz es la metaheurística G-VRPTW; el valor de α introduce variabilidad al momento de seleccionar aleatoriamente al cliente, ya que una LRC mayor ayudará al proceso a evitar caer en óptimos locales. Finalmente, el parámetro de iteraciones indica el número de veces que iterar el algoritmo buscando mejorar la solución guardada en memoria.

Resultados y discusiones

La modelación y programación del algoritmo G-VRPTW se llevó a cabo en C++, y se ejecutó utilizando una computadora personal con Intel Core i7-5500 CPU a 2.4 GHz, 8 GB. La efectivi-

dad de la solución se mide en términos de la distancia mínima de la ruta, es decir, la distancia recorrida por un vehículo al visitar todos los clientes, partiendo y regresando al depósito. En el presente trabajo, se consideró que una unidad de distancia recorrida equivale a una unidad de tiempo.

El % Gap obtenido es el promedio de las 10 réplicas realizadas por cada uno de los casos de prueba. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla IV, donde se puede observar el caso de prueba, el valor óptimo conocido, el valor promedio obtenido del total de la distancia en este trabajo y el % Gap.

Tabla 4
Resultados G-VRPTW Contra el Óptimo Conocido

25 CLIENTES			
Casos de prueba	Óptimo [44]	Promedio	% Gap
C1-25	190.50	190.98	0.25
C2-25	214.45	216.53	0.97
R1-25	481.65	489.69	1.67
R2-25	384.67	395.33	2.77
RC1-25	359.25	356.91	-0.65
RC2-25	319.27	317.09	-0.68
PROMEDIO	324.96	327.75	0.86
50 CLIENTES			
C1-50	361.60	399.38	10.45
C2-50	357.50	411.94	15.23
R1-50	796.86	882.12	10.70
R2-50	654.10	770.00	17.72
RC1-50	731.32	779.70	9.35
RC2-50	608.75	737.50	21.15
PROMEDIO	585.02	663.44	13.40
100 CLIENTES			

C1-100	826.62	1440.13	74.22
C2-100	588.00	1005.95	71.08
R1-100	1266.43	1528.45	20.69
R2-100	965.88	1304.90	35.10
RC1-100	1396.45	1734.39	24.20
RC2-100	1119.23	1429.70	37.74
PROMEDIO	1027.10	1407.25	37.01

En la Tabla IV se puede apreciar que, en los casos de prueba de 25 clientes, se ha logrado un Gap promedio del 0.86 %, destacando que en dos grupos de casos se ha mejorado la solución reportada en la literatura; tal es el caso de los casos RC1 y RC2, que, de acuerdo a las características de los casos de prueba el algoritmo G-VRPTW favorece aquellas que su distribución geográfica es mixta (RC). Los resultados en los casos de 50 clientes reflejan valores variables, en un rango entre 9.35 a 21.15 de % Gap, favoreciendo los casos de prueba con ventanas estrechas y de horizonte de programación corto. En los resultados reflejados en los casos de 100 clientes, se observa que la mayoría están alejados de la mejor solución conocida en la literatura revisada.

Una vez analizados los resultados obtenidos, se tomó la decisión de ejecutar nuevamente los experimentos considerando un mayor número de iteraciones, ya que de acuerdo con [49-52] a medida que se aumenta el número de ejecuciones del algoritmo se asegura un punto de convergencia. Sin embargo, se debe de considerar el tiempo de cómputo utilizado. Al realizar el experimento se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla V. El número de iteraciones consideradas fue de 300,000 (300 K).

Tabla 5
Resultados G-VRPTW Comparados con el Óptimo Conocido (300 K)

Clientes	Óptimo	Promedio	% Gap	CPU (seg.)
25	324.96	324.76	-0.06	18.75
50	585.02	648.49	10.85	26.45
100	1027.10	1344.26	30.88	30.89

Se puede observar que, a medida que se aumentan las iteraciones, los valores tienden a disminuir. Sin embargo, es necesario realizar una prueba de sensibilidad para determinar el número ideal de iteraciones o el tiempo óptimo necesario para obtener un resultado más

cercano al mejor conocido, especialmente en los casos de prueba de 100 clientes.

Comparación con otras investigaciones

El artículo [53] presenta los resultados de seis casos de prueba con 25 clientes y tres casos con 100 clientes, utilizando un algoritmo memético que incorpora una heurística evolutiva para definir el cruzamiento y la mutación entre subrutinas. En la Tabla VI se compara el rendimiento del método G-VRPTW con respecto a las soluciones obtenidas en términos de distancia, (Dist.) y tiempo computacional en segundos (t seg), contra los resultados reportados en [53], demostrando un rendimiento superior el método G-VRPTW ya que en todos los casos reportados se muestra un valor menor de Dist.

Los casos de prueba con 25 y 50 clientes se comparan con los trabajos de [45] y [54]. En la Tabla VII se presenta un promedio de los casos de prueba por grupo, incluyendo el número de vehículos (V) y la distancia (Dist.). En [54], se resolvieron los casos de prueba de Solomon utilizando métodos exactos basados en generación de columnas, mientras que en [45] se empleó la metaheurística de búsqueda Tabú para resolver el VRPTW. Al comparar con G-VRPTW, se observa que solo en el grupo RC1 de 25 clientes se lograron mejores resultados de distancia que los presentados por [54], y en cinco grupos de casos se obtuvieron resultados por debajo de los reportados por [45]. Sin embargo, dado que la función objetivo de G-VRPTW no considera la minimización del número de vehículos, en promedio se observa un vehículo más en la Tabla VII en comparación con los resultados reportados por [45, 54].

Se compararon los casos de prueba de 100 clientes con los trabajos de Kontoravdis [33] y Chaovaritwongse [34]. Ambos construyen soluciones restringiendo el número de rutas e insertan clientes de acuerdo con la distancia máxima del cliente al depósito y al cliente que requiera el servicio más temprano.

Tabla 6
Comparación de Resultados G-VRPTW y un Algoritmo Memético [53]

Caso de prueba	[53]		G-VRPTW	
	Dist.	t(seg.)	Dist.	t(seg.)
C104-25	190.1	42.2	188.4	18.3
Vehículos	3		4	
R104-25	470.2	47.8	417.9	21.47
Vehículos	5		5	
RC108-25	304.8	49.9	290.4	20.06
Vehículos	5		4	

C204-25	288.83	47.9	215.55	18.86
Vehículos	2		3	
R208-25	331.3	49.1	329.9	20.44
Vehículos	2		2	
RC208-25	288.5	52.9	269.5	5.68
Vehículos	2		2	
C104-100	1381.2	NR	1172.6	246.5
Vehículos	12		12	
R104-100	1414.10	NR	1232.9	283.66
Vehículos	14		14	
RC108-100	1851.3	NR	1420.7	88.52
Vehículos	12		15	

NR = No resultados

Tabla 7
G-VRPTW contra otras Investigaciones
(25 y 50 clientes)

Caso de prueba	[54]		[45]		G-VRPTW	
	V	Dist.	V	Dist.	V	Dist.
R1-25	5.0	463.36	4.0	470.17	5.0	471.63
R1-50	7.0	765.64	7.0	797.01	9.0	866.95
R2-25	2.0	382.14	1.0	430.77	3.0	393.12
R2-50	4.0	607.97	2.0	680.48	4.0	662.60
C1-25	3.0	190.58	3.0	191.08	4.0	191.17
C1-50	5.0	361.68	4.0	362.52	6.0	385.47
C2-25	1.0	214.45	1.0	246.36	3.0	215.34
C2-50	2.0	357.50	2.0	403.14	3.0	403.40
RC1-25	3.0	350.19	3.0	351.09	4.0	339.97
RC1-50	6.0	730.32	6.0	732.00	8.0	776.19
RC2-25	3.0	306.47	3.0	403.16	3.0	315.90
RC2-25	5.0	564.77	5.0	585.24	4.0	675.15

NR = No resultados

En la búsqueda local, eliminan rutas sobrantes y aplican la heurística 2-OPT propuesta por [55]. En el estudio de [56], se emplearon todos los casos de prueba de 100 clientes [32], cada uno ejecutado 250 veces con 250 iteraciones. Por otro lado, en [26], se utilizan una o dos casos de prueba de cada grupo de 100 clientes, llevando a cabo cinco ejecuciones con 50 iteraciones cada una.

Repoussis, en su estudio [35], emplea un enfoque de construcción de soluciones para GRASP que utiliza la inserción en paralelo con una función codiciosa basada en penalizaciones. En la búsqueda local, aplica la técnica VNS propuesta por [57], que explora vecindarios cada vez más distantes para mejorar la solución actual. Posteriormente, después de obtener soluciones con GRASP, utiliza la metaheurística de búsqueda Tabú [27], conocida por su memoria flexible de búsqueda, que modifica y expande el espacio de búsqueda. En el estudio [31], las rutas se forman utilizando el enfoque voraz del método GRASP. Posteriormente, se seleccionan las soluciones óptimas para aplicar el algoritmo de optimización basado en enjambres de partículas (PSO), el cual se inspira en el movimiento coordinado de organismos vivos, como bandadas de aves o bancos de peces.

La Tabla VIII presenta los resultados del conjunto de casos de prueba, incluyendo el tiempo computacional en segundos (CPU) y el número de vehículos (V). Se observa que, en comparación con el G-VRPTW, el algoritmo no ofrece un rendimiento óptimo para los casos de prueba con 100 clientes. Sin embargo, destaca que en los casos R1 y RC1, los resultados en distancia superan a los obtenidos por [29].

Conclusiones

Se realizó la programación y ejecución del algoritmo GRASP en C++ para resolver el problema VRPTW, y se compararon los resultados con los mejores encontrados en la literatura y con diversas investigaciones que también utilizaron GRASP, como se muestra en las Tablas VII y VIII. Se aclara que, para una comparación equitativa con estos estudios, el G-VRPTW debería incluir la función objetivo de minimizar el número de vehículos. Además, es necesario explorar el criterio de parada y considerar la introducción de una heurística adicional que pueda mejorar los resultados en los casos de prueba de 100 clientes.

Tabla 8
G-VRPTW contra otras Investigaciones
(100 clientes)

Caso de Prueba	[34]	[33]	[35]	[31]	G_VRPTW
R1	1325.4	1603.0	1220.9	1192.10	1512.6
CPU	73.1	NR	NR	NR	181.39
V	12	18	NR	13	17
R2	1164.2	1268.5	974.4	821.3	1330.7
CPU	115.6	NR	NR	NR	158.15
V	3	4	NR	4	6
C1	827.3	885	828.38	833.3	1278.4
CPU	72.5	NR	NR	NR	151.62
V	10	10	NR	10	14
C2	589.6	598	589.86	666.2	972.5
CPU	127.5	NR	NR	NR	131.16
V	3	3	NR	3	5
RC1	1500.9	1721	1396.6	1354.6	1712.8
CPU	9	NR	NR	NR	177.7
V	12	15	NR	10	17
RC2	141.2	NR	1160.9	1014.6	1546
CPU	13.51	NR	NR	NR	151.57
V	3	NR		6	7

NR = No resultados

Llevar el G-VRPTW a aplicaciones prácticas es un área futura a considerar. Esto implica usar datos de una empresa que requiera satisfacer a sus clientes dentro un horario establecido y aplicar el algoritmo a un software comercial dirigido a las pequeñas y medianas empresas.

En esta primera exploración, se puede concluir que el G-VRPTW es un algoritmo capaz de proporcionar soluciones efectivas para casos de prueba de hasta 50 clientes como se observa en la Tabla V donde se logra superar en promedio los resultados mejor conocido de los 25 clientes y se obtiene un Gap de 10 % en los casos de 50 clientes. Además, el algoritmo introducido en esta investigación supera algunos de los resultados presentados por diversas investigaciones. No obstante, es necesario continuar explorando para encontrar soluciones de mayor precisión.

Referencias

- [1] D. M. M. Bovet and W. Bob, "Camino sin obstáculos," *GestiónVol*, vol. 5, pp. 70-74, 2000.
- [2] G. B. Dantzig and J. H. Ramser, "The truck dispatching problem," *Management science*, vol. 6, no. 1, pp. 80-91, 1959.
- [3] W. Garvin, H. Crandall, J. John, and R. Spellman, "Applications of linear programming in the oil industry," *Management science*, vol. 3, no. 4, pp. 407-430, 1957.
- [4] M. L. Balinski and R. E. Quandt, "On an integer program for a delivery problem," *Operations research*, vol. 12, no. 2, pp. 300-304, 1964.
- [5] P. Toth and D. Vigo, *Vehicle routing: problems, methods, and applications*. SIAM, 2014.
- [6] M. M. Flood, "The traveling-salesman problem," *Operations research*, vol. 4, no. 1, pp. 61-75, 1956.
- [7] H. Pullen and M. Webb, "A computer application to a transport scheduling problem," *The computer journal*, vol. 10, no. 1, pp. 10-13, 1967.
- [8] S. N. Parragh, K. F. Doerner, and R. F. Hartl, "A survey on pickup and delivery problems: Part I: Transportation between customers and depot," *Journal für Betriebswirtschaft*, vol. 58, pp. 21-51, 2008.
- [9] O. Bräysy and M. Gendreau, "Vehicle routing problem with time windows, Part I: Route construction and local search algorithms," *Transportation science*, vol. 39, no. 1, pp. 104-118, 2005.
- [10] K. Knight and J. Hofer, "Vehicle scheduling with timed and connected calls: A case

- study," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 19, no. 3, pp. 299-310, 1968.
- [11] O. B. Madsen, "Variable splitting and vehicle routing problems with time windows," *Preprint IB/1988. IMSOR, The Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark*, 1988.
- [12] N. Metropolis and S. Ulam, "The monte carlo method," *Journal of the American statistical association*, vol. 44, no. 247, pp. 335-341, 1949.
- [13] N. Kohl, "Exact methods for time constrained routing and related scheduling problems," 1995.
- [14] L. M. Gambardella, É. Taillard, and G. Agazzi, "MACS-VRPTW: A multiple ant colony system for vehicle routing problems with time windows," ed: Istituto Dalle Molle Di Studi Sull Intelligenza Artificiale, 1999.
- [15] T. K. Chen, L. L. Hay, and O. Ke, "Hybrid genetic algorithms in solving vehicle routing problems with time window constraints," *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, vol. 18, no. 1, p. 121, 2001.
- [16] J. Homberger and H. Gehring, "Two evolutionary metaheuristics for the vehicle routing problem with time windows," *INFOR: Information Systems and Operational Research*, vol. 37, no. 3, pp. 297-318, 1999.
- [17] W.-C. Chiang and R. A. Russell, "Simulated annealing metaheuristics for the vehicle routing problem with time windows," *Annals of Operations Research*, vol. 63, pp. 3-27, 1996.
- [18] Y. Rochat and É. D. Taillard, "Probabilistic diversification and intensification in local search for vehicle routing," *Journal of heuristics*, vol. 1, pp. 147-167, 1995.
- [19] J.-Y. Potvin and J.-M. Rousseau, "A parallel route building algorithm for the vehicle routing and scheduling problem with time windows," *European Journal of Operational Research*, vol. 66, no. 3, pp. 331-340, 1993.
- [20] R. A. Russell, "Hybrid heuristics for the vehicle routing problem with time windows," *Transportation science*, vol. 29, no. 2, pp. 156-166, 1995.
- [21] S. R. Thangiah, "A hybrid genetic algorithm, simulated annealing and tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows," in *Practical handbook of genetic algorithms*: CRC Press, 2019, pp. 347-384.

- [22] K. C. Tan, L. H. Lee, Q. Zhu, and K. Ou, "Heuristic methods for vehicle routing problem with time windows," *Artificial intelligence in Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 281-295, 2001.
- [23] M. Dorigo and L. M. Gambardella, "Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem," *IEEE Transactions on evolutionary computation*, vol. 1, no. 1, pp. 53-66, 1997.
- [24] B.-I. Kim, S. Kim, and S. Sahoo, "Waste collection vehicle routing problem with time windows," *Computers & Operations Research*, vol. 33, no. 12, pp. 3624-3642, 2006.
- [25] B. Ombuki, B. J. Ross, and F. Hanshar, "Multi-objective genetic algorithms for vehicle routing problem with time windows," *Applied Intelligence*, vol. 24, pp. 17-30, 2006.
- [26] T. A. Feo and M. G. Resende, "Greedy randomized adaptive search procedures," *Journal of global optimization*, vol. 6, pp. 109-133, 1995.
- [27] V. Yepes Piqueras, "Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW," Universitat Politècnica de València, 2008.
- [28] M. G. Resende and C. C. Ribeiro, "Greedy randomized adaptive search procedures: Advances, hybridizations, and applications," *Handbook of metaheuristics*, pp. 283-319, 2010.
- [29] A. Lim and F. Wang, "A smoothed dynamic tabu search embedded GRASP for m-VRP-TW," in *16th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, 2004: IEEE, pp. 704-708.
- [30] Z. Li, S. Guo, F. Wang, and A. Lim, "Improved GRASP with tabu search for vehicle routing with both time window and limited number of vehicles," in *Innovations in Applied Artificial Intelligence: 17th International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems, IEA/AIE 2004, Ottawa, Canada, May 17-20, 2004. Proceedings 17*, 2004: Springer, pp. 552-561.
- [31] Y. Mao and Y. Deng, "Solving vehicle routing problem with time windows with hybrid evolutionary algorithm," in *2010 Second WRI Global Congress on Intelligent Systems*, 2010, vol. 1: IEEE, pp. 335-339.
- [32] M. M. Solomon, "Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints," *Operations research*, vol. 35, no. 2, pp. 254-265, 1987.
- [33] G. Kontoravdis and J. F. Bard, "A GRASP for the vehicle routing problem with time win-

- dows," *ORSA Journal on Computing*, vol. 7, no. 1, pp. 10-23, 1995.
- [34] W. Chaovalitwongse, D. Kim, and P. M. Pardalos, "GRASP with a new local search scheme for vehicle routing problems with time windows," *Journal of Combinatorial Optimization*, vol. 7, pp. 179-207, 2003.
- [35] P. P. Repoussis, D. C. Paraskevopoulos, C. D. Tarantilis, and G. Ioannou, "A reactive greedy randomized variable neighborhood tabu search for the vehicle routing problem with time windows," in *Hybrid Metaheuristics: Third International Workshop, HM 2006 Gran Canaria, Spain, October 13-14, 2006 Proceedings 3*, 2006: Springer, pp. 124-138.
- [36] J. Brito, F. J. Martínez, J. A. Moreno, and J. L. Verdegay, "A GRASP-VNS hybrid for the fuzzy vehicle routing problem with time windows," in *Computer Aided Systems Theory-EUROCAST 2009: 12th International Conference, Las Palmas de Gran Canaria, Spain, February 15-20, 2009, Revised Selected Papers 12*, 2009: Springer, pp. 825-832.
- [37] S. R. A. Haddadene, N. Labadie, and C. Prodhon, "A GRASP× ILS for the vehicle routing problem with time windows, synchronization and precedence constraints," *Expert Systems with Applications*, vol. 66, pp. 274-294, 2016.
- [38] J. Brito, F. J. Martínez, J. A. Moreno, and J. L. Verdegay, "An ACO hybrid metaheuristic for close-open vehicle routing problems with time windows and fuzzy constraints," *Applied Soft Computing*, vol. 32, pp. 154-163, 2015.
- [39] J. De Armas, E. Lalla-Ruiz, C. Expósito-Izquierdo, D. Landa-Silva, and B. Melián-Batista, "A hybrid GRASP-VNS for ship routing and scheduling problem with discretized time windows," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 45, pp. 350-360, 2015.
- [40] G. Senarclens de Grancy and M. Reimann, "Vehicle routing problems with time windows and multiple service workers: a systematic comparison between ACO and GRASP," *Central European Journal of Operations Research*, vol. 24, pp. 29-48, 2016.
- [41] D. H. Wolpert and W. G. Macready, "No free lunch theorems for optimization," *IEEE transactions on evolutionary computation*, vol. 1, no. 1, pp. 67-82, 1997.
- [42] M. Alssager and Z. A. Othman, "Taguchi-based parameter setting of cuckoo search algorithm for capacitated vehicle routing problem," in *Advances in Machine Learning and Signal Processing: Proceedings of MALSIP 2015*, 2016: Springer, pp. 71-79.
- [43] M. Rajkumar, P. Asokan, N. Anilkumar, and T. Page, "A GRASP algorithm for flexible

- job-shop scheduling problem with limited resource constraints," *International Journal of Production Research*, vol. 49, no. 8, pp. 2409-2423, 2011.
- [44] M. M. Solomon, "VRPTW benchmark problems," <http://web.cba.neu.edu/~msolomon/problems.htm>, 2003.
- [45] A.-R. Hedar and M. A. Bakr, "Three strategies tabu search for vehicle routing problem with time windows," *Computer Science and Information Technology*, vol. 2, no. 2, pp. 108-119, 2014.
- [46] H. G. Pulido, R. De la Vara Salazar, P. G. González, C. T. Martínez, and M. d. C. T. Pérez, *Análisis y diseño de experimentos*. McGraw-Hill New York, NY, USA: , 2012.
- [47] F. Gu, P. Hall, N. J. Miles, Q. Ding, and T. Wu, "Improvement of mechanical properties of recycled plastic blends via optimizing processing parameters using the Taguchi method and principal component analysis," *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 62, pp. 189-198, 2014.
- [48] A. D. Romero-Ocaño, M. Cosío-León, V. M. Valenzuela-Alcaraz, G. J. Avilés-Rodríguez, and A. Martínez-Vargas, "Efecto de la calibración de parámetros mediante un diseño Taguchi L934 en el algoritmo GRASP resolviendo el problema de rutas de vehículos con restricciones de tiempo," *Computación y Sistemas*, vol. 22, no. 2, pp. 657-673, 2018.
- [49] J. T. Alander, "On optimal population size of genetic algorithms," in *CompEuro 1992 Proceedings computer systems and software engineering*, 1992: IEEE, pp. 65-70.
- [50] J. Arabas, Z. Michalewicz, and J. Mulawka, "GAVaPS-a genetic algorithm with varying population size," in *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation. IEEE World Congress on Computational Intelligence*, 1994: IEEE, pp. 73-78.
- [51] M. O. Odetayo, "Optimal population size for genetic algorithms: an investigation," in *IEE Colloquium on Genetic Algorithms for Control Systems Engineering*, 1993: IET, pp. 2/1-2/4.
- [52] K. C. Tan, T. H. Lee, and E. F. Khor, "Evolutionary algorithms with dynamic population size and local exploration for multiobjective optimization," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 5, no. 6, pp. 565-588, 2001.
- [53] M. A. Cruz Chávez and O. Díaz Parra, "Evolutionary algorithm for the vehicles routing problem with time windows based on a constraint satisfaction technique," *Computación y Sistemas*, vol. 13, no. 3, pp. 257-272, 2010.

- [54] B. Kallehauge, J. Larsen, and O. B. Madsen, "Lagrangian duality applied to the vehicle routing problem with time windows," *Computers & Operations Research*, vol. 33, no. 5, pp. 1464-1487, 2006.
- [55] G. A. Croes, "A method for solving traveling-salesman problems," *Operations research*, vol. 6, no. 6, pp. 791-812, 1958.
- [56] H. P. Crowder, R. S. Dembo, and J. M. Mulvey, "Reporting computational experiments in mathematical programming," *Mathematical Programming*, vol. 15, pp. 316-329, 1978.
- [57] N. Mladenović and P. Hansen, "Variable neighborhood search," *Computers & operations research*, vol. 24, no. 11, pp. 1097-1100, 1997.

CAPÍTULO 3

Optimización de la recolección de residuos urbanos en un municipio fronterizo mediante Algoritmos Genéticos: un enfoque basado en el problema de rutas de arcos con capacidad limitada

*Víctor M. Valenzuela-Alcaraz
A. Danisa Romero-Ocaño
Luis Ruvalcaba Urías
Jorge Luis García Cantón*

Resumen— Con el crecimiento acelerado de la población en las ciudades y el desarrollo económico que impulsa un aumento en las tasas de consumo, la gestión de los desechos urbanos se convierte en un aspecto de vital importancia. Este estudio se enfoca en el desafío de recolectar residuos sólidos urbanos que enfrenta un municipio fronterizo en el noreste del estado de Sonora. El objetivo principal es abordar este problema mediante un modelo basado en el Problema de Rutas de Arcos con Capacidad limitada (CARP, por sus siglas en inglés). Se reconoce que el CARP es 'NP-difícil' y que encontrar enfoques exactos es difícil debido a sus características. Por lo tanto, presentamos un algoritmo genético (AG) desarrollado específicamente para abordar instancias CARP a gran escala. Se evalúa el rendimiento del AG en cinco casos de prueba de referencia para el CARP, y además se crean un caso de prueba de la vida real basados en la infraestructura específica del municipio mencionado. Los resultados indican que el algoritmo propuesto conlleva una significativa mejora en la distancia recorrida en contraste con el enfoque vigente. Esta mejora

sugiere un potencial considerable para optimizar la eficiencia del servicio de recolección de basura del gobierno municipal.

Palabras Clave— Problema de rutas por arcos; recolección de basura; algoritmo genético.

Introducción

Las empresas, tanto del sector público como privado, enfrentan desafíos significativos en la planificación y diseño de rutas para actividades como la recolección de basura, la entrega de correo, la limpieza y mantenimiento de vías, la distribución de productos y el transporte de personal, clasificados como problemas de rutas de vehículos en la optimización combinatoria [1]. Estas decisiones impactan la eficiencia operativa y los costos, ya que una planificación óptima puede reducir tiempos de viaje, minimizar el consumo de combustible y mejorar la satisfacción del cliente. La optimización de rutas implica considerar múltiples factores como restricciones de tiempo, capacidad de carga y condiciones de tráfico, requiriendo enfoques avanzados y algoritmos específicos para abordar estas complejidades y lograr soluciones efectivas en entornos empresariales.

Las decisiones relacionadas con la planificación de rutas pueden tener un impacto significativo en la eficiencia operativa y los costos de una empresa. Por ejemplo, una ruta óptima para la recolección de basura puede reducir los tiempos de viaje y minimizar el consumo de combustible, lo que a su vez puede disminuir los costos operativos y mejorar la satisfacción del cliente al garantizar una recolección oportuna [2].

La optimización de rutas no solo implica la selección de los caminos más cortos o directos, sino también la consideración de una variedad de factores, como restricciones de tiempo, capacidad de carga de los vehículos, prioridades de entrega y condiciones de tráfico [3]. Por lo tanto, encontrar soluciones efectivas a estos problemas requiere enfoques avanzados de optimización y algoritmos específicamente diseñados para abordar las complejidades inherentes de la planificación de rutas en entornos empresariales.

En este estudio, se examina el desafío de optimizar las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos de un municipio fronterizo en el noreste del estado de Sonora. La necesidad de optimización surge a raíz del reciente aumento en los costos operativos, atribuido al consumo de combustible, la distancia recorrida, la flota de vehículos y el tiempo de desplazamiento. Esta situación se ve agravada por el crecimiento de nuevos fraccionamientos, lo que exige una revisión y reestructuración de las rutas de recolección de basura para garantizar una distribución eficiente de los recursos y una cobertura adecuada en todas las áreas de la ciudad.

El enrutamiento de la recolección de residuos puede ser adecuadamente representado como un problema de rutas de nodos o de rutas de arcos, la elección depende de dónde se acumulen los residuos. Cuando los residuos se concentran en puntos centrales, como sucede al recolectar de grandes negocios, hospitales y escuelas, el enfoque de enrutamiento de nodos es apropiado. Por otro lado, si los residuos están dispersos a lo largo de las calles, como en la recolección en el borde de las aceras, el enfoque de rutas de arcos puede ser más adecuado [4]. Por lo tanto, el artículo modela la tarea de recolección de residuos como un Problema Rutas de Arcos Capacitado (CARP) [5], que se detalla en la Sección II.

En los últimos años, se han sugerido diferentes técnicas de metaheurística para resolver el CARP. Estas técnicas incluyen la búsqueda tabú [6-9], la búsqueda local guiada [10], los algoritmos genéticos [11], la búsqueda en vecindarios variables [12] y la optimización por colonia de hormigas [13]. En términos generales, estas estrategias de optimización suelen encontrar soluciones más eficientes que las heurísticas constructivas. En este documento, se presenta un AG como una solución para abordar el CARP.

Este artículo se compone de cinco secciones. La siguiente a esta será la sección dos, donde se abordará la definición del problema. La sección tres detalla la metodología empleada en el desarrollo del trabajo. Posteriormente, en la sección cuatro se mostrarán los resultados obtenidos, y finalmente, en la sección cinco se discutirán las conclusiones alcanzadas.

Definición del problema

El problema de Rutas de Arcos con Capacidad limitada (CARP)

En el ámbito de los problemas de rutas de arcos, el reto fundamental radica en planificar la ruta de una flota de vehículos para que puedan visitar una serie de arcos específicos, conocidos como “arcos requeridos”, dentro de una red compuesta por arcos y nodos interconectados. El objetivo principal suele ser diseñar un conjunto de trayectorias viables que abarquen todos los arcos necesarios, al tiempo que se minimiza el costo total asociado con estas operaciones. El enfoque del enrutamiento de arcos encuentra aplicaciones prácticas en diversas áreas del mundo real, abarcando desde la distribución de servicios como el esparcimiento de sal y la limpieza de nieve, hasta tareas logísticas como la entrega de correo y la recolección de residuos [5].

El enrutamiento de arcos es una técnica crucial en la logística y la gestión de recursos, ya que permite planificar rutas eficientes para la distribución de servicios y productos en entornos urbanos y rurales. Al abordar el desafío de encontrar rutas óptimas que satisfagan los re-

quisitos específicos de cada situación, se puede mejorar la eficiencia operativa, reducir los costos y mejorar la calidad de los servicios ofrecidos a la comunidad. Por lo tanto, comprender y aplicar eficazmente técnicas de enrutamiento de arcos es fundamental para optimizar la gestión de recursos y la planificación logística en una variedad de contextos industriales y municipales.

En este contexto, El CARP consiste en determinar una ruta óptima para una flota de vehículos que debe atender un subconjunto de arcos (calles) con respecto a la función objetivo, que es minimizar el costo total de las rutas [5]. En este problema, las restricciones son las siguientes:

1) Depósito único: El CARP requiere que haya un único punto de origen y finalización de las rutas, conocido como depósito. Este depósito suele ser un centro de operaciones o una base logística desde la cual los vehículos inician y terminan sus recorridos.

2) Inicio y finalización en el depósito: Cada vehículo debe comenzar y terminar su recorrido en el depósito. Esto asegura que los vehículos regresen al punto de partida después de completar su servicio, lo que simplifica la logística y garantiza una distribución eficiente de recursos.

3) Vehículos homogéneos: Todos los vehículos en la flota se consideran idénticos en capacidad y características operativas. Esta restricción simplifica el problema al eliminar la necesidad de gestionar diferentes tipos de vehículos con capacidades y características variables.

4) Un vehículo por arco requerido: Cada arco (calle) requerido debe ser atendido por exactamente un vehículo. Esta restricción garantiza que todos los arcos necesarios sean cubiertos por la flota de vehículos asignada, evitando la duplicación de esfuerzos y asegurando una cobertura completa de la red.

5) Capacidad de carga de los vehículos: La demanda asignada a cada vehículo no debe exceder su capacidad de carga máxima. Esta restricción asegura que los vehículos no transporten una carga excesiva que pueda comprometer su eficiencia operativa o su seguridad.

6) Arcos asimétricos: Los arcos, que representan las conexiones entre nodos en la red, son asimétricos, lo que significa que la distancia o el costo de viaje de un arco puede ser diferente en una dirección que en la otra. Esta característica refleja con mayor precisión las condiciones del mundo real, donde las rutas pueden variar en términos de distancia, tiempo de viaje y condiciones de tráfico en diferentes direcciones.

Modelo matemático del CARP

El CARP puede ser formulado matemáticamente de la siguiente manera [14]:

Sea un grafo no dirigido, donde:

V es un conjunto de vértices y E es un conjunto de arcos que conectan cada par de nodos en V , $R \subseteq E$ está compuesto por los arcos requeridos y V_r contiene los vértices de R , incluido el depósito. Cada elemento de R en el grafo está asociado con un par de valores (c_{ij}, q_{ij}) ; c_{ij} es el costo de atravesar el arco (i, j) , y q_{ij} es la demanda en el arco (i, j) (si $i = 0$ y $j \in V_r$). Existe un vértice de depósito central 0 , donde se encuentran un conjunto K de vehículos homogéneos (Q) con una capacidad conocida (donde Q es mayor o igual que el arco con la demanda máxima). La demanda es cero para los arcos que no requieren servicio. La variable binaria x_{ijk} si el arco (i, j) es atravesado por el vehículo k y $x_{ijk} = 0$ para todos los demás casos.

$$\text{Sujeto a: } \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} \sum_{k \in K} x_{ijk} \quad (1)$$

$$\sum_{k \in K} x_{ijk} = 1 \quad (i, j) \in R \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V_r - \{0\}} \sum_{k \in K} x_{0jk} = |K| \quad (3)$$

$$\sum_{(i,j) \in R} q_{ij} x_{ijk} \leq Q \quad k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{j \in V_r} x_{ijk} = \sum_{j \in V_r} x_{ijk} \quad i \in V_r, k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \geq \sum_{j \in V} x_{hjk} \quad S \subseteq V_r - \{0\}, k \in K, h \in S \quad (6)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad (i, j) \in R, \quad k \in K \quad (7)$$

La función objetivo (1) es el costo total de la solución. La restricción (2) asegura que todos los arcos requeridos sean visitados al menos por un vehículo. Para garantizar que se utilice el número adecuado de vehículos, la restricción (3) establece que el número de vehículos empleados sea igual al número disponible. La restricción (4) evita que la carga de un vehículo supere su capacidad máxima permitida. A fin de mantener la continuidad de las rutas y garantizar que cada vehículo que entre a una calle también la abandone, la restricción (5) se encarga de ello. Además, para evitar la formación de rutas cerradas o sub-rutas no deseadas, la restricción (6) implementa un procedimiento de eliminación de sub-rutas. Por último, la

restricción (7) especifica que la variable utilizada en el problema es binaria, es decir, toma únicamente los valores de 0 o 1. Estas restricciones no solo son necesarias para garantizar la viabilidad de las soluciones, sino que también ayudan a estructurar el problema y guiar el proceso de búsqueda de soluciones óptimas.

Algoritmo Genético

En este estudio, se aplica un Algoritmo Genético (AG) para abordar el CARP. Los AG, concebidos por John Holland [15] y sus colegas en los años setenta, se inspiran en la teoría evolutiva de Darwin. Estos algoritmos emplean operadores genéticos como la selección, el cruce y la mutación para explorar soluciones a problemas complejos [16].

El AG es capaz de realizar una búsqueda local óptima y consta de algunos pasos básicos que se describen a continuación [16]:

1) **Inicialización:** Se crea una población inicial de soluciones candidatas de manera aleatoria o mediante algún método heurístico. Cada solución representa un individuo en la población.

2) **Evaluación de la aptitud:** Se evalúa la aptitud de cada individuo en la población. La aptitud puede ser determinada por una función objetivo que refleje el desempeño de cada solución en el problema que se está abordando. Cuanto mejor sea la solución en términos de la función objetivo, mayor será su aptitud.

3) **Selección:** Se seleccionan los individuos más aptos para reproducirse y producir descendencia para la próxima generación. La selección se realiza de manera probabilística, dando una mayor probabilidad de selección a los individuos más aptos.

4) **Reproducción:** Se aplican operadores genéticos, como el cruce y la mutación, a los individuos seleccionados para generar nueva descendencia. El cruce combina información genética de dos o más individuos para crear nuevos individuos, mientras que la mutación introduce cambios aleatorios en la información genética de un individuo.

5) **Reemplazo:** Los nuevos individuos (descendencia) reemplazan a los menos aptos en la población original. Esto garantiza que la calidad promedio de la población mejore en cada generación.

6) **Terminación:** El proceso se repite durante un número específico de generaciones o hasta que se cumpla algún criterio de terminación, como alcanzar un cierto nivel de aptitud o agotar un límite de tiempo predefinido.

7) **Resultados:** Una vez que el algoritmo genético ha convergido o ha alcanzado el criterio de terminación, se selecciona la mejor solución encontrada como resultado final del algoritmo.

Caso de estudio: Municipio ubicado al noreste de Sonora

En esta investigación se aborda la problemática de un municipio situado en el noroeste del estado de Sonora, México, que enfrenta dificultades para optimizar sus rutas de recolección de residuos sólidos urbanos. Durante los últimos años, la municipalidad ha experimentado un aumento significativo en sus costos operativos debido a diversos factores, incluyendo el incremento en los precios de los combustibles, la mayor cantidad de kilómetros recorridos por los vehículos de recolección, el incremento en el número de vehículos necesarios para cubrir la demanda, así como el aumento en el tiempo requerido para completar los recorridos. Estos desafíos han generado una presión adicional sobre los recursos y el presupuesto del municipio, lo que ha llevado a la necesidad de buscar soluciones efectivas para mejorar la eficiencia y reducir los costos asociados con la gestión de residuos sólidos urbanos. En este contexto, se plantea la investigación con el objetivo de desarrollar estrategias y herramientas que permitan optimizar el diseño y la planificación de las rutas de recolección, con el fin de maximizar la eficiencia operativa y minimizar los costos para el municipio.

Además, la planificación de las rutas se realiza tradicionalmente basada en la experiencia y el conocimiento del personal encargado de la recolección de residuos. Las rutas suelen ser trazadas de manera subjetiva, a criterio del conductor del vehículo, quien puede optar por diferentes caminos y horarios en función de su familiaridad con el área y las condiciones del tráfico. Esta práctica, aunque puede ser efectiva en ciertos casos, también puede llevar a suboptimizaciones y a un uso ineficiente de los recursos disponibles. La falta de un enfoque sistemático y científico para la planificación de las rutas puede resultar en recorridos no óptimos, tiempos de viaje prolongados, superposición de rutas y una distribución desigual de la carga de trabajo entre los vehículos. Por lo tanto, es crucial implementar metodologías y herramientas que permitan una planificación más precisa y eficiente de las rutas de recolección, incorporando datos objetivos y análisis detallados para mejorar la calidad del servicio y reducir los costos operativos del municipio.

En este escenario, el municipio enfrenta la necesidad de abordar el problema de las rutas de vehículos para mejorar la eficiencia de su red de recolección de residuos sólidos urbanos. El reto implica planificar las rutas para que una flota de vehículos pueda recolectar la basura de todos los hogares privados en el área urbana del municipio. Se utiliza una flota de vehículos de recolección de residuos idénticos que trabajan en turnos, con una cantidad específica de turnos permitidos por día, cada uno con un inicio y finalización determinados, todos de igual duración. Estos vehículos parten de un depósito central al comienzo de cada turno y deben regresar antes de que finalice. Cada vehículo tiene una capacidad de residuos establecida y

debe descargar en las instalaciones de gestión de residuos disponibles cuando alcanza su límite de capacidad, lo que puede ocurrir varias veces durante cada turno. Además, al finalizar un turno, los vehículos también deben descargar en las instalaciones de gestión de residuos antes de regresar al depósito. Durante un turno, un vehículo puede realizar múltiples viajes dentro del tiempo asignado para el turno.

El entorno urbano del municipio se visualiza como una red de calles e intersecciones, con segmentos de calle que permiten la recolección de residuos. Los vehículos de recolección atienden ubicaciones específicas a lo largo de las calles, asegurándose de cubrir cada punto de recolección exactamente una vez. Recolectar residuos toma más tiempo que simplemente transitar por las calles. El objetivo principal es encontrar una programación de rutas que minimice los costos totales, cumpliendo con las restricciones de capacidad, tiempo y recolección.

Actualmente el municipio cuenta con un depósito y un relleno sanitario para la gestión de residuos, una flota de 6 vehículos, cada vehículo tiene una capacidad de 140 toneladas. Se dispone de una estimación promedio de la demanda diaria de basura, y se conoce un día antes de realizar la recolección de basura.

La Tabla I, muestra el número de vértices (V) en la red vial que representa los puntos de intersección o nodos en la red. Por otro lado, E denota el número total de arcos en la red, que son las conexiones entre los nodos, es decir, las calles o segmentos de carretera. Estos arcos forman la estructura básica de la red de calles que los vehículos deben recorrer para completar sus rutas de recolección. Por otro lado, K es el número de vehículos disponibles para realizar las tareas de recolección de residuos y Q es la capacidad de los vehículos, es decir, la cantidad máxima de residuos que cada vehículo puede transportar durante un recorrido de recolección.

Tabla 1
Demanda Diaria de los Clientes

V	E	K	Q
50	91	6	140

Se empleó *Google Maps* para determinar la distancia que separa cada par de nodos en la red, abarcando tanto el depósito como las instalaciones del vertedero sanitario. En la Tabla II se presentan las distancias entre los nodos de los primeros y últimos cinco arcos, con el depósito representado por el valor uno. Es importante destacar que estas distancias se consideran simétricas, lo que significa que la distancia entre el nodo A y el nodo B es la misma que la distancia entre el nodo B y el nodo A. Asimismo, la tabla exhibe la demanda de recolección de basura para cada uno de estos arcos.

Tabla 2
Matriz de Distancias (KM)

No.	E	Distancia	Demanda
1	(1, 5)	3.0	11.5
2	(1, 9)	3.1	7.5
3	(1, 10)	4.1	12.5
4	(1, 15)	4.2	3.0
5	(1, 16)	4.0	4.0
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
87	(45, 49)	3.0	8.5
88	(45, 50)	3.5	7.5
89	(46, 50)	2.6	4.0
90	(48, 49)	4.3	10.0
91	(49, 50)	2.4	8.0

Metodología

En este apartado se explica detalladamente el enfoque metodológico empleado para implementar un AG en la solución del CARP. Se detallan los pasos, estrategias y técnicas utilizadas para diseñar, implementar y evaluar el rendimiento del AG en la resolución de este desafío logístico.

Aplicación de un AG para abordar el CARP

Representación de soluciones

En este trabajo, se emplea una cadena de números enteros de longitud n para representar la solución del CARP [17], donde cada gen de la cadena corresponde al número del arco asignado previamente. La secuencia de los genes en la cadena indica el orden en que se visitan los arcos. Por ejemplo, se puede observar en la Figura 1 un cromosoma que decodifica una

solución para el CARP con 6 arcos. En dicho cromosoma, se especifica que primero debe recorrer el arco 2, posteriormente el arco 4, después el arco 1 y así sucesivamente.



Figura 2. Representación de una solución de 6 arcos.

Decodificación de soluciones

A continuación, se explica el proceso para descifrar una solución, dado una secuencia de arcos (cromosoma). Este paso es crucial en la implementación del AG, ya que convierte la representación codificada en una solución realizable dentro del contexto del CARP. La decodificación implica asignar correctamente los arcos codificados a rutas y vehículos, asegurando así que se respeten todas las restricciones del problema. Este procedimiento es fundamental para garantizar que las soluciones generadas por el algoritmo sean factibles y puedan ser evaluadas de manera precisa en términos de costos y eficiencia en la recolección de residuos sólidos urbanos.

Este procedimiento construye rutas una por una, agregando un nuevo arco a la ruta actual hasta que se alcance la capacidad del vehículo; este proceso se detiene cuando ya no se requieren más arcos. El proceso inicia eligiendo el primer arco del cromosoma y conectándolo al depósito () determinando cuál de los dos extremos, , tiene un menor costo de viaje en comparación con el depósito. Este criterio define la orientación del arco, es decir, si el costo de viaje es menor desde el hasta , la dirección del arco será \rightarrow y el camino es $\rightarrow \rightarrow$; de lo contrario, la dirección del arco será \leftarrow y el camino es $\rightarrow \rightarrow$. Si hay arcos en el camino entre el y el o seleccionado, se añade a la ruta y se recorrerá siempre y cuando cumpla con la restricción de la capacidad del vehículo.

Los siguientes arcos seleccionados se analizan en relación con el último vértice de la ruta parcial construida hasta el momento. Por ejemplo, si la solución parcial es $\rightarrow \rightarrow$, y el siguiente arco seleccionado es , este se evalúa con respecto a .

El proceso mencionado se repite hasta que la capacidad de carga del vehículo esté llena o no haya más arcos con una demanda igual o menor que la carga disponible del vehículo. En resumen, se continúa añadiendo arcos al recorrido del vehículo hasta que se alcance la capacidad máxima de carga o no haya más arcos requeridos que puedan ser atendidos dentro de la capacidad disponible del vehículo.

Una vez que el vehículo ha alcanzado su capacidad máxima o no hay más arcos requeridos para atender, regresa al depósito y se inicia la construcción de una nueva ruta, repitiendo este proceso hasta que no queden más arcos requeridos por visitar.

Función Objetivo. En este problema, el costo mínimo de cada ruta se basa exclusivamente en la distancia. El objetivo principal es reducir la distancia recorrida en cada ruta para maximizar la eficacia de la solución decodificada por el cromosoma. Para evaluar esto, se calcula la aptitud del cromosoma sumando las distancias recorridas en cada ruta, tal como se describe en la ecuación (1). La idea es optimizar el cromosoma para que represente rutas más cortas, lo que contribuye a minimizar el costo total del problema y mejorar la eficiencia del proceso de recolección de residuos.

Generación de la Población. En esta investigación, se crea la población inicial de forma aleatoria [18], donde se asignan valores numéricos a cada arco. Estos valores numéricos, organizados en una cadena que representa el cromosoma, definen la secuencia de la ruta. Una vez generada cada población, se procede a evaluar los individuos utilizando la función objetivo descrita en la ecuación (1), lo que permite determinar la calidad de la solución.

Operador de Selección. En esta investigación, se aplica el método de selección por torneo [19] para la elección de padres. El operador de selección por torneo es una técnica utilizada en algoritmos genéticos para seleccionar individuos de una población de forma probabilística. En este método, se seleccionan aleatoriamente un número fijo de individuos de la población (llamados “participantes”) y se compara su aptitud (o valor de la función objetivo). El individuo con la mejor aptitud dentro del torneo es seleccionado como un padre para la próxima generación. Este proceso se repite tantas veces como sea necesario para completar las selecciones requeridas.

Operador de Cruce. En este estudio, se empleó el operador de cruce de un punto [20], donde se elige al azar un punto de cruce dentro del individuo. Luego, cada padre se divide en este punto, y cada hijo hereda la primera parte de un padre y la segunda parte del otro, evitando duplicados para garantizar soluciones válidas. Se obtienen así dos hijos combinando a los padres en el punto de cruce. Un ejemplo de este proceso se ilustra en la Figura 2.

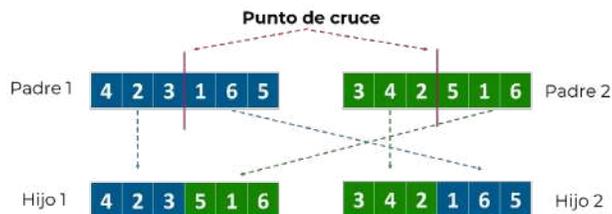


Figura 1. Cruce de un punto

Operador de Mutación. El AG implementado en este estudio utiliza el operador de mutación denominado “Intercambio de 2-posiciones” [20], ilustrado en la Figura 3. Este operador consiste en seleccionar aleatoriamente dos posiciones en un cromosoma y luego intercambiar los valores de esas posiciones entre sí. Este proceso de mutación busca introducir diversidad en la población al alterar selectivamente la información genética de los individuos, lo que puede conducir a nuevas soluciones y evitar la convergencia prematura del algoritmo.



Figura 2. Mutación de intercambio de 2-posiciones

Criterio de Finalización. Cuando el algoritmo genético ha completado un número predefinido de generaciones, se detiene y devuelve como salida la solución óptima encontrada hasta el momento, junto con el costo asociado a esa solución. Este proceso de finalización asegura que el algoritmo haya tenido suficiente tiempo para explorar y explotar el espacio de búsqueda en busca de soluciones óptimas o cercanas a óptimas. Además, proporciona una forma clara de evaluar el rendimiento del algoritmo en términos de la calidad de la solución encontrada y la eficiencia en términos de tiempo computacional.

Pruebas y Resultados

El AG se implementó en C++ y se compiló utilizando la versión 7.3.0 de gcc. Se ejecutó en un sistema operativo basado en Ubuntu 18.10, con un procesador Intel® Core™ i7-4900MQ a 2.80GHz y 16 GB de RAM. El algoritmo fue evaluado en 5 casos de prueba, Kshs2, Gdb10, Gdb11, Val7C y VAI8C del CARP, disponibles en la biblioteca CARP (<https://www.uv.es/belengu/carp.html>).

Evaluación de efectividad de las soluciones

La efectividad de las soluciones se evaluó utilizando las siguientes dos métricas [22]:

1.- Porcentaje de Desviación Relativa (PRD, por sus siglas en inglés).

$$PRD = \frac{MV - VMC}{VMC} \cdot 100$$

Donde MV representa el mejor resultado logrado por el AG tras 10 ejecuciones, mientras que VMC corresponde al valor de la mejor solución conocida para el caso de prueba.

2.- Porcentaje de Desviación Relativa Promedio (APRD, por sus siglas en inglés)

$$APRD = \frac{VP - VMC}{VMC} 100$$

Donde VP representa el promedio de los valores obtenidos por el AG en las 10 ejecuciones, mientras que VMC corresponde al valor de la mejor solución conocida para el caso de prueba.

Calibración del AG

Se identificaron y evaluaron cuatro factores clave en el GA propuesto: la Probabilidad de Cruce (P_c) y la Probabilidad de Mutación (P_m) son parámetros que afectan la exploración y diversidad en los AG. El Tamaño de la Población (T_p) determina la cantidad de individuos y el tiempo de computación requerido, mientras que el Número de Generaciones (N_g) influye en la convergencia y calidad de las soluciones finales.

Para investigar el efecto de estos factores en el rendimiento del AG, se realizó un diseño experimental utilizando el método de Taguchi [23] en 2 casos de prueba seleccionadas aleatoriamente: Gdb10 y Val7C.

Como se detalla en la Tabla III, cada uno de los cuatro factores (parámetros) se configura con cuatro niveles, generando una matriz ortogonal L_{16} . Esto da lugar a 16 combinaciones posibles de valores para los parámetros. Cada combinación se evalúa ejecutando el AG 10 veces para cada uno de los dos casos de prueba seleccionados. La variable de respuesta utilizada es el APRD promedio, donde un menor valor de APRD indica una combinación de valores de parámetros más efectiva.

Tabla 3
Factores y niveles utilizados.

Factor	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
	0.6	0.7	0.8	0.9
	0.1	0.2	0.3	0.4
	100	200	300	400
	500	600	800	1000

La Tabla IV presenta la matriz ortogonal junto con los valores de respuesta, y la Figura 4 muestra la tendencia de cada nivel por factor. En esta figura se puede apreciar que el parámetro **Pc** logra el valor más reducido de la variable de respuesta en el tercer nivel. Una tendencia similar se aprecia en el parámetro **Pm**, donde el valor mínimo de la variable de respuesta también se registra en el tercer nivel. En lo que respecta al parámetro **Tp**, el valor más bajo de la variable de respuesta se encuentra en el cuarto nivel. De igual manera, para el parámetro **Ng**, el valor mínimo de la variable de respuesta se obtiene en el cuarto nivel.

Tabla 4
Matriz ortogonal y valores de aprd

No.					APRD
1	0.6	0.1	100	500	2.32
2	0.6	0.2	200	600	2.12
3	0.6	0.3	300	800	1.79
4	0.6	0.4	400	1000	1.45
5	0.7	0.1	200	800	1.57
6	0.7	0.2	100	1000	1.70
7	0.7	0.3	400	500	1.83
8	0.7	0.4	300	600	2.98
9	0.8	0.1	300	1000	1.12
10	0.8	0.2	400	800	0.84
11	0.8	0.3	100	600	0.99
12	0.8	0.4	200	500	1.32
13	0.9	0.1	400	600	1.27
14	0.9	0.2	300	500	1.11
15	0.9	0.3	200	1000	1.07
16	0.9	0.4	100	800	1.42

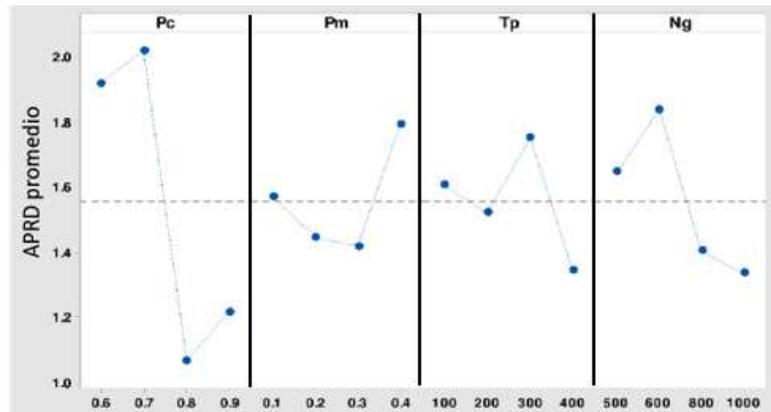


Figura 3. Tendencia del nivel de cada Factor

Basado en el análisis anterior, se sugiere fijar los parámetros del AG según se detalla en la Tabla V al abordar la problemática real del municipio. Esta recomendación se fundamenta en la eficacia demostrada por el AG en los casos de prueba evaluados anteriormente. Al establecer los parámetros de acuerdo con los valores óptimos obtenidos, se espera mejorar la capacidad del algoritmo para encontrar soluciones de alta calidad y eficiencia en la optimización de las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos.

Tabla 5
Parámetros Seleccionados para el AG

No.	Parámetro	Valores
1	Probabilidad de cruce ()	0.80
2	Probabilidad de mutación ()	0.30
3	Tamaño de población ()	400
4	Número de generaciones ()	1000

Evaluación del desempeño del AG propuesto

Con el fin de analizar exhaustivamente el desempeño del AG propuesto, se llevó a cabo su ejecución en 5 casos de prueba. Para cada uno de estos casos de prueba, el AG se ejecutó 10 veces, utilizando diferentes semillas aleatorias para cada ejecución. Esto permitió obtener una visión más precisa y variada del comportamiento del algoritmo bajo condiciones variadas. El desempeño del AG se evaluó empleando las métricas PRD y APRD, previamente explicadas.

La Tabla VI muestra los resultados de las 10 ejecuciones, en cada caso de prueba se reporta el PRD y el APRD. Los resultados presentados en la Tabla VI revelan un rendimiento satisfactorio del AG, puesto que, en 4 de los 5 casos evaluados, el PRD es de 0.00, indicando que el algoritmo ha logrado alcanzar el mejor valor conocido hasta la fecha. Esto sugiere que el AG ha sido efectivo en la optimización de las soluciones para el CARP. Este hallazgo es importante, ya que evidencia la capacidad del algoritmo para encontrar soluciones competitivas.

Tabla 6
Resultados en los Casos de prueba

No.	Caso	V	E	K	Q	VMC	MV	VP	PRD	APRD
1	Kshs2	10	15	4	150	9863	9863	9863	0.00	0.00
2	Gdb10	27	51	10	27	303	303	303	0.00	0.00
3	Gdb11	22	45	5	50	395	395	404	0.00	2.28
4	Val7C	40	66	9	65	334	334	339	0.00	1.50
5	VAI8C	30	63	9	65	521	534	557	2.57	4.31

Comparación entre las rutas generadas por AG propuesto y las generadas por el municipio

En esta sección, se lleva a cabo un análisis comparativo entre los resultados derivados del AG y los producidos por el enfoque utilizado por el municipio. Este análisis permite evaluar la eficacia y la eficiencia relativas de ambas estrategias en la optimización de las rutas de recolección de residuos sólidos urbanos.

Aunque las rutas de recolección de basura actuales pueden parecer efectivas, el crecimiento constante de la población y la consiguiente expansión de nuevos fraccionamientos requieren una redistribución urgente de estas rutas. El aumento en la densidad urbana conlleva una mayor demanda de servicios de recolección, lo que podría desencadenar un desequilibrio en la distribución de la carga entre las rutas existentes. Es esencial ajustar y optimizar las rutas de recolección para asegurar una cobertura equitativa y eficiente en todas las áreas de la ciudad, especialmente aquellas recién urbanizadas. Esta medida contribuiría significativamente a mejorar la eficacia operativa de los servicios de recolección de basura, permitiendo una respuesta más ágil a las necesidades de la población en crecimiento. Además, una redistri-

bución adecuada de las rutas ayudaría a preservar la calidad del medio ambiente urbano al garantizar una recolección oportuna y efectiva de los residuos, reduciendo así el riesgo de contaminación y otros problemas asociados con la acumulación de desechos.

La Tabla 7 presenta una comparación detallada entre las rutas actualmente implementadas por el municipio para la recolección de residuos urbanos y las rutas optimizadas mediante un AG. Las rutas planificadas por el personal especializado del municipio comprende 6 itinerarios, cubriendo una distancia total de 334 kilómetros. Esta estructura refleja la organización actual de la recolección de residuos en la ciudad, basada en la experiencia práctica en el terreno. Sin embargo, los resultados obtenidos por el AG, también mostrados en la Tabla VII, sugieren que es posible mejorar significativamente la eficiencia de este sistema. A pesar de que ambas soluciones proponen 6 rutas, el AG logra reducir la distancia total a 268 kilómetros, aprovechando mejor la capacidad de los vehículos y optimizando la distribución de la carga de trabajo.

En el análisis comparativo entre las rutas diseñadas por la empresa y las rutas optimizadas mediante el AG, se observan diferencias clave que impactan significativamente en la eficiencia operativa. Las rutas diseñadas por el municipio muestran una capacidad utilizada que varía entre el 68.6% y el 93.4%, con un promedio de 84% en las rutas 1, 2, 4 y 6, mientras que la Ruta 5 presenta una subutilización del 68.6%, lo que refleja una ineficiencia en la distribución de la carga. En contraste, las rutas optimizadas por el AG tienen una mejor utilización de la capacidad, con porcentajes entre el 91.6% y el 97.1%, lo que indica una distribución más equilibrada y eficiente de la capacidad disponible en los vehículos. Esta alta utilización sugiere que el AG ha optimizado la asignación de carga, reduciendo la necesidad de vehículos adicionales o rutas extras.

En cuanto a la distancia recorrida, las rutas diseñadas por la empresa suman un total de 334 kilómetros, con distancias individuales que varían de 40 a 61 kilómetros. A pesar de que algunas rutas tienen distancias más cortas, la distancia total sigue siendo considerablemente alta. Por otro lado, las rutas optimizadas por el AG recorren un total de 268 kilómetros, representando una reducción significativa del 20%. Esta disminución no solo reduce los costos operativos, como combustible y mantenimiento, sino que también mejora el tiempo total de las rutas, ofreciendo un servicio más rápido y eficiente. Además, la optimización lograda por el AG tiene un impacto positivo en los costos operativos y en la sostenibilidad, al reducir las emisiones contaminantes y promover prácticas ambientales responsables. En general, la implementación del AG en la optimización de rutas demuestra ser altamente beneficiosa, maximizando la eficiencia operativa y reduciendo tanto los costos como el impacto ambiental.

Basándonos en los resultados obtenidos, se recomienda encarecidamente que el gobierno municipal considere la adopción de las rutas optimizadas por el AG en su proceso de reco-

lección de basura. Implementar estas rutas no solo permitiría un uso más eficiente de los recursos, sino que también podría generar ahorros significativos en la asignación de rutas, mejorando la calidad del servicio y promoviendo prácticas ambientales responsables.

Tabla 7

Tabla comparativa entre las rutas diseñadas por la EMPRESA y las rutas diseñadas por el AG

Ruta	Rutas diseñadas por la Empresa			Rutas diseñadas por el AG			
	Secuencia	% Capacidad utilizada	Distancia (KM)	Secuencia	% Capacidad utilizada	Distancia (KM)	
1	0-5-15-17-26-28-33-40-42-49-53-59-60-70-71-79-81-85-0	88.1	61	0-6-11-16-23-31-36-42-47-52-56-65-73-77-85-0	96.5	52	
2	0-1-9-18-25-29-34-41-43-50-54-61-65-80-82-86-0	90.0	59	0-3-8-13-21-26-30-35-41-46-55-61-67-72-80-0	95.3	50	
3	0-2-10-19-23-30-35-44-51-55-62-63-72-75-83-87-0	77.5	55	0-1-7-14-22-27-32-39-44-50-57-64-68-75-81-88-0	92.0	43	
4	0-3-11-16-20-31-36-45-52-56-64-67-76-84-88-0	85.1	40	0-5-10-17-24-29-34-38-43-49-54-59-66-70-79-86-0	97.1	30	
5	0-4-8-12-14-21-32-37-46-57-66-68-73-74-77-89-0	68.6	59	0-2-9-15-20-25-33-37-45-51-58-63-69-74-82-90-91-0	95.0	41	
6	0-6-7-13-22-24-27-38-39-47-48-58-69-78-90-91-0	93.4	60	0-4-12-18-19-28-40-48-53-60-62-71-76-78-83-84-89-0	91.6	51	
Distancia Total			334	Distancia Total			268

Conclusiones

La incorporación de herramientas de optimización en la planificación de rutas para la recolección de basura ha demostrado ser efectiva para reducir los costos de transporte y mejorar los tiempos de entrega. En este estudio, se abordó el problema del ruteo de arcos con capacidad limitada (CARP), que implica encontrar la mejor ruta para una flota de vehículos asignados a un conjunto específico de arcos (calles) con el objetivo de minimizar el costo total de las rutas.

Se propuso una solución basada en algoritmos genéticos para abordar el CARP, la cual fue evaluada mediante experimentos computacionales. Los resultados mostraron que la implementación del algoritmo genético representó una mejora sustancial en comparación con la solución previamente utilizada por el municipio.

En conclusión, la optimización del servicio de recolección de basura ofrecido por el gobierno municipal es crucial para garantizar una gestión eficiente de los residuos urbanos y mejorar la calidad de vida de los ciudadanos. Mediante el uso de algoritmos genéticos y técnicas de optimización de rutas, es posible diseñar rutas de recolección más eficientes y rentables, lo que conlleva a una distribución equitativa de la carga de trabajo entre los vehículos de recolección y una reducción significativa en los costos operativos. Los resultados obtenidos de la aplicación de estas técnicas muestran una clara mejora en la eficiencia del servicio, con una reducción notable en la distancia recorrida y un aprovechamiento más efectivo de los recursos disponibles.

Es importante destacar que, si bien las rutas actuales pueden haber sido efectivas en el pasado, el crecimiento continuo de la población y el desarrollo urbano requieren una revisión constante y una actualización de las estrategias de recolección de basura. La implementación de rutas optimizadas no solo proporciona beneficios económicos, sino que también contribuye a la preservación del medio ambiente urbano y al bienestar general de la comunidad.

Por lo tanto, es altamente recomendable que la administración municipal integre las rutas sugeridas por el AG en su operativa de recolección de residuos sólidos urbanos. Esta acción no sólo optimizará el funcionamiento del servicio, sino que también consolida la imagen del gobierno como un ente dedicado a la mejora constante de los servicios públicos y al bienestar general de la población. La adopción de estas rutas generadas por algoritmos de optimización refleja el compromiso del gobierno municipal con la eficiencia, la innovación y la satisfacción de las necesidades de los ciudadanos en materia de gestión de residuos.

Como recomendación futura, sería esencial llevar a cabo estudios más detallados que aborden varias limitaciones y nuevas oportunidades identificadas en este campo. En particular, la imple-

mentación de tecnologías de seguimiento y monitoreo en tiempo real en los vehículos de recolección de basura debe explorarse a fondo. Esto implicaría no sólo un análisis de la viabilidad técnica de integrar sistemas de GPS avanzados y sensores IoT en la flota, sino también un estudio de las infraestructuras necesarias para el procesamiento y análisis de datos en tiempo real.

Además, futuras investigaciones deberían enfocarse en cómo la inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático pueden ser aplicados de manera efectiva para interpretar los datos recopilados. Esto permitiría ajustar dinámicamente las rutas en función de condiciones cambiantes, como variaciones en el tráfico, niveles de llenado de los contenedores y patrones de generación de residuos en diferentes áreas urbanas. Es crucial examinar cómo estas tecnologías pueden integrarse en los sistemas de gestión actuales y cuáles son las posibles barreras, como la resistencia al cambio en las prácticas operativas o los costos de implementación.

Otro aspecto importante es la evaluación de los impactos de programas de educación y concientización ciudadana en la reducción de la generación de residuos. Esta investigación debería incluir estudios piloto que midan la efectividad de diversas estrategias de concientización y su efecto en la optimización de las rutas de recolección, al reducir la frecuencia y volumen de residuos que necesitan ser recogidos.

Finalmente, se deben considerar los desafíos regulatorios y las posibles implicaciones éticas de la recolección y uso de datos en tiempo real, especialmente en términos de privacidad y seguridad de la información. Integrar estos elementos en futuros estudios permitirá desarrollar soluciones más robustas y holísticas para la optimización de rutas de vehículos en la gestión de residuos.

Referencias

- [1] Voß, S. (2000, August). Meta-heuristics: The state of the art. In Workshop on Local Search for Planning and Scheduling (pp. 1-23). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [2] Reyes, J. (2004). El problema de la basura en la ciudad de México. *Fundación de Estudios Urbanos y Metropolitanos*, 3-79.
- [3] Daza, J. M., Montoya, J. R., & Narducci, F. (2009). Resolución del problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico de dos fases. *Revista EIA*, (12), 23-38.
- [4] Nuortio, T., Kytöjoki, J., Niska, H., & Bräysy, O. (2006). Improved route planning and sche-

- duling of waste collection and transport. *Expert systems with applications*, 30(2), 223-232.
- [5] Golden, B. L., & Wong, R. T. (1981). Capacitated arc routing problems. *Networks*, 11(3), 305-315.
- [6] Eglese, R. W., & Li, L. Y. (1996). A tabu search based heuristic for arc routing with a capacity constraint and time deadline. *Meta-Heuristics: Theory and Applications*, 633-649.
- [7] Hertz, A., Laporte, G., & Mittaz, M. (2000). A tabu search heuristic for the capacitated arc routing problem. *Operations research*, 48(1), 129-135.
- [8] Greistorfer, P., 2003. A tabu scatter search metaheuristic for the capacitated arc routing problem. *Computers and Industrial Engineering* 44 (2), 249–266.
- [9] Brandão, J., Eglese, R., 2008. A deterministic tabu search algorithm for the capacitated arc routing problem. *Computers and Operations Research* 35 (4), 1112–1126.
- [10] Beullens, P., Muyldermans, L., Cattrysse, D., Oudheusden, D., 2003. A guided local search heuristic for the capacitated arc routing problem. *European Journal of Operational Research* 147 (3), 629–643.
- [11] Lacomme, P., Prins, C., Ramdane-Chérif, W., 2004a. Competitive memetic algorithms for arc routing problems. *Annals of Operations Research* 131 (1), 159–185.
- [12] Polacek, M., Doerner, K.F., Hartl, R.F., Maniezzo, V., 2008. A variable neighborhood search for the capacitated arc routing problem with intermediate facilities. *Journal of Heuristics* 14 (5), 405–423.
- [13] Lacomme, P., Prins, C., & Tanguy, A. (2004, September). First competitive ant colony scheme for the CARP. In *International Workshop on Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence* (pp. 426-427). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [14] Maniezzo, V. (2004). Algorithms for large directed CARP instances: urban solid waste collection operational support. UBLCS Technical Report Series, Bolonha, Italy: University of Bolonha, 27.
- [15] Jh, H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor.
- [16] De Jong, K. A. (1975). *An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems*. University of Michigan.

- [17] Tan, K. C., Lee, L. H., Zhu, Q. L., & Ou, K. (2001). Heuristic methods for vehicle routing problem with time windows. *Artificial intelligence in Engineering*, 15(3), 281-295.
- [18] Marcos; Rivero Gestal (Daniel; Rabuñal, Juan Ramón; Dorado, Julián; Pazos, Alejandro), & Gestal, M. (2010). *Introducción a los algoritmos genéticos y la programación genética* (p. 32). Coruña: Universidade da Coruña.
- [19] Goldberg, D. E. (1994). Genetic and evolutionary algorithms come of age. *Communications of the ACM*, 37(3), 113-120.
- [20] Poli, R., & Langdon, W. B. (1997). Genetic programming with one-point crossover. *Soft Computing in Engineering Design and Manufacturing*, 180-189.
- [21] Bäck, T., Fogel, D. B., & Michalewicz, Z. (Eds.). (2018). *Evolutionary computation 1: Basic algorithms and operators*. CRC press.
- [22] Valenzuela-Alcaraz, V. M., Cosio-Leon, M. A., Romero-Ocaño, A. D., & Brizuela, C. A. (2022). A cooperative coevolutionary algorithm approach to the no-wait job shop scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 194, 1164.
- [23] Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John wiley & sons.

CAPÍTULO 4

Optimal location of new business entities in urban areas

*Jesús Escalante Euán
Miguel Escalante Solís
Ileana Monsreal Barrera
Jorge Santos Flores
José Castillo Caamal
Miriam Chan Pavón*

Resumen— La ubicación de las instalaciones juega un papel crucial en varios campos, por ejemplo, la planificación urbana, los servicios, entre otros. Los resultados de la investigación supone hallar la ubicación óptima tal que minimice los costos, maximice la accesibilidad o logre un equilibrio entre criterios competitivos. Los resultados indican que el modelo de optimización propuesto tiene el potencial de generar beneficios significativos mediante una combinación de la reorganización espacial y asignación estratégica, logrando un flujo óptimo, reducir la congestión y un mejor aprovechamiento de los recursos.

Palabras Clave— Localización; optimización; Modelación

Introducción

Para tomar decisiones informadas sobre la ubicación de las instalaciones, las organizaciones y los gobiernos suelen emplear modelos matemáticos que tienen en cuenta diversos factores y objetivos.

Estos modelos tienen como objetivo encontrar la ubicación óptima de las instalaciones que minimice los costos, maximice la accesibilidad o logre un equilibrio entre criterios competitivos de acuerdo con [1], [2]. En esta investigación, se exploraron algunos de los modelos clave utilizados para la ubicación óptima de las instalaciones. Posteriormente, se seleccionaron y compararon algunos de ellos, para lo cual se ha descrito el planteamiento, su desarrollo y la programación, utilizando un lenguaje en código abierto. Se implementó y documentó las lecciones aprendidas mediante un estudio de caso para una compañía en expansión en la región sureste de México.

En este sentido es importante destacar que el ciclo de vida de una organización también es un factor clave que depende ampliamente del sitio o región donde se localiza la instalación [3], [4]. Si la decisión de emplazamiento falla en el momento de su diseño, con certeza afectará su ciclo de vida. Por lo que podría redundar en incrementos importantes en sus costos logísticos. En síntesis, la propuesta se configuró partiendo de un conjunto de clientes (n) y dado (m) ubicaciones potenciales.

La tarea es decidir dónde construirlos y desde qué almacenes se deben enviar las mercancías. Por lo tanto, hay dos decisiones que deben tomarse en cuenta: dónde localizarlos y la asignación óptima de los clientes. Esta configuración aparentemente simple, también implica que se deberá construir al menos un almacén y que cualquiera de ellos es lo suficientemente grande para satisfacer los requerimientos.

En la literatura se puede encontrar aportes como los de [5] quienes desarrollaron un programa no lineal de enteros mixtos para estudiar la ubicación de refugios y rutas de evacuación después de un contexto de desastre, donde se minimiza el tiempo total de evacuación (una función no lineal del flujo en los segmentos). Por su parte, [6] propusieron un modelo de programación lineal de enteros mixtos (MILP) para seleccionar refugios con utilización de área. En este sentido, el modelo fue validado con datos reales de Kartal, Estambul, Turquía, y se realizó un estudio de caso sobre un terremoto en el 2011. Otro estudio muy interesante fue la propuesta de [7] quienes estudiaron la ubicación de instalaciones temporales asociado con la infraestructura de transporte y demanda reducida ante un contexto de un desastre natural. La programación entera propuesta se resolvió mediante la relajación lagrangiana y se probó mediante un estudio de caso para la ciudad de New Taipei.

Por su parte [8] estudió el impacto de las decisiones estratégicas previas al desastre, es decir, determinar la ubicación y el tamaño de las instalaciones de emergencia en atención a la preparación ante posibles desastres.

Las fluctuaciones y variaciones de la demanda son características importantes durante los desastres asociados a la naturaleza. Cuando la demanda varía, las ubicaciones dinámicas de las instalaciones y los problemas de planificación de la capacidad pueden mejorar el rendimiento del sistema al aumentar la utilización de los recursos disponibles. Generalmente, todo el horizonte de planificación se divide en varios períodos de tiempo y las decisiones se toman periódicamente de acuerdo con [9], [10]. Los problemas de localización dinámica han sido ampliamente estudiados desde [11].

Por otra parte, diversos autores como [12], [13], [14] refieren que además del flujo de transporte y el inventario, la ubicación también es una variable de decisión importante tal como se ha planteado en este estudio. En contraste, otros autores han asumido la ubicación como un parámetro de entrada.

Otro aspecto relevante en esta propuesta, es que el caso de estudio se compone de 50 instalaciones candidatas, 1000 sitios de demanda, criterios de costo fijo y las relaciones de distancia entre cada entidad.

Actualmente, SP (Programación Estocástica) se ha convertido en una metodología fundamental para abordar este tipo de problemas partiendo de un conjunto de escenarios subyacentes. En este sentido [15] describieron un modelo estocástico basado en escenarios de dos etapas con incertidumbre de la demanda para determinar la ubicación, el tamaño y la asignación de los suministros de soporte.

Por su parte, [16] ampliaron su propuesta anterior véase [17] a través de la consideración de incertidumbre en la demanda de evacuación para resolver el problema propuesto por descomposición de Benders. En este sentido, [18], [19] formularon el problema de planificación de expansión de capacidad con incertidumbre de demanda como un modelo SP de dos etapas y determinaron dinámicamente la capacidad decisiones de expansión o transbordo.

Los problemas relacionados también se pueden formular como un SP entero mixto de varias etapas a través de un árbol de escenarios. Por ejemplo, [7] adoptó el enfoque de árboles de escenarios para representar las incertidumbres en el diseño de capacidad y el problema de ubicación dinámica, y el MILP (Problemas Lineales Mixtos) propuesto se resolvió mediante descomposición de Dantzig-Wolfe y programación entera dinámica dual, respectivamente. En particular, varios artículos adoptan restricciones de probabilidad para describir la incertidumbre, y las restricciones de probabilidad, que en algunos casos resultan intratables com-

putacionalmente, pueden reformularse mediante una serie de escenarios utilizando SP de acuerdo con autores como: [20], [8], [21]. O en su caso por información parcial mediante optimización (O) y por restricciones (R) [22], [23].

Los estudios que consideran operaciones humanitarias antes y después de un desastre simultáneamente son limitados. Por ejemplo, [8] desarrollaron un modelo basado en escenarios con incertidumbre en la demanda, caracterizaron el resultado esperado (antes del desastre) y el resultado obtenido (después del desastre) por los llamados objetivos de aversión a la desigualdad antes y después. Por su parte, [24] desarrollaron un modelo de dos etapas para abordar las decisiones de ubicación, capacidad, preposicionamiento, adquisición y asignación durante las fases de preparación y respuesta con el índice de vulnerabilidad social. Enfoques como los de [25], [26], refieren que las decisiones estratégicas a largo plazo al comienzo del horizonte de planificación se precisan con ajuste de las estrategias tácticas a corto plazo con la demanda aleatoria realizada en cada período de tiempo. La siguiente tabla resume los principales enfoques y autores, así como los métodos de solución empleados para resolver estas cuestiones.

Tabla 1
Autores y enfoques de solución

Autores	Demanda					Fases de Desastre		Método de solución	
	D	I	SP	O	R	Pre	Post	O	H
Kilci et al., (2015)	*					*		*	
Bayram & Yaman, (2018)	*					*		*	
Rawls & Turnquist, (2011)		*	*			*		*	
Bayram & Yaman, (2018)		*	*			*		*	
Beraldi & Bruni, (2009)		*	*	*		*			*
Noyan et al., (2022)		*	*	*		*			*
Mostajabdaveh et al., (2019)		*	*	*		*	*	*	*
Charles et al., (2016)		*			*	*	*	*	
Alem et al., (2021)		*	*			*	*	*	*
Vatsa & Jayaswal , (2021)		*		*		*		*	

Demanda: Determinada (D); Incierta (I); Programación Estocástica (SP); Optimización (O); Restricción (R). Método de solución: Optimización (O); Heurístico (H).

Metodología

La metodología de ubicación de instalaciones a través de la optimización es un campo crítico dentro de la investigación de operaciones y la gestión de la cadena de suministro, cuyo enfoque es determinar las ubicaciones más eficientes y efectivas para instalaciones como fábricas, almacenes, centros de distribución y centros de servicio. El alcance de esta metodología es amplio y abarca varios aspectos en la toma de decisiones sobre la ubicación de las instalaciones. La aportación de este estudio genera una solución óptima local para múltiples centros de abasto, bajo el supuesto de la logística de distribución de productos. Considerando $n=1000$ clientes y $m=50$ potenciales ubicaciones comerciales. A continuación, se ofrece una descripción de la metodología utilizada para la optimización de la ubicación de las instalaciones. El algoritmo se propuesto declara que: Dado un conjunto de clientes $C=\{1\dots n\}$ y un conjunto de posibles entidades $W=\{1\dots m\}$, y una función de costo asociado al transporte CT (véase la ecuación 1) vinculado a los costos de localización siendo: $x_{i,j}$ y y_j las distancias asociadas desde cada una de las posibles locaciones comerciales hasta un cliente potencial. Además, de un costo fijo asociado (CF) a cada entidad comercial, donde:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m CT_{i,j} * x_{i,j} + \sum_{j=1}^m CF_j * y_j, s. a.: \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^m x_{i,j} &= 1; i=1, \dots, n \\ x_{i,j} &\leq y_j; i=1, \dots, n \\ x_{i,j} &\in \{0,1\}; i=1, \dots, n \\ y_j &\in \{0,1\}; j=1, \dots, m \end{aligned} \quad (1)$$

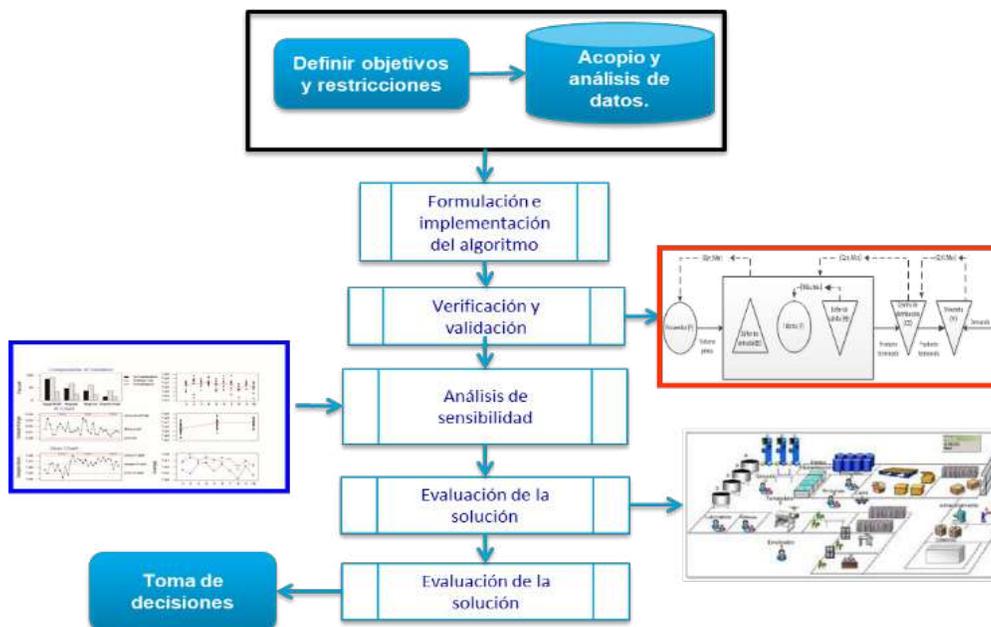


Figura 1. Enfoque sistemático para el análisis de localización

Definir objetivos y restricciones

En esta primera etapa definimos los objetivos que deseamos alcanzar. La empresa nos planteó algunas premisas tales como: la posibilidad de minimizar los costos de transporte, maximizar la cobertura del servicio o minimizar los costos generales de las instalaciones. Para resolver esta cuestión, se identificaron las restricciones disponibles considerando los límites de capacidad, restricciones de distancia o requisitos reglamentarios.

Acopio y análisis de datos

Como parte del proceso, se recopilaron los datos más relevantes, incluidas las ubicaciones de demanda, ubicaciones potenciales de las instalaciones, los costos de transporte, los requisitos de servicio y cualquier otra información pertinente. Se realizó un análisis geoestadístico para comprender la distribución espacial de la demanda y las posibles ubicaciones de las instalaciones.

Formulación e implementación del algoritmo

Se formuló un algoritmo inicial programado bajo el lenguaje de R [27] (GLPK Simplex Optimizer; v4.65) y para ejecutar las rutinas de cálculo se utilizaron las siguientes librerías: *ompr.roi* y *ROI.plugin.glpk*. La propuesta incluye la función objetivo a optimizar y las restricciones que deben satisfacerse.

Un enfoque gráfico del modelo de ubicación mínima es útil para comprender mejor el problema de ubicación. El gráfico a construir se conoce como diagrama de peso acumulativo. Aquí, el número de viajes de una instalación existente se considera como su peso. Este peso actúa como una fuerza que empuja la nueva instalación en dirección a la instalación existente. El eje horizontal registra la coordenada de la ubicación de la instalación existente i (ya sea a_i o b_i). El eje vertical registra el peso acumulado a la derecha de cada coordenada. Se pueden seguir los siguientes pasos para dibujar el diagrama de peso acumulado para las coordenadas a_i y obtener el valor óptimo de $x = x^*$ para la ubicación de la nueva instalación:

- En el eje horizontal marque los valores de x iguales a 0 y todos los valores de $a(i)$ para $i = 1, 2, \dots, m$.
- En el eje vertical marque la suma de pesos a la derecha de cada valor marcado de $x = a(i)$.
- Iniciando con la izquierda con $\sum_{i=1}^m W_i$, $\sum_{i=1}^m W_i$ unir segmentos lineales horizontales y verticales, siendo la longitud de cada desplazamiento vertical igual al peso en cada punto.

- Encuentre el valor $x = x^*$ en el diagrama que corresponde a un peso acumulado de $\sum_{i=1}^m w_i/2$.
- Se lleva a cabo un análisis similar para encontrar $y = y^*$.
- En el eje horizontal marque los valores de y iguales a 0 y todos los valores de $b(i)$ para *todo* $i = 1, 2, \dots, m$.
- En el eje vertical: marque la suma de pesos a la derecha de cada valor marcado de $y = b(i)$.
- Iniciando con la izquierda con $\sum_{i=1}^m w_i$ unir segmentos lineales horizontales y verticales, siendo la longitud de cada desplazamiento vertical igual al peso en cada punto.
- Encuentre el valor $y = y^*$ en el diagrama que corresponde a un peso acumulado de $\sum_{i=1}^m w_i/2$.

Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad para comprender cómo los cambios en los parámetros de entrada o las restricciones afectan la solución óptima. Esto ayudó a tomar decisiones más informadas y a comprender la solidez de la solución.

Evaluación de la solución

Evaluar la calidad de la solución obtenida en términos de los objetivos y restricciones de optimización. Se compararon los resultados con escenarios de referencia o estándares de la industria para evaluar la efectividad de las ubicaciones optimizadas de las instalaciones.

Toma de decisiones

Tomar decisiones basadas en las ubicaciones optimizadas de las instalaciones y las recomendaciones proporcionadas por la metodología. Esta etapa relativa a la implementación de las ubicaciones elegidas no fue contemplada en este análisis, tampoco el monitoreo de los resultados reales para garantizar que se alineen con los beneficios esperados. Sin embargo, no se quiso dejar pasar la oportunidad para incluirlo en el enfoque del presente trabajo.

Mejora continua

Finalmente, la etapa de supervisión y adaptación de las ubicaciones de las instalaciones a lo largo del tiempo a medida que cambien factores como los patrones de demanda, los costos y las regulaciones, aunado a la incorporación de las reflexiones finales entorno a los resultados del mundo real para perfeccionar la metodología de optimización para su uso futuro siendo las etapas clave de la metodología.

La optimización de la ubicación de las instalaciones es una tarea compleja y multifacética que requiere una cuidadosa consideración de los objetivos, las limitaciones, los datos y las técnicas de modelado. La metodología descrita anteriormente proporciona un enfoque estructurado para abordar este problema de manera efectiva y tomar decisiones informadas.

Resultados

Los resultados suponen que los clientes están ubicados en una cuadrícula con distancias euclidianas. Se ha calculado el costo promedio de los pesos expresados en unidades monetarias (u.m.). También se generaron los vectores que describen las coordenadas en los ejes x y y . Se programó una función que permitiera resolver asignando una locación y los pesos para cada eje y devolver como resultado las frecuencias acumuladas, el costo asociado peso por la distancia para cada uno de los ejes como se aprecia en la siguiente tabla.

Tabla 2
Percentil 50 para los pesos acumulados
(la)

Local	Coordenadas x	Peso (w)	wAc
1	2	2	2
2	3	3	5
3	3	9	14
4	4	15	29
5	6	11	40
6	8	9	49
7	8	19	68
8	13	4	72
9	20	13	85

(lb)

Local	Coordenadas y	Peso (w)	wAc
1	2	13	13
2	6	2	15
3	6	4	19
4	9	3	22
5	15	9	31
6	15	11	42
7	19	15	57
8	19	9	66
9	27	19	85

En la tabla (la) se observa que el resultado dado un percentil 50 arroja un peso de 42.5 para la determinación de la coordenada en el eje x con un valor de 8 ubicada entre el rango de 40 y 49. Para el eje y, se nota que en la tabla (lb) refiere que la coordenada óptima se ubica entre el rango de 42 y 57 siendo la posición 19. Por tanto para esta primera iteración se concluye que la localización óptima estará dada por las coordenadas en la localización (8,19).

El algoritmo sugiere ir eliminando las coordenadas de forma ascendente en función al peso (w). En este sentido, la coordenada (2,6) con peso 2 será descartada. En este mismo orden de ideas el algoritmo eliminará las coordenadas de forma ascendente respecto al peso (w). Para este caso será la coordenada (3,9) con un peso de 3. En la figura 2 se ilustran los resultados de las iteraciones en donde se puede concluir que la coordenada (11, 2) representa la solución óptima del modelo.

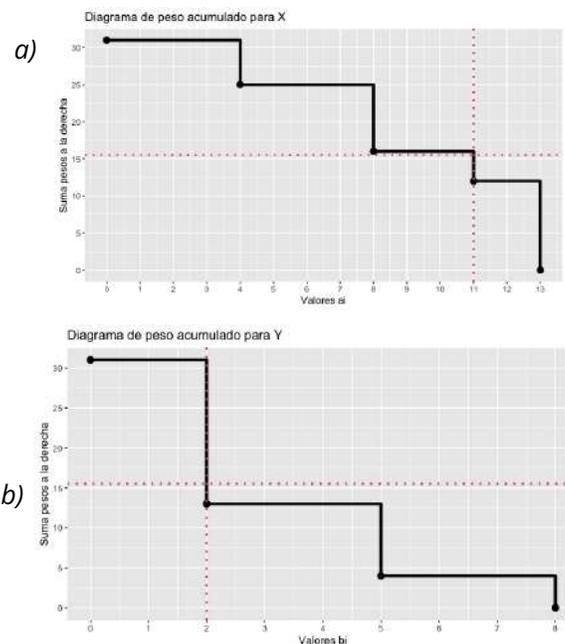


Figura 2. Pesos acumulados para los ejes x y y.

La figura 3 ilustra las referencias de localización, en donde los puntos representan las localización potenciales siendo las coordenadas óptimas en (11, 2).

Los resultados más importantes fueron: las ubicaciones preferentes para cada locación en función de los costos y asignación de clientes potenciales.

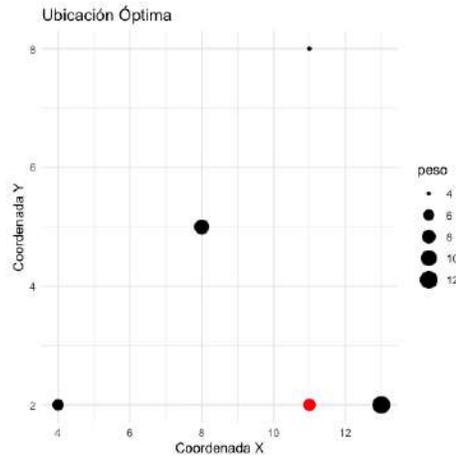


Figura 3. Solución óptima.

También, se han discriminado aquellas ubicaciones por orden de relevancia para favorecer la planeación de la demanda en función de las necesidades de la cadena comercial. Los hallazgos más importantes fueron: identificar las ubicaciones óptimas para cada unidad comercial en función de los niveles de servicio para garantizar una máxima cobertura.

También, se han discriminado aquellas ubicaciones que no se utilizarán pero que podrán habilitarse en caso de ser necesarios de acuerdo a las lecciones aprendidas que se refieren en [4], así como de una fase previa de análisis véase en [28].

Fueron cuantificados los costos fijos y totales, así como la asignación de clientes para cada locación. Una primera reflexión fue la discriminación de la ubicación más importante.

Finalmente, los costos fijos totales para la operación de las cuatro instalaciones representan \$465,968 u.m. Futuros análisis permitirían estudiar el problema de mezcla de productos y demanda de productos específicos. Entonces, los subconjuntos de las restricciones sólo incluirían los productos que requieran suministros específicos. Entonces, en esos casos, los subconjuntos de los índices aún tendrían que articularse explícitamente para esas restricciones.

Conclusiones

En este estudio, se desarrolló y analizó un modelo integral de optimización de instalaciones destinado a mejorar la eficiencia operativa, reducir costos y mejorar la asignación general de recursos dentro de la organización. Al considerar varios factores, como las distancias y costos asociados y la asignación de recursos, se pudo generar información y recomendaciones valiosas para la optimización de las instalaciones.

Los resultados de este trabajo indican que el modelo de optimización propuesto tiene el potencial de generar beneficios significativos. Mediante una combinación de reorganización espacial y asignación estratégica de recursos, las organizaciones pueden lograr un flujo de trabajo óptimo, una congestión reducida y una mejor utilización de los recursos. Esto, a su vez, puede conducir a una mayor productividad, tiempos de procesamiento más cortos y, en última instancia, una mayor satisfacción del cliente.

Además, el modelo de optimización considera factores dinámicos como patrones de demanda cambiantes, y disponibilidad variable de recursos. Esta adaptabilidad garantiza que las instalaciones permanezcan óptimas en el horizonte temporal convenido, incluso en entornos operativos fluctuantes, maximizando los beneficios a largo plazo de los cambios propuestos.

Al comparar soluciones para optimizar la ubicación de las plantas de las instalaciones, resulta evidente que no existe un enfoque único para todos. Diferentes industrias, organizaciones y contextos exigen estrategias y metodologías únicas para abordar sus necesidades y desafíos específicos. Sin embargo, existen temas comunes y conclusiones clave que pueden guiar a los tomadores de decisiones en este complejo proceso.

En primer lugar, no se puede subestimar la importancia de los datos. La recopilación y el análisis de datos sólidos son esenciales para tomar decisiones informadas sobre la ubicación de las plantas de las instalaciones. La información precisa sobre factores como patrones de demanda, costos de transporte, datos demográficos del mercado y factores de riesgo es fundamental para desarrollar soluciones de optimización eficaces.

En segundo lugar, las técnicas de optimización y modelado matemático desempeñan un papel central en el proceso de toma de decisiones. Estas herramientas ayudan a las organizaciones a formular y resolver problemas complejos de ubicación de instalaciones, considerando múltiples objetivos y limitaciones. Permiten a los responsables de la toma de decisiones explorar diversos escenarios y tomar decisiones basadas en datos. Además, a menudo es necesario un enfoque holístico. Las soluciones de optimización no deben centrarse únicamente en minimizar costos, sino que también deben considerar factores como el servicio al cliente, el impacto ambiental y la mitigación de riesgos.

Un enfoque de análisis de decisiones multicriterio (MCDA) puede resultar valioso para abordar objetivos contradictorios y encontrar soluciones equilibradas. Además, la naturaleza dinámica de los negocios y las condiciones cambiantes del mercado requieren que las organizaciones revisen periódicamente sus estrategias de ubicación de plantas. Lo que hoy puede ser óptimo puede no seguir siéndolo en el futuro. El monitoreo continuo, la flexibilidad y la adaptabilidad son componentes esenciales de soluciones de optimización exitosas.

Por último, la optimización de las instalaciones no se trata sólo de reducción de costos; también se trata de mejorar la competitividad y la sostenibilidad. Las organizaciones deben considerar las implicaciones a largo plazo de sus decisiones en su estrategia comercial general y en las comunidades en las que operan. En conclusión, comparar soluciones para optimizar la ubicación de las plantas de las instalaciones subraya la complejidad y la importancia de este proceso de toma de decisiones. Enfatiza la necesidad de enfoques basados en datos, modelos matemáticos y una visión holística de los objetivos y limitaciones. En última instancia, el objetivo es crear redes de plantas de instalaciones que sean eficientes, receptivas y alineadas con los objetivos estratégicos de una organización, permitiéndole prosperar en un entorno dinámico y competitivo.

Es importante señalar que, si bien el modelo de optimización presentado aquí ofrece ventajas sustanciales, su implementación exitosa requiere una planificación cuidadosa, colaboración entre diferentes departamentos y estrategias efectivas de gestión del cambio. La resistencia al cambio y las posibles perturbaciones durante la fase de transición deben anticiparse y abordarse de manera proactiva.

En conclusión, el modelo de optimización de instalaciones presentado en este estudio presenta un enfoque sistemático para mejorar la eficiencia operativa y la utilización de recursos. Al integrar la optimización espacial, el análisis del flujo de trabajo y la asignación dinámica de recursos, las organizaciones pueden aprovechar las oportunidades para ahorrar costos, mejorar la productividad y mejorar el rendimiento general. A medida que las empresas se esfuerzan por seguir siendo competitivas y ágiles en un panorama en rápida evolución, invertir en la optimización de las instalaciones surge como un imperativo estratégico con beneficios de largo alcance.

Referencias

- [1] S. Ratick, B. Meacham, and Y. Aoyama, "Locating Backup Facilities to Enhance Supply Chain Disaster Resilience," *Growth Change*, vol. 39, no. 4, pp. 642–666, 2008, [Online]. Available: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1468-2257.2008.00450.x>

- [2] W. Wang, S. Wu, S. Wang, L. Zhen, and X. Qu, "Emergency facility location problems in logistics: Status and perspectives," *Transp Res E Logist Transp Rev*, vol. 154, Oct. 2021, doi: [10.1016/j.tre.2021.102465](https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102465).
- [3] A. Bal and F. Badurdeen, "A multi-objective facility location model to implement circular economy," *Procedia Manuf*, vol. 51, pp. 1592–1599, 2020, doi: [10.1016/j.promfg.2020.10.222](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.222).
- [4] Z. Dönmez, B. Y. Kara, Ö. Karsu, and F. Saldanha-da-Gama, "Humanitarian facility location under uncertainty: Critical review and future prospects," *Omega (Westport)*, vol. 102, p. 102393, Jul. 2021, doi: [10.1016/j.OMEGA.2021.102393](https://doi.org/10.1016/j.OMEGA.2021.102393).
- [5] V. Bayram, B. Yıldız, and M. S. Farham, "Hub Network Design Problem with Capacity, Congestion, and Stochastic Demand Considerations," *Transportation Science*, Jun. 2023, doi: [10.1287/TRSC.2022.0112](https://doi.org/10.1287/TRSC.2022.0112).
- [6] F. Kilci, B. Y. Kara, and B. Bozkaya, "Locating temporary shelter areas after an earthquake: A case for Turkey," *Eur J Oper Res*, vol. 243, no. 1, pp. 323–332, May 2015, doi: [10.1016/j.EJOR.2014.11.035](https://doi.org/10.1016/j.EJOR.2014.11.035).
- [7] X. Yu, S. Shen, and S. Ahmed, "On the Value of Multistage Stochastic Facility Location with Risk Aversion," May 2021, Accessed: Aug. 26, 2023. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2105.11005>
- [8] M. Mostajabdaveh, W. J. Gutjahr, and F. Sibel Salman, "Inequity-averse shelter location for disaster preparedness," *IIE Trans*, vol. 51, no. 8, pp. 809–829, Aug. 2019, doi: [10.1080/24725854.2018.1496372](https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1496372).
- [9] I. Heckmann, T. Comes, and S. Nickel, "A Critical Review on Supply Chain Risk – Definition, Measure and Modeling," *Omega (Westport)*, vol. 52, pp. 119–132, Oct. 2014, doi: [10.1016/j.omega.2014.10.004](https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.10.004).
- [10] Ö. B. Kinay, B. Yetis Kara, F. Saldanha-da-Gama, and I. Correia, "Modeling the shelter site location problem using chance constraints: A case study for Istanbul," *Eur J Oper Res*, vol. 270, no. 1, pp. 132–145, Oct. 2018, doi: [10.1016/j.EJOR.2018.03.006](https://doi.org/10.1016/j.EJOR.2018.03.006).
- [11] R. H. Ballou, *Business logistics/supply chain management : planning, organizing, and controlling the supply chain*. Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall, 2004. Accessed: Jun. 08, 2014. [Online]. Available: <http://cataleg.upc.edu/record=b1268315~S1>

- [12] K. Barker, J. E. Ramirez-Marquez, and C. M. Rocco, "Resilience-based network component importance measures," *Reliab Eng Syst Saf*, vol. 117, pp. 89–97, Sep. 2013, doi: [10.1016/j.ress.2013.03.012](https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.03.012).
- [13] A. Samvedi and V. Jain, "A grey approach for forecasting in a supply chain during intermittent disruptions," *Eng Appl Artif Intell*, vol. 26, no. 3, pp. 1044–1051, 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2012.12.002>.
- [14] C. Wamsler, E. Brink, and C. Rivera, "Planning for climate change in urban areas: from theory to practice," *Special Issue: Advancing sustainable urban transformation*, vol. 50, no. 0, pp. 68–81, Jan. 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.008>.
- [15] C. G. Rawls and M. A. Turnquist, "Pre-positioning planning for emergency response with service quality constraints," *OR Spectrum*, vol. 33, no. 3, pp. 481–498, Jul. 2011, doi: [10.1007/S00291-011-0248-1/METRICS](https://doi.org/10.1007/S00291-011-0248-1/METRICS).
- [16] V. Bayram and H. Yaman, "Shelter location and evacuation route assignment under uncertainty: A benders decomposition approach," *Transportation Science*, vol. 52, no. 2, pp. 416–436, Mar. 2018, doi: [10.1287/TRSC.2017.0762](https://doi.org/10.1287/TRSC.2017.0762).
- [17] V. Bayram, B. T. Tansel, and H. Yaman, "Compromising system and user interests in shelter location and evacuation planning," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 72, pp. 146–163, Feb. 2015, doi: [10.1016/J.TRB.2014.11.010](https://doi.org/10.1016/J.TRB.2014.11.010).
- [18] W. E. Hart, J. P. Watson, and D. L. Woodruff, "Pyomo: Modeling and solving mathematical programs in Python," *Math Program Comput*, vol. 3, no. 3, pp. 219–260, Sep. 2011, doi: [10.1007/S12532-011-0026-8/METRICS](https://doi.org/10.1007/S12532-011-0026-8/METRICS).
- [19] A. Marín, L. I. Martínez-Merino, A. M. Rodríguez-Chía, and F. Saldanha-da-Gama, "Multi-period stochastic covering location problems: Modeling framework and solution approach," *Eur J Oper Res*, vol. 268, no. 2, pp. 432–449, Jul. 2018, doi: [10.1016/J.EJOR.2018.01.040](https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2018.01.040).
- [20] P. Beraldi and M. E. Bruni, "A probabilistic model applied to emergency service vehicle location," *Eur J Oper Res*, vol. 196, no. 1, pp. 323–331, Jul. 2009, doi: [10.1016/J.EJOR.2008.02.027](https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2008.02.027).
- [21] Ö. Elçi and N. Noyan, "A chance-constrained two-stage stochastic programming model for humanitarian relief network design," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 108, pp. 55–83, Feb. 2018, doi: [10.1016/J.TRB.2017.12.002](https://doi.org/10.1016/J.TRB.2017.12.002).

[22] C. W. Liu, Y. X. Li, Y. K. Yan, J. T. Fu, and Y. Q. Zhang, "A new leak location method based on leakage acoustic waves for oil and gas pipelines," *J Loss Prev Process Ind*, vol. 35, pp. 236–246, May 2015, doi: 10.1016/J.JLP.2015.05.006.

[23] T. Zhang, Y. Tan, X. Zhang, and J. Zhao, "A novel hybrid technique for leak detection and location in straight pipelines," *J Loss Prev Process Ind*, vol. 35, pp. 157–168, May 2015, doi: 10.1016/j.jlp.2015.04.012.

[24] D. Alem, H. F. Bonilla-Londono, A. P. Barbosa-Povoa, S. Relvas, D. Ferreira, and A. Moreno, "Building disaster preparedness and response capacity in humanitarian supply chains using the Social Vulnerability Index," *Eur J Oper Res*, vol. 292, no. 1, pp. 250–275, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.EJOR.2020.10.016.

[25] A. Charles, M. Lauras, L. N. Van Wassenhove, and L. Dupont, "Designing an efficient humanitarian supply network," *Journal of Operations Management*, vol. 47–48, pp. 58–70, Nov. 2016, doi: 10.1016/J.JOM.2016.05.012.

[26] R. Rahmaniani, G. Rahmaniani, and A. Jabbarzadeh, "Variable neighborhood search based evolutionary algorithm and several approximations for balanced location–allocation design problem," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 72, no. 1–4, pp. 145–159, Feb. 2014, doi: 10.1007/s00170-013-5602-9.

[27] M. U. RStudio, "RStudio Team," 2015, *Integrated , Inc., Boston, Ma*: Development for R. RStudio. [Online]. Available: <http://www.rstudio.com/>.

[28] E. Jesús, R. Loecelia, M. Ileana, G. Alan, S. Jorge, and C. Miriam, "Localización óptima de nuevas ubicaciones comerciales ," *Advances in Engineering and Innovation* , vol. 9, pp. 319–327, 2024.

CAPÍTULO 5

Performance Comparative Study of Human-Inspired Algorithms: Harmony Search Algorithm (HSA) and Golf Optimization Algorithm (GOA)

*Jesús Carlos Carmona Frausto
Adriana Mexicano Santoyo*
Oscar Alejandro Hernández Cruz
Pascual Noradino Montes Dorantes
Juan Antonio Vargas Enríquez*

Abstract— In order to solve complex problems (NP-Hard), a set of techniques known as metaheuristics have been proposed in the literature, which, although they do not guarantee the optimal solution to the problem they address, they do allow finding good solutions in reasonable time. Within the metaheuristic approaches, there are some recent algorithms known as Human-Inspired Algorithms (HIA). This paper presents a study comparison between the performance of two of the most popular human-inspired algorithms in the literature: Harmony Search Algorithm (HSA) and Golf Optimization Algorithm (GOA). This study compares the ability to exploit and explore the search space of the algorithms by means of three groups of functions used in the literature for this purpose: unimodal, multimodal and fixed-dimension multimodal functions. Obtained results present that the Golf Optimization Algorithm (GOA) has obtained a better capacity of exploitation, obtaining the best result in the 7 functions used to test this capacity. Concerning its exploration capacity, the Golf Optimization Algorithm (GOA) has obtained the best result in 5 out of

the 6 functions tested. For the fixed-dimension multimodal functions used to assess both exploitation and exploration abilities, it has been observed that both algorithms, Golf Optimization Algorithm (GOA) and Harmony Search Algorithm (HSA) have achieved the best result for 5 functions out of the 10 available. Based on the above, it has been concluded that in general, the Golf Optimization Algorithm (GOA) has achieved a better performance.

Keywords— Comparative Study; Human-Inspired Algorithms; Harmony Search Algorithm; Golf Optimization Algorithm.

Introduction

Optimization is defined as a field of computational research that has been developed over time with the aim of developing new and efficient computational solutions. Various optimization problems exist today, i.e. obtaining the optimal values of a function, the scheduling of a task or in calculating an optimal route [1].

Through the time, different groups of techniques have been developed to solve optimization problems such as: Evolutionary Algorithms [2], Insect-Inspired Algorithms [3], Plant-Inspired Algorithms [4], Human-Inspired Algorithms [5], among others. In this sense, this research has been focused on evaluating the performance of two Human-Inspired Algorithms [5], the most popular one, the Harmony Search Algorithm [6] and the other one is a recent created algorithm, the Golf Optimization Algorithm [7]. These algorithms belong to the area of evolutionary computation [8] and to the branch of Swarm Intelligence [9], which is a discipline that deals with the simulation of natural and artificial systems composed of many individuals that are coordinated through decentralized control and self-organization. On the other hand, Swarm Intelligence focuses on collective behaviors that result from the interactions of individuals between each other and with their surroundings or environment [10]. Human-inspired optimization algorithms, such as the Golf Optimization Algorithm, play a crucial role in the discipline of logistics by enabling efficient and adaptive decision-making in complex and dynamic environments. These algorithms emulate human strategies, such as the ability to adjust plans in real time and learn from past experiences, resulting in continuous improvement of logistical operations. By applying intuitive and adaptive principles, these algorithms can optimize transportation routes, manage inventories, and allocate resources more effectively, reducing costs and improving the timeliness and quality of service. In a world where efficiency and speed are essential, integrating these algorithms into logistics systems provides a significant competitive advantage, allowing companies to respond more agilely to market fluctuations and customer demands. Some examples of human-inspired optimization algorithms applied to logistics solutions can be found in [17-20].

One way to evaluate the performance of these algorithms is through the optimization of sets of mathematical functions with specific features. This research intends to evaluate the exploitation and exploration properties of GOA and HSA algorithms by evaluating different mathematical functions [11-15].

This paper is structured as follows: Section II explains the source of inspiration for this algorithms, Section III specifies the implementation procedure of the algorithms in detail. Section IV presents materials used, i.e., the functions used to evaluate the performance of the algorithms, Section V shows the results obtained from the research, and finally, Section VI presents conclusions.

Inspiration for the Algorithms

This section presents the basis that inspired the development of the algorithms that were evaluated. The section is divided into two subsections: *A. Harmony Search Algorithm* [6] and *B. Golf Optimization Algorithm* [7].

Harmony Search Algorithm

The main inspiration for the Harmony Search Algorithm [6] is the music, which is a process generated by human effort. This algorithm aims to create a better harmony based on music. Musical harmony is a combination of aesthetically pleasing sounds. In nature, harmony is considered to be that special relationship between several sound waves with different frequencies.

Musical performances help to find a better mood, that is, a better harmony that is determined by an aesthetic estimation. This aesthetic appreciation is the ensemble of sounds played by the union of instruments. Getting a better aesthetic appreciation is achieved through practice.

Golf Optimization Algorithm

The main source of inspiration for the Golf Optimization Algorithm [7] is the golf sport, which is played individually or in teams. This sport involves the handling of specialized clubs to propel a ball from an initial point into a distant hole.

However, there are rules in this sport that add extra complexities, leading to a greater challenge. Pivotal in golf is the strategy to guide the golf ball into the hole. The development of a strategy is a manifestation of intellectual prowess, which is the core of inspiration for the algorithm.

Algorithm Methodology

This section describes the phases of each of the compared algorithms. The section is divided into two subsections: A. *Methodology of the Harmony Search Algorithm* [6] and B. *Methodology of the Golf Optimization Algorithm* [7].

A. Methodology of the Harmony Search Algorithm

The methodology followed by the Harmony Search Algorithm [6] consists of 4 stages which are: (1) Initialization of the Harmony Memory, (2) Improvisation of a New Solution, (3) Memory Update and (4) Repetition of stages 2 and 3 (Improvisation of a New Solution and Memory Update) until a stop criterion is met.

(1). Initializing the Harmony Memory consists of generating a number of solutions at random. The Harmony Memory is shown in Equation (1):

$$HM = [x_{i,j} \dots x_{i,j+1} \dots x_{i,n} \vdots x_{i+1,j} \dots \vdots \vdots x_{i+1,j+1} \dots \vdots \vdots x_{i+1,n} \vdots x_{HMS,j} \dots x_{HMS,j+1} \dots x_{HMS,n}] \quad (1)$$

where HM is the Harmony Memory, $x_{i,j}$ is a solution, where subscript i denotes the i -th solution and subscript j denotes the j -th dimension, n represents the number of dimensions and HMS is the Harmony Memory Size, i.e. the number of solutions stored in the HM. Typically, HMS is set between 50 and 100.

Figure 1 shows an example of the initialization of the Harmony Memory, where $HMS = 3$ (size of the Harmony Memory), $n = 4$ (number of dimensions of the solutions) and the generation of random solutions between (0, 1].

$$HM = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.6 & 0.2 & 0.8 \\ 0.1 & 0.9 & 0.3 & 0.7 \\ 0.2 & 0.5 & 0.6 & 0.4 \end{bmatrix}$$

Figure 1. Harmony Memory Initialization

Next stage is Improvisation of a New Solution; in this stage a new harmony vector x_{new} is created, by applying 3 operators which are: (a) Memory Consideration, (b) Random Re-initialization and (c) Pitch Adjustment [16].

(a). The first operator in the Improvisation of a New Solution stage is the Memory Consideration. This operator is applied as follows: Having a solution randomly selected from the harmony memory, for each variable of the selected solution the following is performed to form a new solution x_{new} :

A random number r is generated within the interval $(0, 1]$, if the generated value r is less than the Harmony Memory Consideration Rate ($HMCR$) parameter, the variable is now part of the new solution x_{new} , as shown in Equation (2).

(b). If the generated value r is greater than the Harmony Memory Consideration Rate ($HMCR$) parameter, the value of the variable is determined by the Random Re-initialization operator, as shown in Equation (3).

$$\begin{aligned} x_{new} &= x_i(j) \in [x_i(j), x_{i+1}(j), \dots, x_{HMS}(j)], & r < HMCR & \quad (2) \\ x_{new} &= l(j) + (u(j) - l(j)) * r, & r > HMCR & \quad (3) \end{aligned}$$

where x_{new} is the Improvisation vector of a New Solution, i is the i -th position of the Harmony Memory, HMS is the size of the Harmony Memory, $HMCR$ is the probability of selecting a Harmony Memory component, l and u are the lower and upper bounds respectively and $1 - HMCR$ is the probability of randomly generating the Harmony Memory component. Figure 2 shows an example of the application of the Memory Consideration operator.

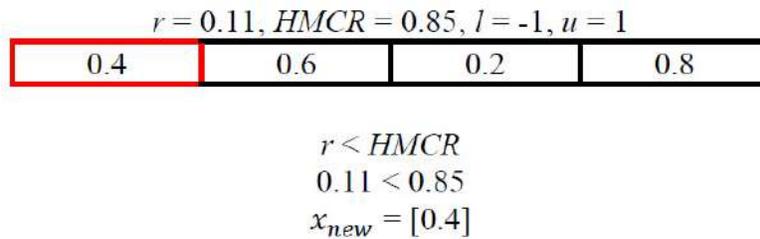


Figure 2. Memory Consideration

Figure 2 shows that the Memory Consideration operation is applied because the generated random number is smaller than the $HMCR$ parameter. Figure 3 shows an example of how Re-initialization is applied.

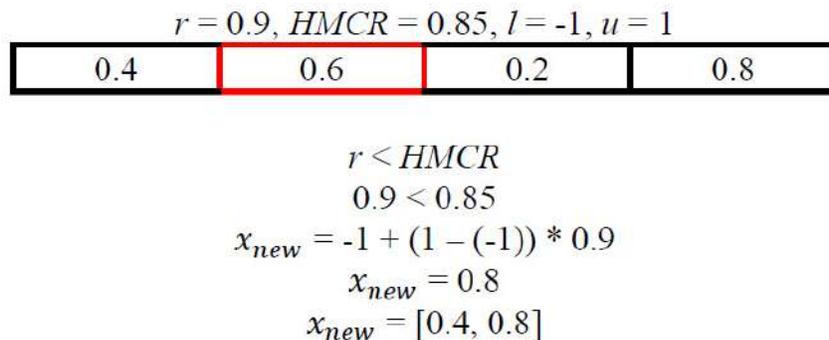


Figure 3. Random re-initialization

In Figure 3, random re-initialization is applied because the random number is larger than the $HMCR$ parameter.

(c). Once the first operators have been applied, each variable obtained by the Memory Consideration operation will be re-analyzed to determine whether a pitch adjustment is required. The pitch adjustment decision is calculated through equations (4) and (5).

$$x_{new}(j) = x_{new}(j) \pm r * BW, r < PAR \quad (4)$$

$$x_{new}(j) = x_{new}(j), r > PAR \quad (5)$$

where x_{new} is the vector for new variables, PAR is the pitch adjustment rate, BW is the bandwidth and r is a random number between (0, 1].

If the value of r is less than the PAR variable then the variable x_{new} is adjusted by using the BW bandwidth through Equation (4), otherwise its value is kept unchanged as shown in Equation (5).

$PAR = 0.5, BW = 0.1, r = 0.05$

0.4	0.8	0.2	0.8
-----	-----	-----	-----

$$r < PAR$$

$$0.05 < 0.5$$

$$x_{new} = 0.4 \pm 0.05 * 0.1$$

$$x_{new} = 0.405$$

$$x_{new} = [0.405]$$

Figure 4. Pitch Adjustment with a random number less than the PAR parameter

$PAR = 0.5, BW = 0.1, r = 0.75$

0.4	0.8	0.2	0.8
-----	-----	-----	-----

$$r < PAR$$

$$0.75 < 0.5$$

$$x_{new} = 0.8$$

$$x_{new} = [0.405, 0.8]$$

Figure 5. Pitch Adjustment with a random number greater than the PAR parameter

Figures 4 and 5 show how the Pitch Adjustment operator is applied when the generated random number is greater than the PAR parameter, and when the random number is less than the PAR parameter, respectively.

In Figure 4 the Pitch Adjustment operation is applied due to the fact that the random number generated is smaller than the PAR parameter. In Figure 5 the second Pitch Adjustment operation is applied because the number is bigger than the PAR parameter.

The Pitch Adjustment operation is responsible for generating new potential harmonies by slightly modifying the positions of the variables regarding the original ones. This operation can be seen as being similar to the mutation process of evolutionary algorithms, i.e. the decision variable is either perturbed by the random number r or by BW , or it can also remain unchanged. For the Pitch Adjustment operation to be protected, it is important to ensure that points outside the range $[l, u]$ that is, lower bound and upper bound, must be reassigned, taking the values of the maximum or minimum bounds and depending on whether the value is lower or higher than the bounds.

(3). Updating the Harmony Memory requires a new harmony vector x_{new} generated in the Improvising a New Solution stage. The Harmony Memory is updated by the prevailing value of the comparison between x_{new} and the worst harmonic vector x_w in the Harmony Memory (HM). Therefore, x_{new} can replace and thus become a new member of the Harmony Memory (HM) provided that the value of becomes better than the value of x_{new} , otherwise the value of is removed.

Figure 6 shows how the Harmony Memory is updated where x_{new} is the vector for new solutions and x_w is the worst Harmony Memory vector; these are compared according to their fitness, if x_{new} is better than x_w , x_{new} will take its place in the Harmony Memory, otherwise the x_{new} vector is eliminated.

$$\begin{aligned}
 x_{new} &= [0.405, 0.8, 0.1, 0.3] = (5) \text{ Better Fitness} \\
 x_w &= [0.1, 0.9, 0.3, 0.7] = 10 \\
 HM &= \begin{bmatrix} 0.4 & 0.6 & 0.2 & 0.8 \\ \mathbf{0.405} & \mathbf{0.8} & \mathbf{0.1} & \mathbf{0.3} \\ 0.2 & 0.5 & 0.6 & 0.4 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Figure 6. Harmony Memory Update

(4). Finally, phases 2 and 3 are repeated until a preset number of generations is reached.

B. Methodology of the Golf Optimization Algorithm

The methodology that is applied in the Golf Optimization Algorithm [7] is divided into 3 phases which are: (1) Initialization, (2) Exploration and (3) Exploitation.

(1). The Initialization of the Golf Optimization Algorithm [7] starts with the position of the solutions in the search space of the problem in which the values of the problem variables are determined. The population of solutions is shown in Equation (6). As in other algorithms, this population is randomly generated and distributed in the search space.

$$(6) \quad X = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_i \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix}_{N \times m} = \begin{bmatrix} x_{1,1} \dots & x_{1,d} \dots & x_{1,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{i,1} \dots & x_{i,d} \dots & x_{i,m} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{N,1} \dots & x_{N,d} \dots & x_{N,m} \end{bmatrix}_{N \times m}$$

where X is the population matrix of the algorithm, X_i is the i -th solution, $x_{i,d}$ is the value of the d -th variable proposed by the i -th solution, N is the number of solutions and m is the number of variables. Each member is a candidate solution to the problem. To calculate the fitness, each solution is evaluated by means of an objective function.

Figure 7 shows how to initialize the population matrix where each row is a solution.

$$\begin{bmatrix} 2 & 5 & 8 \\ 7 & 3 & 1 \\ 9 & 2 & 6 \end{bmatrix}$$

Figure 7. Population Matrix with 3 variables and 3 solutions

(2). The next phase of the algorithm is Exploration, which is represented as follows: in a game of Golf the first shot is played in an area of the playing field. In this first shot the players' objective is to try to hit a shot in such a way that the ball is as close to the hole as possible, simulating thus the exploration capability of the algorithm.

The updating process of the solutions based on the exploration is conducted by equations (7) and (8). Based on the shot simulation, the new position for each solution is calculated using Equation (7). If the value of the solution is improved, the previous position of the solution is replaced with the new one as shown in Equation (8).

During the game, players can make several shots to get the ball closer to the hole or to the target, this situation is simulated with Equation (7) using the I parameter. If this parameter value is 1, the ball gets closer to the hole, otherwise if the parameter value is 2, there is even more chance to move the ball; the more the parameter value is increased, there is more Exploration capability.

$$(7) \quad X_i^{P1}, x_{i,d}^{P1} = x_{i,d} + r * (B_d - I * x_{i,d})$$

$$(8) \quad X_i = X_i^{P1}, \text{ si } F_i^{P1} < F_i \text{ o } X_i = X_i, \text{ if } F_i^{P1} > F_i$$

where X_i^{P1} is the newly calculated position of the i -th solution $x_{i,d}^{P1}$, is the d -th dimension, X_i^{P1} is the fitness value of the i -th solution, B_d is the d -th dimension of the best solution, r is a random number in the interval $(0, 1]$ and finally I is a randomly selected number from the set $(1, 2, \dots, n)$.

Figure 8 shows the application of the formulas for the Exploration phase, where Equation (7) is applied first to obtain the value of the $X_i^{P1}, x_{i,d}^{P1}$ position, and then Equation (8) is applied where F_i^{P1} replaces F_i because the fitness value is better than that of the previous position; in case the fitness value of F_i^{P1} is not better, the fitness value F_i of the new position is discarded and the current position is kept.

1	2	3	4
$x_{i,d} = 1, B_d = 3, r = 0.5, I = 2$ $X_i^{P1}, x_{i,d}^{P1} = 1 + 0.5 * (3 - 2 * 0.5)$ $X_i^{P1}, x_{i,d}^{P1} = 1 + 0.5 * (2)$ $X_i^{P1}, x_{i,d}^{P1} = 2$ $F_i^{P1} = 5, F_i = 10$ This value is maintained only if $F_i^{P1} < F_i$, otherwise not $5 < 10$			
2	2	3	4

Figure 8. Exploration Phase

(3). Finally, there is the Exploitation phase, which is represented as follows: the players try to put the ball in the hole through strokes. These strokes are of lesser power so that the ball does not move away from the hole. This strategy allows to carefully scan the area in which each solution is found, this indicates the Exploitability of the algorithm.

The process of updating the solutions based on the Exploitation is done using equations (9) and (10). In this stage the new position for each solution is calculated using Equation (9). If this new position is better than the previous one, it overrides it, as shown in Equation (10).

$$(9) \quad X_i^{P2}, x_{i,d}^{P2} = x_{i,d} + (1 - 2r) * \frac{lb_d + r * (ub_d - lb_d)}{t}$$

$$(10) \quad X_i = X_i^{P2}, \text{ if } F_i^{P2} < F_i \text{ or } X_i = X_i, \text{ if } F_i^{P2} > F_i$$

where X_i^{P2} is the newly calculated position of the i -th solution, based on the Exploitation phase, $x_{i,d}^{P2}$ is the d -th dimension, lb_d and ub_d are the lower and upper bound respectively, X_i^{P2} is the value of the objective function and t is the iteration counter.

Figure 9 shows the application of the formulas in the Exploitation phase, where Equation (9) is applied first to obtain the value of the position $X_i^{P2}, x_{i,d}^{P2}$, to then apply Equation (10)

where F_i^{P2} substitutes F_i since the fitness value is better than that of the previous position; in case that the fitness value of F_i^{P2} is not better than the fitness value of F_i , the new position is discarded and the current position is maintained.

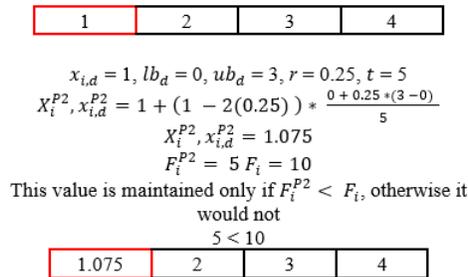


Figure 9. Exploitation Phase

Once it has been finished the update of the position of the population solutions, the new solutions are checked whether they are feasible or not. The first set of restrictions is related to the adaptive range of the decision variables, if the value of any decision variable exceeds the upper or lower bound, its value is set to the bound. This boundary restriction is checked and if necessary, it must be solved by means of equations (11) and (12).

$$X_{i,d}^{P1} = \begin{cases} ub_d, si X_{i,d}^{P1} \geq ub_d \\ \leq lb_d \\ \leq ub_d \end{cases} \quad \begin{cases} lb_d, si X_{i,d}^{P1} \\ X_{i,d}^{P1}, si lb_d \leq X_{i,d}^{P1} \end{cases} \quad (11)$$

$$X_{i,d}^{P2} = \begin{cases} ub_d, si X_{i,d}^{P2} \geq ub_d \\ \leq lb_d \\ \leq ub_d \end{cases} \quad \begin{cases} lb_d, si X_{i,d}^{P2} \\ X_{i,d}^{P2}, si lb_d \leq X_{i,d}^{P2} \end{cases} \quad (12)$$

where $X_{i,d}^{P1}$ and $X_{i,d}^{P2}$ are the d -th dimension, lb_d and ub_d are the lower and upper bound of the d -th dimension, respectively.

This first set of restrictions are applied to the feasible solutions, no operations are needed, only comparisons are made to know which value would be taken: either the values obtained in the previous stages or the value of one of the bounds.

Figure 10 shows a solution when the value of $X_{i,d}^{P1}$ is outside the upper bound, in this situation Equation (11) is applied since the value obtained is $X_{i,d}^{P1}$ when adjusting the value to the upper bound. Figure 11 shows a solution when the value of $X_{i,d}^{P2}$ is within the bounds; in this situation its value remains the same.

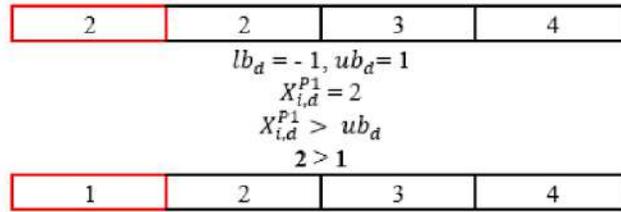


Figure 10. First set of restrictions for $X_{i,d}^{P1}$

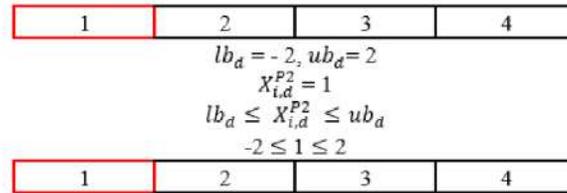


Figure 11. First set of restrictions for $X_{i,d}^{P2}$

The second set of restrictions is related to the equal or unequal constraints of the problem. To cope with these constraints, a penalty factor is applied. If any of the restrictions is not fulfilled, it means that the new solution is an infeasible solution, so a penalty is added to the fitness value; in this case, this solution cannot be considered to be the solution of the problem. The set of restrictions is verified by Equation (13).

$$F_i = F_i + n_q * PF_i \quad (13)$$

where F_i is the value of the function, n_q is the number of restrictions in the problem and PF_i is the penalty factor.

This second set of restrictions is applied to all those solutions that are not feasible, to which a penalty factor is added, so that they will not be candidates to become solutions of the problem.

Figure 12 shows the application of the penalty factor to an unfeasible solution, where the solution PF_i is added to the product of the number of restrictions by the penalty factor.

$$F_i = 1000, n_q = 3, PF_i = 100$$

$$F_i = F_i + n_q * PF_i$$

$$F_i = 1000 + 3 * 1000$$

$$F_i = 1000 + 3000$$

$$F_i = 4000$$

Figure 12. Penalty Factor

Materials

The algorithms were implemented in MATLAB using a computer with Windows 11 OS, 8 GB RAM, AMD Ryzen 5 3.6 GHz processor. The algorithms were evaluated against twenty-three functions used in the literature by different researchers [11-15]. These functions are divided into 3 groups: Unimodal, Multimodal and Fixed-Dimension Multimodal. The details of these functions are presented in tables I, II, and III, respectively. The description of the columns in tables I, II, and II are as follows: *Dim* indicates the dimension of the function, *Range* represents the bound on the search space of the function and f_{min} is the optimal value of the function.

Table 2
Unimodal Function

Function	Dim	Range	f_{min}
$F_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	30	[-100, 100]	0
$F_2(x) = \sum_{i=1}^n |x_i| + \prod_{i=1}^n |x_i|$	30	[-10, 10]	0
$F_3(x) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^i x_j \right)^2$	30	[-100, 100]	0
$F_4(x) = \max_i \{|x_i|, 1 \leq i \leq n\}$	30	[-100, 100]	0
$F_5(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2]$	30	[-30, 30]	0
$F_6(x) = \sum_{i=1}^n ([x_i + 0.5])^2$	30	[-100, 100]	0
$F_7(x) = \sum_{i=1}^n ix_i^4 + \text{random}[0,1)$	30	[-1.28, 1.28]	0

Table 3
Multimodal Functions

Function	Dim	Range	f_{min}
$F_8(x) = \sum_{i=1}^n -x_i \sin(\sqrt{|x_i|})$	30	[-500, 500]	-418.9825x5
$F_9(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i) + 10]$	30	[-5.12, 5.12]	0
$F_{10}(x) = -20\exp\left(-0.2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i^2}\right) - \exp\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)\right) + 20 + e$	30	[-32, 32]	0
$F_{11}(x) = \frac{1}{4000}\sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$	30	[-600, 600]	0
$F_{12}(x) = \frac{\pi}{n}\{10\sin(\pi y_1) + \sum_{i=1}^{n-1} (y_i - 1)^2 [1 + 10\sin^2(\pi y_{i+1})] + (y_n - 1)^2\}$ $+ \sum_{i=1}^n u(x_i, 10, 100, 4)$ $Y_i = 1 + \frac{x_i + 1}{4}$	30	[-50, 50]	0
$F_{13}(x) = 0.1\{\sin^2(3\pi x_1) + \sum_{i=1}^n (x_i - 1)^2 [1 + \sin^2(3\pi x_i + 1)]\}$	30	[-50, 50]	0

Table 4
Fixed-Dimension Multimodal Functions

Function	Dim	Range	f_{min}
$F_{14}(x) = \left(\frac{1}{500} + \sum_{j=1}^{25} \frac{1}{j + \sum_{i=1}^2 (x_i - a_{ij})^6}\right)^{-1}$	2	[-65, 65]	1
$F_{15}(x) = \sum_{i=1}^{11} \left[a_i - \frac{x_1(b_i^2 + b_i x_2)}{b_i^2 + b_i x_3 + x_4} \right]^2$	4	[-5, 5]	0.00030
$F_{16}(x) = 4x_1^2 - 2.1x_1^4 + \frac{1}{3}x_1^6 + x_1 + x_2 - 4x_2^2 + 4x_2^4$	2	[-5, 5]	-1.0316
$F_{17}(x) = \left(x_2 - \frac{5.1}{4\pi^2}x_1^2 + \frac{5}{\pi}x_1 - 6\right)^2 + 10\left(4 - \frac{1}{8\pi}\right)\cos x_1 + 10$	2	[-5, 5]	0.398
$F_{18}(x) = [1 + (x_1 + x_2 + 1)^2(19 - 14x_1 + 3x_1^2 - 14x_2 + 6x_1x_2 + 3x_2^2)]$ $\times [30 + (2x_1 - 3x_2)^2 \times (18 - 32x_1 + 12x_1^2 + 48x_2 - 36x_1x_2 + 27x_2^2)]$	2	[-2, 2]	3
$F_{19}(x) = -\sum_{i=1}^4 c_i \exp\left(-\sum_{j=1}^3 a_{ij}(x_j - p_{ij})^2\right)$	3	[1, 3]	-3.86
$F_{20}(x) = -\sum_{i=1}^4 c_i \exp\left(-\sum_{j=1}^6 a_{ij}(x_j - p_{ij})^2\right)$	6	[0, 1]	-3.32
$F_{21}(x) = -\sum_{i=1}^5 [(X - a_i)(X - a_i)^T + c_i]^{-1}$	4	[0, 10]	-10.1532
$F_{22}(x) = -\sum_{i=1}^7 [(X - a_i)(X - a_i)^T + c_i]^{-1}$	4	[0, 10]	-10.4028
$F_{23}(x) = -\sum_{i=1}^{10} [(X - a_i)(X - a_i)^T + c_i]^{-1}$	4	[0, 10]	-10.5363

Results and Discussion

The parameters used in the tests performed were as follows: (1) For the Harmony Search Algorithm a Harmony Memory Size (*HMS*) of 50, a Harmony Memory Consideration Rate (*HMCR*) of 0.9, a Pitch Adjustment Parameter (*PAR*) of 0.5, a Bandwidth (*BW*) of 0.5, and a maximum number of iterations per run (*NI*) of 1000 were used. (2) For the Golf Optimization Algorithm, an initial population of 50 and a maximum number of iterations of 1000 were used. These parameters have been determined empirically based on experimentation with these functions.

The HSA and GOA algorithms evaluated in this study were tested by solving 23 mathematical optimization functions. Table IV shows the average of 31 runs of the fitness value found by each of the algorithms, as well as the standard deviation of the 31 runs for each of the 23 optimization functions. The columns "Mean" and "S. D." refer to the average and standard deviation of the algorithms in question, respectively. The best fitness value for each of the functions is highlighted in bold and the lowest standard deviation is underlined.

Functions F1 to F7 are unimodal functions as they have only one global optimum. This type of functions allows to evaluate the exploitability of the studied metaheuristic algorithms. In Table IV it can be seen that GOA has a higher exploitation capacity than HSA since in 4 of the 7 functions it achieves the optimal solution (1, 3, 5 and 6) and the remaining 3 solutions are too close to their respective optimal solutions.

Multimodal functions are known for including many local optima whose number increases exponentially in relation to the size of the problem. These functions are divided into 2 groups: multimodal functions (from function 8 to 13) and fixed-dimension multimodal functions (from function 14 to 23).

The first group of multimodal functions allows to evaluate the exploration capability of the tested metaheuristic algorithms. The second group: fixed-dimension multimodal functions allow both exploitation and exploration capacity to be assessed together.

Results indicate that for the first group of multimodal functions, the GOA algorithm has obtained the best results in 5 of the 6 functions in the group; in two functions (9 and 11) it has achieved its optimal solutions, being only surpassed in function 8 by the HSA algorithm. This shows that the GOA algorithm has demonstrated a better exploration capability than the HSA algorithm.

For the second set of multimodal functions, results show that both algorithms obtained the best solution in 5 functions each. Moreover, each algorithm reached the optimum of a

function: GOA (15) and HSA (16), thus concluding that for this type of functions there is no notable difference in the performance of the GOA and HSA algorithms.

With these results it can be concluded that the GOA algorithm has better exploitation and exploration capabilities than HSA, when these capabilities are independently evaluated. However, no significant difference has been observed when the exploitation and exploration capabilities of the GOA and HSA algorithms have been evaluated together.

In terms of runtime, both algorithms have an execution time of less than one second, except in function 14, where they have reached up to 2 seconds of execution time. Figures 13, 14, and 15 show graphically the average values found for the different functions with which the algorithms were tested. In these images, the logarithmic scale has been used in order to improve its visualization and to clearly see the difference between the values.

In Figure 13 can be observed the performance of the algorithms for the functions 1 to 7 (unimodal functions). Here it can be seen how the GOA algorithm has a notable difference with respect to the HSA algorithm in the average fitness value, with GOA outperforming the HSA algorithm by tens, hundreds and in some cases thousands of units. HSA has shown to lack exploitability since it does not find any optimal value in the set of unimodal functions while GOA found 4 of them. GOA can therefore be considered as an algorithm with a good exploitability. Figure 14a shows graphically the mean value found for function 8 (multimodal function with negative optimum value), where HSA obtained the best performance, being the only multimodal function in which it achieved the best result.

Figure 14b presents the values found for functions F9 to F13 (multimodal functions with positive optimal value). In these functions, the best results were achieved by GOA, obtaining two optimal results, and in the rest of the functions, results close to the optimum were obtained, except for function 8, which obtained a negative optimal value. Given the above results, it can be concluded that the GOA algorithm has a better exploration capability in comparison to the HSA algorithm.

Figure 15a shows the performance of the algorithms for functions 14, 15, 17 and 18 (fixed-dimension multimodal functions with positive optimal values) where it can be seen that the difference between these two algorithms is less remarkable than in the previous cases; on the other hand, GOA algorithm is still better in these functions since it has obtained an optimal value and in the rest of the functions it has obtained values close to the optimum; besides, HSA algorithm has not obtained any optimal value, it has only achieved some values close to the optimum. Therefore, it can be observed that when exploitation and exploration capacity were evaluated simultaneously, no considerable differences were found.

Table 5
Mean and Mean Standard Deviation for the HSA and GOA fitness values

Function	HSA mean	HSA S.D.	GOA mean	GOA S.D.
	95.0029	59.8284	0	<u>0</u>
	16.2324	2.7433	1.02e-298	<u>0</u>
	54273.2079	9989.6527	0	<u>0</u>
	50.4536	4.7005	1.63e-287	<u>0</u>
	2665977.25	871340.0692	0	<u>0</u>
	4207.4908	805.0718	0	<u>0</u>
	2.0172	0.6524	0.0000164	<u>1.89544e-05</u>
\sum^1	0	0	7	7
	-10499.2762	<u>363.0161</u>	-3727.0592	397.2239
	78.5019	11.6536	0	<u>0</u>
	12.1239	0.8856	4.44e-16	<u>3.00713e-31</u>
	34.6754	6.6632	0	<u>0</u>
	694202.44	733450.6912	1-57e-32	<u>1.11286e-47</u>
	3539432.34	1636943.2230	1.57e-32	<u>2.78215e-48</u>
\sum^1	1	1	5	5
	2.9083	3.1285	2.1168	<u>1.9605</u>
	0.0078	0.0104	0.0003	<u>7.01324e-05</u>
	-1.0316	<u>1.71447e-05</u>	-1.0313	0.0011
	0.3979	<u>2.10949e-05</u>	0.4330	0.1782
	3.2178	0.5378	3.0516	<u>0.1515</u>
	-3.8488	0.0769	-3.8467	<u>0.0386</u>
	-3.2931	<u>0.0464</u>	-3.0285	0.2520
	-5.1337	3.5131	-5.5965	<u>1.1429</u>
	-6.0545	3.6474	-6.7352	<u>2.1340</u>
	-6.649	3.7758	-6.2434	<u>1.8530</u>
\sum^1	5	3	5	7

Figure 15b shows the performance of the algorithms for functions 16, 19, 20, 21, 22 and 23
 \sum^1 corresponds to the number of times that an algorithm and the metric obtained the solution, at each group.

(fixed-dimension multimodal functions with negative optimal values), where it is shown that the HSA algorithm has obtained a better performance than GOA algorithm, as HSA outperforms GOA algorithm in 4 of the 6 functions, having obtained the optimal value for one of them and obtained values close to the optimal for the rest.

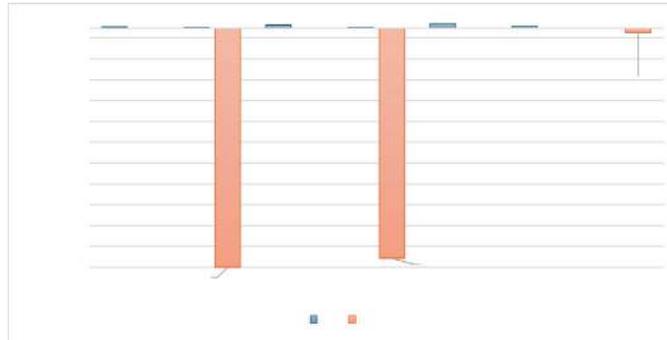


Figure 13. Average fitness found by HSA and GOA algorithms on unimodal functions



Figure 14a. Average fitness found by HSA and GOA algorithms on multimodal functions with negative optimal values

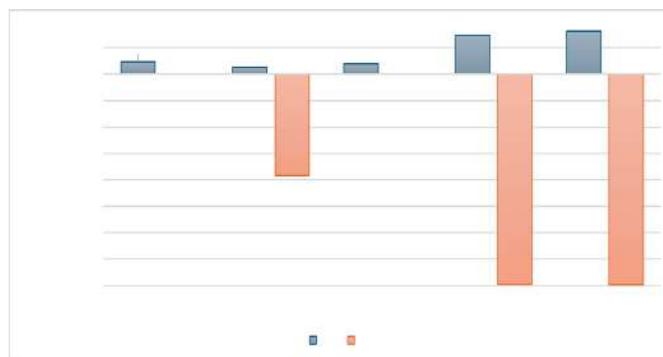


Figure 14b. Average fitness found by HSA and GOA algorithms on multimodal functions with positive optimal values

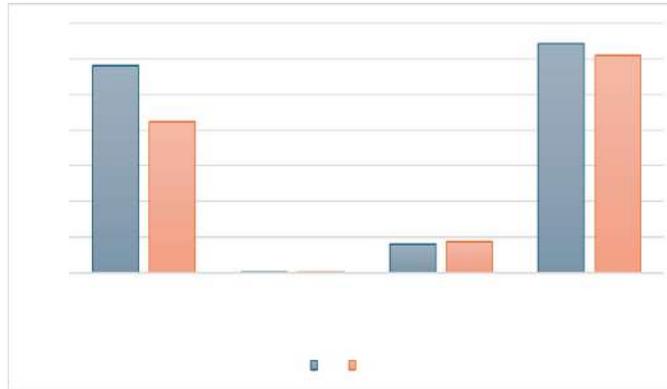


Figure 15a. Average fitness found by HSA and GOA algorithms on fixed-dimension multimodal functions with positive optimal values

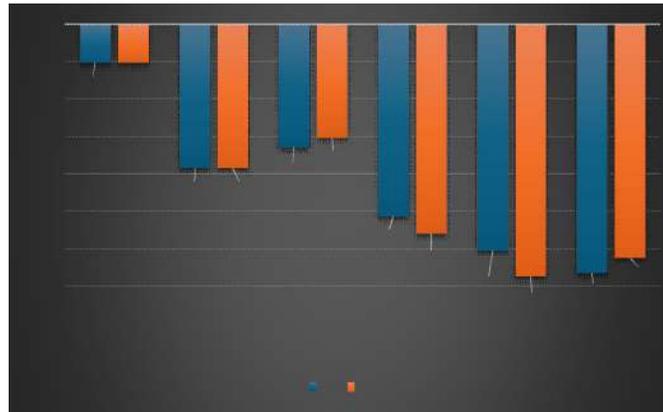


Figure 15b. Average fitness found by HSA and GOA algorithms on fixed-dimension multimodal functions with negative optimal values

Conclusion

In this paper it has been studied the performance of two of the metaheuristic algorithms of the Human-Inspired Algorithms sub-branch, with 23 test functions widely used in several research. These functions evaluated the exploitation and exploration capability of the algorithms. Through this study, it has been found that the GOA algorithm has a higher exploitability, finding most of the optimal values of the evaluated unimodal functions. With respect to the exploration capability, once again the GOA algorithm has found better results for multimodal functions with positive optimal values. However, in the multimodal functions with negative optima, the HSA algorithm achieved the best result. In the fixed-dimension multimodal functions that evaluated both exploitation and exploration capabilities together, the GOA algorithm performed well, but not as well as in the independent exploitation and exploration

evaluations. A decrease in the general performance of the GOA algorithm has been observed for functions with negative optima, whereas the HSA algorithm has obtained better results for this type of functions. In contrast, the HSA algorithm has not performed well in the independent exploitation and exploration tests. Finally, in general it can be concluded that GOA algorithm has more exploitation and exploration capabilities than HSA algorithm.

References

- [1] B. L. Gorissen, I. Yanikoglu, and D. den Hertog, "A practical guide to ~ robust optimization," *Omega*, vol. 53, pp. 124–137, 2015. J. Clerk Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68–73.
- [2] T. Back and H. P. Schwefel, «An Overview of Evolutionary Algorithms for Parameter Optimization,» *Evolutionary Computation*, vol. 1, n. 1, pp. 1-23, 1993.
- [3] A. Kumar, M. Nadeem and H. Banka, «Nature inspired optimization algorithms: a comprehensive overview,» *Evolving Systems*, vol. 14, n. 1, pp. 141-156, 2022.
- [4] J. C. Carmona Frausto, A. Mexicano Santoyo, P. N. Montes Dorantes, S. Cervantes Alvarez and J. A. Vargas Enríquez, «Comparativa de Desempeño de Algoritmos de Colonias de Insectos (ABC y ACOR) Aplicados a Funciones,» *FEGLININ -Revista oficial de la Federación Global De Profesiones A.C. (FGDP)-*, vol. 3, n. 27, pp. 52-59, 2023.
- [5] R. Rai, A. Das, S. Ray and K. G. Dhal, «Human-Inspired Optimization Algorithms: Theoretical Foundations, Algorithms, Open-Research Issues and Application for Multi-Level Thresholding,» *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 29, nº 7, pp. 5313-5352, 2022.
- [6] Z. W. Geem, J. H. Kim, and G. V. Loganathan, "A new heuristic optimization algorithm: harmony search," *simulation*, vol. 76, no. 2, pp. 60–68, 2001.
- [7] Z. Montazeri, T. Niknam, J. Aghaei, O. P. Malik, M. Dehghani, and G. Dhiman, "Golf optimization algorithm: A new game-based metaheuristic algorithm and its application to energy commitment problem considering resilience," *Biomimetics*, vol. 8, no. 5, p. 386, 2023.
- [8] A. M. Iglesias Solano and A. B. Iglesias Carbonell, «La Computación Evolutiva y sus Paradigmas,» *Investigación y Desarrollo en TIC*, vol. 2, n. 1, pp. 30-39, 2011.

- [9] G.-G. Wang, S. Deb and Z. Cui, «Monarch butterfly optimization,» *Neural computing and applications*, vol. 31, pp. 1995-2014, 2019.
- [10] G. Beni and J. Wang, "Swarm intelligence in cellular robotic systems," in *Robots and biological systems: towards a new bionics?*, pp. 703–712, Springer, 1993.
- [11] X. Yao, Y. Liu, and G. Lin, "Evolutionary programming made faster," *IEEE Transactions on Evolutionary computation*, vol. 3, no. 2, pp. 82– 102, 1999
- [12] J. G. Digalakis and K. G. Margaritis, "On benchmarking functions for genetic algorithms," *International journal of computer mathematics*, vol. 77, no. 4, pp. 481–506, 2001.
- [13] M. Molga and C. Smutnicki, "Test functions for optimization needs," *Test functions for optimization needs*, vol. 101, p. 48, 2005.
- [14] X.-S. Yang, "Test problems in optimization," *arXiv preprint arXiv:1008.0549*, 2010.
- [15] S. Mirjalili and A. Lewis, "S-shaped versus v-shaped transfer functions for binary particle swarm optimization," *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 9, pp. 1–14, 20
- [16] E. V. Cuevas Jiménez, J. V. Osuna Enciso, D. A. Oliva Navarro and M. A. Díaz Cortés, *Optimización Algoritmos programados con MATLAB*, México: Alfaomega Grupo Editor, 2016.
- [17] Minanda, V.; Liang, Y.-C.; Chen, A.H.L.; Gunawan, A. Application of an Improved Harmony Search Algorithm on Electric Vehicle Routing Problems. *Energies* 2024, 17, 3716. <https://doi.org/10.3390/en17153716>
- [18] Dalbah LM, Al-Betar MA, Awadallah MA, Zitar RA (2021) A modified coronavirus herd immunity optimizer for capacitated vehicle routing problem. *J King Saud University-Comput Inform Sci*
- [19] Zitar R (2021) A modified coronavirus herd immunity optimizer for capacitated vehicle routing problem.
- [20] Praveen SP, Rao KT, Janakiramaiah B (2018) Effective allocation of resources and task scheduling in cloud environment using social group optimization. *Arab J Sci Eng* 43(8):4265–4272

SECCIÓN II

Estudio y Mejora de Procesos

CAPÍTULO 6

Análisis estadístico de tiempos de conducción en el autotransporte con respecto al cumplimiento de la NOM-087

*Carlos Mario Pérez-González
Martha Elizabeth De la Torre Romero
Jared Piña-Barcenas
Marisol Barrón Bastida*

Resumen—Este documento abordó la problemática de los excesivos tiempos de conducción en el marco de la implementación de la Norma Oficial Mexicana “NOM-087-SCT-2-2017”. Estos ocasionan problemas en el desempeño y seguridad del autotransporte, además del incumplimiento de la norma establecida. En este sentido, el objetivo de este análisis es diagnosticar el cumplimiento de los tiempos de conducción y descanso, mediante el análisis estadístico de tres muestras de datos GPS de empresas del autotransporte. Esta problemática se abordó desde una perspectiva metodológica, práctica y normativa. En primer lugar, se realizó una revisión bibliográfica para consultar los modelos propuestos para la localización y gestión de paradores para el autotransporte de carga. En segundo lugar, se identificaron geográficamente los paradores oficiales de México y, con las muestras de datos GPS, se determinaron los tiempos de viaje y de estadía con respecto a estas áreas. Finalmente, se contrastaron los resultados con lo estipulado en la Norma oficial. Entre los hallazgos, se tienen: casos donde el tiempo de conducción entre descansos supera el intervalo de cinco horas establecido por la norma mexicana; que el tiempo de operación de los vehículos puede ser superior al límite de 14 horas por cada 24 horas;

y que existen estaciones de servicio no incluidas como paradores que presentan tiempos de estadía mayores a ocho horas. Por último, se incluye una propuesta de trabajo futuro para ubicar paradores de autotransporte con base en la estimación de la demanda actual y la capacidad instalada, que tenga como objetivo lograr una cobertura adecuada para el cumplimiento de la NOM-087.

Palabras Clave— paradores; autotransporte; GPS; normativa; horas de conducción

Introducción

Los conductores del transporte de carga juegan un papel fundamental en la economía y la logística del país. Sin ellos, muchas poblaciones no tendrían acceso a alimentos y otros muchos productos indispensables.

La profesión de conductor es una labor muy importante, lamentablemente sus condiciones de trabajo son de las más difíciles. Uno de los factores más relevantes a abordar son las largas jornadas laborales, las cuales no solo afectan su salud, también constituyen un riesgo para los demás usuarios que transitan por las carreteras del país. Por esta razón la Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes (SICT) emitió la norma NOM-087-SCT2-2017 (NOM-087 en adelante), cuyo objetivo es regular los tiempos de conducción y períodos de descanso de los conductores del autotransporte federal.

Se espera que la implementación de esta norma genere una reducción de la siniestralidad en las carreteras y una mejor calidad de vida de los conductores. Sin embargo, también implica nuevos retos; uno de los más importantes es lograr la infraestructura adecuada y suficiente para que los conductores puedan hacer las pausas que la NOM-087 señala. En este sentido, aumentar el gasto en infraestructura es complicado. Un enfoque más práctico es aprovechar la infraestructura existente de acuerdo a los lineamientos establecidos en la norma. Así, el primer paso consiste en determinar el panorama actual de las horas de conducción y descanso en el autotransporte y su relación al cumplimiento de la norma.

El objetivo del presente documento es diagnosticar el estado actual de la implementación de la NOM-087, con base en un análisis documental y cuantitativo, para la identificación de oportunidades de mejora. El análisis documental se llevó a cabo mediante una revisión de la literatura de las metodologías y lineamientos existentes para la localización de paradores. Por otro lado, el análisis cuantitativo consistió en la medición y resumen estadístico de los tiempos de viaje y estadía en paradores de vehículos de carga, usando su trazabilidad GPS.

El presente documento se organizó de la siguiente forma: la sección II, desarrolla la revisión de literatura en el tema de los paradores para el autotransporte de carga. La sección III, presenta la metodología propuesta y el origen de los datos utilizados en el análisis. La sección IV, desarrolla el análisis estadístico de las muestras de datos recolectadas. Finalmente la sección V, presenta la conclusiones y recomendaciones.

Antecedentes

La presente revisión de literatura, se realizó en diferentes fuentes de datos. Para realizar el análisis metodológico se consultaron las siguientes bases de datos: “*Science Direct*” y “*Web of Science*”. En esta búsqueda se usaron las siguientes palabras claves: i) “*parking*”; ii) “*truck*”; y iii) “*methodology*”. Además, para el análisis normativo se consultaron documentos que abordaron lineamientos de operación para el autotransporte y las horas de conducción. Esta exploración se realizó mediante el motor de búsqueda de Google™. En esta actividad se utilizaron las siguientes palabras claves: i) “*paradero*”; ii) “*parador*”; iii) “*truck stop*”, y sus posibles combinaciones. La revisión se realizó durante los meses de febrero a marzo del 2024. Los documentos utilizados fueron seleccionados de acuerdo a: i) El contenido del resumen; ii) Normativa aplicable al autotransporte; iii) De acuerdo a su relación con el objetivo de este estudio. Finalmente se seleccionaron 31 documentos para el análisis metodológico y normativo en materia de paradores y tiempo de conducción.

Importancia de autotransporte de carga en México

El autotransporte de carga es el medio más usado para mover mercancías en México. Tan solo en el 2023 movió el 57% del total de la carga en México. Este porcentaje equivale a 565.7 millones de toneladas [1]. La infraestructura carretera existente, así como la flexibilidad del autotransporte de carga y su alcance, lo convierten en el modo de transporte dominante en México.

De acuerdo con [2] el sector de Transportes, Correos y Almacenamiento, presentó en el cuarto trimestre del 2023 un Producto Interno Bruto de 1.8 Billones de pesos. Tal como se mencionó anteriormente, el autotransporte es el medio principal de transporte de carga en México, apoyado sobre la infraestructura existente. En este sentido México cuenta con la Red Nacional de Caminos (RNC). La longitud de la RNC es de 836,603 km (carreteras pavimentadas + vialidades/enlaces + caminos) [3]. Una breve descripción de las características de la RNC se presentan en la Tabla I.

Tabla 1
Características generales de la RNC

Tipo	Cantidad
Carreteras Federales	51,339 km
Carreteras Estatales	103,023 km
Caminos (municipales y particulares)	23,855 km
Carreteras de cuota	11,094 km
Plazas de cobro	1,356 plazas
Vialidades urbanas e infraestructura de enlace	130,642 km
Caminos NO pavimentados	527,744 km

Fuente: [3]

Debido a la importancia del autotransporte, una multitud de problemas han surgido entorno al mismo. De acuerdo con [4], los principales tres problemas de la industria del transporte por carretera son: i) la economía en general; ii) la disponibilidad de estacionamientos para camiones, y; iii) el precio de los combustibles. La economía actual y el precio de los combustibles son afectados por diversos factores a nivel nacional e internacional fuera del control operativo del autotransporte. No obstante, uno de los aspectos en los que es posible incidir desde un nivel operativo son: la disponibilidad de estacionamientos para camiones. De acuerdo con [5], los paradores son *“instalaciones físicas adyacentes, ubicadas fuera del derecho de vía, que brindan seguridad y ofrecen servicios al viajero, como áreas de descanso, servicios sanitarios y recarga de combustible, entre otros, y estarán diseñados de acuerdo a las necesidades de cada carretera siguiendo un plan maestro”*. En este sentido, el mismo autor menciona que existen diversos tipos de parador, clasificándolos de la siguiente forma:

- i. Parador de emergencia: Instalación con servicios mínimos necesarios para una estadía de corto tiempo, que proporciona el espacio mínimo requerido de cajones de estacionamiento para vehículos ligeros, autobuses y vehículos de carga;
- ii. Parador de descanso: Instalación de mayor jerarquía que los paradores de emergencia, sirven de soporte a los paradores de servicios;
- iii. Parador de servicio: Instalaciones para brindar descansos largos con más infraestructura para ofrecer un mayor número de servicios;
- iv. Parador auxiliar: Instalaciones que aprovechan espacios con zonas tradicionales o emblemáticas. Estos paradores son instalaciones complementarias en la red de carreteras;

son una variante de los paradores de descanso y de servicios. Los paradores auxiliares se subdividen en:

- a. Parador escénico: Se encuentran en zonas de interés visual. Cuentan con instalaciones especiales para apreciar vistas escénicas. Por su naturaleza no permiten el acceso de vehículos pesados;
- b. Parador turístico: Estos pueden brindar servicios de abastecimiento de combustible, venta de refrigerios y áreas de descanso. Están ubicados en zonas de interés turístico.

Todas estas definiciones responden a necesidades de seguridad, servicios al viajero, áreas de descanso entre otras. Por lo que son elementos esenciales para la operación en el auto-transporte.

Por otra parte, la inseguridad actual en el autotransporte en México es innegable. Con este respecto, la [6], señala que tan solo en febrero del 2023 se registró un aumento del 11% de carpetas de investigación por robo al autotransporte con respecto al mismo periodo del 2022. Además, con información de [7], la tendencia de robo de carga se encuentra en aumento y se concentra en un espacio reducido en el centro del país. La misma fuente menciona que la mayor concentración de robos en los días laborales (lunes a viernes), permite identificar la actividad delictiva orientada al robo de carga. Si bien una gran cantidad de robos obedece a muchos motivos no controlables, la disponibilidad de estacionamientos adecuados puede propiciar mejores condiciones de seguridad para el autotransporte de carga. Desde este punto de vista, el primer paso consiste en identificar el cumplimiento de la norma para analizar las necesidades reales del autotransporte, y así, propiciar la toma de decisiones basada en evidencia.

De acuerdo a [8], con datos de siniestros del 2011 al 2020, el 76% de los accidentes registrados pueden ser imputados al conductor como único causante. En [9] mencionan que diversos trastornos psicofísicos transitorios como el estrés, la fatiga, el sueño y la depresión, pueden originar que un conductor cometa un error provocando con ello un accidente. En este sentido, en [4] se menciona como una de sus estrategias investigar la relación entre la disponibilidad de estacionamiento para camiones y la seguridad en las carreteras. Los accidentes mortales del 2023 subrayan una peligrosa situación a la cual se enfrentan los choferes de camiones y automovilistas en la actualidad [10].

La posibilidad de accidentes se acentúa debido a las largas jornadas de trabajo sin descanso a la que son sometidos los conductores del transporte de carga. En este sentido la norma que rige los tiempos de conducción y pausas es la norma NOM-087-SCT2-2017 [11].

Desde un punto de vista regulatorio y operacional, la logística del transporte privado requiere de un cambio interno en su operación. Esta área se encuentra fuera de los límites del presente trabajo, por lo que nos enfocaremos en la falta de paradores adecuados para el autotransporte de carga.

NOM 087 SICT

Las normas oficiales mexicanas (NOMs) son un conjunto de regulaciones técnicas que rigen la industria basadas en información científica y tecnológica que permiten que las diversas dependencias gubernamentales entre otras cosas atender y eliminar riesgos para la población y el medio ambiente [12].

La Norma Oficial Mexicana “NOM-087-SCT-2-2017”, es de naturaleza regulatoria para el servicio de autotransporte federal y sus servicios auxiliares. Esta norma establecida por la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT), tiene como objetivo regular los tiempos de conducción y las pausas. Dentro de esta norma se plantea que *“existe una relación directa entre el tiempo de conducción y el riesgo de presentar signos de fatiga física, mental o ambas, a su vez estos síntomas pueden ocasionar lesiones o muerte por accidente de trabajo [11].*

Esta norma en su cuarta sección establece lo siguiente para el autotransporte de carga:

- La obligatoriedad de portar la Bitácora de horas de servicio y exhibirla a la autoridad competente cuando le sea requerida;
- El tiempo máximo de conducción no podrá exceder las 14 horas dentro de un lapso de 24 horas;
- Realizar una pausa de 30 minutos después de conducir por 5 horas continuas; o distribuirse durante un lapso de cinco horas y media de acuerdo a las condiciones de la ruta;
- Se deberá realizar una pausa de 8 horas tras un tiempo continuo de conducción máximo de 14 horas.
- La vigilancia del cumplimiento de esta norma corresponde a la Secretaria de Infraestructura Comunicaciones y Transportes y la Secretaría de Gobernación.

Regulación de Horas de servicio

Por otra parte, las regulaciones en las horas de servicio (HOS, siglas en inglés) también han

sido aplicadas en Estados Unidos. A este respecto, existen regulaciones del Departamento de Transporte (DOT) de Estados Unidos con respecto a las horas de conducción para conductores de transporte de carga.

De acuerdo con la Administración Federal de Seguridad de Autotransportes [13], organismo que forma parte del DOT, se establece lo siguiente:

- El límite de horas de conducción para los conductores de vehículos de carga es de 11 horas continuas, después de 10 horas consecutivas de descanso;
- No puede conducir más allá de la 14ª hora consecutiva después de entrar en servicio;
- Los conductores pueden extender el límite máximo de conducción de 11 horas y la ventana de conducción de 14 horas hasta 2 horas cuando se encuentran condiciones de conducción adversas;
- Deben tomar un descanso de 30 minutos cuando hayan conducido durante un período de 8 horas acumulativas.
- No puede conducir después de 60/70 horas de servicio en 7/8 días consecutivos;
- Un conductor puede reiniciar un período de 7/8 días consecutivos después de tomar 34 o más horas consecutivas fuera de servicio.

Estas regulaciones al igual que en México, tienen como objetivo limitar la cantidad de tiempo dedicado a trabajar o conducir. De esta forma se busca mantener el bienestar público en carretera al reducir la fatiga en los conductores.

Prácticas Internacionales

Con respecto a los problemas ocasionados por la falta de estacionamiento [14] menciona que esto puede impactar negativamente en la seguridad de la carretera, la condición de la infraestructura, la seguridad pública y la calidad de vida. De acuerdo con [15], la adecuación de estacionamiento para camiones es crucial para que los conductores fatigados puedan descansar y cumplir con la restricción de horas de conducción. Desde este punto de vista, cuando un conductor alcanza el límite de horas de conducción permitido requiere de un espacio para estacionarse de forma segura, sin embargo, dada la poca disponibilidad de estos, se ven forzados a estacionarse en el acotamiento del camino. De esta forma se pueden generar problemas de seguridad vial que afectan tanto al conductor de la unidad como a todos los que circulen por ese tramo. Esta situación puede generar los siguientes problemas:

i) incrementar el riesgo de colisión; ii) dañar el pavimento no diseñado para soportar el peso de las unidades durante un periodo prolongado; y, iii) aumentar el riesgo de robo de carga u otros delitos [14].

A nivel de investigación se encuentran varios autores que tratan sobre la implantación y evaluación de paradores seguros y sistemas de apoyo para conductores. Desde esta perspectiva el Departamento de Transporte de Arizona propone dos soluciones a la falta de estacionamientos para camiones: i) brindar información relevante a los conductores; y, ii) mejorar la capacidad/existencia de estacionamientos actuales [14]. En este trabajo se analiza a profundidad los problemas de estacionamiento de camiones y se proponen una serie de recomendaciones. Entre algunas de las recomendaciones planteadas se encuentran el desarrollo de sistemas de información para los conductores, proyectos para aumentar la capacidad existente tanto de actores público, privados y en conjunto, la reserva de espacios de estacionamiento [14], [16]–[18]. En este sentido [19], plantea un estudio para estimar el alcance y la distribución geográfica de la oferta y la demanda de estacionamientos de camiones del Sistema Nacional de Carreteras (NHS, siglas en inglés). Dentro del modelo se consideraron i) longitud del tramo de carretera (km); ii) tráfico medio diario anual (vehículos por día); iii) porcentaje de tráfico diario compuesto por camiones comerciales; iv) límite de velocidad de la autopista o velocidad promedio de los camiones (kph). En este modelo, se consideraron el número de horas de conducción establecidas por ley, para establecer la falta u holgura de los espacios de estacionamiento. Los autores sugieren la elección de parámetros adecuados para el análisis de una región en particular. En [20] los autores calificaron un conjunto de áreas de descanso para camiones, con base en cuatro criterios: i) la distancia entre el conductor y el área de descanso; ii) costo diario por uso del espacio; iii) nivel de seguridad (las características del perímetro, el área de estacionamiento, la entrada/salida y los procedimientos del personal/administración); iv) nivel de confort (seguridad percibida) que ofrecen.

Tomando como base la revisión anterior de documentos existentes sobre paradores de autotransporte y desde una perspectiva metodológica, se pueden formular puntos importantes a tomar en cuenta. La mayoría de los documentos coinciden en:

- Se debe seleccionar una metodología relacionada con las características del objeto de estudio;
- Un análisis de demanda planificada puede ayudar a determinar las necesidades por región;
- Considerar los paradores existentes y responder a la demanda maximizando los recursos ya establecidos.

En este sentido, los autores coinciden en que la selección correcta de una metodología adecuada para el problema es crucial. Así, un diagnóstico apropiado del estado actual de

cumplimiento de la normativa y su tendencia, ayudará a determinar acciones futuras entre los involucrados.

Método

En este sentido se vuelve necesario realizar la trazabilidad de los recorridos. Así, se recomienda caracterizar los flujos por zonas a través de un estudio de trazabilidad y la medición de tiempos, con base en el procesamiento de datos masivos del monitoreo de vehículos.

De acuerdo con [21], existen diferentes tecnologías para la localización y trazabilidad a lo largo de la cadena de suministro, a continuación se presentan los mencionados por los autores. Aunque los sistemas de transporte inteligente (ITS, siglas en inglés) son ampliamente utilizados, normalmente se emplean para controlar el robo y no se explotan sus capacidades para la gestión de flota.

Por otra parte está la tecnología de identificadores de radio frecuencia (RFID), las cuales emiten señales de identificación a antenas estratégicamente posicionadas para este propósito [21]. Existen ejemplos de su uso en vehículos de carga y el monitoreo de ubicaciones clave [22]. De igual forma, se puede mencionar el uso de “*contenedores inteligentes*”. Estos contenedores se basan en el internet de las cosas (IoT, siglas en inglés) para el seguimiento en tiempo real [23].

De acuerdo con [21], una de las mayores desventajas de las tecnologías mencionadas reside en su costo. Algunas requieren de infraestructura de apoyo y dispositivos especializados que elevan los costos de implementación. Por otra parte, los sistemas de monitoreo GPS, actualmente ya en operación, no representan un costo extra y se cuenta con valiosa información disponible para su análisis. La información GPS ha sido utilizada en diferentes estudios para el seguimiento de unidades de carga [21], [24], [25]. Así, se propone la utilización de registros GPS para el seguimiento y trazabilidad de los tiempos de conducción en el presente trabajo.

Desde una perspectiva práctica y normativa, las horas de conducción y descanso en el autotransporte están reguladas por la NOM 087. Sin embargo, la realidad operativa apunta a una escasez de paradores que apoyen su cumplimiento. Además, la falta de un plan que apoye la localización de paradores basados en datos, lo dificulta aún más.

En este sentido, se observan similitudes en ambas regulaciones consultadas. Es importante puntualizar la relación comercial entre México y Estados Unidos, con el objetivo de entender estas similitudes. Como principal socio comercial de México, Estados Unidos aportó el 38% del total de la Inversión Extranjera Directa (IED) al cierre del 2023, con un total de \$13,641 millones

de dólares [26]. Así, Estados Unidos se posiciona como el país con mayor aporte al IED. De esta forma dado que el comercio es constante entre ambos países se puede entender esta similitud en las regulaciones analizadas. En ambas regulaciones se establece un tiempo máximo de 14 horas, así como la obligatoriedad de llevar una bitácora de operación, y, además, se decretan descansos de 30 minutos para los conductores.

Por otra parte, con el objetivo de desarrollar un análisis práctico se propone una metodología que establezca un panorama actual de las horas de conducción y descanso en el auto-transporte y su relación al cumplimiento de la norma. Este proceso se describe y desarrolla en las siguientes secciones. Así, con una base sólida, se busca desarrollar lineamientos que apoyen a la toma de decisiones en la seguridad del autotransporte.

Metodología

El proceso de análisis consistió en tres partes principales, estas son: i) recolección de la información; ii) análisis de datos para el diagnóstico del cumplimiento de la NOM-087 en México; e iii) interpretación de los resultados.

Recolección de la información

La primera parte consistió en la identificación de fuentes de información oficiales y vigentes sobre la localización de los paradores para el autotransporte de carga en México. Sin embargo, se consideraron también los *“paradores no oficiales”*, como son las estaciones de servicio. Lo anterior, con el objetivo de mejorar el estudio incluyendo información generada por los operadores en la práctica, y, además, contribuir con este conocimiento a los tomadores de decisiones del autotransporte.

Con este respecto se consultaron las siguientes fuentes: i) paradores establecidos por la Cámara Nacional del Autotransporte de Carga (CANACAR); ii) paradores de la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST); y iii) estaciones de servicio del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) (ver Tabla II). Con esta información se elaboró una lista de paradores y estaciones de servicio a nivel nacional.

Tal como se sugiere en [14], se clasificaron los paradores existentes en: paradores reconocidos por la DGST y CANACAR, [27]; así como las unidades económicas clasificadas como *“Comercio al por menor de gasolina y diésel”* de acuerdo con el DENUE [28]. La importancia de esta información radica en la posibilidad de determinar las áreas de descanso con potencial para atender al autotransporte de carga, más allá de los ya identificados.

Las bases de datos cuentan con la georreferenciación de sus elementos. De esta forma se puede ubicar cada registro en un GIS para su análisis [29]. El mapa de los paradores identificados por la CANACAR y la DGST se muestran en la Figura 1. No se incluye a las estaciones de servicio del DENUE dado que, por su gran número, únicamente se observaría una masa de puntos por todo el territorio mexicano.

Además, se contó con tres muestras de datos GPS de vehículos de carga que operan a nivel nacional. Estas muestras comprenden los años 2017 a 2021, sin incluir el año 2019. La empresa E3 es la que cuenta con más vehículos y con mayor número de puntos en su muestra, con un total de 13 278 310 registros. La empresa E2 cuenta con 192 vehículos y 5 808 473 puntos GPS. Por último, la empresa E1 cuenta con 17 vehículos y poco más de tres millones de registros (ver Tabla 3). (ver Tabla 2).

Tabla 1
Paradores y estaciones de servicio identificados

Fuente	No. registros
CANACAR	455
DGST	370
DENUE	13,585

Tabla 2
Resumen de información GPS por empresa

Empresa	No. Puntos GPS	No. vehículos
E1	3,499,109	17
E2	5,808,473	192
E3	13,278,310	376

Análisis de datos

Para el análisis de datos se utilizó el procedimiento descrito en [21]. Previo al análisis se requiere de la limpieza de los datos. Se debe realizar su depuración para detectar, corregir o eliminar registros erróneos o incompletos. Por otra parte, su procesamiento se realizó de acuerdo con el mayor nivel de agregación posible del conjunto de datos.

Para determinar las áreas donde se detienen los vehículos de cada empresa, se tomaron los puntos GPS con velocidad igual a cero y se agruparon respecto a áreas de un kilómetro cuadrado. Por cada kilómetro cuadrado se determinó el número de puntos GPS, el número de

días, número promedio de puntos por día y número de vehículos diferentes. Para descartar paradas ocasionadas por semáforos o debido al tráfico, se tomaron las áreas con: doce puntos por día y más de un día de registros; o al menos un parador o estación de servicio en el área; o con visitas de más de diez vehículos diferentes y un promedio de dos puntos por día.

No se toman únicamente los paradores o estaciones de servicio como referencia de áreas de descanso, dado que en las muestras se observaron otras con una aglomeración de puntos importante. En estas otras áreas se observan negocios de comida, casetas de cobro o retenes, entre otros.

Una vez que se cuenta con la lista de posibles paradas por empresa, se filtran aquellos puntos GPS que caen dentro de estas áreas y presentan una velocidad de cero kilómetros por hora. Por cada vehículo de cada empresa, se toman las parejas de puntos de inicio y fin de la visita por cada área identificada como posible parada. Con las fechas y horas de estos puntos se determinan los tiempos de estadía y los tiempos de conducción.

Con la información anterior se realizó un análisis estadístico de los tiempos de viaje y estadía entre las distintas áreas identificadas para determinar: tiempos promedio, cuartiles, mínimo, máximos, entre otras estadísticas básicas.

Interpretación de resultados

De esta forma se realizó un análisis de datos para diagnosticar el cumplimiento de la NOM-087. A través de gráficas de caja se realiza una discusión del comportamiento de los vehículos de carga durante su operación diaria, respecto a: los tiempos en que se encuentran en movimiento por día; los tiempos detenidos en paradores y estaciones de servicio; y los tiempos de viaje entre cada parada. Si es verdad que únicamente se puede saber si el vehículo estuvo en movimiento, suponiendo que solo un operador estuvo manejando cada vehículo por día, los tiempos deben cumplir que: por cada 24 horas el vehículo solo puede estar en movimiento 14 horas; aproximadamente cada 5 horas debe presentarse una parada; y que cada parada debe ser de aproximadamente 30 minutos o de 8 horas.

También es cierto que se debe considerar que los tiempos de las paradas y los viajes dependen de muchos factores, sin embargo, se considera que debe existir un cierto grado de orden en los patrones observados durante la operación de los vehículos a causa del cumplimiento de la NOM-087-SCT y es lo que se esperaba encontrar en caso de existir.

Resultados

En la Tabla 3 se muestra la estadística básica de los tiempos de conducción al día por empresa. Como se muestra, la empresa E2 tiene el mayor promedio con 7.62 horas de conducción por día, seguido de la empresa E1 con 6.59 horas y por último la empresa E3 con 5.90 horas en promedio.

Tabla 3
Tiempos de conducción por día (horas)

	E1	E2	E3
Total	3170	42102	67266
Media	6.59	7.62	5.90
Desv. Est.	5.06	4.39	4.16
Min.	0.10	0.10	0.08
Perc. 25%	2.07	4.28	2.54
Perc. 50%	5.58	7.32	5.27
Perc. 75%	10.22	10.58	8.77
Max.	22.30	20.03	18.21



Figura 1. Paraderos identificados por la CANACAR y la DGST

La Figura 2, muestra la distribución de los tiempos en las gráficas de caja de las tres empresas. La empresa E1 presenta tiempos de viaje que van de 0.10 horas a 22.30 horas. La empresa E2 tiene un valor máximo de 20.03 horas y la empresa E3 un tiempo máximo de 18.21 horas. Sin embargo, el 75% de los tiempos de las tres empresas se encuentra por debajo de las 11 horas. También es claro que existen casos donde los vehículos fueron manejados por más de las 14 horas permitidas. Es importante recalcar que los datos GPS únicamente muestran el movimiento de los vehículos y se desconoce totalmente si un solo operador lo maneja todo el tiempo.

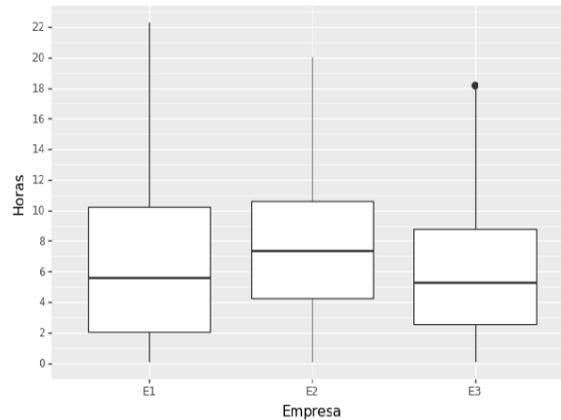


Figura 2. Tiempos de conducción por día y empresa.

En la Tabla 4 se presenta la estadística básica de los tiempos de estadía en las estaciones de servicio que no son consideradas por la DGST o la CANACAR, es decir, son las estaciones de servicio identificadas en el DENUÉ que no han sido contempladas como paradores. Los tiempos medios de estadía no superan las dos horas, siendo el tiempo medio de la empresa E1 de 1.39 horas, para la empresa E2 se tienen 1.82 horas y para la E3 1.95 horas.

Tabla 4

Tiempos de estadía en estaciones de servicio no consideradas como paradores

	E1	E2	E3
Total	3787	35212	71758
Media	1.39	1.82	1.95
Desv. Est.	1.29	1.83	1.94
Min.	0.33	0.33	0.33
Perc. 25%	0.52	0.60	0.59
Perc. 50%	0.87	1.10	1.16
Perc. 75%	1.73	2.28	2.52
Max.	6.05	9.28	8.76

En la Figura 3 se muestra la distribución de los tiempos de estadía de las estaciones de servicio no consideradas como paradores. Los valores máximos no superan las 10 horas, siendo el menor tiempo máximo el de la empresa E1 con 6.05 horas, seguido de la empresa E3 con 8.76 horas y por último la empresa E2 con 9.28 horas. El 75% de los tiempos de estadía en los tres casos no superan las tres horas.

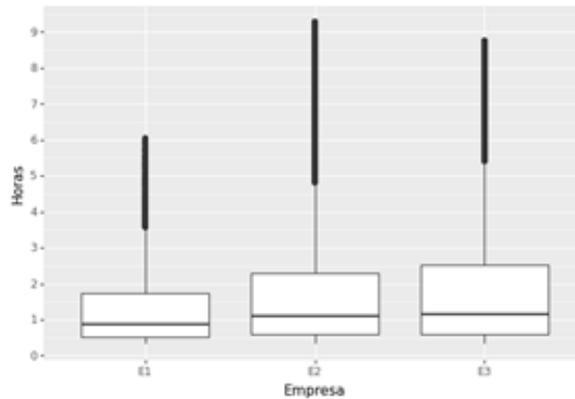


Figura 3. Tiempos de estadía en estaciones de servicio no consideradas como paradores

La Tabla 5 muestra la estadística básica de los tiempos de estadía en los paradores propuestos por la CANACAR y la DGST. La media de los tiempos de la empresa E2 es de 1.09 horas, seguido por la empresa E1 con 1.51 horas y por último la empresa E3 con 2.78 horas.

Tabla 5

Tiempos de estadía en paradores propuestos por la CANACAR y DGST

	E1	E2	E3
Total	1,477	15,998	29,491
Media	1.51	1.09	2.78
Desv. Est.	1.27	0.64	3.05
Min.	0.33	0.33	0.33
Perc. 25%	0.55	0.58	0.63
Perc. 50%	1.05	0.95	1.40
Perc. 75%	2.05	1.42	3.77
Max.	6.08	3.13	12.82

La distribución de los tiempos de estadía en los paradores identificados se presenta en la Figura 4, donde la empresa E3 tiene el tiempo máximo de 12.82 horas, seguido de la empresa E1 con 6.08 horas y la empresa E2 con 3.13 horas. También se observa que el 75% de los tiempos de estadía de la empresa E3 no supera las 3.77 horas, mientras que en el caso de la empresa E1 no superan las 2.05 horas y para la empresa E2 se encuentran por debajo de las 1.42 horas.

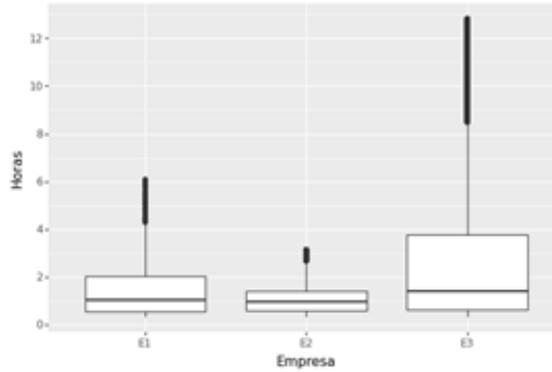


Figura 4. Tiempos de estadía en paradores de CANACAR o la DGST.

Al comparar las gráficas de las Figuras 3 y 4, lo primero que llama la atención es que únicamente la empresa E3 registra tiempos mayores de estadía en los paradores oficiales respecto a los no oficiales (estaciones de servicio no incluidas). En caso contrario, la empresa E2 muestra menores tiempos de estadía en los paradores oficiales, respecto a los no oficiales. Por su lado, los vehículos de la empresa E1 muestran un comportamiento consistente en ambos casos. Es necesario realizar otras pruebas estadísticas para aceptar o rechazar estas observaciones, como una prueba de medias y varianza, así como la clasificación de rutas similares en tiempo.

Por otro lado, en la Tabla 6 se presentan las horas de viaje entre paradas de los vehículos de carga durante recorridos de más de 10 kilómetros. Es importante mencionar que las áreas visitadas no son necesariamente paradores o estaciones de servicio, por lo que no necesariamente son áreas de descanso.

Otra consideración que se tomó en cuenta es que únicamente se toman paradas de más de 20 minutos, es decir, cabe la posibilidad de que durante estos tiempos de viaje exista una parada de menos de 20 minutos. El menor tiempo medio es de la empresa E1 con 2.89 horas, seguida por la empresa E3 con 3.18 horas y con la mayor media se encuentra la empresa E2 con 4.20 horas.

Tabla 6
Tiempo de conducción entre paradas, viajes de más de 10km

	E1	E2	E3
Total	6627	89229	124489
Media	2.89	4.20	3.18
Desv. Est.	2.48	3.00	2.30
Min.	0.20	0.22	0.17
Perc. 25%	0.83	1.58	1.37
Perc. 50%	2.06	3.67	2.62
Perc. 75%	4.28	5.97	4.38
Max.	11.03	13.80	10.26

Dos de las empresas presentan tiempos de viaje menores a 5 horas en al menos el 75% de sus tiempos, únicamente la empresa E2 presenta un cuartil Q3 mayor, de 5.97 horas (Ver Figura 5). Esto es importante dado que 5 horas es el tiempo máximo de conducción antes de cada descanso de 30 minutos, como se indica en la norma mexicana, es decir, alrededor del 25% de los viajes superan el límite permitido. Además, los tiempos máximos de conducción son de 11.03 horas para la empresa E1, 13.80 horas para la empresa E2 y 10.26 horas para la empresa E3. Estos tiempos se encuentran cercanos al tiempo límite de conducción por día que establece la NOM-087-SCT y no presentaron descansos de al menos 30 minutos.

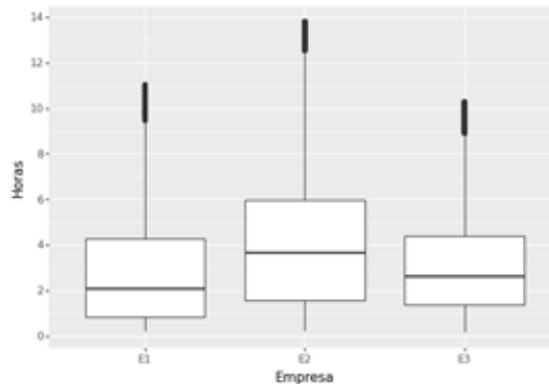


Figura 5. Tiempo de conducción entre paradas, viajes de más de 10km

En la Figura 6 se presenta un mapa con los puntos de espera identificados en la muestra y que se relacionan con algún parador o estación de servicio de las tres fuentes de datos consideradas (DGST, CANACAR o DENUÉ). Por cada área se tomaron todas las visitas mayores a 20 minutos y se calculó el tiempo promedio. En el mapa se muestran únicamente aquellas áreas con tiempos promedio mayores a 30 minutos y con al menos 50 visitas. En el mapa se pueden observar estaciones de servicio con más de ocho horas de estadía en promedio en la costa del pacífico, en Yucatán y en Baja California, sin embargo, también quedan fuera de la vista estaciones en Puebla, el Edo. De México y Jalisco. El mayor promedio de estadía es de 14.43 horas, además de que el 95% de las estaciones presenta un promedio menor a las 5.85 horas y el 50% menos de 2.38 horas.



Figura 6. Tiempos promedio de estadía en los puntos identificados en la muestra GPS



Figura 7. Estaciones de servicio donde el 25% de los tiempos es mayor a 7 horas y un mínimo de 50 visitas.

En la Figura 7 se muestran las estaciones de servicio que presentan un mínimo de 50 visitas en las muestras y demás, el 25% de sus tiempos de estadía son mayores a siete horas. Estas estaciones se pueden considerar como idóneas para descansos más largos después de manejar 14 horas, sin embargo, aún hace falta revisar a detalle sus condiciones y determinar si cuentan con las condiciones ideales para la seguridad de los transportistas. También falta revisar que no se trate de estaciones de servicio cercanas a alguna base o empresa donde realmente se estacionan los vehículos de carga de las muestras.

De esta forma, desde un punto de vista práctico, se establecieron las bases metodológicas para el análisis del cumplimiento de los lineamientos en horas de conducción y descanso. Hasta el conocimiento de los autores en México no se cuenta con procedimientos para este propósito. Este análisis es de gran ayuda para la toma de decisiones en materia de regulación y cumplimiento de la NOM 087. Además, la contribución científica radica en el procedimiento descrito para el análisis de datos, la definición de las áreas donde se estacionan los vehículos de carga y el análisis de consistencia de los datos.

Con base a estos resultados y lo encontrado en la sección de antecedentes, se puede observar un panorama general y actual de la operación y cumplimiento de la normativa de horas de conducción. En este sentido, algunas muestras obtenidas para analizar las horas de conducción superan el límite de 5 horas continuas establecidos por la NOM 087. De igual forma, en algunos casos, las muestras se encuentran muy cercanas al límite de 14 horas consecutivas de conducción. Estos resultados pueden servir como una base sólida para medir el cumplimiento de la normativa. Sin embargo, en este respecto es imperativo realizar una investigación exhaustiva, con una mayor cantidad de datos y muestras de diferentes empresas, para establecer conclusiones sólidas sobre el tema. Así, se presentó un estudio exploratorio para diagnosticar el estado actual de la implementación de la NOM-087.

Conclusiones

La existencia de normativa que regule los tiempos de conducción y descanso es imprescindible para reducir la siniestralidad carretera y mejorar las condiciones de trabajo de los conductores de vehículos de carga.

Sin embargo, la existencia de una norma en sí misma es apenas el primer paso, ya que sin infraestructura adecuada que proporcione a los conductores lugares seguros para descansar al cubrir las horas de recorrido permitidas; el cumplimiento de dicha normativa será inviable, corriendo el riesgo de convertirse en letra muerta, desperdiciando la oportunidad que presenta dicha propuesta.

Pretender que los conductores se detengan al lado del camino para cumplir con los descansos señalados implicaría un alto riesgo para ellos; ya que esto los volvería blancos fáciles de los grupos criminales dedicados al robo de carga.

Con base en el análisis estadístico de los tiempos de conducción, se determinaron algunas estaciones de servicio con potencial para ser incluidas en los “paradores oficiales” (Figura 6). Es verdad que persisten interrogantes sobre las condiciones de estadía dentro de estas áreas identificadas en la muestra, sin embargo, estos resultados son de ayuda para reducir esfuerzos en la tarea de establecer áreas de descanso ideales para los operadores de auto-transporte.

También, con la información analizada de las tres empresas se encontró que las horas de conducción entre descansos sobrepasan los tiempos establecidos en la NOM 087. Además, se puede observar que los tiempos de estadía presentan un rango amplio de variación, dejando ver que no existe un control claro para los descansos de los operadores.

En cuanto a la conducción máxima de 14 horas cada 24 horas, se observan casos donde los vehículos se estuvieron moviendo más allá de dicho límite. Aunque es cierto que no se puede afirmar que fue un solo operador el que estuvo al volante todo el tiempo, esto abre la puerta a sugerir que es necesario realizar un monitoreo más exhaustivo de las prácticas diarias de operación que tienen las empresas de transporte de carga por carretera con sus operadores.

Por otra parte, con la revisión de la literatura se logró identificar las consideraciones metodológicas para realizar una evaluación que permita ubicar paradores que cumplan con ciertas restricciones de acuerdo a la NOM 087. Se encontró que se deben considerar aspectos como:

- La distancia entre el conductor y el área de descanso;
- Costo diario por uso del espacio;
- Nivel de seguridad (las características del perímetro, el área de estacionamiento, la entrada/salida y los procedimientos del personal/administración);
- Nivel de confort (seguridad percibida) que ofrecen.
- Longitud de los tramos de carretera (km);
- Tráfico medio diario anual (vehículos por día);
- Porcentaje de tráfico diario compuesto por camiones comerciales;
- Límite de velocidad de la autopista o velocidad promedio de los camiones (kph)

Además, desde un punto de vista práctico-normativo, a través de un análisis estadístico se encontró que el número de horas de conducción de la muestra es mayor con respecto a las horas de conducción permitida de acuerdo con la norma. Además, los tiempos de estadía

en “estaciones de servicio”, es mayor que en los paradores reconocidos por las instancias oficiales.

Como se ha mencionado a lo largo del presente documento, existen ciertas limitaciones al trabajo relacionadas con la calidad y cantidad de la información analizada, como la falta de un registro que permita saber la existencia de un posible segundo conductor dentro de la unidad. Tal y como se mencionó anteriormente la muestra corresponde a tres empresas de autotransporte, con años que comprenden hasta el 2021. Dadas estas características, se cataloga como una muestra de conveniencia y no se considera representativa del movimiento de carga en su totalidad.

Partiendo de estos hallazgos se propone como trabajo futuro el planteamiento de un método que permita evaluar la infraestructura de estaciones de servicio para establecer un conjunto de paradores que cumplan con los requerimientos de la NOM 087. Con base al método propuesto se podrá apoyar la toma de decisiones en el desarrollo de infraestructura de paradores a nivel nacional que apoyen el cumplimiento de la normativa vigente. La propuesta metodológica se describe a continuación.

Propuesta para crear una red de paradores

Con base en la revisión bibliográfica, el estudio de casos internacionales y el análisis estadístico de empresas transportistas, se confirma la importancia de regular los tiempos de conducción. Aunque la Norma 087 es un importante avance, uno de los principales retos para cumplir con la normativa es contar con una oferta suficiente y adecuada de paradores, así como, monitorear el cumplimiento de esta.

Por ello se propone que el desarrollo de infraestructura de paradores sea tratado desde una perspectiva de red que cubra el territorio nacional considerando en su configuración el cumplimiento de la NOM-087. Dicha estrategia incluye los puntos i) Diagnóstico general del sistema; ii) Análisis de la demanda y iii) Determinación de requerimientos.

Diagnóstico general del sistema

La primera parte del desarrollo consistirá en el análisis del estado actual de la capacidad del conjunto existente de paradores.

La importancia de este diagnóstico radica en conocer la oferta actual disponible, esto implica identificar los paradores existentes en operación, tanto aquellos paradores oficiales reconocidos por SICT, tal como se menciona en [14], como aquellos denominados “paradores informales”. Estos sitios, aunque no son reconocidos como paradores oficiales pueden

arrojar información útil al estudio sobre el comportamiento real de las unidades de auto-transporte. Para todos los paradores identificados, se requiere conocer la infraestructura que comprenden y los servicios que proporcionan. También es deseable contar con la geo referenciación de los paradores, de lo contrario sería necesario registrar su ubicación a fin de poder localizarlos sobre la red carretera. Esto de acuerdo con [17]. El diagnóstico general del sistema constituye un elemento central de la propuesta. En este sentido, se propone el análisis de la oferta y la capacidad instalada.

Análisis de la demanda

En este punto se propone emplear la información existente de velocidades por tramo carretero y los datos origen-destino registrados en el complemento carta porte, para modelar los viajes y tiempos de traslado e identificar las zonas en las cuales existe la demanda de áreas de descanso que permitan cumplir con lo estipulado en la Nom-087.

Determinación de requerimientos

Una vez que se tiene identificada la oferta y la demanda, será posible identificar aquellas zonas donde se requiere instalar un nuevo parador, y aquellas que, si bien cuentan con infraestructura, esta no es suficiente para cubrir la demanda y por lo tanto se debe llevar a cabo un proyecto de ampliación. De esta manera se estaría conformando un plan de creación de nuevos paradores y un plan de ampliación de paradores existentes, empleando una visión de red que garantice la cobertura en toda la red carretera y se adapte a la demanda actual.

Referencias

- [1] Subsecretaría de Transporte, "Estadística básica del autotransporte federal 2023," 2023. [Online]. Available: https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGAF/EST_BASICA/EST_BASICA_2023/Estadística_Básica_del_Autotransporte_Federal_2023.pdf
- [2] Secretaría de Economía, "Inversión extranjera directa Tercer Trimestre 2023," 2023. doi: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/869698/20231103_Presentaci_n_IED_3T-2023_versi_n_p_blica_.pdf.
- [3] SCT, IMT, and INEGI, "Red nacional de caminos," Acciones y Programas. Accessed: May 17, 2024. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/imt/acciones-y-programas/red-nacional-de-caminos>

- [4] ATRI, "Critical issues in the trucking industry – 2023," vol. 22203, no. October, 2023, [Online]. Available: <https://truckingresearch.org/wp-content/uploads/2023/10/ATRI-Top-Industry-Issues-2023.pdf>
- [5] DGST, "Manual de diseño de accesos a instalaciones de servicios e integración de paradores en carreteras 2018", vol. 4, no. 1. 2018. [Online]. Available: https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manual_de_Paradores/PARADORES.pdf
- [6] ANTP, "Estadísticas de robo al transporte de carga 2023," pp. 1–13, 2023, [Online]. Available: https://www.antp.org.mx/archivos/indicadores/mayo2023/SeguridadPatrimonial_Mayo2023.pdf
- [7] Overhaul, "Reporte de robo de carga en México, otoño 2023," pp. 1–7, 2023, [Online]. Available: https://over-haul.com/wp-content/uploads/2023/08/MX-Q2-Report-2023_SPANISH.pdf
- [8] V. J. Soria Anguiano, A. C. Cuevas Colunga, M. E. Silva Rivera, J. M. Chavarría Vega, M. Cadengo Ramírez, and A. Mendoza Díaz, "Siniestralidad vial por conducción bajo efectos de alcohol y drogas en la Red Carretera Federal," 2022. [Online]. Available: <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt697.pdf>
- [9] L. Montoro and F. Toledo, "El factor humano en la conducción de trenes: manual de conducción segura. Valencia", España: Fundación INTRAS Editorial, 1996.
- [10] Kris Van Cleave, "Lack of parking for semi-trucks can have fatal consequences," CBS News. Accessed: Apr. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.cbsnews.com/news/truck-parking-shortage-fatal-accidents/#:~:text=The National Transportation Safety Board,ramps — sometimes with fatal consequences>
- [11] SCIT, "NOM-087-SCT-2-2017." SCIT, pp. 5–10, 2018. [Online]. Available: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5529381&fecha=28/06/2018#gsc.tab=0
- [12] Gobierno de México, "Sabes cómo te benefician las Normas Oficiales Mexicanas." Accessed: Apr. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/sabes-como-te-benefician-las-normas-oficiales-mexicanas?state=published#:~:text=Las Normas Oficiales Mexicanas establecen, personas facultadas que lo harán.>
- [13] FMCSA, "Resumen de las regulaciones de horas de servicio." Accessed: May 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.fmcsa.dot.gov/international-programs/mexico/resumen-de-las-regulaciones-de-horas-de-servicio>

- [14] ADOT, "Arizona truck parking supply, demand, needs analysis working paper 1: truck parking literature review and best practices arizona department of transportation cpcs opinions," Arizona, 2017. [Online]. Available: <https://azdot.gov/sites/default/files/2019/08/WP1-Truck-Parking-Literature-Review-and-Best-Practices.pdf>
- [15] Atlanta Regional Commission, "Atlanta regional truck parking assessment study draft final report," 2018. [Online]. Available: <https://atlantaregional.org/wp-content/uploads/draft-atlanta-regional-truck-parking-assessment-study-report.pdf>
- [16] ADOT, "Arizona truck parking supply, demand, needs analysis working paper 2: identification of truck parking demand factors," Arizona, 2018. [Online]. Available: <https://azdot.gov/sites/default/files/2019/08/WP2-Truck-Parking-Demand-Factors.pdf>
- [17] ADOT, "Arizona truck parking supply , demand , needs analysis working paper 3: truck parking supply, demand, and gaps," Arizona, 2018. [Online]. Available: <https://azdot.gov/sites/default/files/2019/08/wp3-truck-parking-supply-demand-and-gaps.pdf>
- [18] ADOT, "Arizona truck parking study working paper 4: truck parking needs and solutions," Arizona, 4, 2019. [Online]. Available: <https://azdot.gov/sites/default/files/2019/08/wp4-truck-parking-needs-and-solutions.pdf>
- [19] K. K. Pécheux, K. J. Chen, J. Farbry, and S. A. Fleger, "Model development for national assessment of commercial vehicle parking," 2002. [Online]. Available: <https://cdn.atlantaregional.org/wp-content/uploads/final-report-atlanta-regional-truck-parking-assessment-study-apr-2018.pdf>
- [20] M. P. Kouta and Y. J. Stephanedes, "Personalised safe and secure truck parking area selection for C-ITS motorway services," *Transp. Res. Procedia*, vol. 72, no. 2022, pp. 3340–3346, 2023, doi: [10.1016/j.trpro.2023.11.792](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.792).
- [21] J. Piña-Barcenas, M. G. Cedillo-Campos, and C. Martner-Peyrelongue, "Análisis de los flujos del transporte de carga dentro del puerto de Veracruz con base en el procesamiento de datos masivos," SanFandila, 2022. Accessed: Jun. 02, 2023. [Online]. Available: <https://imt.mx/descarga-archivo.html?!=YXJjaGl2b3MvUHVibGljYWNpb25lcy9Qd-WJsaWNhY2lvdIRIY25pY2EvcHQ3MDcucGRm>
- [22] G. Febré and G. Pérez, "Intelligent transport systems in Latin American sea port logistics," 2012. [Online]. Available: <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/36248>
- [23] S. Wattanakul, S. Henry, L. Bentaha, N. Reeveerakul, and Y. Ouzrout, "Improvement of

- the containerized logistics performance using the unitary traceability of smart logistics units," *Springer Int. Publ.*, no. Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0, pp. 410–419, 2018, [Online]. Available: [10.1007/978-3-000030-01614-2_38](https://doi.org/10.1007/978-3-000030-01614-2_38)
- [24] C. M. Pérez-González, J. Mora-Vargas, J. Piña-Barcenas, and M. G. Cedillo-Campos, "A method to improve the logistics value of transportation infrastructure in peripheral markets," Available SSRN <https://ssrn.com/abstract=4545012> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4545012>, p. 60, 2023, doi: Pérez-González, Carlos Mario and Mora-Vargas, Jaime and Piña-Barcenas, Jared and Cedillo-Campos, Miguel Gaston, A method to improve the logistics value of transportation infrastructure in peripheral markets (August 15, 2023). Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4545012> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4545012>.
- [25] M. G. Cedillo-Campos, C. M. Pérez-González, J. Piña-Barcena, and E. Moreno-Quintero, "Measurement of travel time reliability of road transportation using GPS data: A freight fluidity approach," *Transp. Res. Part A*, vol. 130, pp. 240–288, 2019, doi: [10.1016/j.tra.2019.09.018](https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.09.018).
- [26] Subsecretaría de Comercio Exterior, "Inversión extranjera directa cierre de 2023," 2024. [Online]. Available: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/892983/20240215_Presentaci_n_IED_4T-2023_versi_n_p_blica_VF_1_.pdf
- [27] SICT, "Paradores de servicio." Accessed: May 08, 2024. [Online]. Available: <https://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/paradores-de-servicio/>
- [28] INEGI, "Directorio estadístico nacional de unidades económicas." Accessed: May 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/default.aspx>
- [29] M. Andrades Rodríguez *et al.*, *Enseñanza de sistemas de información geográfica (sig) en estudios de grado y posgrado en la universidad de la rioja*. Universidad de La Rioja, 2020.

CAPÍTULO 7

Método de medición del índice de accidentabilidad de los operadores del autotransporte de carga

*José Elías Jiménez Sánchez
Elizabeth de la Torre Romero
José Carlos Martínez Vázquez
Carlos Daniel Martner Peyrelongue*

Resumen— En las últimas décadas, diversos autores han investigado la influencia de los rasgos de personalidad y las actitudes de los operadores para predecir el nivel de riesgo de accidentabilidad en la conducción de camiones de carga. Sin embargo, hasta donde se sabe, ninguno ha combinado la personalidad con el nivel de satisfacción de los operadores. En términos generales, los estudios revisados consideraran los factores de personalidad como únicos elementos que influyen en la propensión de accidentes, sin embargo, la situación económica del operador, su estilo de vida, nivel salarial, sus compromisos familiares, el gusto de ser operador, así como el nivel de bienestar en la empresa donde labora, son algunos de los factores que pueden potenciar la propensión a la accidentabilidad. En tal virtud, la presente investigación se llevó a cabo mediante la aplicación de dos cuestionarios estructurados a 389 operadores de dos empresas del sector autotransporte de carga, cuyo objetivo se enfocó a determinar el índice de accidentabilidad de los operadores con base en las variables antes mencionadas con lo cual se busca ayudar a las empresas transportistas a monitorear y mitigar los impactos de posibles accidentes.

Palabras Clave—rasgos de personalidad, satisfacción personal, autotransporte de carga, riesgo de accidentabilidad, índice de accidentabilidad.

Introducción

En términos generales, las causas registradas para los accidentes de los operadores del autotransporte federal de carga suelen ser diversas; típicamente se clasifican dentro de los siguientes factores: el humano, el climático-infraestructura y el mecánico. De acuerdo con el Instituto Mexicano del Transporte en 2021, 71.2% de las causas de accidentes son atribuibles al operador; 10.5%, a la infraestructura; 4.9%, a agentes naturales; y 13.3%, fueron imputadas al vehículo. (Cuevas, *et. al.* 2022).

De acuerdo con estas cifras, el factor humano es la causa principal de los accidentes. ¿Pero qué sucede en el ser humano? ¿Por qué falla tanto? ¿Qué lo hace fallar? De acuerdo con Briones (2017) "(...) los trabajadores del volante se encuentran en condiciones laborales precarias, con bajos ingresos, largas jornadas laborales, sin protección social y en situaciones de gran exigencia física y mental, que determina su perfil patológico (enfermedades)". Ciertamente, estas condiciones de trabajo pueden ser factores que alteran las habilidades y destrezas del operador y, por tanto, causas de la accidentabilidad. Si a las condiciones laborales se agregan los defectos de integración de la cadena logística, que provocan largos tiempos de espera para cargar y descargar en centros de distribución, con operadores a veces sin comer, sin dormir bien, sin descansar, aunado al maltrato y la mala paga, se prevé que los operadores están sujetos a presentar un comportamiento anormal de conducción potenciando el riesgo de accidentabilidad, debido a los rasgos de su personalidad y al nivel de satisfacción personal.

Si bien es cierto que se busca mitigar las causas que son fuente de accidentes, tales como: el exceso de velocidad con la implementación de dispositivos especiales; el uso de sustancias prohibidas, que se reduce a mayores controles de supervisión; la fatiga, con mejores esquemas de gestión, entre otras, se prevé que las causas inherentes a la personalidad y la satisfacción del operador no han sido lo suficientemente abordadas para aminorar la accidentabilidad. Por ejemplo, la condición del operador relacionada con los problemas de control de la ira, el desacato a las reglas, pensamiento aventurero, imaginativo, aprensivo, y en general el control de las emociones, como rasgos de su personalidad, no han sido abordado con la seriedad necesaria para la reducción del riesgo, como tampoco los tópicos relacionados con su satisfacción personal, como son, el nivel salarial, las condiciones laborales, deudas, vivienda, esparcimiento, realización, entre otros. De acuerdo Ahmer, *et. al.* (2022) la personalidad es un factor que incide de manera determinante en la siniestralidad registrada para los operadores. Afirma que las emociones de los operadores se encuentran entre los principales contribuyentes a los comportamientos de conducción peligrosa, y si a esto se le agrega su nivel de insatisfacción o preocupación por cuestiones socioeconómicas, es fácil deducir que el riesgo de accidentabilidad puede potenciarse.

Por todo lo anterior, resulta interesante conocer, cómo le afecta a su estado de ánimo que

el operador trabaje dentro de una cadena de suministro descoordinada, que su nivel de ingreso no le alcance para cubrir sus necesidades, o cómo le afectan los problemas familiares que carga, su conducta, etc., pero, sobre todo, conocer ¿Qué tanto, estos factores lo ponen en riesgo de sufrir un accidente.

Es importante recordar que, de los 15,020 siniestros registrados en 2021 sobre la red carretera nacional, participaron 23,986 vehículos, de éstos, 6,487 fueron camiones de carga entre los que se incluyen 3,185 articulados, 2,089 camiones unitarios, y 1,213 doble articulados.

Debido al aumento de la competencia, la clave de una empresa de autotransporte de carga es su capacidad de proporcionar servicios de alto nivel que demandan los clientes. La satisfacción total del cliente es un objetivo de todas las empresas, pero como todos los procesos, para lograrlo es necesario que todos los componentes estén perfectamente definidos y sincronizados para alcanzar el objetivo planeado. Los operadores son una de las partes que integran este proceso, por lo que deben estar capacitados, comprometidos y satisfechos con las actividades que realizan y con el ambiente laboral donde se desenvuelven. En general, los aspectos físicos y psicológicos de los operadores son condición necesaria para desempeñar mejor su función. Específicamente, el estudio de los rasgos de personalidad y satisfacción personal de los operadores permitirá conocer los elementos suficientes para dictar normas de seguridad para cumplir con el nivel de servicio que demandan los clientes. Como resultado, pueden ser una fuente de ventajas competitivas en la reducción de accidentes.

Entender por qué se produce el error humano es sumamente importante en la búsqueda hacia las formas de prevenir los accidentes y las asociadas a lesiones y muertes. De acuerdo con Soria, et. al. (2023), "(...) se ha encontrado que en la mayoría de los casos la responsabilidad de éstos recae en el comportamiento humano (conductor)". Por su parte Páez, et. al. (2019) señalan que "(...) el cansancio mental, como el cansancio físico, provoca un adormecimiento en el conductor y contribuye en un factor que representa a los accidentes al menos en el 24 % de ellos". Esto implica en algún momento la falta de atención del operador tales como: somnoliento, o de otro tipo, por ejemplo, "perdido en el pensamiento", por eso debe preguntarse ¿Cuál es el papel que juegan los rasgos de personalidad y nivel de satisfacción del operador en la prevención de accidentes?

En un estudio previo (Jiménez, et. al. 2018), se desarrolló una metodología que involucraba los rasgos de personalidad y satisfacción de los operadores de una empresa de transporte de materiales peligrosos para predecir su nivel de riesgo de accidentabilidad. Los resultados en aquella primera instancia fueron halagadores pues describían con cierta precisión el comportamiento de los operadores, dadas las condiciones laborales y niveles de satisfacción prevalentes en la empresa.

En esta investigación se aplica dicha metodología, pero con una modificación en la ecuación de cálculo del índice de accidentabilidad y extendido a una empresa de transporte de carga general, con la intención contrastar los resultados de la empresa de transporte de materiales peligrosos. Se asume que, en la práctica, ambos sectores establecen niveles de seguridad y de capacitación muy opuestas en sus operadores.

Ciertamente, la construcción de una metodología específica para descifrar elementos de seguridad a partir de la personalidad y nivel de satisfacción del operador puede convertirse en una herramienta poderosa para aumentar el nivel de servicio de las empresas de sector autotransporte, disminuir los accidentes carreteros, y mejora la imagen de las instituciones.

Por todo lo anterior, en este trabajo se plantea como hipótesis de investigación que el nivel de satisfacción personal del operador y sus factores interpersonales se encuentran altamente relacionados y potencian la accidentabilidad del operador, debido a las condiciones laborales y de seguridad que instrumentan las empresas donde laboran. Esto es, si el operador no logra la satisfacción personal con su trabajo, puede haber consecuencias negativas en su comportamiento, como ausentismo, rotación de personal, demoras con el cliente, apatía, e incluso podría estar propenso a sufrir un accidente, dicho comportamiento definido por el control o no de sus factores de personalidad. Por el contrario, si se mantiene satisfecho se asume que su conducta se verá reflejada en actitudes positivas y en el buen desempeño de sus funciones, con lo cual podrá evitar o reducir al mínimo la probabilidad de cualquier tipo de incidente, por tanto, su satisfacción está determinada en gran medida por sus características personales y el trabajo mismo.

Estado del arte

Definición de personalidad

Para asumir una definición de personalidad es necesario remontarse años atrás para retomar la opinión de los científicos más destacados en este ámbito y que han logrado establecer las bases para el estudio de la personalidad. Por la abundancia de la literatura revisada que se ocupa de este tema, se deduce que son muy diversos los enfoques utilizados para concretar una definición cabal, sin embargo, puede acentuarse que la gran mayoría se basa en la complejidad del ser humano y sus elementos conductuales, psicométricos, cognitivos, valores, percepciones y forma de pensar. Por ejemplo, Eysenck (1946), cita a Warren (1934), quien define la personalidad como “la organización integrada de todas las características cognitivas, afectivas, conativas y físicas del individuo tal como se manifiesta en una distinción focal con respecto a los demás”. Bermúdez, *et. al.* (2011) cita a Allport de 1961, quien define

a la personalidad como la “organización dinámica dentro del individuo de aquellos sistemas psicofísicos que determinan su forma característica de pensar y comportarse”.

De igual modo, señalan que Caprara y Cervone (2000) afirmaron que debe irse más allá de identificar las tendencias superficiales, y analizar mecanismos afectivos y cognitivos que contribuyen de forma causal al funcionamiento de la personalidad. Para estos autores, debe entenderse “como un sistema complejo y dinámico de elementos psicológicos que interactúan recíprocamente los unos con los otros”. Por todo lo anterior, en este punto se puede deducir que, al considerar la personalidad como un factor que potencia la accidentabilidad de los operadores, tiene validez porque existe cierta interacción entre todos sus elementos integrados que derivan en un comportamiento específico, positivo o negativo, oportuno o tardío, tal y como lo manifiestan Baumert, *et. al.* (2017), quienes afirman que “(...) los procesos de la personalidad, la estructura de la personalidad y el desarrollo de la personalidad deben entenderse e investigarse de manera integrada para proporcionar respuestas integrales a las preguntas clave de la psicología de la personalidad”. De acuerdo con estos autores, los procesos y mecanismos psicológicos que da lugar a un comportamiento específico, de acuerdo a una situación en particular, deberían explicar también las variaciones entre individuos y situaciones a lo largo del tiempo.

La interpretación de lo anterior, da lugar a que, en una situación de estrés, como lo es la conducción de camiones de carga, cada operador actuará conforme a la estructura de su personalidad: edad, ansiedad, escolaridad, capacitación, conocimientos, habilidades, destrezas, momento, entre otros. Por esta razón, Baumert, *et. al.* (2017), especificaron que “(...) las estructuras de la personalidad, definidas como patrones de covariación en el comportamiento, incluidos pensamientos y sentimientos, son resultados de esos procesos en transacción con las posibilidades y regularidades situacionales”, es decir, dicha estructura determinará la relación que existe entre todas las variables de la personalidad para definir la actuación o comportamiento ante una situación.

Influencia de la Personalidad en la accidentabilidad

En general, se reconoce que la edad del operador, género, rendimiento sensorio motor (por ejemplo, el tiempo de reacción), las condiciones de salud, habilidades y capacidad mental propician riesgos de accidentabilidad, sin embargo, Knippling (2021) reconoció que la personalidad del operador también es un factor que propician la accidentabilidad, pero que tiene un efecto más duradero. Por esta razón, los estudios de personalidad de los operadores de carga y su relación con temas de seguridad, cada vez son más frecuentes (Qu, *et. al.* 2022; Hung, *et. al.*, 2021; Linkov, *et. al.*, 2019), y por general buscan atender el tema de seguridad.

De acuerdo con Aldea (2002), la personalidad de un individuo es un aspecto determinante de la conducta de la conducción. La medida de los rasgos de la personalidad y la predicción del comportamiento futuro están relacionadas. Este autor reportó que Abad (1998), realizó una investigación sobre una muestra de automovilistas en la que concluye que los factores que más influyen en los accidentes de tráfico suelen ser de tipo temperamental y de carácter; y que el mayor número de accidentados suelen manifestar cierta inmadurez de su personalidad, de su humor, actitud de riesgo, osadía, comportamiento arbitrario y descontento en alguna faceta de su vida familiar, laboral o personal.

Con base en lo antes mencionado, la cuestión es: ¿Qué tan cierto es que la velocidad sea una de las principales causas de accidentes de tránsito? Tradicionalmente en el transporte de carga los accidentes son atribuidos al exceso de velocidad; sin embargo, quien conduce el vehículo imprime la velocidad deseada en función de una serie de parámetros psicológicos y de personalidad, los cuales puede ser que éstos se intensifiquen según los satisfactores básicos alcanzados. Sin embargo, también hay que recordar que los operadores trabajan bajo presión de sus superiores para cumplir cuotas o tiempos de recorrido, en muchas otras carecen de la pericia y experiencia necesaria para cumplir el mínimo de requisitos que debe satisfacer todo operador de transporte de carga.

En tal virtud, puede decirse que el factor humano es la causa principal, contrariamente a lo que mucha gente supone, que es la velocidad. Ciertamente, ésta no es una causa directa de accidentes, sino un agravante del resultado. La incidencia de la velocidad se aprecia en la gravedad del resultado, por tanto, es claro observar que la solución solo vendrá a través de ponerle límites a los distintos factores — psicológicos, sociales, culturales, etc. — que inciden en las causas verdaderas de los accidentes. Dicho de otra forma, ¿Qué factores condicionan la imprudencia de los operadores de camiones de carga? y ¿Qué parámetros de la personalidad influyen en la inconciencia de provocar los accidentes?

Aldea (2002), afirma que "(...) puede realizarse una predicción de las personas en determinadas ocasiones a partir de los rasgos de personalidad"; sin embargo, agrega que "(...) hay que tener en cuenta que ciertos sujetos muestran conductas variables ante situaciones similares"; bajo esta premisa, puede cuestionarse también si ¿Esto se debe también a los diferentes niveles de satisfacción alcanzados por los individuos?

Las estadísticas relativas a la seguridad del transporte llegan a la conclusión de que en cualquier lugar del 70 al 90% de todos los accidentes son atribuibles, en su totalidad o en parte, a un error humano. Esta conclusión parece ser para todos los modos de transporte, pero en mayor importancia en el ámbito de carreteras.

Entender por qué se produce el error humano es de importancia crítica en la búsqueda de medios para prevenir los accidentes, algunos de los factores ya identificados atribuibles al error humano son los siguientes:

- Falta de atención (distracción)
- Somnoliento
- El sueño.
- La edad, entre otras

Las innovaciones tecnológicas que se están desarrollando en la actualidad tienen la finalidad de crear nuevas oportunidades para ayudar a los operadores; la investigación en este sector es necesaria para evaluar su impacto especialmente en su comportamiento para evitar el riesgo de accidente. Del mismo modo, la investigación para entender mejor las causas subyacentes de un error humano podría ser importante en la elaboración de iniciativas educativas, en intervenciones tecnológicas, una mejor logística en los procesos de carga y descarga, políticas de seguridad en la conducción, mejores salarios e incluso un mejor trato y reconocimiento de sus logros, entre otras medidas, influirán en el comportamiento del operador y en la reducción del riesgo.

Últimamente, se ha visto que investigadores y encargados de formular políticas de seguridad han dedicado una mayor atención al operador y a su comportamiento para encontrar posibles factores que puedan incidir en un accidente. De ahí la importancia de mejorar las condiciones estructurales de las empresas transportistas en comportamientos, tales como salarios, indemnización, recompensas económicas, rutas, ambiente laboral, políticas de seguridad, entre otras.

Por ejemplo, Ruuhilehto (2004), en su estudio concluye que en la actualidad hay una clara demanda de herramientas para mejorar la seguridad que afecta el comportamiento humano; se ha hecho evidente que la técnica y las mejoras a la gestión ya no son suficientes para promover la seguridad. Las conductas de riesgo y actitudes inseguras aún prevalecen a pesar de toda la formación, las instrucciones, la supervisión y la orientación. El conocimiento y herramientas para gestionar la seguridad de los dispositivos técnicos y del entorno laboral son de uso continuo.

Investigadores en la materia como Thomas Dingus del Instituto Tecnológico del Transporte de Virginia, argumenta que el rendimiento humano y el comportamiento estén total o parcialmente responsables de más del 90% de los accidentes de vehículos (Dingus, 2006). Este investigador afirma que se han utilizado un gran número de vehículos equipados con instrumentos muy sofisticados, incluyendo múltiples cámaras, que ha proporcionado a detalle la relación que existe entre el operador, la carretera, el tráfico y los factores ambientales que conducen a un gran número de accidentes. Por ejemplo, estudios del sector privado a los

operadores profesionales han demostrado que aproximadamente el 10% son responsables de 50% del riesgo de un accidente. Los principales factores que contribuyen a este riesgo son: el deterioro de sus sentidos (debido principalmente al alcohol); falta de atención y distracción; somnolencia, y la relacionada con el error. En particular, la investigación demostró que somnolencia es un factor importante que contribuye en aproximadamente en un 15% y 20% de los accidentes, debido a que la ocurre durante todas las horas del día.

Por otro lado, la falta de atención es también un factor clave que contribuye de manera importante a los accidentes, tanto para camiones como vehículos ligeros. Lo anterior, principalmente se debe a que los operadores realizan actividades distintas a la conducción (por ejemplo, tareas secundarias de comunicación y manipulación de objetos) las cuales representan las principales causas de la falta de atención relacionadas con el riesgo. Algunas de estas actividades distractoras son: manipulación de controles externos o del vehículo (por ejemplo: celulares, mensajes de texto, manipulación del estéreo, comer o beber, hablar con los pasajeros); y distractores externos (por ejemplo, accidentes, objetos extraños, personas, etc.). En otras palabras, pueden existir una gran cantidad de factores que pueden provocar los accidentes. Baikajuli, *et. al.*, (2022) afirman que "(...) una mejor comprensión de la génesis de los accidentes de camiones pesados y la cuantificación del riesgo de accidentes es vital para identificar qué combinaciones multifactoriales aumentan el riesgo de accidentes. Por lo tanto, pueden ser objeto de técnicas de aplicación y gestión de la seguridad para reducir el riesgo".

En estudios realizados por Lajunen y Summala (1995), demostró en su análisis de regresión lineal que la experiencia en la conducción es muy importante en la prevención de accidentes aunado a la habilidad (pericia) y su situación emocional.

En este mismo orden de ideas, Knipling (2021), reconoce que "(...) los estudios a grupos de operadores del autotransporte muestran repetidamente que existen grandes variaciones en los índices de comportamiento del riesgo. Los mismos individuos tienden a presentar los mayores riesgos con el tiempo". Este autor, señala que fue muy fácil demostrar esto último. Explica que en una flota equipada con sensores que registraban velocidades, aceleraciones, desaceleraciones, para identificar frenadas bruscas, arrancones, etc., se detectó que los operadores con conocimiento de ello, en un principio respetaban la instrumentación, para no verse envueltos en observaciones o incidentes, sin embargo, se acostumbraron rápidamente a los sensores y se comportaron como de costumbre, ya sea para "bien o para mal". Como resultado de su estudio concluyó que, en casi cualquier grupo de operadores, entre 15.0% y 20.0% de ellos representan 50.0% o más del total de incidentes, por tanto, el riesgo de responsabilidad. Señaló que el peor de los operadores hizo 0.9% del total de conducción, pero tuvo el 6.3% de todos los eventos culpables. Resultó siete veces más riesgoso que el sujeto promedio del estudio.

Además de la influencia de la personalidad en la propensión de accidentes, debe reconocerse que la conducta humana presenta variaciones o cambia de manera repentina o en el tiempo, por tanto, se convierte en un elemento que puede potenciar los riesgos. Por ejemplo, el caso del arrebato de un operador por inconformarse de una situación que le causó enojo repentino provocó la volcadura de su tractocamión en el patio de la empresa. Por esta situación, puede decirse que la conducta de las personas suele cambiar con facilidad con la edad, las circunstancias de vida, una situación en particular, entre otras, y en los operadores del autotransporte es muy común. La personalidad es una tendencia conductual estable de las personas a lo largo del tiempo, y las dimensiones de la personalidad más reconocidas para el caso el estudio del comportamiento de los operadores son las llamadas “cinco grandes rasgos de personalidad”: abierto, escrupuloso, extrovertido, amable y neuroticismo (Costa y McCrae, 2011).

En concordancia con Linkov, *et. al.* (2019), las personas con determinadas características de personalidad tienen más probabilidades de verse implicadas en accidentes de tráfico. De acuerdo con estos autores, el número de accidentes se correlacionan positivamente con el neuroticismo (inestabilidad emocional) y negativamente con la amabilidad y la escrupulosidad. Afirman que, las sensaciones se correlacionan con un mayor número de prácticas de conducción inseguras y errores al conducir.

En el estudio realizado por Gowda, *et. al.* (2016), aplicaron un cuestionario semiestructurado para obtener información sociodemográfica y un cuestionario estándar de prueba de los cinco grandes rasgos de personalidad de los operadores. De 200 entrevistados, 126 resultaron propensos a sufrir accidentes y 74 eran no propensos. Se descubrió que el total de horas de conducción en un día era significativamente mayor en los operadores con posibilidades de sufrir un accidente que en los no propensos. Con respecto a la personalidad, se encontró que la apertura a la experiencia y la inestabilidad emocional/neuroticismo se asociaban significativamente con la propensión a sufrir accidentes. A manera de conclusión, estos autores afirman que el rasgo de personalidad juega un papel importante en la accidentalidad. Para prevenir este tipo de accidentes, es aconsejable examinar a los operadores en el momento de la expedición de su licencia de conducir para vehículos pesados.

De acuerdo con Sümer (2003) describe que, autores como West, *et. al.* (1993), Rimmö y Åberg, (1999), Norris *et. al.* (2000), entre otros, han enfocados sus estudios a correlacionar los factores de la personalidad con la forma de conducir la unidad. En palabras de este autor, los factores distales (factores de personalidad) y proximales (conductas de conducción incorrectas) son dos elementos que pueden ayudar a predecir la participación de los operadores en accidentes de tránsito.

En este contexto, Wei, *et. al.* (2021), llevaron a cabo un estudio que muestra el análisis de

correlación entre los rasgos de personalidad y las conductas de conducción inapropiadas. Los rasgos de personalidad considerados en este estudio fueron extrovertido, amable, escrupuloso, neuroticismo y abierto a la experiencia. Los resultados demostraron que la mayoría de los coeficientes de correlación entre los rasgos de personalidad y las conductas de conducción inadecuadas fueron inferior a 0.35, y solo algunos coeficientes de correlación fueron significativos superiores a 0.55. Con base en el resultado del análisis de correlación, el neuroticismo se relacionó significativamente con exceder el límite de velocidad, aceleración brusca, velocidad de giro excesiva y desaceleración brusca. La escrupulosidad se relacionó significativamente con conducir horas extras. Dado que la mayoría de los coeficientes de correlación no eran significativos (mayores que 0.70), los cinco rasgos de personalidad se incorporaron en el modelo para predecir conductas de conducción inapropiadas y sus riesgos. Los autores aplicaron un método para calificar los comportamientos inadecuado y asignar un índice de predicción de riesgo de conducción para cada operador.

En la literatura existe una importante cantidad de artículos que estudian los rasgos de personalidad de los operadores y la relación con su forma conducción. Por lo general, utilizan técnicas que van desde modelos de simulación hasta análisis de correlación. Algunos autores, identifican los rasgos de personalidad asociada a los diferentes riesgos de conducción; tratan de entender las causas subyacentes del error humano; buscan disminuir los riesgos de accidentabilidad, entre los más frecuentes. En este proyecto de investigación se aborda desde esta perspectiva, pero involucrando el efecto del nivel de insatisfacción socioeconómica del operador, pero con un enfoque de prevención, que permita identificar la propensión a la accidentabilidad, para buscar soluciones de capacitación mediante cursos dirigidos, dentro de un contexto similar al trabajo realizado por Wei, *et. al.* (2021), que buscan predecir la probabilidad de la accidentabilidad de manera individual a través de la definición de un índice por operador, en el entendido de que existen variaciones en los índices del comportamiento riesgosos de los operadores.

Estado del arte del estudio de satisfacción personal

Contrario a los estudios de la personalidad, que son abundantes, en el caso de los estudios de satisfacción personal suelen ser muy escasos. Pocos son los autores que han desarrollado esta temática desde el punto de vista general, y menos orientados a los operadores del autotransporte de carga. La mayoría se centran a identificar las condiciones labores y llevan implícito el tema de la satisfacción en términos de su situación laboral. Por ejemplo, Palma (2005), señala que "(...) la satisfacción laboral se define como la disposición o tendencia relativamente estable hacia el trabajo, basada en creencias y valores desarrollados a partir de su experiencia ocupacional". Por supuesto, ninguna definición se encuentra con un enfoque de su influencia potencial a la propensión de accidentabilidad de los operadores.

Para el caso de esta investigación, la satisfacción personal se considera como el segundo componente que puede mermar la capacidad de conducción de los operadores de camiones de carga, y a su vez potenciar la propensión a sufrir un accidente. ¿Por qué esta consideración?, porque la preocupación de no cumplir con las necesidades básicas suele convertirse en un tema emocional, susceptible de crear distracciones de concentración. En este sentido, debe reconocerse que la satisfacción es la resolución de una necesidad o deseo, que permite alcanzar la tranquilidad y placidez, para lograr el bienestar y plenitud.

Cardona y Agudelo (2007), comentan que la European Foundation (2005), define a la satisfacción personal como "(...) la satisfacción con la vida y está relacionada con la valoración individual de la calidad de vida, regida por apreciaciones subjetivas y objetivas donde se trasciende lo económico y se mira la percepción, opinión, satisfacción y expectativas de las personas".

En este contexto, Helliwell (2008), sostiene que la calidad de vida es percibida por las relaciones sociales y de manera particular del lugar donde se desenvuelven las personas, y que ambos aspectos, impulsa el nivel de satisfacción personal. En el ámbito empresarial del autotransporte de carga y la gestión logística, es muy común que las relaciones sociales del operador, sucumben ante la falta de reconocimiento y maltrato, respectivamente, lo cual repercute negativamente en su nivel de satisfacción desde la perspectiva personal. Esto es muy cierto en el entendido de que el proceso de percepción de la vida, se define de acuerdo al propio sujeto (Arita, 2005), de ahí la relevancia de incluir la satisfacción del operador como indicador de bienestar.

Continuando con Arita (2005), señala que "(...) la estimación global de la satisfacción por la vida como indicador del bienestar subjetivo no puede brindar información acerca de los componentes de la vida que también contribuyen a este sentido de bienestar. Se necesita evaluar también la satisfacción por diversos dominios de la vida". Para ello, este autor utiliza la metodología del Índice de Bienestar Personal (IBP) de Cummins (2000) en escala de 1 a 10 puntos, la cual aplica a 108 personas en Sinaloa, México, donde encuentra el siguiente orden de los dominios de acuerdo a su IBP: seguridad sentida (8.56), relaciones personales (8.34), sentirse parte de la localidad (7.94), salud (7.89), logros en la vida (7.81), situación económica (7.23) y seguridad en el futuro (7.13). Estos resultados ofrecen un indicio claro de las prioridades que antepone las personas para sentirse más satisfechos, que como puede apreciarse, no necesariamente es la parte económica, sino la seguridad y las relaciones interpersonales como factores de satisfacción primordial. En una situación similar a la anterior, pero con la aplicación de la técnica de redes semánticas naturales de Reyes (1993), Cetina, *et. al.* (2018), evalúa la calidad de vida en el trabajo de los operadores de transporte urbano en Mérida, Yucatán, donde resultó que el sueldo y las prestaciones económicas no son lo más importantes para los operadores, sino las prestaciones como el "tener seguro", reconocimientos, sentirse

responsable, entre otros elementos que le afectan de manera más positiva su calidad de vida en el trabajo.

Briones, *et. al.* (2017), proponen profundizar en el estudio de las condiciones laborales de los operadores de camiones de carga, con un enfoque en la evaluación de la calidad del empleo. Recomiendan la construcción de un índice, de acuerdo con los factores más influyentes en los riesgos y exigencias laborales. Afirman que, si bien pueden medirse y mejorarse las condiciones laborales, también puede preverse un incremento en el nivel de satisfacción personal, la salud, el entorno laboral y familiar (Briones y Rosales, 2011). Ciertamente, en este sector, las empresas de transporte regularmente, se han interesado por la conducta de los operadores y sus consecuencias, pero raramente se han interesado por la actitud y sus expectativas psicológicas. Es un sistema empresarial, que se ha preocupado por incrementar su rendimiento, principalmente económico, y poco se ocupa de la satisfacción y motivación de los operadores, aunque algunas empresas ya comenzaron a reaccionar por ofrecer a los operadores mejores condiciones laborales, debido a la escasez de esta mano de obra.

Cabe señalar que, en México existen programas de certificación que se enfocan a evaluar al operador en términos de su trayectoria laboral, pruebas psicológicas, psicométricas, estudio socioeconómico y doping. Son interesantes estos programas, porque tienen en cuenta los factores de la personalidad, sin embargo, dichos programas se sesgan hacia aquellos que están alineados a los valores corporativos, más no así a los factores con riesgo de accidentabilidad y que dañan al operador. Utilizan indicadores complementarios como robo, soborno, mentira, deslealtad, acoso sexual, sustancias, respeto al orden social, y personalidad delictiva que, si bien son muy importantes, no se consideran otros factores como la distracción, divagación, u otros similares que pueden ser motivo de la accidentabilidad.

En términos generales, se reconoce que uno de los aspectos de mayor importancia para los trabajadores es la satisfacción que le produce la tarea que desempeña, así como las circunstancias que rodean su trabajo (Zubiri, 2013). Dicho esto, es claro que ello aplica a los operadores del autotransporte de carga, que parecen experimentar una especie de libertad en las carreteras que les ofrece cierta autonomía.

En este ámbito laboral, puede decirse que, para los operadores del autotransporte de carga, la conducción de vehículos es uno de los principales elementos de la satisfacción personal y todo el medio ambiente que le rodea, a pesar de ser una de las actividades más intrincadas de realizar que le demanda una mayor carga psicológica, social y económica, la cual exige una concentración de la forma en cómo conduce. Los operadores altamente satisfechos, suelen ser muy productivos y entregar resultados positivos, con lo cual propicia el crecimiento empresarial.

Metodología para determinar el índice de accidentabilidad

Como punto de partida, conviene explicar que la metodología diseñada para evaluar el índice de accidentabilidad de los operadores del autotransporte de carga, se basó en la información recabada de un estudio previo que desarrolló una empresa nacional de transporte de materiales peligrosos que, por motivos de confidencialidad se omitirá su nombre. Dicho estudio se derivó por el alto impacto que tenían los accidentes de sus unidades tanto en el plano de pérdidas personales como materiales. En tal virtud, el área de recursos humanos planteó que un importante componente del riesgo de sufrir un accidente está relacionado con los rasgos de personalidad del conductor, de manera que, por ejemplo, un individuo con rasgos de impulsividad y desacato a las reglas pudiera presentar una mayor predisposición a estar involucrado en un accidente vial.

Dicho planteamiento tuvo su origen en las pruebas psicométricas que aplican a los candidatos para su contratación y la observación empírica que, a través del tiempo, les permitió identificar que existían ciertos rasgos de personalidad afines en individuos que presentaban una mayor incidencia en hechos viales. De esta manera, se propuso aplicar un conjunto de evaluaciones psicológicas utilizadas comúnmente en las áreas de reclutamiento para medir diversas habilidades, rasgos de personalidad o estados emocionales.

Específicamente, el área de selección de personal de la empresa utilizó el formato denominado "16 Factores de Personalidad" (16PF) de Cattell, *et. al.* (1988), como parte de su proceso para evaluar la idoneidad de los aspirantes a conductores, con lo cual dispone de un perfil que es comparado con el personal que ha enfrentado accidentes, de tal manera que fue posible detectar los factores más comunes relacionados con estos hechos. Con base en ello, la empresa identificó los siguientes siete factores de personalidad: despreocupado (factor F), desacato de reglas (factor G), aventurero (factor H), imaginativo (factor M), aprehensivo (factor O), incontrolado (factor Q3) y tenso (factor Q4).

Ciertamente, los estudios de esta naturaleza son muy escasos en la literatura, pocos ejemplos como el de Gowda, *et. al.* (2016) que, a través de un cuestionario semiestructurado de información socioeconómica y un estándar de prueba de personalidad, denominado los cinco grandes, aplicados a los operadores de camiones pesados en la India, pudieron identificar los factores de personalidad que se muestran en el Cuadro 1, y que se presentan asociados a la clasificación de Castell (1988).

Tabla 1
Factores de personalidad asociados

Gowda, et. al. (2016)	Castell (1988)
Amabilidad-afabilidad	Factor A
Estabilidad emocional	Factor C
Escrupulosidad	Factor G
Apertura al cambio	Factor Q1
Extrovertido-Tenso	Factor Q4

Como puede observarse, los factores G y Q4 coinciden con los propuestos por la empresa de transporte de materiales peligrosos. Gowda, *et. al.* (2016), concluyeron que los rasgos de personalidad juegan un papel importante en la accidentabilidad. En tal virtud, recomendaron examinar a los operadores en el momento de expedir su permiso de conducción de vehículos pesados para prevenir los accidentes.

De acuerdo con Wei, *et. al.* (2021), los cinco grandes rasgos de personalidad desarrollados a partir de la década de 1980 en la teoría de los rasgos psicológicos incluían extroversión, amabilidad, responsabilidad, neuroticismo y apertura a la experiencia. Según estos autores Dahlen & White (2006), encontraron que la apertura, estabilidad emocional, amabilidad, y la ira al volante son significativas para predecir la conducta insegura del operador. La extroversión y escrupulosidad no parecieron ser útiles para comprender la conducta al volante. Con el uso del cuestionario DBQ (Driver Behaviour Questionnaire), Sullman, *et. al.* (2002), caracterizaron el comportamiento inseguro (“aberrant behaviour”) del operador de camión de carga. Encontraron que las conductas de inseguridad pueden clasificarse en: errores, lapsus, infracciones e infracciones agresivas. De las cuales, comprobaron que solo la puntuación de “infracciones” se correlaciona significativamente con la participación en accidentes.

La investigación de Li, P. (2017) predijo una conducta insegura de conducción utilizando los cinco grandes rasgos de personalidad. El estudio construyó niveles de riesgo al conducir relacionando la conducta de conducción insegura con el riesgo al conducir. Los cinco rasgos de personalidad se utilizaron para predecir el nivel de riesgo de un conductor individual mediante una regresión logit ordenada. Los resultados mostraron que los conductores con rasgos más neuróticos o concienzudos podrían clasificarse como de mayor riesgo, y los conductores más agradables podrían clasificarse como de menor riesgo.

Las pruebas mencionadas pueden considerarse herramientas estandarizadas, diseñadas por psicólogos con la finalidad de evaluar diversas dimensiones psicológicas como inteligencia, personalidad o habilidades cognitivas entre otras.

A partir de estos antecedentes, se prevé que los factores de personalidad seleccionados por la empresa de transporte de materiales peligrosos son representativos en la generación potencial de accidentes en el autotransporte de carga y que pueden ser de utilidad para analizar el riesgo de accidentabilidad de los operadores.

No obstante, la empresa de transporte de productos peligrosos planteó que, además de considerar la prueba de 16PF, el nivel de satisfacción del personal puede ser un concepto que también se encuentra estrechamente relacionado con un manejo responsable de las unidades y que ambas variables influyen en la accidentabilidad. Para ello se utilizó el cuestionario SPL diseñado por Palma (2009).

Una vez definidos ambos cuestionarios, se procedió a aplicar encuestas a operadores de una empresa de transporte de carga general y retomar los resultados de la empresa de transporte de materiales peligrosos.

Para el caso de la empresa de carga general, además de identificar las variaciones en los niveles de satisfacción y perfiles de personalidad en los operadores, se recolectó información sobre el número de accidentes en que los conductores se han visto involucrados durante los últimos tres años y a lo largo del ejercicio de su profesión como operador de vehículo pesado.

Cabe señalar que, durante la entrevista realizada a los responsables de la empresa de transporte de materiales peligrosos, no se obtuvo indicios de la realización del análisis de correlación que confirmara o desmintiera la hipótesis planteada por la empresa donde suponen que un alto nivel de satisfacción en el personal y la ausencia de factores de personalidad calificados “de alto riesgo” impactarían favorablemente en la reducción de accidentes. Sin embargo, de acuerdo con lo expresado por el personal de la empresa de transporte de materiales peligrosos, las acciones implementadas para mejorar la satisfacción de los conductores y la selección del personal, basada en la aplicación de evaluaciones, se busca personal que no presente comportamientos calificados como de “alto riesgo” lo que ha redundado en una significativa reducción de accidentes que en varios años no se ha registrado ninguna pérdida humana. Se podría suponer que la hipótesis planteada por la empresa de transporte de materiales peligrosos fue establecida con base en los conocimientos empíricos adquiridos por la experiencia, sin embargo, dicha hipótesis no había sido comprobada.

Los cuestionarios empleados en esta investigación fueron los siguientes:

- Prueba estandarizada 16 factores de personalidad (16PF): la cual se enfoca en conocer los rasgos de personalidad de un individuo basándose en características opuestas, en la cual cada individuo se mueve de un extremo a otro entre dos rasgos de personalidad (por ejemplo: Introverso/extroverso).
- Encuesta de nivel de satisfacción: en esta encuesta se recolecta la opinión del empleado sobre sus condiciones de trabajo de Palma (2009).

El cuestionario 16PF es el resultado de más de 40 años de investigación empírica realizada por el psicólogo Raymond B. Cattell (1950), quien redujo 4,500 rasgos de personalidad a 16 rasgos básicos, mediante análisis factorial. La prueba se basa en la medida independiente de varios factores psicológicos (Castell, et. al. 1988). Ciertamente, con esta herramienta se busca obtener un informe sobre el pasado, presente y previsible reacciones futuras de un operador en concreto, tomándose como base los métodos de codificación de evaluación psicológica de la personalidad. El cuestionario utilizado está constituido por preguntas cerradas que evalúan los hábitos personales, creencias, actitudes y fantasías (pruebas psicométricas). Este instrumento sirvió como filtro para determinar, de acuerdo a los rasgos de personalidad, cómo influyen los factores de personalidad en los operadores y en qué nivel puede representar un peligro de accidentabilidad para ellos.

El cuestionario de Satisfacción Laboral (SL) de Palma (2009), fue diseñado a partir de la consideración explícita de la teoría motivacional contenida en el modelo de la jerarquía de las necesidades de Maslow, en la teoría de los dos factores de Herzberg, et. al. (1959) y en el modelo de motivación de logros de Mc Clelland; evalúa cinco factores: autorrealización, involucramiento laboral, supervisión, comunicación, condiciones laborales. Asimismo, incluye tres secciones principales que agrupan los factores motivacionales: i) necesidades básicas (seguridad y fisiológicas); ii) necesidades de relación (afiliación); y iii) necesidades de crecimiento (realización personal y estima).

Ambas herramientas utilizan métodos de evaluación basadas en una escala de calificación. Dichas escalas conforman un procedimiento de evaluación numérico que determina las cualidades y características psicológicas de los operadores. Esta condición permitió generar el índice de accidentabilidad, través de una relación intrínseca entre ambos conceptos.

Desde luego, estos dos instrumentos son muy utilizados en diversos campos de la investigación, por tanto, en este trabajo se adecuaron a las características del tema de investigación y fueron la base del mismo.

Interpretación de los factores de personalidad

Para obtener los resultados del cuestionario 16PF, se utilizó la misma técnica que aplica Palma (2009) para sus análisis, basada en la escala de Likert, la cual consiste en asignar una puntuación a los reactivos para medir el grado de satisfacción de los factores motivacionales, evaluándose al mismo tiempo la opinión del operador con relación a las condiciones laborales. La escala de puntuación se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2

Escala de evaluación de la influencia de los factores de personalidad en la accidentabilidad

Escala	Nivel de influencia en el riesgo
0 - 1.0	Influencia nula
>1.0 - 2.0	Poca Influencia
>2.0 - 3.0	Medianamente Influyente
>3.0 - 4.0	Influyente
>4.0 - 5.0	Altamente influyente

Cabe señalar que la escala en el Cuadro 2, se adaptó al procedimiento de interpretación de los resultados de los factores de personalidad, el cual establece una escala de 1 a 10. En donde, el primer segmento de 1 a 5, el factor de personalidad se evalúa cierto comportamiento, y en segmento de 6 al 10, se evalúa su comportamiento opuesto.

Para determinar la influencia de cada factor de personalidad en la accidentabilidad se asume que los operadores con actitudes impulsivas son más propensos a verse involucrados en accidentes, debido a conductas temerarias al conducir el vehículo. Para fines de evaluación de la influencia asociada a los rasgos identificados, se consideró una escala de 0 a 5, donde cero es baja influencia y 5 es alta influencia para propiciar accidentabilidad, que se determina a partir de la puntuación obtenida en el cuestionario 16PL. A continuación, se describe el procedimiento e interpretación del grado de influencia de cada uno de los factores de personalidad seleccionados.

Comportamiento despreocupado

En el factor F de la metodología 16PF se observan dos extremos opuestos de la personalidad, "sobrio" vs "despreocupado". En la escala de esta metodología, si el individuo obtiene la puntuación de 1, indica que su personalidad tiende más a un comportamiento serio o retraído, que implica que el operador tiende a ser más cuidadoso al conducir con un menor riesgo

de accidentabilidad debido a su actitud precavida. Por otro lado, con una puntuación de 10 indicaría un operador que conduce de manera impetuosa y que toma decisiones impulsivas sin tomar las precauciones necesarias, es decir, se trata de un conductor con mayor propensión de accidentabilidad. De este modo, el nivel de influencia del rasgo “despreocupado”, se determina de la siguiente manera:

En la Figura 1, se observa que el operador logro una puntuación de 4, por tanto, su calificación será: ; es decir, toda puntuación de 5 o menor, implica que el operador tendera reducir su probabilidad de accidentabilidad.

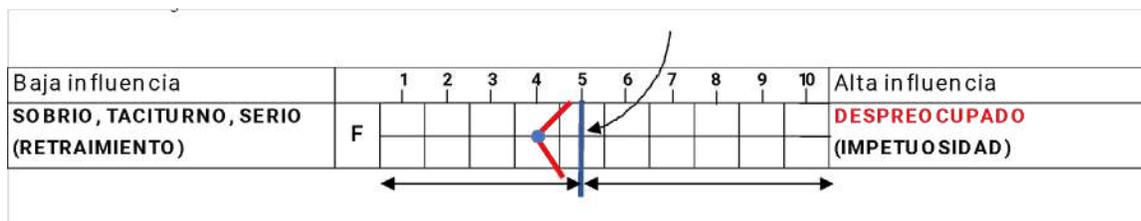


Figura 1. Factor F del formato 16PF con puntuación de 4

En caso de que el operador logrará una puntuación de 10 (Figura2), el nivel de influencia del rasgo “despreocupado”, sería: .

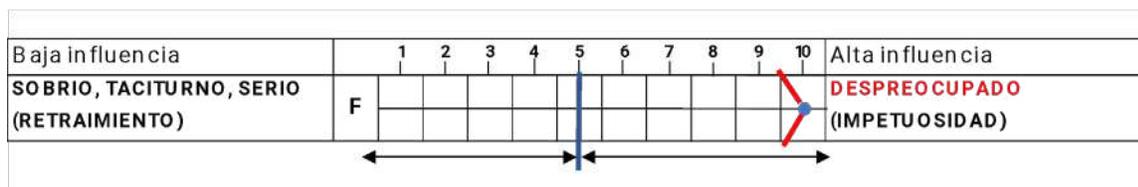


Figura 2. Factor F del formato 16PF con puntuación de 10

Tendencia a desacatar reglas

En el factor G, de la metodología 16PF también se observan dos extremos opuestos de la personalidad, “activo, desacato a las reglas” vs “escrupuloso”. Sí el individuo obtiene una puntuación de 1, indica que su personalidad tiende a no respetar las reglas y, por tanto, estará propenso a sufrir un accidente. En contraparte, si el operador logra 10 puntos, se estima que es escrupuloso o estricto al respetar las reglas y normas que rigen el transporte, la probabilidad de accidentabilidad será muy baja. De este modo, el nivel de influencia del rasgo “desacato a las reglas”, se determina de la siguiente manera:

En la Figura 3, se observa que el operador logró una puntuación de 7, por tanto, el nivel de influencia en el riesgo de accidentabilidad es: .

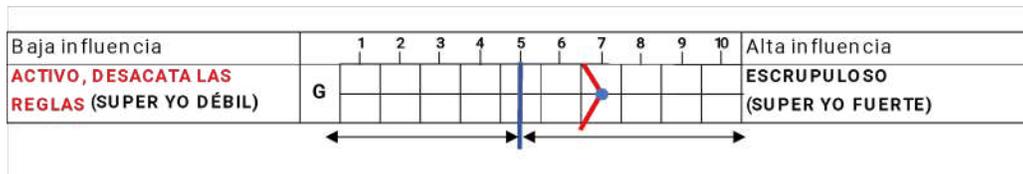


Figura 3. Factor G del formato 16PF con puntuación de 7

En caso de que el operador logrará una puntuación de 4, el nivel de influencia en el riesgo de accidentabilidad del rasgo “desacato a las reglas”, sería:

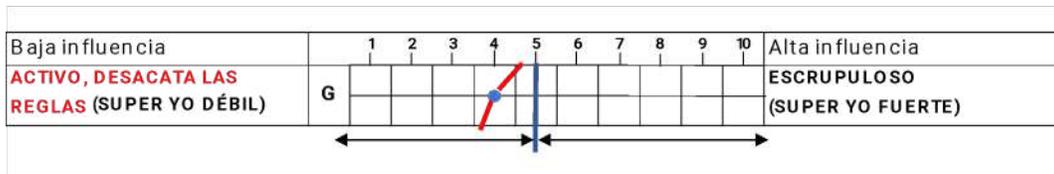


Figura 4. Factor G del formato 16PF con puntuación de 4

Aventurero

En el factor H, de la metodología 16PF se observan dos extremos de la personalidad, “recatado, tímido, reprimido” vs “aventurero”. Sí el individuo obtiene la calificación 1, indica que su personalidad tiende a mostrar una conducta de timidez o desconfianza sobre las acciones que realiza, con lo cual se estima que el operador estará alerta sobre situaciones de riesgo. Si el operador logra 10 puntos en este factor, se considera que es una persona altamente audaz que podría caer en lo imprudente, lo que significa que sus decisiones pueden ser arriesgadas o atrevidas, que incrementarían la posibilidad de un accidente. De este modo, el nivel de influencia en el riesgo de accidentabilidad del rasgo “aventurero”, se determina de la siguiente manera:

En la Figura 5, se observa que el operador logró una puntuación de 2, por tanto, el nivel de influencia en el riesgo de accidentabilidad será de:

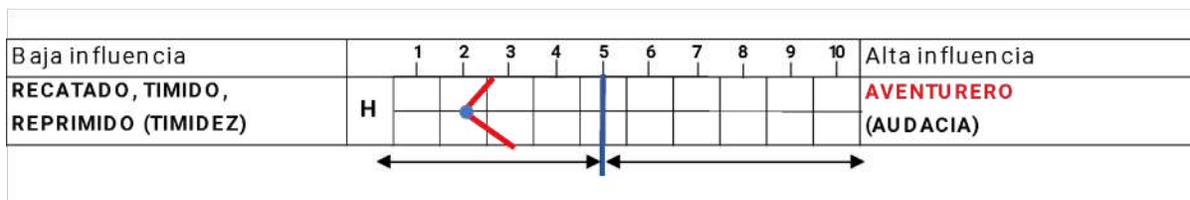


Figura 5. Factor H del formato 16PF con puntuación de 2

En caso de que el operador logrará una puntuación de 7, el nivel de influencia en el riesgo de accidentabilidad del rasgo “aventurero”, sería:

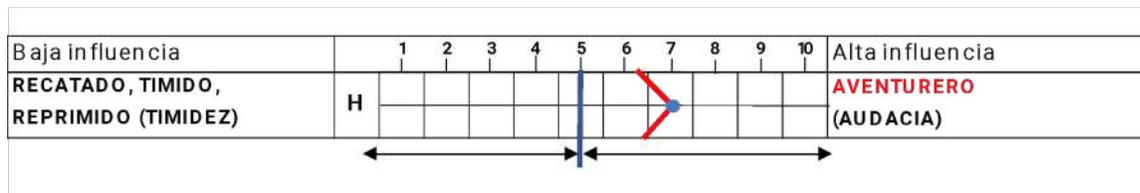


Figura 6. Factor H del formato 16PF con puntuación de 7

Imaginativo

En el factor M, de la metodología 16PF se observan dos extremos de la personalidad, “práctico, tiene preocupaciones reales” vs “imaginativo”. Al entrevistar a los operadores, el departamento de Recursos Humanos de la empresa de materiales peligrosos descubrió que el personal imaginativo constantemente se planteaba escenarios de lo que podía ocurrir en el camino mientras conducía, de manera tal, que cuando se presentaba alguna situación atípica, los operadores más imaginativos podían responder mejor a dichos eventos. Eso significa que las personas más imaginativas tienden a estar más preparadas cuando algo surge. Por el contrario, en eventos imprevistos se detectó que las personas que son objetivas tienden a esperar a que todo se comporte a lo esperado y, por tanto, pueden presentar un mayor riesgo de reacción incorrecta ante un evento. Por tanto, la escala de evaluación se invierte de la siguiente manera:

En la Figura 7, se observa que el operador logró una puntuación de uno que tiende a ser objetivo, por tanto, su valor final será de: , lo que supone un mayor nivel de influencia en el riesgo de accidentabilidad.

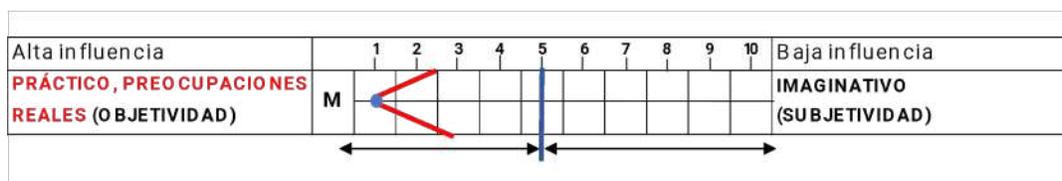


Figura 7. Factor M del formato 16PF con puntuación de 1

En caso de que el operador logrará una puntuación de 8, con una tendencia a ser “imaginativo”, su nivel de influencia en el riesgo de accidentabilidad es menor:

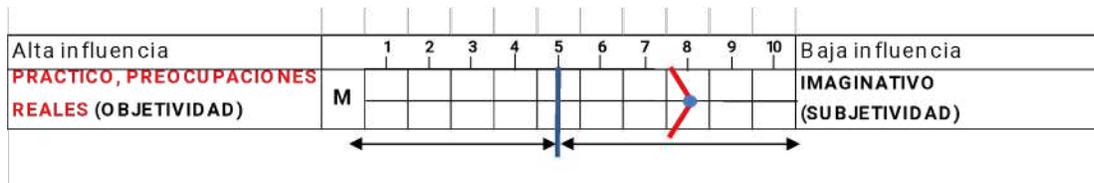


Figura 8. Factor M del formato 16PF con puntuación de 8

El cálculo anterior, indica que contrario a lo planteado originalmente en la metodología 16PF, se encontró que, en este sector del autotransporte de carga, los operadores con alta puntuación en el factor imaginativo registraban menos incidentes que el personal que presentaba un pensamiento más objetivo. Por esta razón, es importante señalar que en este factor el rasgo de personalidad imaginativo se identificó que actúa de manera inversa, por tanto, cuando su evaluación es cero se considera que la condición de imaginativo tiene un efecto nulo (situación positiva) y sí es 5 se considera que su efecto es de alto riesgo (situación negativa).

Aprehensivo

En el factor O, de la metodología 16PF se observan dos extremos de la personalidad, "sereno" vs "aprehensivo". Sí el individuo obtiene una puntuación de uno, indica que su personalidad tiende a mostrar una conducta apacible, complaciente, y seguro de sí mismo, con lo cual, se reducen los riesgos en su toma de decisiones. Si el operador logra 10 puntos en este factor, se considera que es una persona con propensión a la culpabilidad, lo que significa que sus decisiones se basan en la predisposición o capricho, anteponiendo riesgos en su toma de decisiones. De este modo, el nivel de influencia en el riesgo de accidentabilidad del rasgo "aprehensivo", se determina de la siguiente manera:

En la Figura 9, se observa que el operador logró una puntuación de 2, por tanto, su nivel influencia en el riesgo de accidentabilidad de este rasgo de personalidad sería: , con una tendencia a una conducta serena.

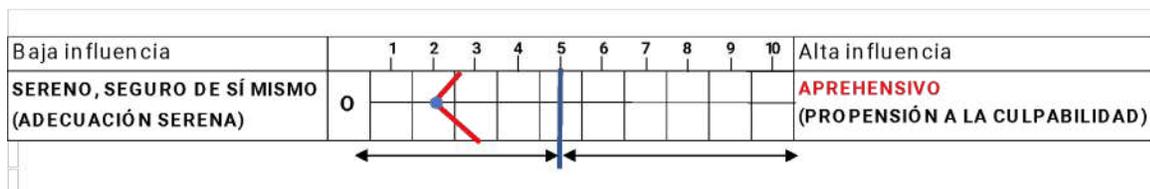


Figura 9. Factor O del formato 16PF con puntuación de 2

En caso de que el operador logrará una puntuación de 7, su nivel de influencia en el riesgo de accidentabilidad del rasgo “aprehensivo”, sería: .

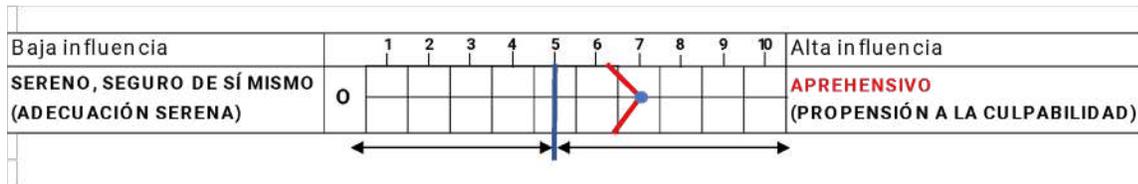


Figura 10. Factor O del formato 16PF con puntuación de 7

Incontrolado

En el factor Q3, de la metodología 16PF se observan dos extremos de la personalidad, “incontrolado” vs “controlado”. Sí el individuo obtiene una puntuación de uno, indica que su personalidad tiende a mantenerse indiferente de los acontecimientos que le rodean, es flojo y solo persigue sus propios intereses. Un operador con estas características es un riesgo para el vehículo que conduce y para sí mismo. En contraparte, si el operador logra 10 puntos, se estima que es una persona con autocontrol, que está atento a los requerimientos del vehículo y que mantiene la calma ante situaciones complejas al conducir. De este modo, el nivel de influencia en el riesgo de accidentabilidad del rasgo “incontrolado”, se determina de la siguiente manera:

En la Figura 11, se observa que el operador logró una puntuación de 7, por tanto, el nivel de influencia en el riesgo de accidentabilidad es: , que refleja que existe control en la conducción.

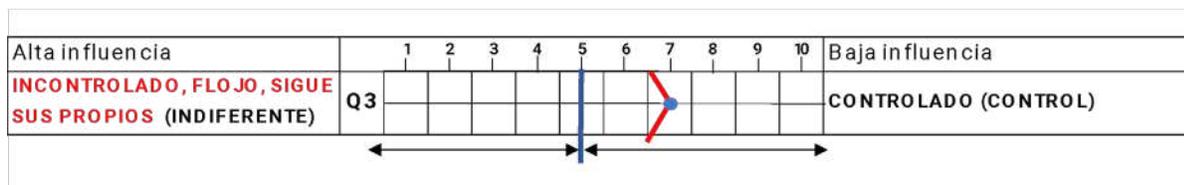


Figura 11. Factor Q3 del formato 16PF con puntuación de 7

En caso de que el operador logrará una puntuación de 4, el nivel de influencia en el riesgo de accidentabilidad del factor “incontrolado”, sería: , el cual refleja que existe cierto nivel de riesgo.

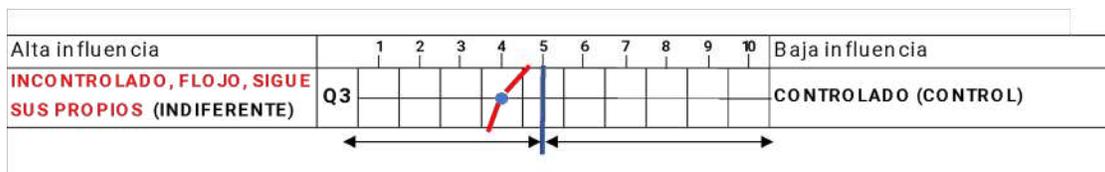


Figura 12. Factor Q3 del formato 16PF con puntuación de 4

Tenso

En el factor Q4, de la metodología 16PF se observan dos extremos de la personalidad, “Relajado” vs “Tenso”. Si el individuo obtiene la calificación 1, indica que su personalidad tiende a mostrar una conducta tranquila, conforme con sí mismo y sus acciones, con lo cual un operador tenderá a tomar mejores decisiones durante la conducción y en situaciones de riesgo. Si el operador logra 10 puntos en este factor, se considera que es una persona con bastante tensión, que conduce con preocupación, angustia, e incluso ansiedad. Desde luego, bajo este estado, el operador está propenso a distraerse y cometer un error que lo puede llevar a un accidente. De este modo, el nivel de influencia en el riesgo de accidentabilidad del factor “tenso”, se determina de la siguiente manera:

En la Figura 13, se observa que el operador logró una puntuación de 2, por tanto, el nivel de influencia en el riesgo de accidentabilidad es: , lo cual refleja un riesgo mínimo marginal.

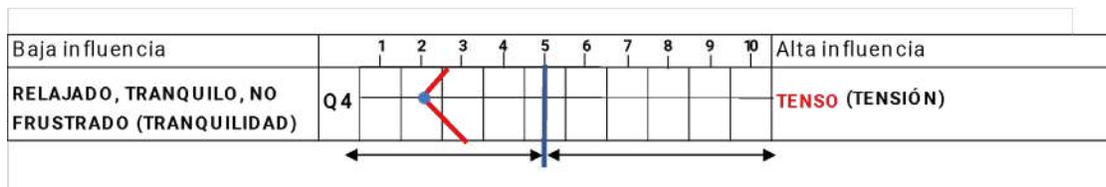


Figura 13. Factor Q4 del formato 16PF con puntuación de 2

En caso de que el operador logrará una puntuación de 7, el nivel de influencia en el riesgo de accidentabilidad del rasgo “tenso”, sería: , que refleja cierto nivel de riesgo.

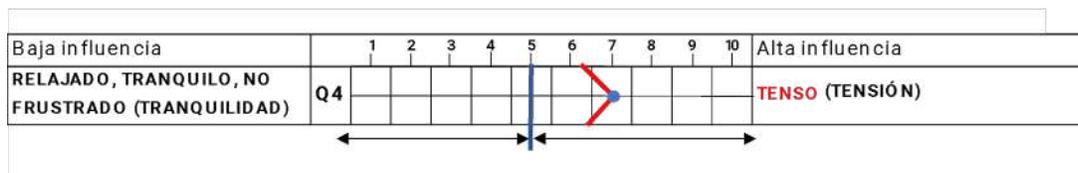


Figura 14. Factor Q4 del formato 16PF con puntuación de 7

Metodología para determinar el índice de accidentabilidad

A partir de los resultados de los cuestionarios 16PF y del cuestionario de satisfacción, el proceso de medición del índice de accidentabilidad se derivó de la siguiente manera:

1. Del cuestionario 16PF el nivel de influencia de los factores de personalidad se determinó a partir de la sumatoria de los puntos obtenidos en cada uno de los siete factores

evaluados, bajo el entendido de que todos suman al nivel de riesgo. La máxima puntuación que un operador puede obtener es de 35 puntos, que significaría que el operador se encuentra en una situación alarmante. La mínima puntuación es cero, donde el operador demostraría un control absoluto de todos sus factores de personalidad. Desde luego, se prevé que ambos extremos difícilmente podrán encontrarse. Por ejemplo, el máximo valor obtenido por uno de los operadores encuestados en esta investigación fue de 18 puntos, el cual puede considerarse como la persona que requiere atención inmediata.

2. Para determinar el grado de satisfacción de los operadores, se consideró el promedio de los resultados que arrojaron las 33 preguntas relacionadas de 37 en total. De esta manera, en una escala de los resultados de 1 a 5 se espera que el máximo valor que un operador puede alcanzar es de 5.0 puntos que significaría altamente satisfecho, y por el contrario, el mínimo valor sería de 1.0, que representa el de menor satisfacción.
3. La representación gráfica de estos resultados se plasma en un esquema de ejes cartesianos (Figura 15), en donde, el cuadrante I aloja a los operadores de más alto nivel de satisfacción y con mayor estabilidad y control de sus rasgos de personalidad, contrario a lo que se ubican dentro del cuadrante III. En el cuadrante II se localizan los operadores con altos niveles de satisfacción, pero con problemas de personalidad complicados, contrario a lo que sucede a los operadores que se ubican en el cuadrante IV, que mostrarían bajos niveles de satisfacción y con un adecuado control de su personalidad.

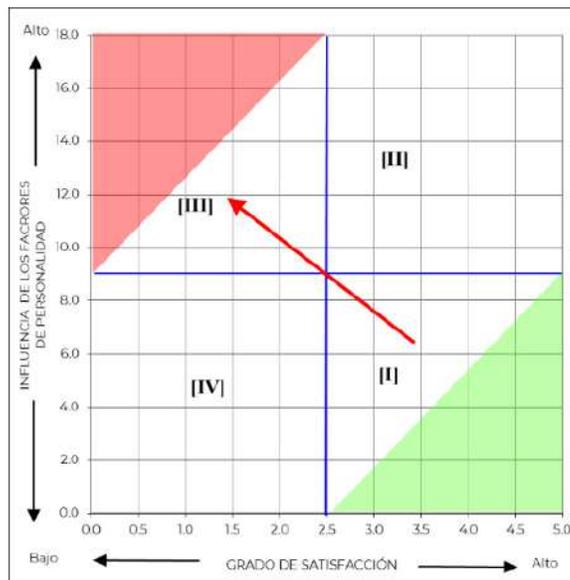


Figura 15. Grado de satisfacción vs nivel de influencia de los factores de personalidad

4. Por su parte, el índice de accidentabilidad se mide a partir del cociente entre ambos conceptos, donde el dividendo está representado por el nivel de influencia de la personalidad, y el divisor, por el nivel de satisfacción, bajo el argumento de medir el número de veces que impactan los factores de personalidad sobre la satisfacción del operador.

Matemáticamente se representa de la siguiente manera:

- = índice de accidentabilidad
- = nivel de influencia de los factores de personalidad
- = grado de satisfacción

Resultados y evaluación de la hipótesis de estudio

Del Cuadro TT, los resultados pueden interpretarse de la siguiente manera: en la fila 51 se identifica el operador 103 con un nivel de satisfacción alto (4.7576), el cual refleja compromiso con la empresa donde presta sus servicios porque muestra un nivel de influencia bajo (3.0) de sus factores de personalidad en la propensión de accidentes, con lo cual puede deducirse que el operador se encuentra a gusto en la empresa y, por tanto, va a respetar las políticas de seguridad, reglamentos, y todo tipo de disposiciones con el fin de disminuir las posibilidades de un accidente, con un índice de accidentabilidad de apenas 0.63 puntos.

En el mismo cuadro, el operador número 7 en la fila 1, se identifica como una persona medianamente satisfecha con un indicador de 3.2121 pero, con el nivel de influencia más alto (18 puntos) de los factores de personalidad en la propensión de accidentabilidad, lo cual significa que puede llegar a ser candidato a sufrir un accidente de acuerdo con los resultados del instrumento de rasgos de personalidad, con una tendencia hacia el alza, debido a que este operador presentó dos de los siete factores analizados de la personalidad con un alto nivel de influencia en la propensión de un accidente, mientras que en los otros cinco, se vieron afectados en cierta medida, por lo que derivó un índice de accidentabilidad de 5.60 puntos.

En el primer caso puede observarse que se cumple la hipótesis planteada, la cual establece que el nivel de satisfacción personal del operador y sus factores interpersonales se encuentran estrechamente relacionados y potencian la accidentabilidad del operador, sin embargo, en el segundo caso, se rechaza la hipótesis, porque la personalidad no influye de manera significativa. Ambos ejemplos y el conjunto de resultados obtenidos, permiten observar que no existe una relación directa a simple vista entre estas dos variables. Para corroborar esta conclusión a continuación en el Cuadro XX y ZZ se presentan los resultados de un análisis de regresión lineal que permitió evaluar la correlación entre estas dos variables para las dos empresas de transporte, a fin de descubrir estadísticamente el tipo de relación que prevalece.

ce entre ambas. Para su análisis, se consideró como variable independiente (X) el grado de satisfacción del operador, y como variable dependiente el nivel de influencia de los factores de personalidad (Y). Con la herramienta Excel, se llevaron a cabo los cálculos mencionados. En ambos resultados se observó que el coeficiente de correlación es poco significativo entre estas dos variables, esto es, que no existe una relación lineal, por tanto, puede deducirse que ambas variables influyen de manera distinta e independiente en los operadores.

De manera gráfica, en la Figura 16 se muestra la nube de puntos que representan los operadores de la empresa de transporte de materiales peligrosos, por cada par de valores. En dicha figura, se observan los cuadrantes en los cuales se ubican los operadores, según su grado de satisfacción personal y nivel de influencia de su personalidad en la propensión al riesgo de accidentabilidad. Como es evidente en dicha figura, se destaca que la mayoría de los operadores presentan altos nivel de satisfacción que van de nivel medio a alto (3 a 5 puntos), y algunos con alto nivel de influencia de su personalidad, entre 12 y 14 puntos como los valores más altos de la muestra, donde se destaca un operador con 18 puntos de nivel de influencia de su personalidad y mediano nivel de satisfacción.

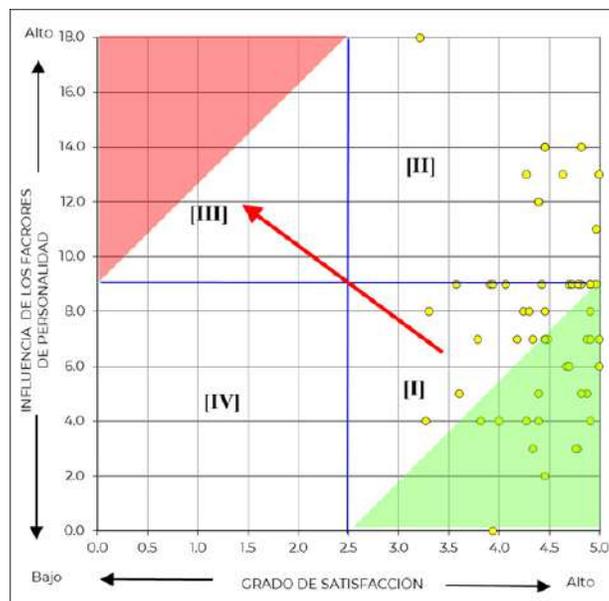


Figura 16. Grado de satisfacción y nivel de influencia de los factores de personalidad de los operadores de transporte de materiales peligrosos

En el caso de la empresa de transporte de carga general, los resultados son muy similares a la compañía de transporte de materiales peligrosos. La mayoría de los operadores muestran niveles de satisfacción de medio a alto (3 a 5 puntos), y algunos de ellos, presentan altos niveles de influencia de sus factores de personalidad (10 a 14 puntos) de acuerdo a los resultados de esta muestra (Figura 17). Una minoría de operadores, muestran bajos niveles de

satisfacción y de influencia en sus factores de personalidad. Como puede apreciarse, estos resultados corroboran que no existe una relación lineal entre estas dos variables.

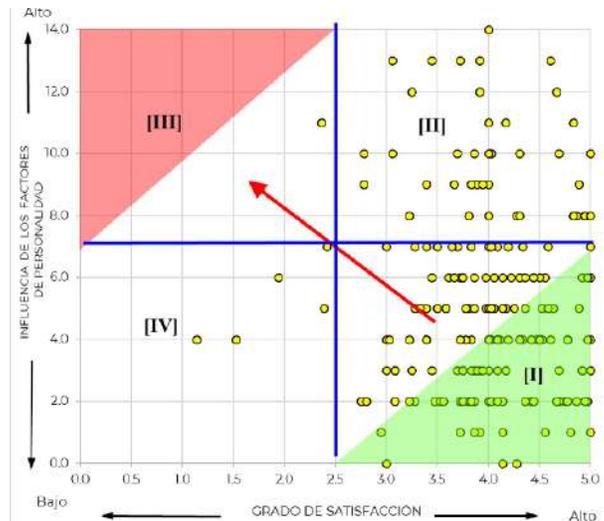


Figura 17. Grado de satisfacción y nivel de influencia de los factores de personalidad de los operadores de transporte de carga general

Desde luego, con la ubicación de cada operador en los cuadrantes de las figuras anteriores, es posible identificar aquellos que requieren una atención inmediata de su insatisfacción o diseñar un programa para atender sus factores de personalidad críticos o ambos. Para esto último, el índice de accidentabilidad permite jerarquizar a los operadores con mayores necesidades de atención. Por ejemplo, si se establece que 3.0 o más sea considerado como valor crítico de índice de accidentabilidad, en la Figura 18 pueden observarse aquellos operadores que tienen este valor o que están por arriba y que requieren atención especial.

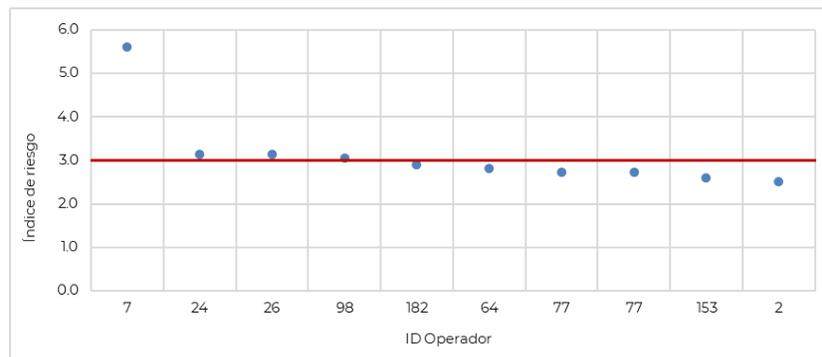


Figura 18. Operadores de la empresa de transporte de materiales peligrosos con índice de accidentabilidad mayores a 2.5

En el caso de la empresa de transporte de carga general, la Figura 19 muestra los operadores que requieren atención inmediata porque presentan un valor igual o mayor a 3.0 de índice de accidentabilidad. Cabe señalar que, en su caso, se podría establecer una política de supervisión para aquellos operadores que están muy cercanos a 3.0.

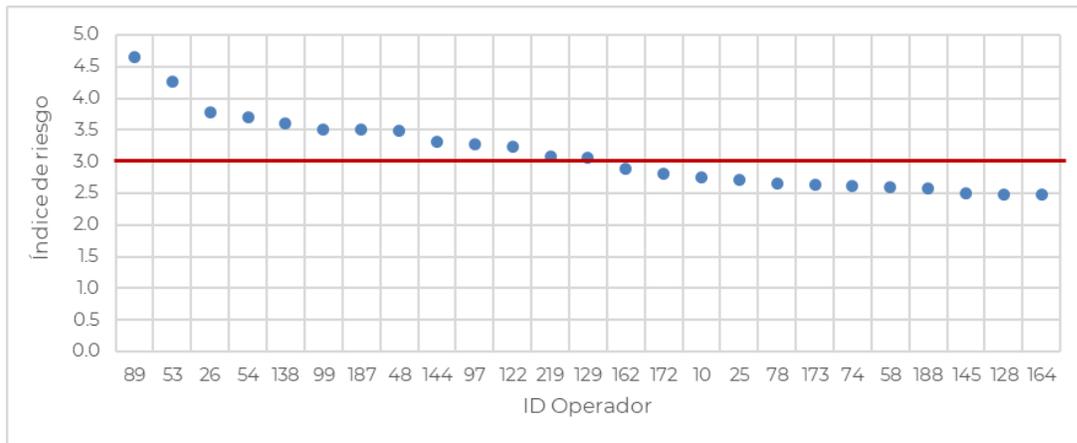


Figura 19. Operadores de la empresa de transporte de carga en general con índice de accidentabilidad mayores a 2.5

A partir de las estadísticas derivadas de los análisis, se desprenden los siguientes comentarios:

a) El valor del coeficiente de correlación tiende a cero (0.013396809 y 0.022491), lo que significa que la relación entre el grado de satisfacción y nivel de influencia de los factores de personalidad en la accidentabilidad es muy débil; además, de acuerdo con el coeficiente de determinación R^2 , permite deducir que apenas el 0.017% de los casos se podrían explicar.

b) Lo anterior, significa que las suposiciones hechas sobre estas variables en torno a su relación son verdaderas, la dispersión que presenta la nube de puntos confirma la poca dependencia entre ambas variables.

c) En este mismo orden de ideas, se aprecia que una gran mayoría de los operadores entrevistados caen en el cuadrante I, lo cual implica que estos operadores tienen un alto grado de satisfacción y bajo nivel de influencia de los factores de personalidad en la accidentabilidad. Este resultado parece obvio para el caso de los operadores de la empresa de autotransporte de materiales y residuos peligrosos, que posee altos estándares de calidad y seguridad, con programas de capacitación permanentes y mejores sueldos. Sin embargo, para el caso de los operadores de carga general, se presenta un caso similar, no obstante que éstos presentan menores niveles de ingreso y satisfactorios.

d) Ciertamente, el ideal de toda empresa es que sus operadores al ser evaluados caigan en el cuadrante I (zona amarilla en la figura); sin embargo, ello no siempre es así, pues suele suceder que algunos operadores pueden estar satisfechos en su trabajo, pero también puede tener problemas de personalidad que lo ponen en riesgo de accidentabilidad, tal es el caso de único operador que se ubica en el cuadrante III de la empresa de carga general (Figura 17).

Conclusiones

A partir de los resultados de ambos cuestionarios, se detectó que la mayoría de los operadores se muestran satisfechos y con pocos problemas de personalidad, salvo algunos casos como es natural, pero sin que ninguno de ellos presente un estatus grave, de acuerdo con la metodología de evaluación. Específicamente, de los siete factores de personalidad analizados, pocos son los operadores que muestran una situación que merece su atención.

En primera instancia pudo notarse que algunos de los factores analizados son propios de la edad, y otros no necesariamente de ella, en tal virtud, se prevé que la combinación de estos factores y el nivel de satisfacción laboral pueden ser determinantes en potenciar la accidentabilidad del operador. Por ejemplo, del total de operadores entrevistados (389), se observó que 88 (22.6 %) de ellos presentaban al menos un factor de personalidad a nivel crítico; pero 15 de ellos, manifestaron dos factores críticos con combinaciones muy diversas entre los siete factores considerados. El factor de personalidad que más se repitió en la muestra de los operadores de carga general, fue el factor *tenso*, con 19.8 %, en especial del grupo de edad de los años 20's y 30's.

En el caso de los operadores de transporte de materiales peligrosos, en estos mismos rangos de edad, el *desacato a reglas* presentó un mayor número de operadores con esta propensión (11.2 %), lo cual podría considerarse alarmante por el tipo de producto que manejan. Para estos rangos de edad, es necesario establecer mayor énfasis en las políticas de seguridad, con lo cual puede concluirse la falta de experiencia es un factor determinante.

Los análisis de correlación realizados confirmaron que los factores de personalidad no mostraron una relación lineal; tanto el coeficiente de correlación, como el de determinación, estadísticamente resultaron bajos e imposibles de predecir una conducta. De igual modo, con el análisis de la covarianza, pudo detectarse que la influencia entre los diferentes factores de personalidad es poco significativa para el caso de los operadores de transporte de materiales peligrosos, esto es, los valores de la covarianza en estos factores resultaron por debajo de 0.3100, lo cual significa que existe muy baja relación entre ellos. Por el contrario, la covarianza de los factores de los operadores de carga general, resultaron valores un poco

más altos, tanto en la dirección positiva como negativa (inversa), lo cual puede deberse a las diferencias de los niveles de satisfacción entre los operadores de carga general y de materiales peligrosos.

Ciertamente, entre los operadores de carga general y carga peligrosa, se encontraron diferencias significativas en lo que concierne al nivel de satisfacción. Los primeros, mostraron más carencias o condiciones laborales menos favorables que los segundos. Esta diferencia se manifiesta en la posición de bienes como casa propia, vehículos y mejores condiciones salariales. Se esperaba que ello repercutiera de manera significativa en la conducta de los operadores, pero en los hechos, ambos aspectos influyen de manera similar en la determinación del índice de accidentabilidad.

Por grupos de edad, los operadores presentan diferencias entre sus necesidades básicas, de relación y de crecimiento, incluso entre los operadores que mueven carga general y materiales peligrosos. Resultan interesantes los resultados de este apartado porque se observan claramente los intereses de cada uno de los grupos analizados. No obstante, la herramienta empleada para medir la satisfacción del operador, en los diferentes tipos de análisis, como fue: la edad y los años de experiencia, arrojaron que las empresas deben trabajar en las necesidades de relación (variables de trabajo en equipo e individual, ambiente de trabajo, cultura organizacional, contacto con los jefes, aceptación, participación y comunicación).

Como aportaciones de los operadores encuestados, sugieren atender los temas de tradicionales que afectan a los operadores como los incrementos salariales, descansos los días domingos y mejorar las condiciones de los camiones para su seguridad. Sin embargo, hay quienes van más allá y solicitan igualdad entre los compañeros, que se elimine el favoritismo que perciben en el reparto de los viajes. Proponen descansos programados y una mejor programación de rutas, coordinación con clientes para recibir las mercancías, un programa de mantenimiento más eficaz, mejorar el rol de viajes asignados ya que suelen ser las mismas rutas y consideran que no hay una equidad, y en general, mejorar el ambiente laboral. Obviamente, estos temas, afectan el rendimiento de los operadores y su mentalidad, pero, sobre todo, a sus factores de personalidad.

Por otro lado, se puede establecer que el nivel de estudios no está directamente relacionado con el índice de accidentabilidad, porque igual los más altos valores de riesgo fueron de operadores con nivel bachillerato como de nivel de primaria. Si bien los estudios ayudan mucho a mejorar como personas y como trabajadores, es recomendable que las empresas transportistas aumenten el nivel de escolaridad que se pide para el puesto, con el propósito de desarrollar la masa crítica en la toma de decisiones.

Tomando como referencia los resultados mostrados por estos instrumentos, pudo llegar-

se a la conclusión que las empresas transportistas, tienen que establecer un plan preventivo para evitar que alguno de los factores de personalidad se salga de control y puedan presentar un alto riesgo de accidente, ello quiere decir que no se debe de dejar de trabajar y tomar medidas seguridad para tener CERO accidentes.

Por todo lo anterior, y tomando como referencia los resultados que arrojo este estudio, puede concluirse de manera contundente que las empresas podrían disponer de un plan preventivo, con el propósito de mantener bajo control a los operadores que manifestaron al menos un factor de personalidad crítico a fin de mitigar el riesgo de accidentabilidad.

Reconocimientos

Los autores agradecen el apoyo de diversas empresas de transporte y operadores que proporcionaron información para identificar los factores de personalidad y niveles de satisfacción. Sin su apoyo esta investigación no hubiese sido posible, sobre todo porque no existe información o bases de datos que detallen este suceso.

Referencias

- [1] Abad, J. (1998) "El carácter y la personalidad en los accidentes de tráfico". Congreso Nacional de Centros de Reconocimientos Médicos para la Seguridad Vial. Cáceres; pp. 23-25.
- [2] Ahmer, J, A, Warda, N, Otto, & McMahillb, M. (2022). How does emotional intelligence predict driving behaviors among non-commercial drivers? *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*; 38-46.
- [3] Aldea, M. S. (2002) Factores Psicológicos que incrementan el riesgo de accidentes de circulación. *Revista Internacional de Psicología*; 3(2). <http://espanol.geocities.com/aguilera99/>
- [4] Arita, B. (2005). Satisfacción por la vida y teoría homeostática del bienestar. *Psicología y Salud*, 15(1). pp. 121-126. <https://www.redalyc.org/pdf/291/29115113.pdf>
- [5] Baikejuli, M., Shi, J., & Hussain, M. (2022). A study on the probabilistic quantification of heavy-truck crash risk under the influence of multi-factors. *Accident Analysis and Prevention* 174. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106771>

- [6] Baumert, A., Schmitt, M., Perugini, M., Johnson, W., Blum, G., Borkenau, P., Costantini, G., Denissen, J. J. A., Fleeson, W., Grafton, B., Jayawickreme, E., Kurzius, E., MacLeod, C., Miller, L. C., Read, S. J., Roberts, B., Robinson, M. D., Wood, D., & Wrzus, C. (2017). Integrating Personality Structure, Personality Process, and Personality Development. *European Journal of Personality*, 31(5), 503-528. <https://doi.org/10.1002/per.2115>
- [7] Bermúdez, J., Pérez, A., Ruiz, J., Sanjuán, P., & Rueda, B. (2011). Psicología de la Personalidad. Universidad Nacional de Educación a Distancia Madrid. Madrid España. 29-33. <https://tuvntana.files.wordpress.com/2015/06/psicologia-de-lapersonalidad-bermudez-perez-y-ruiz.pdf>
- [8] Briones, D. (2017). Choferes del autotransporte de carga en México: investigaciones sobre condiciones laborales y la cadena de suministro *Revista Transporte y Territorio*, 17, 251-266. <https://www.redalyc.org/pdf/3330/333053372012.pdf>
- [9] Briones, D. y Rosales, R. (2011). Nivel de satisfacción y calidad de vida en el trabajo de los choferes de taxi y microbuses de la Ciudad de México. *Revista Mexicana de Salud en el Trabajo* 1(7), 5-7. <https://www.imbiomed.com.mx/articulo.php?id=76952>
- [10] Cardona, D. y Agudelo, H. (2007). Satisfacción Personal como Componente de la Calidad de Vida de los Adultos de Medellín. *Rev. Salud Pública*, 9(4). <https://doi.org/10.1521/pedi.1992.6.4.343>
- [11] Cattell, B., Eber H. y Tatsuoka, M. (1980). Cuestionario de los 16 Factores de la personalidad. México: El Manual Moderno.
- [12] Cattell, R., Eber, H., & Tatsuoka, M. (1988). Handbook for the sixteen personality factor questionnaire (16 PF). USA. Institute for Personality and Ability Testing.
- [13] Cattell, R. (1950). The Main Personality Factors in Questionnaire, Self-Estimate Material. *The Journal of Social Psychology*, 31(1), 3-38. <https://doi.org/10.1080/00224545.1950.9918993>
- [14] Cetina, T., Escamilla, M., Centeno, L., y Aguilar, C. (2018). Calidad de vida en el trabajo en operadores de autotransporte. *Psicología desde el Caribe*, Número especial 2018, 80-97. DOI: <http://dx.doi.org/10.14482/psdc.35.4.306.8>
- [15] Costa, P. y McCrae, R. (2011). The Five-Factor Model of Personality and Its Relevance to Personality Disorders. Published Online: 6(4), 343-359. <https://doi.org/10.1521/pedi.1992.6.4.343>

- [16] Cuevas, *et. al.* (2022). Estadística de accidentes de tránsito, año 2021 Documento técnico No. 86. México: Instituto Mexicano del Transporte. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt686.pdf>
- [17] Cummins, R. (2000). Objective and subjective quality of life: An interactive model. Netherlands: Social Indicators Research, 52, 55-72. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1007027822521>
- [18] Dahlen, E.; White, R. (2006). The Big Five factors, sensation seeking, and driving anger in the prediction of unsafe driving. *Personal. Individ. Differ.* 41: 903–915.
- [19] Dingus, T. (2006). The impact of driver performance and behavior on vehicular safety and crash risk. The Federation of Behavioral Psychological, and Cognitive Sciences (FBPCS). http://www.thefederationonline.org/events/2007_HFES_APA/One-Pager_Dingus.pdf
- [20] Eysenck, H. (1946). Integrating Personality Structure, Personality Process, and Personality Development. *Proceedings of the Royal Society of Medicine.* 40(75), 76-80. <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/003591574604000209>
- [21] Fernández, N. (2011) Cuestionario de 16 factores de personalidad. Facultad de Psicología de la UNAM.
- [22] Gowda, S., Rangaswamy, N., & Rudresh, H. (2016). Personality correlates of accident-proneness in truck drivers passing. By one of the state highway of India. *Int J. Community Med Public Health*; 3(7):1841-1846.
- [23] Helliwell, J. (2008). Life satisfaction and quality of development. National Bureau of Economic Research. Working Paper 14507. <https://www.nber.org/papers/w14507>
- [24] Herzberg, F.; Mausner, B.; Snyderman, B. (1959). The motivation to work. New York, United States. Wiley Ed. <https://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/psicologia/article/view/11753/214421446487>
- [25] Hung, Ch, Lee, Y, Luo, Y y Lu, J (2021). Incorporating Personality Traits to Assess the Risk Level of Aberrant Driving Behaviors for Truck Drivers. *International Journal of Environmental Research and Public Health.* 18(9), 4601; <https://doi.org/10.3390/ijerph18094601>
- [26] Jiménez, E., Escobar, O., & García, J. (2018). Personality and truck operators personal satisfaction as accident rate predictors in freight transportation. Congreso Internacional de Logística y Cadena de Suministro (CiLOG). Asociación Mexicana de Logística y Cadena de

Suministro, A.C. (AML)

- [27] Knipling, R. (2021). ¿What's your safety personality? Safety For the Longhaul. <https://safetyforthelonghaul.com/2021/04/19/whats-your-safety-personality/>
- [28] Lajunen, T. y Summala, H. (1995). Driving Experience, Personality, and Skill and Safety-Motive Dimensions in Drivers' Self-Assessments. Pergamon, 19(3), 307-318. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/019188699500068H>
- [29] Li, P. (2017) Constructing the Risk Level Models Based on Inter-City Bus Drivers' Personalities. Master's Thesis, Department of Transportation and Communication Management Science, National Cheng Kung University, Tainan City, Taiwan, 2017.
- [30] Linkov, V, Zaoral, A, Řezáč, P, Pai, Ch. (2019). Personality and professional drivers' driving behavior. ELSEIVER, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour. 60, 105-110. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2022.07.003>
- [31] Páez, M., Abarca, E., Gómez, N., & Mendoza, A. (2019). Estudio para predecir la fatiga en conductores del Servicio Público Federal. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 548.
- [32] Reyes, I. (1993). Las Redes semánticas naturales, su conceptualización y su utilización en la construcción de instrumentos. Revista de Psicología Social y Personalidad, 9(1), 81-97
- [33] Palma, S. (2005). Manual de Escala de Satisfacción Laboral SL-SPC para trabajadores de Lima metropolitana. Perú, Lima.
- [34] Palma, S. (2009). Elaboración y validación de una escala de satisfacción laboral SL-SPC para trabajadores de Lima Metropolitana. Ed. Cid Editor.
- [35] Qu, W, Luo, X, Wang, Y, y Ge, Y. (2022). Effects of personality on driving behaviors among professional truck drivers: The mediating effect of safety climate. ELSEIVER, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour. 89, 289-302. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2022.07.003>
- [36] Soria, V., Villegas, N., & Mendoza, A. (2023). Estrategias para reducir lesiones en los accidentes viales causados por el factor humano durante la conducción. Instituto Mexicano del Transporte. Publicación Técnica No. 779.
- [37] Sullman, M, Meadows, M. & Pajo, K. (2002). Aberrant driving behaviours amongst New

Zealand truck drivers. *Transportation Research Part F*, 5: 217–232.

- [38] Sümer, N. (2003). Personality and behavioral predictors of traffic accidents: testing a contextual mediated model. *Accident Analysis & Prevention*, 35(6), 949-964.
- [39] Wei, C., Lee, Y., Luo, Y., & Lu, J. (2021). Incorporating Personality Traits to Assess the Risk Level of Aberrant Driving Behaviors for Truck Drivers. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2021, 18, 4601. <https://doi.org/10.3390/ijerph18094601>.
- [40] Zubiri Sáenz, F. (2013). Satisfacción y motivación profesional. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, 36(2), 193-196. <https://dx.doi.org/10.4321/S1137-66272013000200002>

CAPÍTULO 8

Potencial de intermodalismo de la carga movida por autotransporte en México

*Agustín Bustos Rosales
Miguel Gastón Cedillo Campos
José Alejandro Ascencio Laguna
Alma Rosa Zamora Domínguez*

Resumen— El presente estudio busca identificar aquella carga que se mueve actualmente por autotransporte y que, por sus características de peso, volumen, perecibilidad, distancia de recorrido y densidad económica, pudieran hacer el uso de transporte intermodal. Se utilizaron bases de datos de carga movida por autotransporte, las cuales fueron creadas a partir de 161 estaciones de encuesta instaladas a lo largo de las carreteras federales mexicanas durante los años 2007 a 2017. Para actualizar la información de la carga identificada en esas encuestas a 2023 se consideró la relación entre el PIB nacional y la carga movida. Para el preprocesamiento de los datos, se utilizó la metodología CRISP-DM, la cual es una permite orientar la gestión de los datos a la de minería de datos. Se identificó un volumen de carga de alrededor de 340 millones de toneladas anuales con potencial de ser movida por transporte intermodal y se identifican la carga generada desde y hacia los distintos estados del país, así como los principales pares origen – destino. Sin embargo, se sugiere identificar las condiciones de oferta para estimar con mayor precisión estos volúmenes de carga.

Palabras Clave—transporte intermodal; flujos de carga; transporte carretero; intercambio modal

Introducción

Desde 1991 y hasta 2017, la Dirección General de Servicios Técnicos de la hoy Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT) junto con el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) iniciaron el Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional [1, 2], el cual tuvo la finalidad de obtener información básica referente al tráfico de carga en las carreteras mexicanas.

Este estudio de campo era efectuado anualmente, recolectando datos referentes a vehículos y a cargas transportadas en las principales carreteras mexicanas federales.

Para realizar dicho estudio de campo se instalaron estaciones de encuesta a lo largo de las carreteras federales a nivel nacional. A partir de estos estudios anuales se han generado diversas bases de datos, una por estación de encuesta, las cuales han servido para la elaboración de reportes estadísticos en los que se han identificado aspectos referentes al flujo vehicular y a la operación del transporte en las carreteras federales. Con esto se ha podido identificar la presencia de vehículos vacíos y sobrecargados en cada una de las estaciones en que se han realizado las encuestas.

Uno de los primeros esfuerzos de análisis de dichas bases de datos resultó en una caracterización del autotransporte de carga a nivel nacional [3], basada en un análisis exploratorio espacial de datos (ESDA, por sus siglas en inglés). Sin embargo, ha pasado poco más de dos décadas de esa publicación.

En esa publicación se pudieron conocer:

1. Patrones de distribución de variables referentes al tráfico de carga.
2. Correlaciones existentes entre las variables y establecimiento de relaciones sistemáticas entre ellas.
3. Diferencias y semejanzas estadísticamente significativas de las variables de tipo de carga, origen – destino y configuración vehicular.

En años más recientes, se volvieron a aprovechar estas bases de datos para ver las características de la carga [4, 5, 6] para identificar los factores de ocupación del autotransporte en carreteras federales, como insumo para un modelo nacional de transporte en el que se buscaba el mejor reparto modal de la carga entre transporte carretero y transporte ferroviario, aprovechando las ventajas de cada modo de transporte.

Estas bases de datos, al mostrar los tipos y montos de carga, también pueden brindar un marco contextual para estudios de necesidades de infraestructura, puesto que dan una idea clara del tipo de mercado al que se atendería y que se vería beneficiado por la construcción, modernización o rehabilitación de infraestructura carretera.

En este trabajo se exploraron bases y conjuntos de datos sobre flujos de transporte de carga en México, usando técnicas estadísticas para conocer:

1. Patrones de distribución de variables referentes al tráfico de carga.
2. Principales productos con origen o destino través de la zona de estudio.
3. Identificación de flujos de carga que, por sus características, puedan ser transportadas por transporte intermodal, entendido como el uso combinado de transporte carretero y ferroviario, con el uso del contenedor de carga.

Para esto, se realizó un análisis de las bases de datos del Estudio estadístico de campo del autotransporte nacional (EECAN) de las últimas diez ediciones (2010 – 2017) para ver las variables de interés definidas en los objetivos para la zona de estudio.

Se seleccionaron las bases de datos correspondientes a las estaciones de encuesta instaladas en los diez últimos años ya que la SICT no tiene criterios definidos para ubicar sus estaciones de encuesta, por estos diez años de encuesta fueron necesarios para obtener una cobertura nacional de las carreteras federales.

En estos diez años se obtuvieron las bases de datos correspondientes a 161 estaciones de encuesta, de las cuales se tuvo datos de poco más de un millón de vehículos de carga.

Criterios para identificar carga movida por autotransporte con potencial de intermodalismo

En un estudio de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, SCT, [7], se propuso desarrollar un Esquema Director de Estaciones de Transferencia de Carga Multi e Intermodal, en el cual se definían, entre otras cosas, los criterios para identificar aquella carga que se mueve por autotransporte y que, por sus características, podría moverse por transporte intermodal.

Para ello, el problema se planteó de la siguiente manera:

Se tiene un conjunto de flujos de mercancías, los cuales componen el mercado doméstico

entre estados del país por autotransporte. Se define como flujo de mercancías, f_{kij} , al flujo de mercancías del tipo $k=1, 2, \dots, 98$ (clasificados según capítulos arancelarios) movidos por autotransporte con origen en el estado i y destino en el estado j (de manera similar que en la Figura 1).

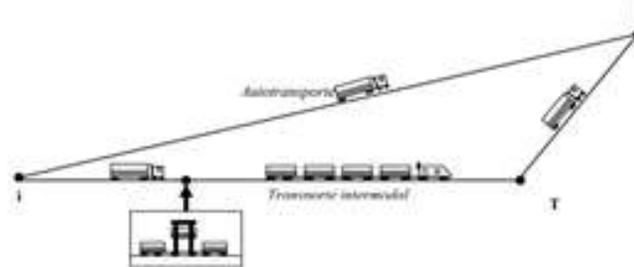


Figura 1. Situación actual y alternativa del transporte

El desvío de flujos de mercancías f_{kij} del autotransporte al transporte intermodal, se sustenta a partir del supuesto de que la nueva alternativa significará una reducción en el costo generalizado del transporte para ciertos flujos, de forma tal que los usuarios y/o empresas seleccionarán el transporte intermodal por representar un menor costo con respecto al autotransporte.

Para este trabajo se utilizó equipo del Laboratorio de Visión Artificial del Transporte, del Instituto Mexicano del Transporte (IMT)

De los factores o criterios relacionados con el reparto o la selección del modo de transporte, se consideró un conjunto de criterios elegidos con base en [5], donde previamente se hizo un análisis sobre el tema y son los que se encontraron más comúnmente asociadas con la selección modal, y son también los criterios de los cuales se pudo obtener información.

Peso de los flujos de las mercancías

El intermodalismo se caracteriza por su participación en el movimiento de volúmenes en toneladas de relativa importancia. La magnitud de los embarques en toneladas es uno de los criterios que los usuarios o responsables de la carga consideran en la selección de modo de transporte. Con este criterio se supone que entre mayor es el volumen en toneladas de un flujo de mercancías que van de un origen i a un destino j , mayor es la susceptibilidad para cambiar del modo carretero al intermodalismo de dicho flujo al permitir la aplicación de economías de escala. Este planteamiento se hace con base en varios de los estudios antes mencionados [1,2,4].

En este trabajo se establece el umbral de peso a partir de la magnitud de los flujos de mercancías contenerizadas por ferrocarril. Así, en [7] se establece como límite inferior 10,000 ton para la selección de los flujos con mayor potencial para el intermodalismo. Definiéndose

como W_{kij} al peso de las mercancías en toneladas del producto k ($k = 1, 2, 3 \dots, 98$) entre el estado de origen i y el estado de destino j .

Manteniendo la Integridad de las Especificaciones

Otro de los factores más comúnmente asociado a la selección modal es la distancia de recorrido final. Esto se atribuye a que la tarifa varía en alguna medida conforme la distancia aumenta. Por lo general en el caso del ferrocarril su costo de transporte es una función lineal de la distancia y que su costo marginal por kilómetro es menor que el costo marginal por kilómetro del autotransporte. Generalmente, el ferrocarril y específicamente el intermodalismo se asocia con los recorridos a grandes distancias debido a que es donde se presentan las condiciones para la aplicación de las economías de escala. En [7] se hace un análisis de las tarifas del transporte de vehículos sin rodar dentro del territorio nacional para los dos modos, autotransporte y ferrocarril. Se llega a la conclusión de que el ferrocarril tiene un gran potencial en el mercado doméstico, el cual la mayor parte es atendido por el transporte carretero.

Debido a lo anterior y con base también en [7] se propone un recorrido de 400 km, la cual es el mínimo de equilibrio que se observó en los estudios antes mencionados, es decir, $D_{kij} t > 400$ km, siendo D la distancia más corta entre un origen y destino de un embarque asociado al producto k . Para esto, se vio la conveniencia de agrupar los más de 2,500 municipios a nivel nacional que pudieran servir como origen o destino en centroides estatales. Como ya se mencionó anteriormente, el subíndice i representa el estado de origen y j el estado de destino en el caso de transporte de mercancías en mercado interno, mientras que, en mercado internacional, i representa el estado origen y j el puerto o cruce fronterizo de salida del país en el caso de las exportaciones mientras que en las importaciones i representa el puerto o cruce fronterizo de entrada al país y j el estado de destino.

Productos de baja caducidad

Dadas las características de operación del transporte ferroviario e intermodal, para los flujos de mercancías de comercio exterior a través de la frontera norte y para los de mercado doméstico, con base en [8] se consideró que los flujos susceptibles de cambiar del modo carretero al intermodal son aquellos que involucran mercancías k de media y baja caducidad.

Accesibilidad al servicio ferroviario

Con este criterio lo que se busca es seleccionar aquellos flujos que cuenten con infraestructura ferroviaria en el estado que se ha definido como origen, tratándose de las exportaciones y destino en el caso de las importaciones.

Es así que en estudios anteriores [3, 4] se descartaron flujos con origen o destino en Baja California Sur, Guerrero, Morelos, Chiapas y Quintana Roo por no contar con acceso al ferrocarril. En este estudio si se consideraron estos estados bajo el supuesto de que se pudieran formar servicios a partir de estados cercanos que si cuenten con infraestructura ferroviaria y que cumplan con los demás criterios.

Características y manejo de bases de datos

Para el presente estudio se consideraron las últimas diez ediciones de la encuesta y, de acuerdo con [1, 2], las estaciones instaladas en dichos años se muestran en la tabla I. Como puede observarse, se analizaron poco más de un millón de registros, en los que cada registro corresponde a un vehículo de carga encuestado. En estas estaciones instaladas se encuestó a la totalidad de los vehículos de pasajeros y de carga que pasaron por ellas.

Como se ha mencionado, la información de la carga movida fue recabada en estaciones de encuesta que fueron instaladas en distintos años, por lo que fue necesario homologar los montos de carga a cantidades equivalentes para el año 2023. Para esta homologación se usó la relación existente entre la carga movida y el producto interno bruto (PIB) observados en cada año. En la Tabla II se muestran los factores de actualización a partir del Producto Interno Bruto (PIB) nacional con base en información de INEGI [9]. Cabe mencionar que en las bases de datos de INEGI el año base es 2018, por lo que la actualización se realizó en dos pasos:

1. Actualizar las bases de datos del EECAN a 2018
2. Proyectar las bases de datos de 2018 hacia 2023

Tabla 1
Vehículos encuestados de por año de encuesta

Año	Estaciones	Vehículos encuestados	Promedio por estación
2007	12	93,996	7,833
2008	10	61,503	6,150
2009	17	76,845	4,520
2010	20	108,505	5,425
2011	20	141,021	7,051
2012	18	120,651	6,703
2013	18	198,003	11,000

2014	10	71,140	7,114
2015	16	78,584	4,912
2016	14	111,619	7,973
2017	6	28,795	4,799
Total	161	1,090,662	--

Fuente: Gutiérrez et al., 2018

Tabla 2
Factor de actualización de la carga con base en PIB

AÑO	PIB 1T	factor 2023
2007	20,100,181	1.2303
2008	20,367,921	1.2141
2009	18,944,394	1.3053
2010	19,804,981	1.2486
2011	20,516,991	1.2053
2012	21,329,659	1.1593
2013	21,707,486	1.1392
2014	21,995,098	1.1243
2015	22,612,355	1.0936
2016	23,011,571	1.0746
2017	23,704,041	1.0432
2023	24,728,312	1

Fuente: INEGI, 2023

Preprocesamiento de las bases de datos

En este estudio, específicamente para el preprocesamiento de los datos, se ha partido de la metodología CRISP-DM, con sus siglas en inglés Cross-Industry Standard Process for Data Mininig, el cual es una técnica que permite orientar la gestión de los datos a la de minería de datos [10]. Dicha metodología considera una estructura modular, flexible y con un ciclo iterativo de mejora continua que da posibilidad al refinamiento constante. Esta técnica es ampliamente utilizada debido a las ventajas que de acuerdo con [11] pueden ser la posibilidad de replicación de proyectos independientemente de la industria, aplicación o proyecto;

su neutralidad con respecto a las herramientas y su enfoque en las situaciones de negocios y en el análisis técnico.

Es importante mencionar que las fases CRISP-DM utilizadas en este proyecto son las de comprensión del negocio, y comprensión y preparación de los datos, la primera de ellas busca definir los objetivos y criterios de éxito, en este caso, entender y detectar el movimiento de carga carretera y la posibilidad de ser transferida al ferrocarril. La segunda de ellos es permite la recopilación de los datos, habiendo detectado como principal insumo los conjuntos de datos publicados en [2] y la tercera se han identificado las variables claves y los periodos a considerar para que el análisis sea significativo.

Como se puede observar en la figura 2, se han considerado 20 variables, donde 3 de ellas son float64 (valores numéricos con decimales), 3 son int64 (valores numéricos sin decimales) y 14 son object (caracteres). Los datos que han permitido el análisis son: clave de la estación, la fecha de registro, el tipo de vehículo, el origen y destino, modelo del vehículo, el tipo de carga, el peso y el tipo de mercado (importación, exportación o interno).

Se ha desarrollado un algoritmo de homologación de información que considera la estructura entre las bases de datos de los diferentes años y la forma en la que se reconoce cada clase, por ejemplo, el tipo de vehículo, el tipo de mercado, etc., a continuación, se presenta el proceso:

1. Leer cada archivo de la base de datos verificando su extensión y condicionado para cambiar de un proceso a otro, por ejemplo, para leer base de datos Excel, CSV, DBF, etc.
2. Obtener y comprar el nombre de los campos en cada base de datos.
3. Renombrar los campos con diferente nombre y homologar al estándar.
4. Obtener el nombre de los datos por cada campo y homologar a un estándar, por ejemplo, de 'G' a 'Gasolina' o de 'GASOLINA' a 'Gasolina', etc.
5. Eliminar campos adicionales que no son de interés a este estudio.
6. Concatenar en una base de datos integral la información de los archivos ya homologados.
7. Ya que se tiene la base de datos homologada se eliminan los registros de vehículos que no son de carga.
8. Se almacena la base de datos en un formato de alto rendimiento para lectura, en este caso CSV separado por comas.

```
Data columns (total 20 columns):
#   Column      Dtype
---  -
0   CLAVE_ESTACION  int64
1   AÑO             int64
2   ESTACIÓN       object
3   FECHA          object
4   HORA           int64
5   TIPO           object
6   VEHÍCULO       object
7   ORIGEN         object
8   POBORI         object
9   ENTORI         object
10  DESTINO        object
11  POBDES         object
12  ENTDES         object
13  MODELO         float64
14  COMBUSTIBL     object
15  CLAVECARGA     object
16  CARGA          object
17  PESOCARGA      float64
18  MERCADO        object
19  PBV            float64
dtypes: float64(3), int64(3), object(14)
```

Figura 2. Información de las variables seleccionadas.

En la figura 3 se presenta un ejemplo de una función codificada con el lenguaje de programación Python que permite detectar la extensión del archivo y generar un comando de lectura diferente para cada uno de ellas, el algoritmo puede buscar dentro de una carpeta los posibles archivos de interés, por ejemplo, discrimina los archivos generados automáticamente por algún compilador “.ipynb_checkpoints”. El método generado en la misma imagen manda llamar a otro denominado ColumnRename, que verifica la estructura de los diferentes archivos y los retorna con la estructura predefinida para el caso de estudio. De la misma manera a través de este tipo de programación se realiza la homologación de las diferentes estaciones del EECAN de los años 2007 al 2017, además de proponer un proceso que permita la agregación de más bases de datos a futuro.

```
In [5]: def ProcessDb(carpeta):
        contenido = os.listdir(carpeta)
        count = 0
        for archivo in contenido:
            if archivo != ".ipynb_checkpoints":
                clave_estacion = archivo[:3]
                pos_point = archivo.find('.')
                nombre = archivo[3:pos_point]
                extension = archivo[pos_point:]
                print(clave_estacion+"-"+nombre)
                if extension == '.dbf' or extension == '.DBF' or extension == '.Dbf':
                    df = DBF("./"+carpeta+"/"+archivo, encoding='latin-1')
                    df = pd.DataFrame(iter(df))
                else:
                    df = pd.read_excel("./"+carpeta+"/"+archivo)
                #df = ColumnRename(carpeta,df)
                df = ColumnRename(df,nombre,carpeta)
                print(clave_estacion+"-"+str(len(df)))
                #print(df.columns)
                columns = [
                    #"ESTACIÓN",
                    "FECHA",
                    "HORA",
                    "TIPO",
                    "VEHÍCULO",
                    "ORIGEN",
                    "POBORI",
                    "ENTORI",
                    "DESTINO",
                    "POBDES",
                    "ENTDES",
                    "MODELO",
                    "COMBUSTIBL",
                    "CLAVECARGA",
                    "CARGA",
                    "PESOCARGA",
                    "MERCADO",
                    "PBV"
                ]
```

Figura 3. Ejemplo de proceso de homologación automática.

A continuación, se presenta un listado de los procesos de limpieza a los cuales se le dedicaron mayores recursos:

- Homologación de nombres. Modificar las palabras a un estándar, Como se muestra en la Tabla 3.
- Decodificar el día, mes y año en un solo atributo compuesto de tipo fecha.
- Codificar las clases de un atributo a conjunto de atributos. El proceso consiste en identificar los tipos de mercado encontrados en el atributo "MERCADO" y convertirlo a los atributos EXP, IMP y MI, que representan la exportación, importación y mercado interno, el resultado final es la agregación de 3 variables por registro y la ocurrencia se marca con una "X".
- Eliminación de registros. Se identificaron los registros que no contenían los atributos de interés o que no se podían calcular a través de otros.
- Homologación de peso de carga. Se identificó si el valor del peso en cada una de las bases de datos estaba en unidades de kilogramos para homologar a toneladas, esto considerando algunos procesos en automático, por ejemplo, si el peso de la carga es mayo

que el peso bruto vehicular (campo denominado PBV), entonces se considera que está en kilogramos, pero si es igual o menor se consideran toneladas.

Tabla 3
Ejemplos de homologación de campos

Atributo	Ocurrencia 1	Ocurrencia 1	Ocurrencia 1
Origen	Cveori	Cvepobori	Oricedo
Destino	Cvedes	Cvepobdes	Descedo
Clave carga	Cvecarga	Cvecar	
Carga	Cargatexto		
Peso carga	Pesocond	Ton	Toneladas
Vehículo	Vehícu	Tipo	Tipos

Identificación de flujos potenciales de carga

En [4] se establece una clasificación de mercancías para poder construir una matriz origen – destino. Sin embargo, las bases de datos de autotransporte son más detalladas en su clasificación que las bases ferroviarias, por lo que se consideró conveniente homologar la clasificación de ambos modos con la clasificación utilizada por la Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario [3], la cual se simplificó para efectos de identificar la carga que pudiera usar el transporte intermodal:

1. Abono
2. Granel agrícola
3. Granel mineral
4. Petróleo y sus derivados
5. Productos forestales
6. Productos industriales
7. Productos minerales

En la Tabla 4 se muestran las toneladas equivalentes al año 2023 que fueron movidas a nivel nacional, correspondientes a los tipos de carga señalados en la clasificación arriba mencionada.

Se puede apreciar que la totalidad de carga que podría hacer uso del ferrocarril está en el orden de 430 millones de toneladas anuales, de las cuales, por sus características, las que podrían hacer uso del transporte intermodal (contenerizado, visto en el renglón de productos industriales) es de alrededor de 340 millones de toneladas anuales (actualizadas a 2023).

Carga movida por estado origen y destino

En la Tabla 5 se identifica la carga agrupada por estado origen. Con respecto a los productos industriales, que son los que se podrían mover por contenedor, destaca la carga originada en la ciudad de México, Jalisco y Nuevo León, como es de esperarse. Sin embargo, son seguidos muy de cerca por San Luis Potosí y Veracruz y, un poco más abajo por Tamaulipas y Guanajuato.

Tabla 4
Carga con potencial de intermodalismo 2023

Tipo de carga	Toneladas 2023
Abono	250,756
Granel agrícola	6,615,751
Granel mineral	23,294,797
Petróleo y sus derivados	34,589,940
Productos forestales	10,200,254
Productos industriales	338,585,460
Productos minerales	17,238,274
Total	430,775,232

Fuente, elaboración propia con base en EECAN, IMT

Por su parte, en la misma tabla 5 se identifica la carga agrupada por estado de destino. En cuanto a productos que pudieran usar el transporte intermodal, destacan los que llegan a Nuevo León, seguido de la Ciudad de México, Tamaulipas, Veracruz y Jalisco.

Identificación de pares origen – destino

Con respecto a la carga generada desde y hacia los distintos estados, en la Tabla VI se muestran los flujos de carga de productos industriales, que son los susceptibles de ser movidos en contenedor, en toneladas anuales actualizadas a 2023, entre los distintos pares origen – destino.

A nivel estatal, se identificaron 768 diferentes pares origen – destino. En estos pares origen – destino se registraron alrededor de 340 millones de toneladas anuales. En la tabla VI se muestran solamente los primeros treinta pares origen – destino con mayor carga registrada. En cada uno de estos pares en los que se identificó que la carga que actualmente se transporte por carretera y que podrían usar transporte intermodal es mayor a dos millones de toneladas anuales. Estos treinta pares registraron el 28% de la carga potencial.

Cabe destacar que en los primeros cinco pares tienen que ver con la Ciudad de México, con destino hacia Nuevo León, Jalisco, Veracruz y Tamaulipas. El quinto par es en sentido inverso, de Nuevo León a la Ciudad de México.

Los pares entre la Ciudad de México hacia y desde Nuevo León y Tamaulipas, así como los que relacionan a San Luis Potosí con Tamaulipas y Nuevo León, se encuentran entre los primeros diez. Toda esta carga se mueve actualmente por el eje carretero México – Nogales.

Aunque no están entre los diez primeros pares, dentro del mismo eje carretero, en la misma tabla se pueden identificar los pares entre Guanajuato – Tamaulipas, Querétaro –Tamaulipas, Ciudad de México – Coahuila, Ciudad de México – San Luis Potosí y Querétaro – Nuevo León y Querétaro - Tamaulipas, ya sea en un sentido o en otro.

Otros ejes identificados en esta tabla son el México – Tijuana en sus tramos entre la Ciudad de México y Michoacán y Jalisco, así como tramos entre Jalisco hacia Zacatecas y San Luis Potosí.

En cuanto a otros ejes carreteros involucrados se pueden mencionar los siguientes:

- En el eje México – Cd. Juárez, se encuentran los pares entre la Ciudad de México y Chihuahua y Zacatecas.
- En el eje Manzanillo – Tampico se identificaron los pares entre Jalisco, Zacatecas y San Luis Potosí.

En el eje México – Puebla – Progreso, se identificaron pares entre la Ciudad de México, Veracruz, Tabasco y Yucatán. Cabe mencionar que la distancia entre la ciudad de México y Veracruz apenas supera el umbral de 400 Km, por lo que sería menos probable que los usuarios opten por el transporte intermodal.

Tabla 5

Carga con potencial de intermodalismo (Productos industriales) por estado origen o destino, en toneladas de 2023

	ORIGEN	DESTINO
AGS	8,742,563	5,736,624
BC	9,320,280	13,690,051
BCS	170,054	432,089
CAMP	1,317,782	2,105,020
CDMX	52,663,716	26,789,530
CHIH	13,977,281	20,171,099
CHIS	5,068,778	8,065,652

COAH	9,432,867	17,869,713
COL	5,093,556	7,554,626
DGO	3,499,335	8,655,781
GRO	2,990,634	4,691,354
GTO	13,334,200	5,177,885
HGO	7,066,947	3,745,735
JAL	23,589,285	22,410,176
MEX	13,354,362	6,813,918
MICH	12,042,839	8,178,174
MOR	4,672,143	2,397,129
NAY	861,883	1,197,909
NL	22,634,710	31,175,020
OAX	5,196,956	6,710,105
PUE	15,071,548	7,612,801
QRO	14,173,534	5,567,780
QROO	2,821,873	5,679,298
SIN	6,712,911	9,397,114
SLP	21,483,562	7,963,818
SON	6,689,202	10,586,227
TAB	8,012,781	10,805,758
TAMPS	15,665,657	25,640,809
TLAX	1,863,454	569,675
VER	19,631,420	23,840,125
YUC	5,355,014	12,754,346
ZAC	5,811,595	14,279,214

Fuente: Elaboración propia, con datos de Instituto Mexicano del Transporte

Tabla 6
Principales pares origen – destinos ordenados por flujo de carga (en toneladas)

Origen	Destino	Toneladas 2023
CDMX	NL	7,417,573
CDMX	JAL	5,324,180
CDMX	VER	4,557,394
CDMX	TAMPS	4,508,476
NL	CDMX	4,507,463
VER	TAB	3,682,318
TAMPS	CDMX	3,401,858
JAL	ZAC	3,263,866
SLP	TAMPS	3,176,032
SLP	NL	2,950,971
CDMX	COAH	2,909,287

CDMX	BC	2,810,061
JAL	NL	2,760,347
CDMX	CHIH	2,696,492
SLP	CDMX	2,655,708
CDMX	ZAC	2,637,834
QRO	TAMPS	2,618,799
GTO	TAMPS	2,553,884
TAB	VER	2,532,815
CDMX	YUC	2,487,692
CDMX	SLP	2,451,880
JAL	CDMX	2,424,154
NL	CHIH	2,323,483
JAL	TAMPS	2,238,931
TAB	YUC	2,196,846
GTO	NL	2,192,332
VER	YUC	2,172,025
JAL	CHIH	2,125,405
NL	BC	2,117,549
MEX	TAMPS	2,111,228

Fuente: Elaboración propia, con datos de Instituto Mexicano del Transporte

Conclusiones

Durante las últimas décadas se ha realizado un estudio de campo para caracterizar el auto-transporte nacional.

A partir de estos estudios anuales se han generado diversas bases de datos, las cuales han servido para la elaboración de algunos reportes estadísticos en los que se han identificado algunos aspectos referentes al flujo vehicular y al peso y las dimensiones de los vehículos encuestados.

En esta publicación se pudieron conocer patrones de distribución de variables referentes al tráfico de carga que se movía por transporte carretero y que cuenta con potencial de inter-modalismo.

En el capítulo 4 se identificaron los principales pares origen – destino. A nivel estatal, se identificaron 768 diferentes pares origen – destino. En estos pares origen – destino se registraron alrededor de 340 millones de toneladas anuales.

Cabe destacar que en los primeros cinco pares tienen que ver con la Ciudad de México, con

destino hacia Nuevo León, Jalisco, Veracruz y Tamaulipas. El quinto par es en sentido inverso, de Nuevo León a la Ciudad de México.

Los pares entre la Ciudad de México hacia y desde Nuevo León y Tamaulipas, así como los que relacionan a San Luis Potosí con Tamaulipas y Nuevo León, se encuentran entre los primeros diez. Toda esta carga se mueve actualmente por el eje carretero México – Nogales.

Aunque no están entre los diez primeros pares, dentro del mismo eje carretero, se pueden identificar los pares entre Guanajuato – Tamaulipas, Querétaro –Tamaulipas, Ciudad de México – Coahuila, Ciudad de México – San Luis Potosí y Querétaro – Nuevo León y Querétaro - Tamaulipas, ya sea en un sentido o en otro.

Otros ejes identificados en esta tabla son el México – Tijuana en sus tramos entre la Ciudad de México y Michoacán y Jalisco, así como tramos entre Jalisco hacia Zacatecas y San Luis Potosí.

En cuanto a otros ejes carreteros involucrados se pueden mencionar los siguientes:

- En el eje México – Cd. Juárez, se encuentran los pares entre la Ciudad de México y Chihuahua y Zacatecas.
- En el eje Manzanillo – Tampico se identificaron los pares entre Jalisco, Zacatecas y San Luis Potosí.

En el eje México – Puebla – Progreso, se identificaron pares entre la Ciudad de México, Veracruz, Tabasco y Yucatán. Cabe mencionar que la distancia entre la ciudad de México y Veracruz apenas supera el umbral de 400 Km, por lo que sería menos probable que los usuarios opten por el transporte intermodal.

Este es un primer acercamiento que muestra de manera global los volúmenes de carga movida por autotransporte que podrían usar el transporte intermodal. Es necesario identificar las condiciones de oferta como pudieran ser la coordinación y consolidación de envíos, adecuación a líneas de producción, entre otras, para estimar con mayor precisión estos volúmenes de carga.

Este tipo de estudios puede replicarse, sin embargo, se tiene la limitante de que el estudio en que se basa no se realiza desde 2017, por lo que se realizó una actualización de los volúmenes de carga. De ahí la conveniencia de retomar estos estudios de campo por parte de la Secretaría.

Referencias

- [1] J. Gutiérrez, V. Soria, V. y M- Dorado. Análisis estadístico de la información recopilada en las estaciones instaladas en 2017. [Documento técnico No. 75]. México: Instituto Mexicano del Transporte. 2018. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/DocumentoTecnico/dt75.pdf>
- [2] Instituto Mexicano del Transporte [IMT]. (2017). *Consulta de la Base de Datos del Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional [EECAN]*. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivos DBF].
- [3] E. Moreno, A. Bustos, R. Aguerrebere, A. Becerra. (2001). Características del autotransporte público y privado de carga en las carreteras mexicanas. [Publicación técnica No. 167]. México: Instituto Mexicano del Transporte. 2001. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt167.pdf>
- [4] E. Moreno, O. Rico, A. Bustos, A., R. Montoya, C. Martner. Reparto modal óptimo del transporte terrestre de carga en México: primera etapa. [Publicación técnica No. 413]. México: Instituto Mexicano del Transporte. 2014. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt413.pdf>
- [5] E. Moreno, A. Bustos, L. Gradilla, R. Montoya, C. Martner, (2015). Hacia el desarrollo de un modelo nacional de transporte, primera fase: Construcción de la red intermodal y primeros análisis. [Publicación técnica No. 459]. México: Instituto Mexicano del Transporte. 2015. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt459.pdf>
- [6] M. Dorado, A. Mendoza, J. Gutiérrez, E. Abarca, E. (2014). *Matrices Origen – Destino Multi-producto para el autotransporte nacional de carga*. [Publicación técnica No. 409]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt409.pdf>
- [7] R. Aguerrebere, C. Martner, A. Bustos. C. Morales. Esquema Director de Estaciones de Transferencia de Carga Multi e Intermodal. [Reporte interno]. Instituto Mexicano del Transporte. 2004.
- [8] A. Bustos, J. Acha, R. Aguerrebere, A. Balbuena, y E. de la Torre,. (2003). *Análisis del potencial para el movimiento de mercancías*. [Publicación técnica No. 235]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt235.pdf>

- [9] Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2022). *Indicadores de ocupación y empleo*. [Consulta en línea]. <https://www.inegi.org.mx/app/saladeprensa/noticia.html?id=7386>
- [10] IBM. (2021). *Conceptos básicos de ayuda de CRISP-DM*. CRISP-DM. <https://www.ibm.com/docs/es/spss-modeler/SaaS?topic=dm-crisp-help-overview>
- [11] G. García. (2018). *Aplicación de la metodología CRISP-DM a la recolección y análisis de datos georreferenciados desde Twitter*. Universidad Militar Nueva Granada [Tesis de especialización]. Colombia.

CAPÍTULO 9

Explorando la eficiencia de métodos de pronóstico: Un estudio comparativo en la predicción de la demanda

*Leonardo Gabriel Hernández Landa
Carolina Solís Peña
José Daniel Mosquera Artamanov
Jorge Octavio Vega Gámez
Pablo Cesar Oviedo Salazar*

Resumen— Este estudio evalúa la eficiencia de métodos clásicos y modernos en el pronóstico de la demanda de productos en empresas de diferentes sectores. Utilizando una base de datos desafiante, encontramos que el modelo ARIMA(10,0,2) proporcionó un ajuste excepcionalmente bueno a los datos de demanda. También exploramos el método SARIMA y redes neuronales, identificando configuraciones óptimas comparables al modelo ARIMA. Nuestros hallazgos sugieren que la precisión del pronóstico depende de la adecuada calibración de los parámetros del modelo. Se establece la base para el trabajo futuro próximo para mejorar la precisión y la robustez de los modelos de pronóstico.

Palabras Clave—Pronósticos, ARIMA, SARIMA, LSTM

Introducción

El pronóstico se ha convertido en algo fundamental para las organizaciones y se encarga de poder anticipar la cantidad de unidades que se van a requerir de un producto en específico. Esto va más allá de solo mirar las ventas pasadas. La demanda puede estar influenciada por factores externos como las condiciones económicas, las campañas de marketing, la competencia y el comportamiento del consumidor. Es crucial manejar escenarios de corto, mediano y largo plazo, donde los de corto plazo nos dan la visión táctica del negocio y los escenarios a largo plazo la visión estratégica. [1]

Los pronósticos juegan un papel muy importante dentro de la cadena de suministro, ya que permiten realizar la planeación anticipándose a la demanda del cliente. Esto ayuda a hacer el mejor uso de los recursos disponibles de las empresas, así como brindar un mejor servicio al cliente. Para realizar los pronósticos es conveniente integrar los diferentes eslabones de la cadena de suministro para disminuir el efecto de la distorsión de la información. Otro aspecto importante a considerar es elegir el modelo de pronóstico adecuado de acuerdo a la disponibilidad de datos históricos. [2]

El pronóstico se considera una herramienta clave para el éxito de una empresa afectando, directamente, en muchas partes de la cuenta de resultados y, por tanto, del EBIT de la misma. Entendamos que estamos hablando de calcular una demanda que se ve afectada por dos factores tipológicamente diferenciados:

- Factores tangibles. Típicamente, datos objetivos del negocio, como son el histórico de información de pedidos, ventas y ofertas, junto con contratos ya firmados y entregas pactadas.
- Factores intangibles o futuribles. En este tipo de factores se incluyen todo tipo de estimaciones; ventas futuribles en base al impacto que entendemos tendrá una campaña de marketing, el resultado del lanzamiento de un producto, la venta estacional asociado a un factor (como puede ser un medicamento para la gripe), el efecto de la competencia, etc... en general, datos que se basan en estimaciones, más o menos formales, pero futuribles, en cualquier caso. [3]

Carecer de pronósticos o no tener pronósticos precisos genera tanta incertidumbre que podemos incurrir en comprar lo que el mercado no está demandando, no conseguimos adquirir a tiempo aquello que sí demanda el mercado o en el peor de los casos ambas situaciones simultáneamente. El resultado siempre es el mismo: excedentes de inventario muy considerables, con todo lo que ello conlleva respecto a costes de mantener inventario, consumo de recursos, etc. y por contra, una caída continua de eficacia para satisfacer las necesidades del mercado. De forma que para mantener un nivel de inventario lo más pequeño posible

manteniendo un elevado nivel de servicio necesitamos saber qué esperamos vender, es decir, necesitamos planificar pedidos, hacer pronósticos, planificar la demanda. Indudablemente, necesitaremos un buen software de previsión de la demanda, pero cabe tener en cuenta ciertos aspectos que influirán en el buen funcionamiento y en los resultados que arroje dicho software. [4]

Pronóstico de la demanda

Un pronóstico preciso y confiable de la demanda es el cimiento sobre el que se construye una cadena de suministro sólida y eficiente. A partir de él, se desarrollan estrategias que impulsan el crecimiento y la rentabilidad, garantizando la satisfacción del cliente. La gestión efectiva de la demanda es la piedra angular de una cadena de suministro exitosa. Al invertir en pronósticos precisos y estrategias bien definidas, las empresas pueden cosechar una gran variedad de beneficios, desde una mayor eficiencia y rentabilidad hasta una satisfacción del cliente inquebrantable. [5] Actualmente han surgido nuevas herramientas para pronósticos de la demanda. [6] clasifica en métodos tradicionales o clásicos de la demanda como el Error Cuadrado Medio, modelos de regresión, autoregresión y medias móviles (ARIMA) entre otros y métodos modernos o en tendencia como aplicaciones de Machine Learning, Deep learning y distintos tipos de redes neuronales.

El objetivo en esta investigación es determinar la eficiencia en la comparación de los métodos más usados tanto de métodos clásicos como de métodos modernos en el pronóstico de la demanda de una serie de productos de un par de empresas productoras de diferente tipo para comprobar la robustez y los ajustes necesarios para mejorar la eficiencia.

Revisión de literatura

Métodos tradicionales de pronósticos

El método del Promedio Móvil se posiciona como una de las técnicas más utilizadas para pronosticar la demanda, especialmente en el caso de estudio que nos ocupa. Su simplicidad y eficacia lo convierten en una herramienta atractiva para predecir el comportamiento futuro de la demanda a partir de datos históricos recientes. Este se basa en la premisa de que la demanda futura será similar a la demanda observada recientemente. En otras palabras, este método asume que los patrones de demanda tienden a persistir en el tiempo, por lo que el promedio de la demanda en los últimos periodos puede ser un buen indicador del comportamiento futuro. [7]

Además del promedio móvil, la regresión se alza como una técnica estadística fundamental en el análisis de series temporales. Su función principal reside en la construcción de modelos que capturan la relación entre una variable dependiente (el valor que queremos predecir) y una o varias variables independientes (factores que influyen en ella). Para pronósticos, la regresión se convierte en una herramienta para anticipar valores futuros a partir de la asociación histórica entre las variables. De esta manera, podemos obtener proyecciones informadas sobre el comportamiento de las series temporales, permitiendo una mejor toma de decisiones. Palao et al. (2021)

En el ámbito del pronóstico de series temporales, dos modelos estadísticos se destacan por su precisión y versatilidad: ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) y SARIMA (Seasonal ARIMA). Ambos modelos se basan en la idea de que el comportamiento futuro de una serie temporal puede predecirse a partir de su comportamiento pasado, considerando la estacionalidad en el caso de SARIMA.[5]

Tabla 1
Comparativa de métodos tradicionales de pronósticos

Método	Descripción	Referencias
Regresión lineal	Un modelo estadístico que relaciona una variable dependiente con una o más variables independientes.	[8] [9] [10] [11]
ARIMA	Un modelo estadístico que se utiliza para pronosticar series de tiempo.	[12], [13]
SARIMA	Una extensión del modelo ARIMA que incluye un componente estacional.	[14], [15]
Promedio móvil	Un método de pronóstico que calcula el promedio de los valores pasados de una serie de tiempo.	[16], [17]

Metodos modernos de pronósticos

En el ámbito de la cadena de suministro, la implementación de métodos avanzados de previsión de la demanda, como el aprendizaje automático, puede generar mejoras sustanciales en los resultados de desempeño. El sector minorista, debido a su importante contribución a los ingresos y su demanda algo impredecible, se ha convertido en el centro de investigaciones relacionadas con el análisis de series temporales de demanda. [18]

Entre las diversas herramientas disponibles, las redes neuronales artificiales (ANN) han ganado popularidad debido a su capacidad para modelar relaciones complejas y aprender

de grandes conjuntos de datos. Según Mediavilla et al (2022), hay tres tipos de redes neuronales comúnmente utilizadas en la previsión de la demanda: Perceptrón Multicapa (MLP), Memoria a Largo Plazo (LSTM) y Red Neuronal Artificial (ANN), desde la perspectiva de un experto en cadena de suministro.

El MLP es una red neuronal artificial relativamente simple compuesta por capas de neuronas interconectadas. Cada neurona recibe entradas, las procesa y genera una salida. Las capas se apilan entre sí, formando una estructura multinivel que permite el aprendizaje de patrones complejos.

Las redes LSTM son un tipo especial de red neuronal artificial diseñadas para abordar el problema de la memoria a largo plazo. Incorporan celdas de memoria que les permiten almacenar y recuperar información a lo largo del tiempo, lo que las hace ideales para modelar series temporales con dependencias de largo plazo.

El término "Red Neuronal Artificial" (ANN) es un término general que abarca una amplia gama de modelos de aprendizaje automático inspirados en el funcionamiento del cerebro humano. En el contexto de la previsión de la demanda, las ANN se refieren a redes neuronales artificiales con diversas arquitecturas y algoritmos de aprendizaje.

Tabla 2
Comparativa de métodos modernos de pronósticos

Método	Descripción	Referencias
Redes neuronales recurrentes (RNN)	Un tipo de red neuronal que es capaz de modelar dependencias de largo alcance en series de tiempo.	[19], [20], [21]
Redes neuronales convolucionales (CNN)	Un tipo de red neuronal que es eficaz para extraer características espaciales de los datos.	[22], [23], [24]
Redes neuronales de memoria a largo plazo (LSTM)	Un tipo de RNN que es particularmente adecuado para modelar dependencias de largo alcance en series de tiempo.	[25], [26], [27]
Pronóstico basado en árboles de decisión	Un método de pronóstico que utiliza árboles de decisión para aprender un modelo no lineal a partir de los datos.	[28], [29]

METODOLOGIA

Selección de modelos para la comparativa

Del conjunto de métodos descritos en la sección anterior se han seleccionado los métodos

tradicionales más usados (ARIMA y SARIMAX) y el método de redes neuronales LSTM por separado, después se combinan estos métodos para verificar si mejora los resultados

ARIMA

Identifique a los patrocinadores aquí. En caso de no existir, elimine este cuadro de texto. (patrocinadores). ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) es un modelo estadístico utilizado para analizar y predecir series temporales. Consiste en tres componentes:

Componente autoregresivo (AR): Utiliza las observaciones de las series temporales de períodos anteriores para predecir el valor actual. La parte autoregresiva se denota como $AR(p)$, donde “p” es el orden del modelo AR.

Componente integrado (I): Se refiere a la diferencia entre las observaciones en un período específico y las observaciones en el período anterior. Esto se hace para hacer estacionaria la serie temporal. La integración se denota como $I(d)$, donde “d” es el grado de diferenciación necesario para hacer estacionaria la serie temporal.

Componente de media móvil (MA): Utiliza el error residual de los modelos de regresión de las observaciones anteriores para predecir el valor actual. La parte de media móvil se denota como $MA(q)$, donde “q” es el orden del modelo MA.

En resumen, un modelo ARIMA se denota como $ARIMA(p, d, q)$.

Metodología de ajuste de parámetros:

División del conjunto de datos: El conjunto de datos se divide en un conjunto de entrenamiento y un conjunto de prueba. Usualmente, el 66% de los datos se utilizan para entrenar el modelo y el restante 34% se utiliza para evaluar su rendimiento.

Selección de parámetros: Se seleccionan diferentes combinaciones de parámetros (p, d, q) para el modelo ARIMA. Esto se hace mediante un enfoque de búsqueda exhaustiva, donde se prueban todas las combinaciones posibles dentro de ciertos rangos predefinidos.

Entrenamiento del modelo: Para cada combinación de parámetros, se entrena un modelo ARIMA utilizando el conjunto de entrenamiento.

Validación del modelo: Se evalúa el rendimiento de cada modelo utilizando el conjunto de prueba. En este caso, se utiliza el error cuadrático medio (MSE) como métrica de evaluación.

Selección del mejor modelo: Se selecciona el modelo que produce el menor MSE como el mejor modelo ARIMA. Este modelo se utiliza para hacer predicciones futuras.

SARIMA

El proceso de SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Variables) es una extensión del modelo ARIMA que incorpora componentes de estacionalidad y permite la inclusión de variables exógenas para mejorar la precisión de las predicciones en series temporales.

Identificación de la estacionalidad y tendencia: Antes de ajustar un modelo SARIMA, es importante identificar si la serie temporal exhibe algún patrón estacional o tendencia. Esto se puede hacer visualmente mediante gráficos de la serie temporal, como gráficos de líneas y gráficos de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (PACF).

Estacionalidad y diferenciación: Si la serie temporal muestra estacionalidad, es necesario diferenciarla para hacerla estacionaria. Esto implica restar el valor actual del valor de hace un período. Si la serie aún muestra estacionalidad después de la diferenciación, puede ser necesario aplicar diferenciación estacional. Además de la diferenciación para la estacionalidad, puede ser necesario aplicar diferenciación regular para eliminar cualquier tendencia.

Identificación de los parámetros del modelo: Similar al proceso de ARIMA, se utilizan gráficos ACF y PACF para identificar los parámetros p , d y q del modelo SARIMA. Además, para el componente estacional, se utilizan los gráficos ACF y PACF de los datos diferenciados estacionalmente.

Ajuste del modelo SARIMA: Una vez que se han identificado los parámetros del modelo, se ajusta el modelo SARIMA a los datos de la serie temporal. Esto se realiza utilizando métodos de ajuste de modelos estadísticos como la función de ajuste fit en bibliotecas como StatsModels en Python.

Validación del modelo: Después de ajustar el modelo, se valida su rendimiento utilizando técnicas como la validación cruzada o dividiendo los datos en conjuntos de entrenamiento y prueba. Se utilizan métricas de evaluación como el error cuadrático medio (MSE) para comparar las predicciones del modelo con los valores reales.

Redes Neuronales de Memoria a Largo Plazo

Una red LSTM (por sus siglas en inglés) consta de unidades de memoria llamadas “celdas LSTM”, que son responsables de mantener y actualizar estados de memoria a lo largo del tiempo.

Cada celda LSTM está compuesta por tres “puertas” principales:

- Puerta de Olvido (Forget Gate): Determina qué información debe ser descartada o olvidada de la celda de memoria anterior.
- Puerta de Entrada (Input Gate): Decide qué nueva información debe ser almacenada en la celda de memoria.
- Puerta de Salida (Output Gate): Controla qué parte de la información en la celda de memoria se utilizará para hacer predicciones en el paso de tiempo actual.
- Estas puertas están compuestas por funciones de activación sigmoideas y operaciones de multiplicación de elementos, lo que permite a la red aprender y adaptarse a diferentes patrones y dependencias en los datos.

Proceso de Aprendizaje: Durante el proceso de entrenamiento, las redes LSTM utilizan algoritmos de optimización, como el descenso de gradiente estocástico (SGD) o el algoritmo de propagación hacia atrás a través del tiempo (BPTT), para actualizar los parámetros de la red y minimizar una función de pérdida. La función de pérdida se calcula comparando las predicciones de la red con los valores reales de los datos de entrenamiento.

Resultados

Preparación y análisis preliminar de la información

La base de datos que se está utilizando es una base de datos difícil de pronósticar, esto es con la finalidad de complicar los resultados del modelo de predicción y verificar la robustez de los modelos propuestos. La Figura 1 muestra el gráfico del comportamiento de los datos para el test de los modelos.

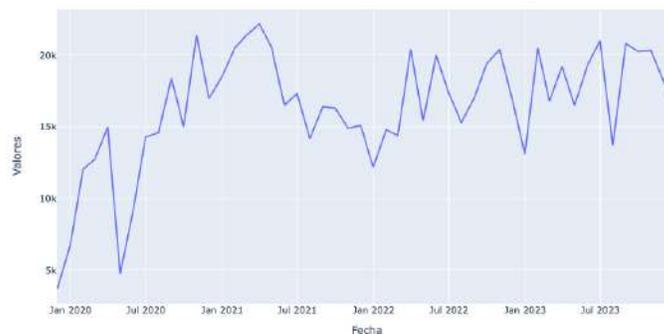


Figura 1. Gráfico del comportamiento de los datos

De estos datos como serie de tiempo podemos observar en la Figura 2 su estructura mediante la descomposición en terminos de tendencia, estacionalidad y residuales. Se nota claramente que existe estacionalidad y la tendencia es muy marcada por el efecto de la pandemia. Se observan pocos datos atipicos en los residuales.

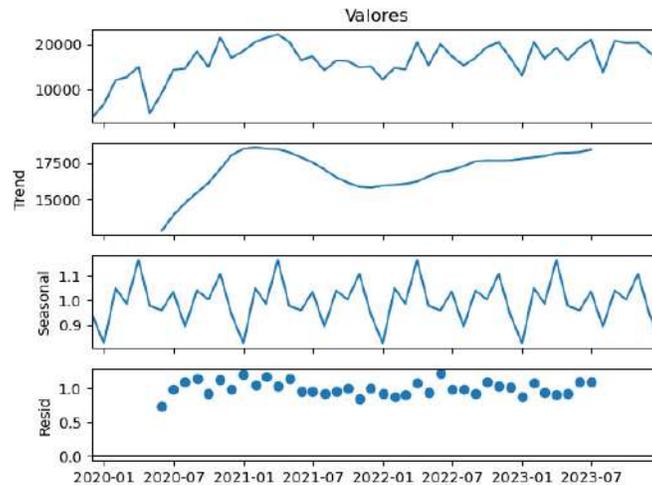


Figura 2. Descomposición de la serie de tiempo

Aplicación del método ARIMA en la serie de tiempo

Primeramente se realiza la prueba de estacionariedad a los datos mediante analisis grafico y la prueba de Dicker Fuller.

Para probar la estacionariedad, utilizaremos la Prueba Aumentada de Dickey Fuller:

Hipótesis Nula: Supone que la serie temporal no es estacionaria.

Hipótesis Alternativa: Si se rechaza la hipótesis nula, entonces la serie temporal es estacionaria.

La Tabla 3 muestra los resultados de la prueba Dicker Fuller

- *Estadístico de Prueba (Test Statistic):* El valor de -4.33 indica que el estadístico de prueba es menor que el valor crítico al 1%, lo que sugiere una fuerte evidencia en contra de la hipótesis nula. Esto implica que la serie temporal es estacionaria.
- *Valor p (p-value):* El valor p de 0.00 también sugiere una fuerte evidencia en contra de la hipótesis nula. Esto confirma aún más que la serie temporal es estacionaria.

Tabla 3
Resultados prueba Dicker Fuller

	Value
Test Statistic	-4.33
p-value	0.00
#Lags Used	8.00
Num of Observations	41.00
Critical Value (1%)	-3.60
Critical Value (5%)	-2.94
Critical Value (10%)	-2.61

Por ellos se sugiere que no es necesario hacer diferenciación en el parametro "d". Ahora para obtener buenos resultados del modelo vamos a utilizar el ajuste de parametros del número de terminos autoregresivos (p) y el numero de errores del pronóstico (q). El método de afinación es muy sencillo para este trabajo ya que usamos el método de la fuerza bruta para encontrar la mejor combinación de un conjunto de parámetros. La Tabla 4 Muestra la evolución del ajuste automático de parametros del ARIMA para nuestra serie de tiempo dando como mejor resultado el modelo ARIMA(10,0,2).

Tabla 4
Ajuste de los parámetros para el ARIMA

Modelo	Error	Tiempo
ARIMA(0, 0, 0)	MSE=11085386.310	Time=0.163 seconds
ARIMA(0, 0, 1)	MSE=10751264.718	Time=0.171 seconds
ARIMA(0, 1, 1)	MSE=10158691.277	Time=0.094 seconds
ARIMA(1, 0, 1)	MSE=9473659.675	Time=0.272 seconds
ARIMA(4, 0, 2)	MSE=9053018.493	Time=1.238 seconds
ARIMA(6, 0, 2)	MSE=8362504.093	Time=2.853 seconds
ARIMA(8, 0, 2)	MSE=6193150.966	Time=5.490 seconds
ARIMA(8, 1, 1)	MSE=6144446.303	Time=3.115 seconds
ARIMA(8, 2, 1)	MSE=6017929.419	Time=4.821 seconds
ARIMA(10, 0, 0)	MSE=5028436.039	Time=4.242 seconds
ARIMA(10, 0, 1)	MSE=4979996.023	Time=6.727 seconds
ARIMA(10, 0, 2)	MSE=4670726.452	Time=9.691 seconds

Al verificar el modelo con el ajuste de los datos podemos observar en la Figura 3 los valores pronosticados con el modelo ARIMA(10,0,2) que a simple vista se observa un muy buen ajuste. El error cuadrado medio de esos datos pronosticados contra los reales fue de 2115.58 lo que habla de un buen ajuste en terminos de la demanda del producto.

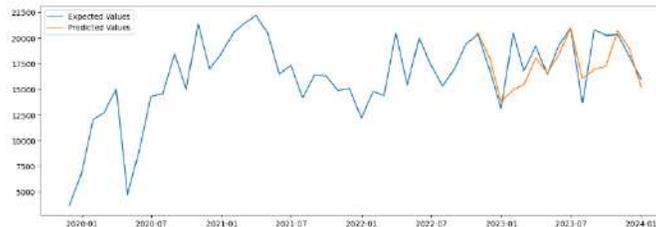


Figura 3. Pronóstico de ARIMA(10,0,2)

Aplicación del método SARIMAX en la serie de tiempo

El modelo SARIMA es una extensión del modelo ARIMA que puede manejar los efectos estacionales de los datos. Tiene un tipo de 2 órdenes $(p,d,q) \times (P,D,Q,M)$. (p,d,q) es el orden que es similar al orden del modelo ARIMA. (P,D,Q,M) se conoce como el Orden Estacional donde (P,D,Q) son similares al (p,d,q) del modelo ARIMA.

Dentro de las pruebas del modelo ARIMA y SARIMA, nos dimos cuenta que la mejor configuración para los parámetros (p,d,q) debe ser la mejor que conseguimos en la prueba pasada. Es por ello que al no estar considerando variables exógenas tenemos que calibrar ahora los parámetros de orden estacional (P, D, Q, M) , pero considerando que M por la naturaleza de los datos lo estableceremos en $M=12$, solo calibraremos los 3 primeros parámetros.

Usamos la misma estrategia que el método de calibración de los parámetros de ARIMA, se observa en la Tabla 5 que solo hubo dos mejoras en los ajustes de los parámetros

Tabla 5
Ajuste de los parámetros para el ARIMA

Modelo	Error	Tiempo
SARIMAX(0, 0, 0, 12)	MSE=5732619.776	Time=0.447 seconds
SARIMAX(0, 1, 0, 12)	MSE=5654538.666	Time=0.627 seconds

Los resultados del modelo fueron muy similares al modelo de ARIMA, con cambios visibles en la Figura 4 del ajuste de los valores pronosticados a los reales. Aquí el indicador RMSE fue de 2694.95, el cual es peor que el modelo anterior. Esto nos dice que para esta serie de tiempo no es conveniente usar el modelo SARIMA.

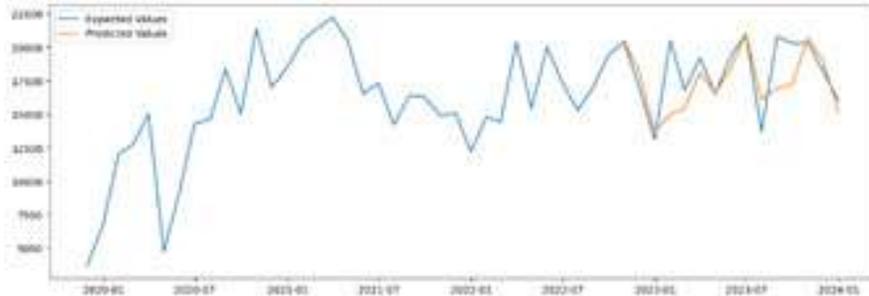


Figura 4. Pronóstico del modelo SARIMA

Pronóstico de la serie de tiempo usando Redes Neuronales

Se evaluó la serie de tiempo usando el modelo de redes LSTM, el cual es el adecuado para nuestra configuración de información de la serie de tiempo. Para obtener el mejor resultado se tienen que calibrar los parámetros que se introducen al modelo. Los parámetros que se ajustaron fueron longitud de la secuencia, número de neuronas, función de pérdida, número de épocas (epoch) y tamaño de lote. Las combinaciones son:

Tabla 6
Configuración de parámetros para ajuste de la RNA

Parámetro	Combinaciones
Numero de neuronas	(20,40,60,80,100)
Secuencia	(2,3,4)
Funcion de pérdida	(Error cuadrado,error absoluto)
epochs	(100,300,400,500)
Lote	(30,35,40)

Un ejemplo de los resultados de las combinaciones para la red neuronal se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7
Ejemplo de combinaciones para la calibración de parámetros

Seq length	neuron	Loss function	epochs	batch_size	RMSE
2	40	mean_squared_error	300	35	0.2869
2	40	mean_squared_error	400	35	0.2868
2	40	mean_squared_error	500	35	0.2868
2	40	mean_squared_error	600	35	0.2868
...

Los resultados del experimento indicaron que la configuración óptima para el modelo LSTM en nuestro estudio fue la siguiente:

- Longitud de la secuencia: 2
- Número de neuronas: 80
- Función de pérdida: mean_squared_error
- Número de épocas: 500
- Tamaño del lote (Batch Size): 35

Esta configuración proporcionó el mejor rendimiento en términos de la métrica de evaluación utilizada en nuestro experimento. La elección de estos parámetros se basó en una exhaustiva exploración de múltiples combinaciones, lo que demuestra la importancia de ajustar cuidadosamente los hiperparámetros en la construcción de modelos de redes neuronales para la predicción de series temporales. Visualmente podemos observar el resultado en la Figura 5 el ajuste obtenido con este modelo y obteniendo un RMSE de 2130.71. Bastante similar a el modelo de ARIMA.

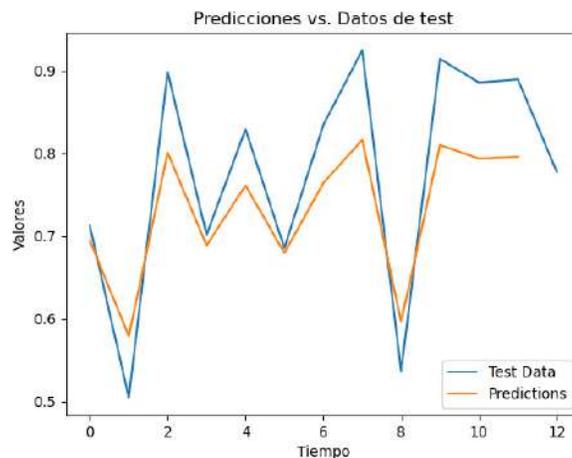


Figura 5. pronóstico del modelo LSTM

Comparación Final de los Modelos

Para una comparación visual y cuantitativa:

Tabla 8

Comparación de los modelos de pronósticos para los datos

Modelo	MSE	RMSE
ARIMA(10,0,2)	4670726.452	2115.58
SARIMAX(0,1,0,12)	5654538.666	2694.95
LSTM	-	2130.71

El modelo ARIMA(10,0,2) mostró el mejor rendimiento con el menor RMSE (2115.58), seguido de cerca por el modelo LSTM (2130.71).

El modelo SARIMAX, aunque adecuado para series estacionales, no superó a ARIMA en este caso específico, demostrando un RMSE mayor (2694.95).

Esta comparación sugiere que, para esta serie de tiempo, el modelo ARIMA es la opción más efectiva, seguido por las redes neuronales LSTM, mientras que el modelo SARIMAX no aporta mejoras significativas.

Conclusiones

En este estudio, nos propusimos determinar la eficiencia en la comparación de métodos de pronóstico tanto clásicos como modernos en la predicción de la demanda de una serie de productos en empresas de diferentes sectores. Nuestro enfoque incluyó un análisis exhaustivo de métodos tradicionales como ARIMA, así como un enfoque más contemporáneo utilizando redes neuronales LSTM. A través de la aplicación de estos métodos a conjuntos de datos desafiantes, buscamos verificar la robustez de los modelos propuestos y explorar los ajustes necesarios para mejorar su eficiencia. En resumen, nuestros hallazgos sugieren que tanto los métodos clásicos como los modernos pueden ser eficaces en el pronóstico de la demanda, pero la precisión del pronóstico depende en gran medida de la adecuada calibración de los parámetros del modelo. La elección del método de pronóstico óptimo debe basarse en un análisis cuidadoso de los datos y una evaluación exhaustiva de múltiples enfoques. Estos resultados tienen implicaciones importantes para la gestión de la cadena de suministro y la planificación empresarial, destacando la importancia de utilizar modelos de pronóstico robustos y bien ajustados para tomar decisiones informadas y eficientes.

Trabajo futuro

Como trabajo futuro, proponemos explorar métodos híbridos que combinen enfoques clásicos y modernos en el pronóstico de la demanda. Estos métodos podrían integrar las fortalezas de diferentes técnicas para mejorar aún más la precisión y la robustez de los modelos de pronóstico. Además, consideramos importante desarrollar algoritmos de optimización de parámetros que permitan una calibración más eficiente y automatizada de los modelos, reduciendo así la carga de trabajo y mejorando la reproducibilidad de los resultados.

Además, se planea ampliar el alcance de este estudio mediante la evaluación de una variedad más amplia de bases de datos de demanda. La inclusión de datos de diferentes industrias, regiones geográficas y períodos de tiempo podría proporcionar una visión más completa de la eficacia de los modelos de pronóstico en diferentes contextos y condiciones.

Referencias

- [1] L. Kurzak, "IMPORTANCE OF FORECASTING IN ENTERPRISE MANAGEMENT".
- [2] A. A. Syntetos, Z. Babai, J. E. Boylan, S. Kolassa, y K. Nikolopoulos, "Supply chain forecasting: Theory, practice, their gap and the future", *European Journal of Operational Research*, vol. 252, núm. 1, pp. 1–26, jul. 2016, doi: [10.1016/j.ejor.2015.11.010](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.11.010).
- [3] "Inicio | Kyocera Document Solutions Mexico". Consultado: el 10 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.kyoceradocumentsolutions.mx/es.html>
- [4] D. A. Benalcazar Cisneros y J. L. Tandalla Cando, "Pronóstico de generación de una mini central hidroeléctrica mediante aprendizaje automático utilizando software de código abierto.", bachelorThesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi; (UTC), 2024. Consultado: el 10 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://localhost/handle/27000/11984>
- [5] M. Abolghasemi, E. Beh, G. Tarr, y R. Gerlach, "Demand forecasting in supply chain: The impact of demand volatility in the presence of promotion", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 142, p. 106380, abr. 2020, doi: [10.1016/j.cie.2020.106380](https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106380).
- [6] S. Mukhopadhyay, A. O. Solis, y R. S. Gutierrez, "The Accuracy of Non-traditional versus Traditional Methods of Forecasting Lumpy Demand", *Journal of Forecasting*, vol. 31, núm. 8, pp. 721–735, 2012, doi: [10.1002/for.1242](https://doi.org/10.1002/for.1242).

- [7] H. Hassani, C. Beneki, E. S. Silva, N. Vandepu, y D. Ø. Madsen, "The science of statistics versus data science: What is the future?", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 173, p. 121111, dic. 2021, doi: [10.1016/j.techfore.2021.121111](https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121111).
- [8] N. Amral, C. S. Ozveren, y D. King, "Short term load forecasting using Multiple Linear Regression", en *2007 42nd International Universities Power Engineering Conference*, sep. 2007, pp. 1192–1198. doi: [10.1109/UPEC.2007.4469121](https://doi.org/10.1109/UPEC.2007.4469121).
- [9] V. Bianco, O. Manca, y S. Nardini, "Electricity consumption forecasting in Italy using linear regression models", *Energy*, vol. 34, núm. 9, pp. 1413–1421, sep. 2009, doi: [10.1016/j.energy.2009.06.034](https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.06.034).
- [10] A. Mouhaffel, C. Domínguez, B. Arcones, F. Redonda, y R. Díaz Martín, "Using Multiple Regression Analysis Lineal to Predict Occupation Market Work in Occupational Hazard Prevention Services", vol. 12, pp. 283–288, ene. 2017.
- [11] A. Goia, C. May, y G. Fusai, "Functional clustering and linear regression for peak load forecasting", *International Journal of Forecasting*, vol. 26, núm. 4, pp. 700–711, oct. 2010, doi: [10.1016/j.ijforecast.2009.05.015](https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2009.05.015).
- [12] V. Ş. Ediger y S. Akar, "ARIMA forecasting of primary energy demand by fuel in Turkey", *Energy Policy*, vol. 35, núm. 3, pp. 1701–1708, mar. 2007, doi: [10.1016/j.enpol.2006.05.009](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.05.009).
- [13] G. P. Zhang, "Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model", *Neurocomputing*, vol. 50, pp. 159–175, ene. 2003, doi: [10.1016/S0925-2312\(01\)00702-0](https://doi.org/10.1016/S0925-2312(01)00702-0).
- [14] "SciELO - Brasil - A SARIMA forecasting model to predict the number of cases of dengue in Campinas, State of São Paulo, Brazil A SARIMA forecasting model to predict the number of cases of dengue in Campinas, State of São Paulo, Brazil". Consultado: el 10 de mayo de 2024. <https://www.scielo.br/j/rsbmt/a/wQt5dCYymC9nvYVzfRMjgpj/?lang=en>
- [15] "Modelling and Forecasting of Rainfall Time Series Using SARIMA | Environmental Processes". Consultado: el 10 de mayo de 2024. [En línea]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40710-017-0226-y>
- [16] J. C. C. Chan, "Moving average stochastic volatility models with application to inflation forecast", *Journal of Econometrics*, vol. 176, núm. 2, pp. 162–172, oct. 2013, doi: [10.1016/j.jeconom.2013.05.003](https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2013.05.003).
- [17] S. Hansun, "A new approach of moving average method in time series analysis", en

2013 Conference on New Media Studies (CoNMedia), nov. 2013, pp. 1–4. doi: [10.1109/CoNMedia.2013.6708545](https://doi.org/10.1109/CoNMedia.2013.6708545).

[18] A. Amer, L. P. Eka Yani, y I. M. Alan Priyatna, “Data Analytics in the Supply Chain Management: Review of Machine Learning Applications in Demand Forecasting”, *OSCM: An Int. Journal*, pp. 1–13, dic. 2020, doi: [10.31387/oscm0440281](https://doi.org/10.31387/oscm0440281).

[19] M. Adya y F. Collopy, “How effective are neural networks at forecasting and prediction? A review and evaluation”, *Journal of Forecasting*, vol. 17, núm. 5–6, pp. 481–495, 1998, doi: [10.1002/\(SICI\)1099-131X\(199809\)17:5/6<481::AID-FOR709>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-131X(199809)17:5/6<481::AID-FOR709>3.0.CO;2-Q).

[20] P. Zhang y M. Qi, “Neural network forecasting for seasonal and trend time series”, *European Journal of Operational Research*, vol. 160, pp. 501–514, feb. 2005, doi: [10.1016/j.ejor.2003.08.037](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.08.037).

[21] I. Alon, M. Qi, y R. J. Sadowski, “Forecasting aggregate retail sales: a comparison of artificial neural networks and traditional methods”, *Journal of Retailing and Consumer Services*, vol. 8, núm. 3, pp. 147–156, may 2001, doi: [10.1016/S0969-6989\(00\)00011-4](https://doi.org/10.1016/S0969-6989(00)00011-4).

[22] A. Borovykh, S. Bohte, y C. W. Oosterlee, “Conditional Time Series Forecasting with Convolutional Neural Networks”. arXiv, el 17 de septiembre de 2018. doi: [10.48550/arXiv.1703.04691](https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.04691).

[23] I. Koprinska, D. Wu, y Z. Wang, “Convolutional Neural Networks for Energy Time Series Forecasting”, en *2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, jul. 2018, pp. 1–8. doi: [10.1109/IJCNN.2018.8489399](https://doi.org/10.1109/IJCNN.2018.8489399).

[24] A. Tsantekidis, N. Passalis, A. Tefas, J. Kannianen, M. Gabbouj, y A. Iosifidis, “Forecasting Stock Prices from the Limit Order Book Using Convolutional Neural Networks”, en *2017 IEEE 19th Conference on Business Informatics (CBI)*, jul. 2017, pp. 7–12. doi: [10.1109/CBI.2017.23](https://doi.org/10.1109/CBI.2017.23).

[25] H. Abbasimehr, M. Shabani, y M. Yousefi, “An optimized model using LSTM network for demand forecasting”, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 143, p. 106435, may 2020, doi: [10.1016/j.cie.2020.106435](https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106435).

[26] X.-H. Le, H. V. Ho, G. Lee, y S. Jung, “Application of Long Short-Term Memory (LSTM) Neural Network for Flood Forecasting”, *Water*, vol. 11, núm. 7, Art. núm. 7, jul. 2019, doi: [10.3390/w11071387](https://doi.org/10.3390/w11071387).

[27] S. Siami-Namini, N. Tavakoli, y A. Siami Namin, “A Comparison of ARIMA and LSTM in

Forecasting Time Series”, en *2018 17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA)*, dic. 2018, pp. 1394–1401. doi: [10.1109/ICMLA.2018.00227](https://doi.org/10.1109/ICMLA.2018.00227).

[28] S. Thomassey y A. Fiordaliso, “A hybrid sales forecasting system based on clustering and decision trees”, *Decision Support Systems*, vol. 42, núm. 1, pp. 408–421, oct. 2006, doi: [10.1016/j.dss.2005.01.008](https://doi.org/10.1016/j.dss.2005.01.008).

[29] G. Nie, W. Rowe, L. Zhang, Y. Tian, y Y. Shi, “Credit card churn forecasting by logistic regression and decision tree”, *Expert Systems with Applications*, vol. 38, núm. 12, pp. 15273–15285, nov. 2011, doi: [10.1016/j.eswa.2011.06.028](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.06.028).

CAPÍTULO 10

Análisis de tiempos de carga de camiones en empresa manufacturera

*María de los Ángeles Martínez-Mercado
Elva Patricia Puente-Aguilar
Azucena Minerva García-León
Daniela del Carmen Bacre-Guzmán*

Resumen— En la presente investigación, el objetivo principal fue reducir los tiempos de carga de camiones de una empresa manufacturera, a fin de incrementar el número de embarques por unidad de tiempo. Se siguió parte de la metodología DMAIC, iniciando por establecer el tiempo de embarque a 1.5 horas por camión, se definieron como herramientas de recolección de datos, la validación y el análisis de los tiempos de carga; se entrevistó a personal de grúas, para identificar las problemáticas que se presentan dentro del proceso de carga. Se realizó un mapeo del proceso de carga de camiones. Se identificaron las causas del bajo rendimiento en el proceso de carga. Se utilizó el diagrama de Ishikawa y los 5 porqués, entre otras herramientas, para analizar las posibles causas de los traslados y movimiento de camiones al momento de cargarlos, la diferencia de tiempos de carga, los tiempos de uso de las grúas de desalojo, el cuello de botella en dos de las naves y el mal acomodo de los paquetes a desalojar. Al estratificar los tiempos de carga por área, se observó que existía un 32.99% de reducción de tiempo al momento de cargar los camiones desde el área de preparación con respecto a la zona de inventarios. Realizando las mejoras, se demostró una disminución del 70.82% a la diferencia del tiempo generado por el mal acomodo de los paquetes a desalojar comparada con el tiempo estándar. Finalmente, se concluye que la metodología utilizada mejoró el rendimiento de la producción, por lo que se implementará en otras áreas de embarque.

Palabras Clave — Tiempos de carga, Embarques, Estudio de tiempos, Tiempo estándar.

Introducción

Actualmente las organizaciones buscan la eficiencia y productividad en sus operaciones, las cuales incluyen tanto procesos operativos como administrativos. Entre ellos se pueden considerar las actividades logísticas y de embarques, que son vitales para las entregas a tiempo de los productos al cliente. Este trabajo se realizó a partir de varias situaciones planteadas por una empresa manufacturera del estado de Nuevo León, siendo seleccionada el área de oportunidad referente al análisis de los tiempos de carga de camiones de dicha empresa. Para aumentar la capacidad del área de embarques, siendo aplicadas diversas metodologías; una de ellas es el DMAIC. La metodología DMAIC es un enfoque único paso a paso de la metodología seis sigma para mejorar la calidad [1], que tiene como objetivo reducir la variación del proceso para aumentar la satisfacción del cliente a través del monitoreo continuo de los procesos a fin de reducir o eliminar los defectos o fallas en todo el proceso. DMAIC está estructurado en cinco fases: definir, medir, analizar, mejorar y controlar, que se utilizan frecuentemente como herramientas de calidad para solucionar problemas y defectos en el proceso [2].

A continuación, se muestran las definiciones de cada una de las fases. Definir: identificación de aspectos clave de la organización, requisitos y procesos que pueden afectar a los clientes, así como identificar posibles proyectos de mejora, algunas herramientas útiles son diagrama de Pareto, diagrama de flujo de proceso, histograma, lluvia de ideas, entre otras. Medir: identificar las causas del problema y recopilación de datos, algunas de las herramientas útiles son diagrama de Pareto, hoja de verificación, gráfico de control. Analizar: procesar los datos para determinar las causas de los defectos o fallas en el proceso, algunas herramientas pueden ser: diagrama de causa efecto, matriz de relación, correlación, análisis de varianza. Mejorar: generar soluciones e implementar las más convenientes, algunas herramientas útiles son técnicas analíticas y pruebas piloto. Controlar: establecer un plan que garantice alcanzar la mejora en el nivel deseado, algunas herramientas útiles son planes de control, gráficos de control [3]. Entre las herramientas utilizadas en esta investigación se encuentra el diagrama causa-efecto también conocido como diagrama de Ishikawa o espina de pez, que funciona a modo de mapa mental, siendo una representación gráfica y sencilla en la que se define el problema y como se relaciona con las posibles causas. A partir de las causas encontradas en el diagrama de Ishikawa, se puede aplicar la técnica de los 5 porqués, la cual ayuda a identificar la causa raíz de los problemas [4]. Otra herramienta importante es el diagrama de Pareto que se conoce también como regla del 80-20, la cual explica que el 80.00% de los problemas se refieren a un 20.00% de las causas. A partir de ello se puede concentrar el esfuerzo en las causas más importantes.

La implementación de proyectos *kaizen* implica un mejoramiento continuo que involucra a todo el personal en todos los niveles, desde la recepción de la orden por parte del cliente

hasta la implementación de una estructura de proceso esbelto que permita incrementar la productividad [5]. En las empresas internacionales esta metodología ha dado importantes resultados, incrementando la calidad y productividad, logrando mayores ventas, menor costo y mejor precio al cliente, optimizando recursos y generando mayores ganancias [6].

Otra de las herramientas que se utilizan en la industria para mejorar los procesos es el mapeo de procesos. Un mapeo de procesos es un conjunto de gráficos y símbolos que se utiliza para clarificar las operaciones y actividades, mejorar la comunicación de los estándares en los diferentes niveles organizacionales y establecer las responsabilidades de acuerdo con los objetivos de la organización. Es importante que la simbología sea comprensible para todas las personas involucradas [7].

La generación de nuevas ideas de solución es también una parte importante de los cambios que se pueden emplear para mejorar cualquier tipo de procesos. El *brainstorming* o lluvia de ideas consiste en reunir a un grupo de personas para generar ideas de causas y soluciones novedosas, cada idea se anota, sin importar si es absurda, luego se señala los pros y contras y se elige la de mayor potencial. Lo importante de la técnica es la variedad y cantidad de ideas que puedan surgir [8].

Otra técnica muy utilizada para definir cuál es el problema es las 5 *w* + 2 *h* que proviene de las siete palabras en inglés ¿qué? (*what*), ¿cuándo? (*when*), ¿dónde? (*where*), ¿quién? (*who*), ¿por qué? (*why*), ¿cómo? (*how*) y ¿cuánto? (*how much*). Esta técnica también se puede usar para establecer responsables y fechas para las acciones correctivas que lleven a la solución de los problemas.

El uso de las técnicas mencionadas permite analizar con mayor profundidad y mejorar las áreas necesarias en la empresa para hacerla más competitiva.

Objetivo

Reducir los tiempos de carga de camiones de una empresa manufacturera para incrementar el número de embarques por unidad de tiempo.

Hipótesis

Al aplicar la metodología DMAIC se reduce los tiempos de carga en al menos en un 30.00%.

Metodología

1. Se realizó recorrido en sitio para conocer las situaciones propuestas por la empresa.
2. La elección de la situación a trabajar fue el área de embarques, debido a que la cantidad de embarques realizados por día es insuficiente ante la demanda requerida.
3. Se determinó que para realizar el proyecto se llevaran a cabo 16 visitas a la planta, en un período de 6 semanas.
4. Se acordó con la empresa utilizar la metodología DMAIC debido a que esta herramienta de mejora ayuda a medir y mejorar los procesos de las empresas al analizar sus datos, siendo el DMAIC una filosofía utilizada dentro de la manufactura esbelta, la cual es parte de la cultura de dicha empresa.
5. Ejecución del ciclo DMAIC:

Definir En la empresa se estableció que los tiempos de embarques son de 1.5 h por camión en la zona de tubería, que actualmente es el cuello de botella de todo el proceso de la planta.

Medir En esta etapa del ciclo DMAIC se determinaron las herramientas a utilizar para la recolección de datos. Entre las herramientas que se utilizaron fueron el estudio de tiempos y movimientos, de esta forma se analizó el proceso. También se contó con el apoyo de los gruistas para identificar las problemáticas dentro del proceso y que entorpecen el mismo, así como también con el apoyo de los dueños del proceso.

Análisis Se analizaron las frecuencias de los desperdicios de los traslados y movimientos de camiones al momento de carga, las áreas de preparación de carga, zona de inventario, espera de camiones, para ello se utilizaron herramientas tales como diagrama de Pareto, diagrama de Ishikawa, lluvia de ideas, análisis de toma de tiempos, los 5 porqués, entre otras herramientas.

Mejorar Se realizaron propuestas de mejora en la zona de inventarios, en la zona de carga, en el área de control de pedidos, reubicación de una oficina, zona preparación, así como radios de comunicación para evitar traslados y el mantenimiento preventivo de escaleras.

Controlar Al implementar las propuestas se buscó mejorar el tiempo de carga por nave y para dar seguimiento al mantenimiento de escaleras se diseñó un formato para su revisión continua. Por último, se presentaron los resultados ante los directivos de la empresa, quienes se mostraron satisfechos con el trabajo realizado.

Resultados

Definir En la empresa de hierro y acero, se detectó un cuello de botella en la zona de tubería. El tiempo de embarque en esa zona es de 1.5 h por camión, el cual afecta a todo el proceso de la planta. El proyecto reduce el tiempo de embarque a 0.75 h, para aumentar el número de embarques por unidad de tiempo.

Medir Se hizo un diagrama de flujo del proceso de carga, para identificar las actividades hombre-máquina, siendo las principales: búsqueda, separación, traslado y acomodo (Figura 1).

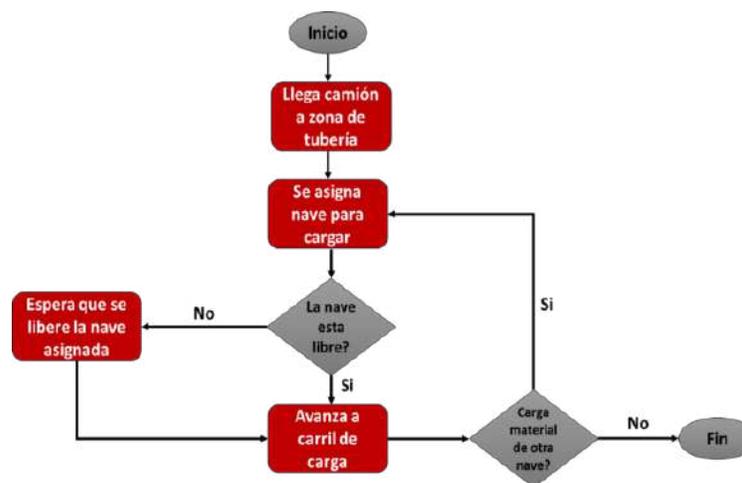


Figura 1. Flujo del proceso de carga de camión.

Enseguida, se tomaron los tiempos cada actividad y se entrevistó a personal de grúas, para identificar las problemáticas que se presentan dentro del proceso de carga.

En donde la actividad de búsqueda, se prepara el camión para ir por el material, con un tiempo estándar de 3 min 55 s por carga.

La actividad de separación de paquetes del *stock*, para trasladarlos al camión presenta un tiempo estándar de 2 min 13 s por carga.

El traslado de material al camión tarda un tiempo estándar de 1 min 47 s por carga.

El acomodo del material en el camión conlleva un tiempo estándar de 5 min 2 s por carga.

Análisis

Se analizaron las frecuencias de desperdicios de movimiento del proceso de carga de camiones. Se identificó en el diagrama de Pareto, que las dos actividades que presentan más desperdicios son: los traslados y movimientos de camiones y la diferencia de tiempos de carga, entre área de preparación y zona de inventario (Figura 2).

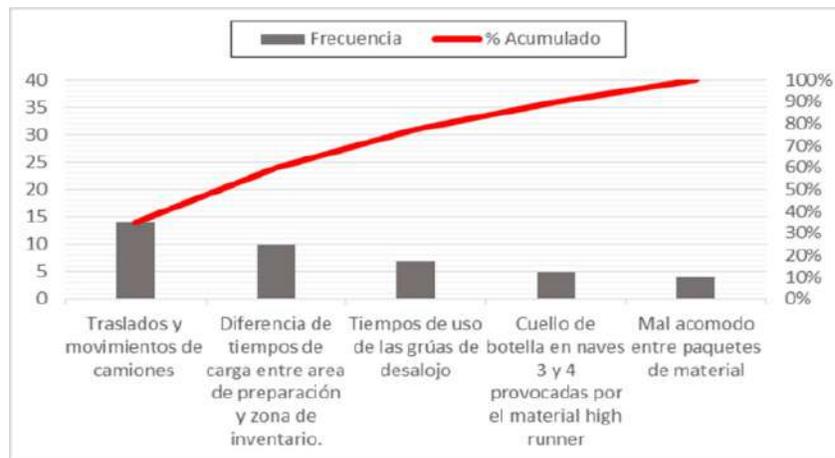


Figura 2. Diagrama de Pareto de frecuencias de desperdicios.

El análisis de desperdicios en los traslados y movimientos de camiones muestra que más del 90.00% de los camiones que entran a la zona 5, van en promedio de 3 a 4 naves para cargar todo el material. Por lo que se genera un gran tiempo de espera antes de ingresar a la zona, ocasionando una larga fila de camiones esperando a que se libere el lugar en la nave a la que tienen que ir.

Por otra parte, se determinaron las actividades internas y externas como parte de la aplicación del *Single Minute Exchange of Die* (SMED). Se observó que el tiempo de espera de camión, para pasar a la siguiente nave que le corresponde, es muy alto produciendo largas filas en la zona de tubería. Se identificaron como actividades internas, los camiones parados en nave por no poder avanzar y, como actividades externas, la carga de camiones, la preparación del paquete y el sistema de rastreo del camión.

Analizando los tiempos promedio de espera en las naves, se observa que las naves 3 y 4 presentan el mayor tiempo de 30 min (Figura 3). En promedio, el tiempo de espera entra cada nave es de 19 min.

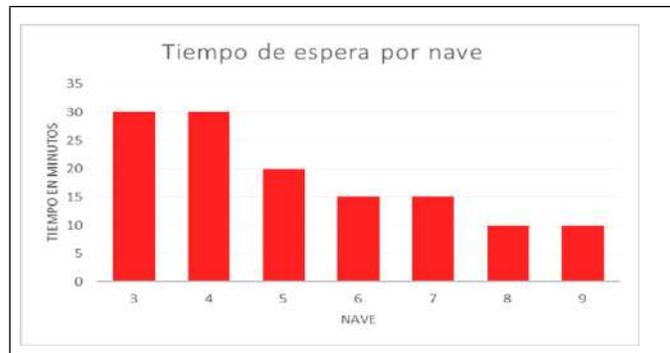


Figura 3. Tiempos promedio de espera por nave en minutos.

Para identificar la forma más eficiente de atender cada pedido, se realizó la toma de tiempos de carga de los productos. Se evidenció que, en las naves el tiempo de carga promedio desde el área de preparación es de 8 min 41 s, mientras que el tiempo de carga promedio desde la zona de inventario es de 12 min 55 s (Figura 3). Por tanto, se presenta un 32.99% de reducción de tiempo al cargar los camiones desde el área de preparación.

A continuación, se realizó un diagrama de Ishikawa para identificar las posibles causas de la diferencia de tiempos de carga (Figura 4).

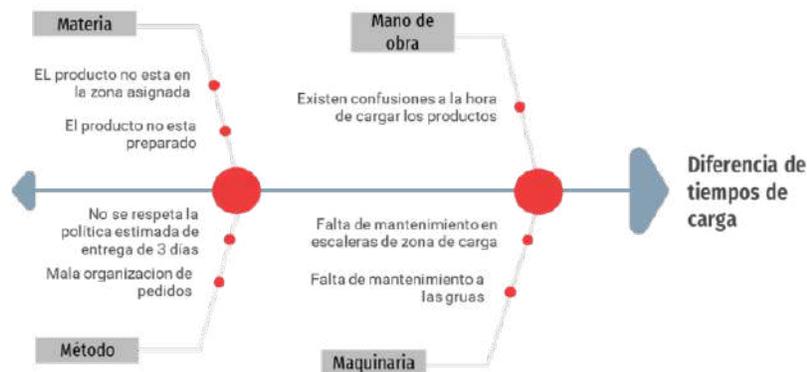


Figura 4. Diagrama Ishikawa para detectar las causas de la diferencia de tiempos de carga.

Se identificaron las siguientes propuestas de solución para disminuir la diferencia de tiempos de carga, a través de la técnica de lluvia de ideas con el personal:

1. Cuando no se tenga un pedido en el área de carga, se tiene que preparar el siguiente pedido.
2. Tener el conocimiento de los transportistas que ya están en espera para dar prioridad a esos pedidos.
3. El turno nocturno en la mayoría del tiempo tiene que preparar pedidos que se entreguen al día siguiente.
4. Solicitar apoyo de la grúa de desalojo si no está en operación, para búsqueda de pro-

ductos y acercarlos al área de preparación.

5. Cuando se está cargando un camión, un operador podrá colocar las piezas de madera mientras que el otro prepara la carga.

Además, se realizó la toma de tiempos de las grúas de desalojo en las naves para identificar los tiempos de uso y los tiempos muertos o de parada. En las naves, se contabilizó un tiempo promedio de 2 min 30 s. En la nave 6, el tiempo de utilización fue del 25.00%, mientras que los tiempos muertos abarcan el 75.00%. Contrariamente, en la nave 7, el tiempo de uso fue del 44.00% y 56.00% de tiempo muerto.

Se observó que los cuellos de botella se presentan en las naves 3 y 4, debido a que almacenan los materiales más demandados (*high runners*) y las grúas carecen de capacidad para continuar con la fluidez del recorrido de los camiones.

Enseguida, se utilizó la herramienta de los 5 porqués para la zona de carga en las naves.

1. ¿Por qué se genera el cuello de botella?

Porque en estas naves se tienen los *high runners* lo cual provoca mucha acumulación de camiones durante el día.

2. ¿Por qué se produce acumulación?

Porque en la nave 3, hay una grúa de embarque y la grúa de pórtico solo se usa para acercar el polín al inventario. Mientras que en la nave 4, casi todo el tiempo, solo se usa una de dos grúas para embarcar.

3. ¿Por qué sucede esto?

Porque la segunda grúa que tiene la nave 3, es más chica que las demás grúas en otras naves. En la nave 4, es porque la grúa de desalojo no se ocupa para apoyar los embarques cuando está en desuso.

4. ¿Por qué es así?

Porque la grúa fue sólo diseñada para el acomodo de este producto, no para el uso en el inventario y la nave 4 no existe comunicación para poder apoyar a la zona de embarque.

5. ¿Por qué sucede esto?

Porque no se tiene una estandarización de actividades en la nave 4 para poder agregar el apoyo a la zona de carga con la grúa.

Por lo tanto, se propone colocar una grúa de carga extra en la nave 3 y realizar una estandarización de actividades integrando el apoyo a zona de carga, para los operadores de la grúa de desalojo de la nave 4. Además, se propone agregar áreas de preparación en la nave 4, ya que es de las naves con más flujo de camiones y solo hay un área de preparación, lo que limita la cantidad de pedidos listos.

En las naves de inventario, se presenta la pérdida de tiempos al separar los paquetes para cargar, esto debido al acomodo que se le da al desalojar el material en su casilla correspondiente.

Se contabilizó un tiempo estándar de preparación del paquete o la separación de 2 min 13 s. Sin embargo, existen muchos casos en los que la separación del inventario es casi nula, por lo que el tiempo de preparación puede aumentar hasta 7 min 3 s. Lo que significa que, si se aplica la separación de los paquetes, el tiempo de preparación podría disminuir hasta un 70.82%.

Así mismo, se realizó un diagrama de Ishikawa para identificar las posibles causas del mal acomodo de los paquetes al desalojar (Figura 5).

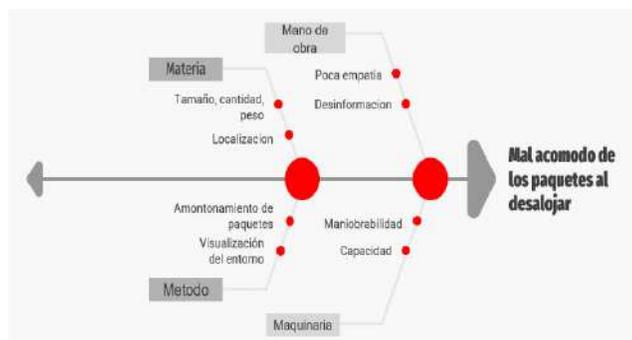


Figura 5. Diagrama Ishikawa para detectar las causas del mal acomodo de los paquetes al desalojar.

En consecuencia, se llevó a cabo un análisis con la técnica de las 5 w y 2 h para el mal acomodo de los paquetes al desalojar, obteniéndose lo siguiente:

- ¿Qué está pasando?
No hay separación entre los materiales y se pierde tiempo en separar cada uno.
- ¿Cuánto afecta el tiempo?
Pérdidas significativas de tiempo al querer separar los paquetes, incrementando la actividad 5 min o más.
- ¿Cómo se deja mal acomodado?
Los paquetes se colocan sin separación.
- ¿Cuándo?
Cuando se tiene una carga de trabajo saturada.
- ¿Dónde?
En el almacén.
- ¿Quién realiza esta actividad?
Los gruistas encargados del desalojo y acomodo del material.
- ¿Por qué no los separan?
Por desalojar de manera rápida.

Enseguida, se identificaron las siguientes propuestas de solución para disminuir el tiempo de preparación de los paquetes:

1. Cambiar el acomodo.
2. Acomodar solo de noche o mañana para hacerlo con un método adecuado.
3. Hacer una estructura para el material.
4. Colocar una línea para separar y dejar el margen del material.
5. Capacitar a los encargados de descarga.
6. Separar con maderas cada medida del paquete.
7. Realizar un *check list* al descargar para verificar el acomodo.

Por otra parte, los gruistas no cumplen con las medidas de seguridad necesarias al escalar el *stock* a más de 3.5 m aproximadamente. Se presenta que los gruistas tienen que escalar el *stock* en repetidas ocasiones para poder colocar la correa de la grúa de carga, debido a que no hay suficiente espacio por un extremo en la separación de las naves donde no cabe la escalera de seguridad.

Se realizó una toma de tiempos de cargas y sucede que deben escalar el *stock* para colocar las *eslingas*. De 10 estudios, se obtuvo un tiempo promedio de 1 min 44 s para esta actividad. Al contrario, cuando no es necesario escalar y se puede usar la escalera o el material está a una altura donde el operador no deba subir, el tiempo es de 0 min 50s. Por lo que la diferencia entre escalar y no hacerlo es del 65.28%.

A través de una lluvia de ideas, se propuso lo siguiente:

1. Comenzar a usar un gancho con pinza en el extremo de aproximadamente 1.5 m de largo.
2. Realizar un *check list* sobre los cumplimientos adecuados de los trabajos en altura constantemente.
3. Implementar una línea de vida para los trabajadores.
4. Revisar constantemente las condiciones de seguridad.

En lo que concierne al área de carga, se encuentran contenedores estorbando el carril peatonal. Debido a estos obstáculos, no se cuenta con un área de trabajo segura, lo que influye en un riesgo para personas que transiten por esa zona.

Se propone implementar montacargas especializados para manejar y almacenar mercancías, a fin de maximizar la capacidad, la seguridad y la eficiencia de los almacenes e instala-

ciones de almacenamiento. La ventaja que proporcionan los montacargas es evitar traslados en alturas, ahorro de espacio, maniobrabilidad, comodidad para el operario y el mantenimiento, aumenta la velocidad operativa.

Se realizó una simulación en el software FlexSim para determinar los tiempos que se usarían para desplazar el material entre cada nave y de esa forma obtener una solución para la reducción en los tiempos de espera de los camiones (Figura 6).



Figura 6. Simulación en el software FlexSim para determinar los tiempos que se usarían para desplazar el material entre cada nave.

Al implementar los montacargas especializados, se tendría un ahorro del 33.00% (de 60 a 40 min) en el tiempo total de carga por nave, eliminando los tiempos de carga entre camión y camión (TABLA 1).

Tabla 1

Tiempos promedio simulados en el software flexsim del desplazamiento de material.

Tiempo de Carga por Nave (min)		
	Sin montacargas	Con montacargas
Tiempo de espera del camión	20	0
Tiempo de carga por nave	40	40
Tiempo total en minutos	60	40

A partir del análisis y la simulación de tiempos realizada, la manera más eficiente de disminuir notablemente los tiempos de espera o tiempos muertos en el cual el camión está en la zona de tubería son los montacargas, por lo que la estadía del camión de 1.5 h se reducirá a 0.75 h.

Mejorar

Al acomodar el material y dejar 3 cm de separación, se mejoraría:

- 3 min menos por camión.
- Evitar riesgo de atrapamiento.
- Evitar riesgo de caídas.
- Aprovechar el espacio.

Como aprovechamiento de recursos humanos en la zona de carga, se proponen los siguientes puntos:

1. Si no se cuenta con producto para desalojar, se recomienda ir con el personal que se encarga de asignar pedidos.
2. Se analizará si el gruista de desalojo podría apoyar dentro de su nave al área de carga.
3. Si no se requiere dentro de su nave, se dará prioridad a la zona de carga de otras naves para liberar pedido.
4. Si al final no se requiere en ningún área de carga, se recomienda que asista a otra zona de desalojo hasta que se reestablezca la zona que le corresponde.

Se recomienda trasladar el área de control de pedidos para que se lleve a cabo en la nave 9, con el objeto de:

- Garantizar la seguridad.
- Facilitar las actividades del transportista.
- Incrementar el espacio.
- Aumentar la productividad.
- Mejorar el control.
- Mejorar la asignación.

Se propone reubicar una oficina que se encuentra en la nave 9 y asignar esa zona para levantamiento de estructura por seguridad. Además, se propone introducir una nueva zona de preparación en la nave 6.

Por otra parte, se propone la implementación de radios de comunicación para complementar el cambio del área de control. Se sugiere introducir 7 radios de comunicación en áreas de carga y 7 radios de comunicación en áreas de desalojo, buscando obtener el beneficio de evitar los traslados de 60 m por camión y a la vez lograr una comunicación rápida y eficiente.

La mayoría de las escaleras en los carriles de carga les hace falta mantenimiento, son difíciles de mover por falta de ruedas y algunas ya están en mal estado, como tubos partidos, ruedas gastadas, tubos doblados, frenos sin funcionar. Además, faltan dos escaleras, una en la nave 5 y otra en nave 9. Por lo que se proponen las siguientes actividades:

- Realizar mantenimiento preventivo regularmente.
- Limpiar las escaleras móviles regularmente.
- Mantener la zona de la escalera móvil despejada.

Cabe mencionar que se implementaron en la nave 5 el uso de los radios de comunicación y el seguimiento al mantenimiento de las escaleras, logrando reducir el tiempo de carga de 1.5 h a 1.13 h en promedio en el transcurso de 9 meses (Figura 7).

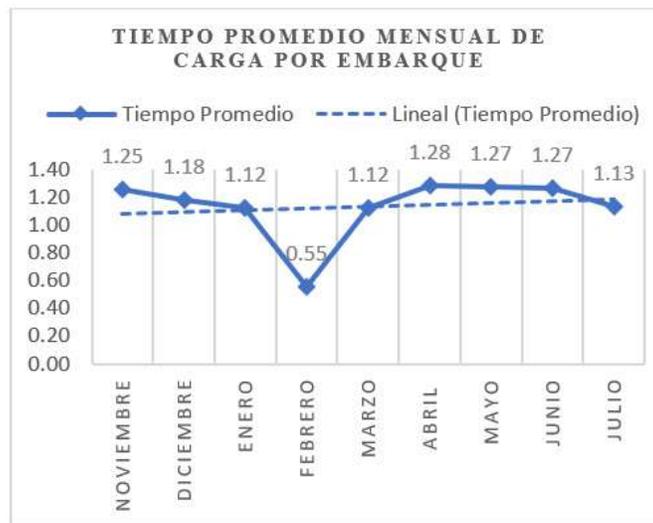


Figura 7. Tiempo promedio mensual de carga por embarque.

Realizando la comparación de disminución del tiempo de carga anterior y el implementado se obtiene que disminuye un 24.57% (TABLA II).

Tabla 2
Porcentaje de disminución del tiempo promedio mensual anterior e implementado

Tiempo de Carga por Nave (min)			
	Anterior	Implementado	% de disminución
Tiempo de promedio de carga por camión	1.5	1.13	24.57%

Controlar

Con 900 min disponibles, correspondientes a dos turnos al día, el tiempo de carga actual es de 90 min, por lo que se cargan 10 camiones por nave al día. En consecuencia, el tiempo de carga estimado es de 45 min; es decir, 20 camiones por nave, lo que aumenta el 100% de mejora.

Utilizando los montacargas, se incrementa el número de embarques por unidad de tiempo en un 30%, pasando de 660 a 858 embarques por mes (TABLA 3).

Tabla 3
Comparación de toneladas de carga según tipo de camión utilizado

Comparación de Toneladas de Carga, Según Tipo Camión Utilizado			
	Diario	Semanal	Mensual
Camiones actuales	30	165	660
Montacargas	39	215	858

Con el fin de llevar un seguimiento al mantenimiento de escaleras, se propone un formato (*check list*) para la revisión de las escaleras de carga y pasillo de las diferentes naves.

Se muestra la relación de las entrevistas para la obtención de los datos obtenidos durante las etapas del DMAIC, la tabla comparativa de dicho resumen se describe (TABLA 4).

Tabla 4
Tabla comparativa del resumen de entrevistas

Etapa del DMAIC	Datos obtenidos	Nombre del Puesto de la(s) Persona(s) Entrevistada(s)
Medir	Identificación de las problemáticas que se presentan dentro del proceso de carga.	Gruistas Analistas de Ingeniería Industrial
Análisis	<p>Frecuencias de desperdicios de movimiento del proceso de carga de camiones, elaboración de Diagrama de Pareto.</p> <p>Diferencia de tiempos de carga.</p> <p>Diagrama de Ishikawa para identificar las posibles causas de la diferencia de tiempos de carga.</p> <p>Propuestas de solución para disminuir la diferencia de tiempos de carga.</p> <p>5 porqués para la zona de carga en las naves.</p> <p>Diagrama de Ishikawa para identificar las posibles causas del mal acomodo de los paquetes al desalojar.</p> <p>Análisis de las 5 W y 2 H para el mal acomodo de los paquetes al desalojar.</p>	<p>Analistas de Ingeniería Industrial e Ingeniería Industrial</p>
Mejorar	<p>Al acomodar el material y dejar 3 cm de separación, se mejoraría: a) 3' menos por camión. B) Evitar riesgo de atrapamiento. c) Evitar riesgo de caídas. d) Aprovechar el espacio.</p> <p>Se recomienda trasladar el área de control de pedidos para que se lleve a cabo en la nave 9.</p>	<p>Analistas de Ingeniería Industrial e Ingeniería Industrial</p> <p>Analistas de Ingeniería Industrial e Ingeniería Industrial</p>

Controlar	Con 900 min disponibles, correspondientes a dos turnos al día, el tiempo de carga actual es de 90 min, por lo que se cargan 10 camiones por nave al día. En consecuencia, el tiempo de carga estimado es de 45 min; es decir, 20 camiones por nave, lo que aumenta el 100% de mejora.	Analistas de Ingeniería Industrial, Ingeniero Industrial y jefe de Ingeniería Industrial y mejora continua Analistas de Ingeniería Industrial, Ingeniero Industrial y jefe de Ingeniería Industrial y mejora continua
	Con el fin de llevar un seguimiento al mantenimiento de escaleras, se propone un formato (check list) para la revisión de las escaleras de carga y pasillo de las diferentes naves.	

Finalmente, mediante una tabla comparativa de los resultados se determina que el promedio de la reducción de tiempo es de un 48.73% (TABLA 5).

Tabla 5
Tabla comparativa de los resultados

Resultados	Estatus	Tiempo actual	Tiempo propuesto	Reducción del tiempo (%)
Diferencia en tiempo de carga.	Instruyó (evidenció)	12 min 55 s (desde zona de inventario)	8 min 41 s (desde área de preparación)	32.99%
Separación de los paquetes para cargar para reducir el tiempo de preparación de carga.	Prueba	7 min 3 s (sin separación)	2 min 13 s (con separación)	70.82%
Seguridad al momento de escalar	Comprobación de propuesta	1 min 44 s (escalando)	0 min 50 s (sin escalar)	65.28%
Montacargas especializado	Simulación en software FlexSim	1.5 h	0.75 h	50.00%
Uso de los radios de comunicación y el seguimiento al mantenimiento de las escaleras	Implementación	1.5 h	1.3 h	24.57%
Promedio				48.73%

Conclusiones

Al utilizar la metodología DMAIC, el objetivo principal del proyecto fue reducir los tiempos de carga de camiones de una empresa manufacturera. La aplicación de la herramienta DMAIC

permitió reducir el tiempo de embarque de 1.5 a 0.75 h por camión. En cada etapa, se definió el proceso, se recopilaron datos con herramientas como la toma de tiempos y se obtuvo información de los datos del proceso. Además, se analizaron las causas de los desperdicios de movimiento y traslados mediante herramientas como el diagrama de Pareto y el diagrama de Ishikawa. Se propusieron soluciones para abordar las causas identificadas, que incluyeron mejoras en la zona de inventarios, la zona de carga, el área de control de pedidos, la reubicación de una oficina e integrar una nueva zona de preparación. Por lo tanto, se han logrado beneficios significativos en la reducción del tiempo de carga de cada nave.

Los resultados obtenidos, confirman que al aplicar la metodología DMAIC se reduce los tiempos de carga en al menos un 30.00%.

Por otra parte, se estableció un sistema para monitorear continuamente el tiempo de carga por nave y revisar el mantenimiento de las escaleras con un formato diseñado específicamente para ello. Este enfoque integral permite a la empresa abordar de manera efectiva los desafíos en la zona de tubería y mejorar la eficiencia de su proceso de embarque de camiones. Finalmente, esta investigación presenta cómo la implementación de los proyectos DMAIC apoyan a las organizaciones a mejorar los procesos y alcanzar la excelencia. Por lo que es una referencia para aplicar la metodología a otras plantas de la organización.

Reconocimientos

El equipo investigador agradece a los estudiantes Jesús Eduardo Castro Bastidas, Lizbeth Itzel Sandoval Pouda, Antonio del Ángel Rodríguez Tenorio, Ángel Daniel Rodríguez Arriaga y Hugo Ramírez Olavarría, por su participación en el desarrollo de la presente investigación; quienes están adscritos a la licenciatura de Ingeniero Industrial Administrador de la Facultad de Ciencias Químicas.

Referencias

- [1] Hoerl, R.W, Six Sigma and the future of the quality profession, IEEE engineering Management Review, Fall, 1998, pp.87-94.
- [2] Lynch, D. P. (2003). How to Scope DMAIC Projects. Quality Progress, 36(1),37-40. <https://www.hmg.com.au/ayb/Scope%20LSS%20Projects.pdf>

- [3] Garza Ríos, R. C., González Sánchez, C. N., Rodríguez González, E. L., & Hernández Asco, C. M. (2016). Aplicación de la metodología DMAIC de Seis Sigma con simulación discreta y técnicas multicriterio. *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*, 22, 19-35.
- [4] Baro Tijerina, M., Estrada Ruiz, M., & García Garrobo, I. (2016). Una aplicación de la metodología seis sigma para la optimización de línea de producción de arneses. *Ingenierías*, 19(72), 53-61.
- [5] Imai, M. (1989). *Kaizen: la clave de la ventaja competitiva japonesa*. Compañía Editorial Continental.
- [6] Rentería, I. a. T., Cervantes, E. B., Moya, S. M., & Pérez, M. G. G. (2019). Homeostasis de la industria de manufactura en Jalisco, México: el kaizen como negentropía en la logística de embarques. *Tecnura*, 23(62), 21-33. <https://doi.org/10.14483/22487638.15453>
- [7] Zamora, A. H. (2016). Mapeo de procesos. Obtenido de <https://www.gestiopolis.com/wp-content/uploads/2016/11/definicion-etapas-mapeoprosos-1.pdf>.
- [8] Mariño, W. (2017). El proceso de generación de ideas innovadoras para emprendimiento. *Estudios de la Gestión*, (2), 152-157.

SECCIÓN III

Gestión de Almacenes y Logística Esbelta

CAPÍTULO 11

Propuesta de reacondo semifijo de materiales en almacén de una empresa manufacturera del sector automotriz

*Lourdes Loza-Hernández
Sergio Vázquez Aranda
Agustín Bustos Rosales*

Resumen—El objeto de estudio de este trabajo es el almacén de una empresa manufacturera de la rama automotriz, con el problema de demora en el surtido de materiales del área de almacén a las líneas de producción, lo cual es ocasionado por el acomodo actual de los materiales. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es reducir el tiempo de surtido de materiales del almacén a las líneas de producción en la empresa manufacturera en estudio, a través de la aplicación de un modelo de programación lineal para minimizar los costos que esto ocasiona. La propuesta de acomodo de los materiales en el almacén mejora el uso del espacio físico actual, así como los recursos con lo que cuenta el almacén para la entrega de materiales a las líneas de producción a partir de la aplicación de modelos existentes en la literatura. La definición de las variables involucradas, el tamaño de muestra adecuado para el análisis de información y la aplicación del modelo de programación lineal diseñado, fueron los antecedentes para el análisis de resultados, los cuales revelan un ahorro del 22.3% en la distancia recorrida por los materiales del almacén a las líneas de producción, con el acomodo de materiales que se propone como alternativa de solución. Este trabajo está dirigido también aquellas personas que les interesa profundizar en la aplicación de modelos de programación lineal para la localización de materiales, planes de distribución y flujo de materiales del área de almacén.

Palabras Clave—Modelos de programación lineal, acomodo de semifijo en almacén, manejo de almacén, layout de almacén.

Introducción

El área de almacén en las empresas manufactureras juega un papel muy importante, ya que la buena administración de los recursos para realizar sus actividades y el adecuado control de estos, ayuda al buen funcionamiento de las demás áreas de la empresa y, en algunos casos, es fundamental para el buen ejercicio del área de producción debido a que éste es el abastecedor directo de las materias primas, lo cual hace al almacén indispensable para que se logren los planes de producción establecidos. [1] mencionan que el objetivo fundamental de un almacén es facilitar el suministro de materiales en la cadena de suministro en cualquiera de sus etapas de transición de éstos.

El objeto de estudio de este trabajo es el almacén de una empresa manufacturera de la rama automotriz, dentro del cual existe un retraso en la entrega de materiales del almacén a las líneas de producción, por lo que se desea disminuir este tiempo a través de la aplicación de un modelo de programación lineal que permita mejorar los tiempos promedio de entrega, para satisfacer la demanda de las diferentes líneas de producción desde el almacén. Con base en información proporcionada por el personal de la empresa, se identificaron las principales causas que generan el retraso en la entrega de materiales, concluyendo que el acomodo de los materiales dentro del almacén no era el adecuado, esto permitió identificar en la literatura modelos de programación lineal que apoyan en la solución de problemas de localización y acomodo de materiales en almacén.

Modelos desarrollados por [2], muestran que la localización de materiales dentro del almacén involucra determinar la ubicación de uno o más materiales en uno o más sitios potenciales dentro del mismo. Considerando que el número de lugares debe, al menos, ser igual que el número de nuevos materiales a colocar. El caso de localizar cada nuevo material en cada sitio potencial se asume que es conocido (almacenaje dedicado) o puede ser conocido y controlado en cualquier momento aun cuando el tipo de almacenaje sea aleatorio; cabe señalar que algunos datos valiosos para definir el tipo de almacenaje de materiales es la preferencia de operación del material (alta, baja y media), rango de actividad (recuperación del tiempo), familias de partes, cantidad de material a mover y espacio requerido del material.

En la referencia [3] se determina que los objetivos que busca cumplir un buen plan de distribución son: utilizar el espacio eficientemente; proveer manejo eficiente de materiales; minimizar el costo de almacén, proveer máxima flexibilidad y proveer buena limpieza.

Un buen plan de distribución de materiales minimiza el costo de movilizar los materiales y la gente; los requerimientos para el diseño de distribución son: flujo de materiales, frecuencia de datos o algunas otras medidas de interacción entre equipo, personal e instalaciones; tamaño y medida de equipo e instalaciones, así como cantidad de personal; espacio del piso

disponible, restricciones de localizaciones para el equipo, el personal y las instalaciones y requerimientos adyacentes entre pares de equipo, personal e instalaciones. Algunos de éstos no son esenciales como: las restricciones de localización, pero conociendo la frecuencia, el tamaño y forma del equipo e instalaciones es suficiente para hacer una planeación preliminar.

El flujo de materiales encierra todas las actividades de transportación necesarias para abastecer los requerimientos de las diferentes áreas, lo cual afecta directamente en la eficiencia del almacén [4]. En [5] se determina que un flujo efectivo maximiza las rutas de flujo directo, minimiza el flujo de materiales y minimiza el costo de los flujos, lo cual depende del progreso de la ruta directamente desde un origen a un destino, este origen y destino se encuentra determinado por las áreas de trabajo y las relaciones que éstas mantienen entre si durante sus actividades cotidianas.

En [6] se muestra que un almacén se diseña con base en las necesidades propias de la empresa y del almacén mismo, mientras que en [7] proponen un modelo basado en el problema de enrutamiento de vehículos dentro del almacén para calcular la distancia recorrida. [8] proponen un modelo matemático exacto con el objetivo de minimizar el tiempo del proceso de despacho de pedidos desde que se recibe el pedido hasta que se entrega al cliente. [9] diseñan un modelo de enrutamiento de vehículos, considerando una matriz de distancias a restricciones de tiempo de despacho y demanda de los destinos en el modelo, lo que permite minimizar el tiempo de entrega de los materiales. [10] resuelven un caso de estudio en el que se busca una eficiente distribución de mercancía en el almacén, mejorando las distancias de viaje del personal que surte un pedido y en consecuencia reduce los costos operativos del almacén.

El presente trabajo está conformado por tres secciones, en la primer sección se describe la forma de trabajo actual del almacén, además de la información necesaria para proponer una solución al problema. La sección dos muestra el procedimiento metodológico utilizado para el desarrollo del trabajo. En la sección tres se describe a detalle el objeto de estudio, así como las variables y parámetros utilizados para el diseño y desarrollo del modelo de programación lineal para la solución del problema. En la sección cuatro se muestran los resultados obtenidos y la propuesta de acomodo del almacén que permite mejorar el tiempo promedio de entrega de materiales del almacén a las líneas de producción; finalmente, se muestran las conclusiones del desarrollo del trabajo.

Metodología

Para el desarrollo del trabajo fue necesario:

- Analizar el proceso de trabajo actual del almacén, con el fin de definir las causas que

generan el atraso en la entrega de materiales.

- Conocer los modelos y técnicas existentes para la localización o distribución de materiales en almacén, que permitan determinar la gama de alternativas de solución a problemas de este tipo.
- Definir las variables de decisión y constantes involucradas en el problema.
- Determinar y aplicar el modelo para la asignación de materiales en almacén, con las variables del problema de estudio y analizar los resultados obtenidos.
- Proponer alternativas de solución, con el apoyo de fundamentos teóricos para lograr el objetivo planteado.
- Realizar una comparación de la situación actual con los resultados obtenidos del nuevo acomodo propuesto.

Con lo anterior se busca proporcionar un nuevo acomodo de materiales en el almacén con tipo de almacenamiento semifijo, resultado de la aplicación de un modelo de programación lineal que mejore el tiempo de surtido a las líneas de producción.

Descripción del caso de estudio

De forma general el flujo que siguen los materiales en el almacén del caso de estudio se muestra en la Figura 1, en el cual se muestra que el punto final de flujo de productos es el área de producción, también del lado derecho se muestra el flujo de documentos que soporta la entrada y salida de materiales a través de las diferentes áreas.

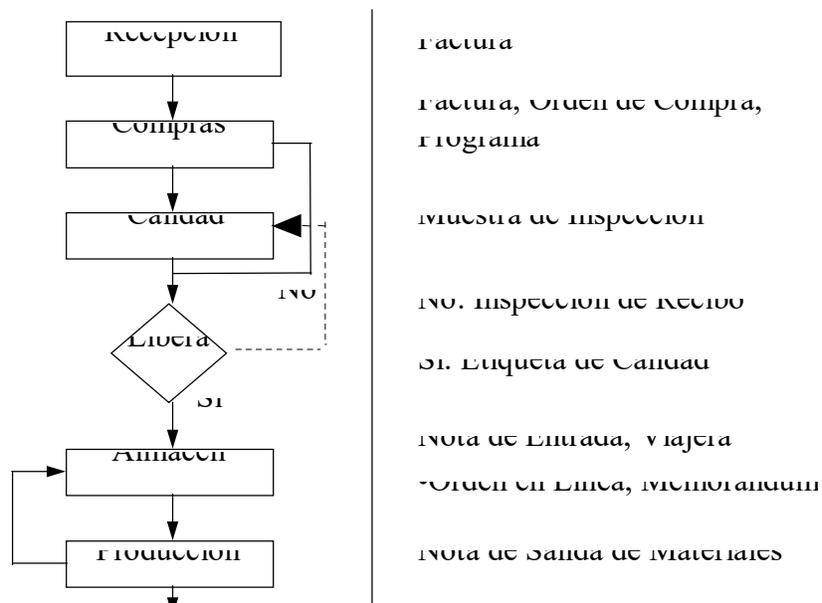


Figura 1. Área física del almacén de materiales. Fuente: Elaboración propia.

Un diagrama de las áreas de almacén de materiales se muestra en la Figura 2, en donde es posible observar la identificación de racks y el acomodo de los productos por prioridad.

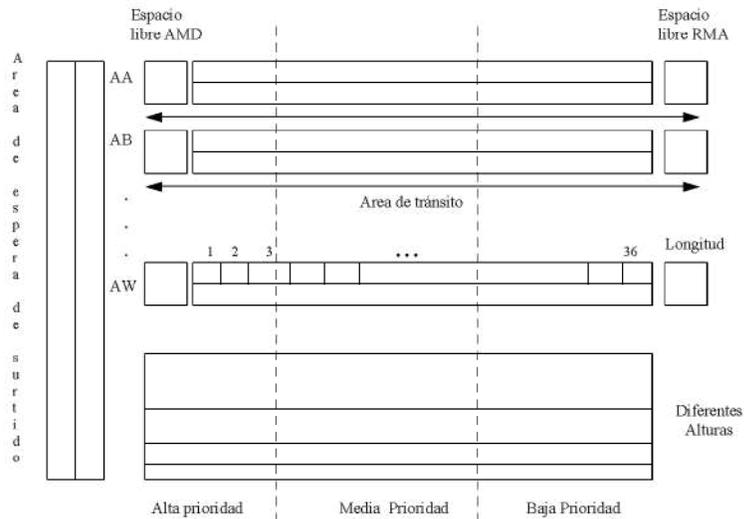


Figura 2. Área de almacén de materiales. Fuente: elaboración propia.

Los racks (estante o armario en forma vertical que contiene espacios divididos de diferentes tamaños para el almacenamiento de materiales), están identificados por la combinación de dos letras como se muestra (AA, AB, AC, ..., AW); la longitud está identificada por un número consecutivo del 1 al 36 y la altura o nivel por una letra (A, B, ...), según el tamaño, también son divididos en forma transversal por prioridades (alta, baja y media), lo cual permite ocupar los espacios cercanos a la salida del almacén, aparentemente. En la parte inicial de cada rack hay un espacio libre para colocar el material que fue asignado dentro de alguno de los espacios disponibles y que personal del área de recibo de materiales trasladará hasta aquí, para que personal del almacén de materiales coloque a su localización correspondiente.

La forma que el sistema de información tiene para la asignación de un lugar dentro del almacén, es a través de la búsqueda de un lugar disponible, la búsqueda siempre inicia desde el rack AA y localización número 1 (alta prioridad) y el primer lugar libre que es encontrado es asignado al material, independientemente de que un lote quede dividido en diferentes localizaciones, sin considerar el tipo de material y la demanda, factores que pueden ser relevantes para mejorar el tiempo de surtido de las órdenes.

En la parte posterior a cada rack hay otro espacio libre para la colocación de materiales que serán enviados a producción, previa requisición y que personal de almacén de materiales (AMD) se encarga de trasladar desde la localización en el rack hasta aquí; una vez en esta área, otra persona coloca en el área de formación de lotes, aquellos pedidos conforme son surtidos y que se encuentran al inicio del rack para ser enviados a la línea de producción por otra persona.

Despacho de materiales

Las requisiciones son asignadas a los montacarguistas por una persona encargada de recibir los pedidos del área de producción, éstas son realizadas en forma sistematizada o a través de memorándum, las cuales son ordenadas por la misma persona conforme a la distribución de los racks y colocadas en la entrada del rack en un recipiente para su surtido; cada montacarguista tiene a su cargo un grupo de racks durante su turno de trabajo, por lo que una vez que las requisiciones son distribuidas, el montacarguista encargado del rack la surte conforme a su criterio, esto es, hasta que no termina de surtir los pedidos del rack en el que se encuentra, surte otros de los racks a su cargo, sin importar la hora de pedido en la que las requisiciones fueron hechas, con el fin de tener un mayor número de requisiciones surtidas, ya que el cambio de rack es pérdida de tiempo para ellos, los materiales son colocados en el área de despacho de material o en su defecto, solo en la salida del rack dependiendo del tamaño del material, en espera a ser llevados a la línea de producción por montacarguistas encargados de esta actividad.

En el área de espera de despacho es posible que se rezaguen materiales debido a su tamaño (muy pequeño) ya que no llenan una tarima o unidad de carga que para el montacarguista es fácil de cargar, por lo que actualmente se realiza una revisión de la hora de pedido y si han transcurrido dos horas desde su requerimiento, son enviadas en ese momento, aún cuando no se tenga algún recorrido por esa línea de producción o se realice solo la entrega de ese material, lo que puede ocasionar atraso en la entrega de materiales.

Clasificación de materiales del almacén

Existe un catálogo de los materiales en el almacén, el cual tiene una organización de tipo ABC, que sigue los siguientes principios: i. Clasificar los artículos del inventario considerando su importancia relativa, es decir, con base a su demanda y al volumen del material. ii. Establecer diferentes controles de administración tomando en cuenta las clasificaciones con el grado de control apropiado a la importancia concedida a cada clasificación.

Las letras ABC representan la importancia descendente y la clasificación debe reflejar la dificultad para controlar cierto material y el impacto de este sobre los costos y la rentabilidad.

La cantidad de materiales que se maneja continuamente dentro del almacén es aproximadamente de 2,312; de los cuales 345 son de tipo A, 397 tipo B y los restantes tipo C, considerando la importancia relativa del material. La Figura 3 muestra la cantidad de productos por clasificación en el almacén.

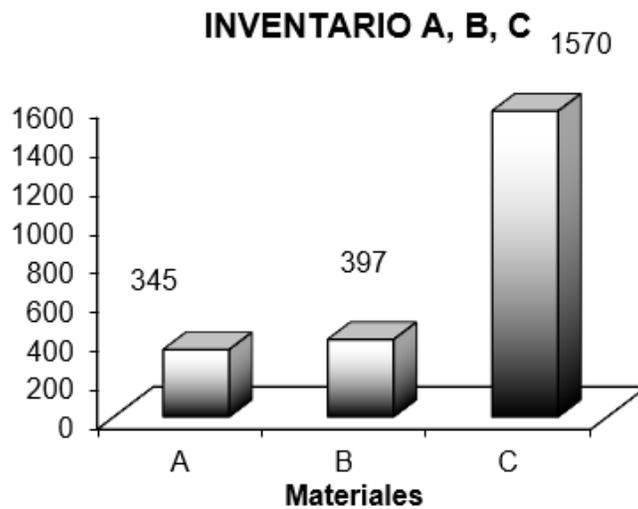


Figura 3. Clasificación A, B, C de materiales del almacén. Fuente: elaboración propia, con base en información proporcionada por personal del almacén y análisis de la misma. Fuente: Elaboración propia.

Clasificación de materiales por familia

La cantidad de materiales definido por el catálogo que se maneja actualmente en almacén representa una cantidad muy amplia de productos, lo cual hace que el manejo de las variables para la asignación de espacios de almacén sea muy complejo, debido a esto, se considera la clasificación por familias de partes es decir un conjunto de partes o materiales que intervienen en la conformación de un producto terminado, pertenecen a una familia, que actualmente se usa en almacén, lo cual permite disminuir considerablemente el número de variables de decisión del modelo. Es importante mencionar que cada material de la familia tiene características propias (volumen, peso, popularidad, etcétera), sin embargo, para el acomodo y traslado de materiales a las líneas de producción los costos o trabajo necesario para mover dichos materiales se considera de manera uniforme, por lo que, dado que cada familia tiene materiales similares, el costo o trabajo de movimiento es el mismo para todas.

Demanda por familia

Para determinar la demanda por familia fue necesario analizar los niveles de producción de la empresa para definir el periodo durante el cual estos se mantienen en los niveles más altos y como consecuencia, las líneas de producción demandan a niveles máximos las materias primas al almacén, el cual debe cumplir los requerimientos satisfactoriamente. Se consideró el promedio por día del registro de requisiciones de las líneas de producción, para obtener el número de viajes de salida del almacén por familia, demanda por familia y número de espacios requeridos por familia en almacén durante 77 días.

Una vez definido el número de movimientos a analizar, se agruparon por familia para definir el número de viajes de entrega de materiales a las líneas de producción que se realizan en promedio por día; determinado con ello una de las constantes básicas para la aplicación del modelo: demanda por familia (T_f). Posteriormente, considerando que el punto de entrada y salida de mercancía del almacén a las líneas de producción es solo uno, el porcentaje de material que sale del almacén para cada familia es del cien por ciento, por lo que el porcentaje (P_f) es cuantificado como unitario y despreciado durante el cálculo del modelo. Con la ayuda del catálogo de materiales e información del inventario del almacén durante el periodo de tiempo mencionado, se clasificaron nuevamente los materiales por familia para definir la cantidad de espacios de almacén requeridos por cada una de las familias en estudio y con ello, calcular otra de las variables a usar en el modelo: espacios requeridos por familia (S_f) y de esta forma determinar el número de lotes requeridos por familia, para esto fue necesario determinar el número de espacio disponibles por rack, esto es 72 espacios en forma horizontal y 5 niveles de espacios en altura con una proporción del 30% de los racks con 6 niveles, por lo que el tamaño del lote se obtiene de las operaciones 72×5.3 aproximadamente de 380 espacios por lote. Por lo tanto, el tamaño del lote está definido por 380 localizaciones en el almacén, realizando las operaciones correspondientes (cantidad de espacios requeridos por familia entre 380).

Definidas las familias a manejar en el modelo, se determinaron los puntos de descarga de los materiales en las líneas de producción para calcular la distancia fija desde la salida del almacén hasta cada uno de esos puntos. Debido a que los puntos de descarga no se encuentran ubicados en línea recta con respecto a la salida del almacén, los métodos utilizados para el cálculo de la distancia fue el método rectilíneo y la suma de distancias aisladas; ya que el resultado de la suma de las distancias aisladas obtenidas por el método rectilíneo inicialmente, determinan la distancia real de los puntos en estudio, esto fue realizado con el apoyo de un plano a escala de la ubicación de la salida del almacén y las líneas de producción, proporcionado por personal encargado del almacén. Un concentrado de la información se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1
Información por familia

Identificador (Familia)	Localizaciones Requeridas	Cantidad de lotes	Distancia promedio	Viajes de Salida del Almacén (por día)
DW	1985	5.22	268 m.	159
EPG	1872	4.93	137 m.	104
LIC	1856	4.88	234 m.	239
ARM	899	2.37	137 m.	26
WSA	730	1.92	170 m.	52

GPB	626	1.65	214 m.	52
AHC	351	0.92	197 m.	11
DPA	259	0.68	145 m.	29
API	169	0.44	177 m.	15
HRA	123	0.32	170 m.	16
DPL	680	1.79	276 m.	38

Modelo de Programación lineal

Los modelos de programación lineal para la localización de materiales en almacén inicialmente desarrollados con tipo de almacenamiento fijo o aleatorio más conocidos son los de [2, 3, 11, 12]. Para el desarrollo del trabajo el que fue adecuado acorde a las necesidades del problema planteado es el siguiente:

$$\begin{aligned}
 \text{Minimizar} \quad & \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^q \frac{T_j}{S_j} [d_k + l_j] X_{jk} \\
 \text{sujeto a} \quad & \sum_{j=1}^n X_{jk} = 1 \quad k = 1, \dots, q \\
 & \sum_{k=1}^q X_{jk} = S_j \quad j = 1, \dots, n \\
 & 0 \leq X_{jk} \leq 1 \quad j = 1, \dots, n \quad k = 1, \dots, q
 \end{aligned}$$

Donde:

q : número de lotes en el almacén.

n : número de familias.

S_j : cantidad de lotes requeridos ó fracción de lote requerido para almacenar la familia j .

T_j : número de viajes de salida de almacén para la familia j .

d_k : distancia o tiempo requerido para viajar desde el punto de salida del almacén al lote de almacén k .

l_j : distancia o tiempo requerido para viajar desde el punto de salida del almacén al punto de descarga en la línea de producción de la familia j .

X_{jk} : fracción del lote k que ocupa la familia j .

Dada la definición de las variables y específicamente de las variables S_j y X_{jk} , fue necesario realizar adecuaciones al modelo para cumplir con todas las restricciones del modelo y obtener resultados factibles, sin embargo, considerando las adecuaciones al modelo y las carac-

terísticas de las variables, se diseñó el modelo que el apartado siguiente muestra. Analizando las restricciones del modelo, la tercera restricción determina que la variable X_{jk} (valor 1 si el producto es asignado a la localización k y 0 en otro caso), solo puede tener dos valores $\{0,1\}$, pero por la definición del tamaño del lote y el número de espacios requeridos para almacenar una familia, la variable S_j está determinada por cantidades enteras y decimales, por lo que esta restricción no se cumpliría; por ello, fue necesario modificar la restricción y considerar que la variable X_{jk} puede tomar valores dentro del intervalo cerrado $[0;1]$, siendo por ello una variable continua acotada por el intervalo anterior.

Resultados

Solución del modelo de Programación Lineal

Con apoyo computacional y en específico a través del uso del software LINDO, la solución óptima al problema se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2
Resultados del modelo de programación lineal con la alternativa de solución propuesta

Familia	Lote (Rack)	Cantidad de Lote (380 espacios)	Espacios de almacén
DW	5	0.024	9
	11	1	380
	12	0.264	101
	13	1	380
	14	1	380
	15	1	380
	16	0.932	355
FPG	18	0.172	66
	19	1	380
	20	1	380
	21	1	380
	22	1	380
	24	0.734	279
	LIC	2	0.68	258
3		1	380
4		1	380
6		1	380
7		1	380
8		0.176	67
ARM		5	0.976	371

	23	0.08	31
	24	0.266	101
	25	1	380
	26	1	380
WSA	16	0.068	26
	17	1	380
	18	0.828	315
GPB	9	0.354	134
	10	0.56	213
	12	0.736	280
AHC	23	0.92	350
DPA	8	0.034	13
	9	0.646	246
API	10	0.44	168
HRA	2	0.32	122
DPL	1	1	380
	8	0.79	300

Fuente: elaboración propia, realizada con base en datos obtenidos del reporte de resultados del software de apoyo.

Para la descripción de los resultados se toma la familia DPL, la Tabla 3 muestra los resultados.

Tabla 3
Resultados obtenidos para la familia DP

Lote	Distancia promedio por lote (d)	Distancia al punto de descarga (I)	Cantidad de lote (380)	Espacios De Almacén
1	22.0	276	1	380
8	34.3	276	0.79	300
			Total	380

Fuente: elaboración propia, realizada con base en datos obtenidos del reporte de resultados del software de apoyo.

DPL es una de las familias intermedias, es decir, no es la que requiere mayor número de espacios y no tiene la mayor carga, pero es la que debe recorrer mayor distancia para llegar al punto de descarga, por lo que el mejor lugar para su ubicación en el almacén está en los lotes que corresponden a los números 1 y 8 con una distancia promedio al punto de salida del almacén de 22.0 y 34.3 metros respectivamente, tomando en cuenta que la distancia que se recorre para distribuir el producto a la línea de producción es de 276 metros, las fracciones de lote con base en el resultado obtenido son de 1 y 0.79, que indican 1 por 380 equivalente a 380 localizaciones en el rack 1 o el rack completo; 0.79 por 380 equivalente a 300 localizaciones en el rack 8, en suma 680 localizaciones requeridas para la familia DPL, que satisface el número de espacios necesarios para su almacenamiento.

Como se observa en la solución del modelo, las familias no se encuentran ubicadas en lotes o racks continuos, sin embargo, es el resultado que minimiza el valor de la función objetivo planteada, ya que al mover alguna de las familias para asignarle un rack continuo incrementa el valor de la distancia total recorrida.

Dado que dentro de un mismo lote fue necesario ubicar a más de una familia, se asignó el lugar de la fracción de lote correspondiente a cada familia, asignado las localizaciones más cercanas a la salida a la familia que en total requiere el mayor número de espacios. Con este acomodo el valor de la función objetivo es de 193,622 metros de distancia recorrida, durante un día, valor que se obtiene de sustituir las variables de decisión dentro de la función objetivo, con su respectiva proporción y multiplicarla por el parámetro que se obtuvo de la suma de las distancias y la multiplicación de la demanda entre el número de espacios requeridos. Las letras de la parte inferior de cada línea vertical indican la identificación del rack como actualmente se maneja en el almacén y los números son el identificador asignado para el planteamiento del modelo. La Figura 4 muestra la distribución.

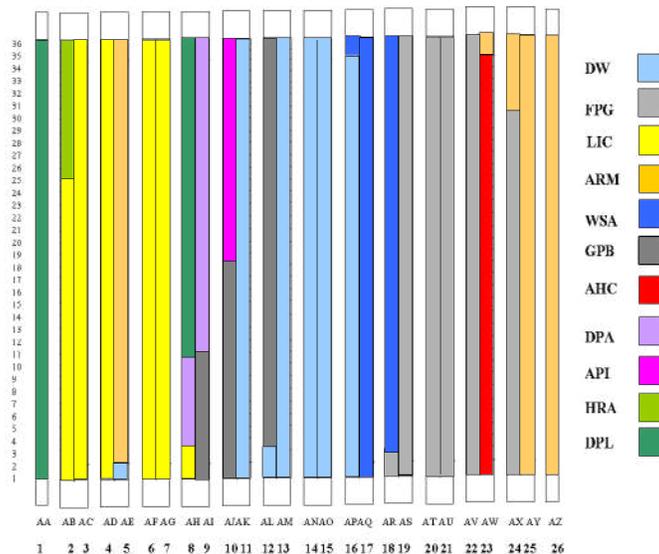


Figura 4. Distribución propuesta como solución al problema. Fuente: elaboración propia, con observación directa del almacén y resultados obtenidos de la aplicación del modelo. Fuente: Elaboración propia.

Situación actual

Una propuesta de acomodo en forma fija que personal del almacén realizó en forma empírica, ubicando las familias más demandadas por las líneas de producción cerca de la salida del almacén, sin considerar la distancia que las demás familias deben recorrer para llegar a sus puntos de descarga utilizando una proporción de movimientos de 80,20 se muestra en la Figura 5:

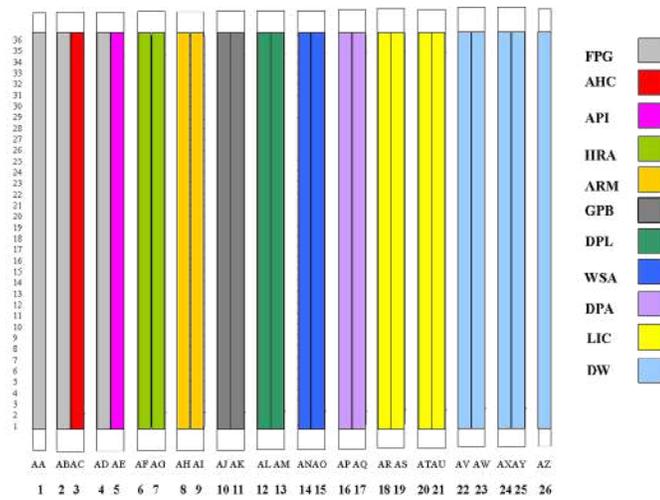


Figura 5. Propuesta de acomodo. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 4 muestra las distancias recorridas con base en la asignación de las familias en el almacén.

Tabla 4
Distancias con proporción 80, 20

Familia	j	Lote asignado (k)
DW	A	22,23,24,25,26
FPG	B	1,2,4
LIC	C	18,19,20,21
ARM	D	6,7
WSA	E	14,15
GPB	F	10,11
AHC	G	3
DPA	H	16,17
API	I	5
HRA	J	8,9
DPL	K	12,13

Fuente: elaboración propia, realizada con base en información proporcionada por personal del almacén y observación directa.

La información obtenida con esta distribución se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5
Parámetros de la situación actual

Familia	Proporción	Distancia Total de Movimientos (metros)	Distancia Promedio (metros)	Distancia a Línea de Producción (metros)	Distancia Recorrida por Familia
AHC	80%	41611.30	145.89	197	3771.83
	20%	5551.50			
API	80%	22568.20	81.33	177	3874.93
	20%	5094.60			
ARM	80%	5284.90	77.36	137	5573.27
	20%	1281.80			
DPL	80%	45511.30	158.47	276	16509.93
	20%	5151.50			
DW	80%	55988.50	84.08	268	55980.70
	20%	10451.40			
FPG	80%	51002.20	77.40	137	22297.92
	20%	12936.40			
GPB	80%	34135.80	70.33	214	14784.90
	20%	8516.30			
LIC	80%	91084.80	125.43	234	85902.74
	20%	21194.20			
WSA	80%	29044.50	162.07	170	17267.49
	20%	3978.20			
DPA	80%	8359.80	89.33	145	6795.65
	20%	3675.00			
HRA	80%	20689.80	77.94	170	3967.03
	20%	3585.00			
					236,726.39 (metros /día)

Fuente: elaboración propia, realizada con base en datos obtenidos del análisis de información, mediciones directas y plano a escala proporcionado por personal del almacén

Realizando los cálculos de las distancias recorridas con base en los parámetros obtenidos de la tabla:

Distancia recorrida = 236,666.4 metros / días

Análisis de resultados

La Tabla 6 muestra la distancia recorrida del total de los materiales solicitados por las líneas de producción cuando éstos son entregados en los puntos de descarga, distancia medida en metros por día, la cual para la alternativa de solución es de 193,622 y en el caso de la distancia recorrida en la situación actual la distancia es de 236,726 metros por día. También se muestra la diferencia de los metros que disminuye el recorrido de los materiales por día si se pone en práctica la distribución de materiales por familia en espacios de almacén semifijos, siendo éstos de 43.104 kilómetros por día, lo cual representa un ahorro en el recorrido del 22.3%.

Tabla 6
Resultados finales

	Distancia recorrida (metros/día)	Diferencia (metros/día)	Ahorro
Alternativa de solución.	193,622	0	22.3%
Situación actual	236,726	43,104	0%

Fuente: elaboración propia, realizada con base en reporte del software de apoyo, datos obtenidos del análisis de información mediciones directas y plano a escala proporcionado por personal del almacén.

Si consideramos 43.104 kilómetros por 350 días al año, esto nos da un valor de 15,086 kilómetros de distancia que disminuye al año con el uso de la alternativa de solución, cifra atractiva para la implementación de la alternativa.

Haciendo una reflexión sobre el porcentaje que es posible disminuir la distancia recorrida, si esto se aplica a alguno de los recursos del almacén, por ejemplo: personal, equipo, tiempo, etcétera; para la empresa representa un verdadero ahorro en los gastos que ellos implican. Es decir, el disminuir por ejemplo en un 22.3% los gastos de mantenimiento de equipo de transporte, combustible y personal que opera los equipos por día como lo muestra la alternativa de solución, representa para la empresa un verdadero ahorro en el presupuesto anual destinado para el almacén.

Conclusiones

Como resultado del desarrollo del trabajo se llegan a las siguientes conclusiones:

- La aplicación del modelo de programación lineal para definir la distribución de materia-

les en el almacén disminuye la distancia recorrida para su entrega a las líneas de producción, reduciendo el tiempo a 4.3 horas por día en el surtido de materiales, si se hace una transformación de la distancia recorrida por la velocidad a la que un montacargas puede moverse dentro de las instalaciones.

- Al obtener los resultados de la aplicación del modelo de programación lineal, se encontró que la distancia que se recorre actualmente al distribuir los materiales es mayor 43,104 m/día a la distancia que se recorre con la distribución de materiales propuesto con una reducción del 22.3% total ($31,198 * 50$ semanas = 1,600 km. menos al año).
- La mejor asignación de materiales para el almacén del objeto de estudio es la de un almacenaje fijo, considerando como mejores localizaciones aquellas que se encuentran más cerca a la salida del almacén en condiciones actuales.
- El manejo de un almacén fijo de materiales permite controlar el inventario ya que visualmente se puede identificar cuando falta o excede la cantidad de material dentro del almacén.
- Para encontrar la solución a problemas reales con la ayuda de modelos o métodos matemáticos, es importante conocer a detalle las variables que se involucran y su comportamiento dentro del mismo.
- El conocimiento de las diferentes herramientas, modelos y métodos para la solución de problemas de localización permite ampliar las posibilidades de solución y seleccionar la mejor.

Este trabajo contribuye a la literatura sobre la aplicación de métodos cuantitativos y en especial modelos de Programación Lineal para la solución de problemas reales que las industrias enfrenta día con día, principalmente en el área de almacén; además sirve como ejemplo para aquellos tomadores de decisiones responsables del buen funcionamiento del área de almacén en los diferentes sectores productivos.

Trabajos futuros del caso de estudio que se muestra es la consideración de la demanda de las familias de productos de forma probabilística, lo cual permitiría prevenir fluctuaciones en la producción de la empresa y evitar falta de materiales a las líneas de producción. También es importante integrar las actividades de las diferentes áreas involucradas, para determinar políticas de inventario a carde la demanda del mercado tanto de materia prima como de producto terminado.

Referencias

- [1] Rushton, A., Croucher, P., & Baker, P. (2017). *The handbook of logistics and distribution management* (6th ed.). Kogan Page.

- [2] J. Tompkins, J. White, E. Frazelle, J. Tanehoco, and J. Treviño Facilities planning. New York. John Wiley & Sons. 1996.
- [3] Heragu S. Facilities Design. PWS Publishing Company. United States of America. 1997.
- [4] Geuken, F., & Louise, J. (2015). *Developing a Warehouse Layout Design Framework for Fast Growing Companies*. Lund University.
- [5] W. Morris. *Analysis for Material Handling Management*, Richard D. Irwin, Homewood , IL. 1962.
- [6] M. Hassan. A framework for the design of warehouse layout. *Facilities*. 2002. 20(13), 432–440. <https://doi.org/10.1108/02632770210454377>
- [7] N. Shetty, B. Sah and S. Chung. Route optimization for warehouse order picking operations via vehicle routing and simulation. 2020. *SN Applied Sciences*, 2(2). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2076-x>
- [8] Ardjmand, E., Shakeri, H., Singh, M., & Sanei Bajgiran, O. (2018). Minimizing order picking makespan with multiple pickers in a wave picking warehouse. *International Journal of Production Economics*, 206, 169–183. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.10.001>
- [9] Shetty, N., Sah, B., & Chung, S. H. (2020). Route optimization for warehouse order picking operations via vehicle routing and simulation. *SN Applied Sciences*, 2(2). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2076-x>
- [10] Mirabelli, G., Pizzuti, T., Macchione, C., & Laganà, D. (2015b). Warehouse layout optimization: A case study based on the adaptation of the multi-layer Allocation problem. *Proceedings of the Summer School Francesco Turco, Industrial Systems Engineering*, 49–58.
- [11] R. Askin and C. Strandridge. *Modeling and analysis of manufacturing systems*. New York; Wiley. 1993.
- [12] Richards, G. (2018). *Warehouse Management: A Complete Guide to Improving Efficiency and Minimizing Costs in the Modern Warehouse* (3rd ed.). Kogan Page.

CAPÍTULO 12

Logística Esbelta en el proceso de galvanizado: Caso de Estudio

*Rogelio Zarza Díaz
Tere Itzell Martínez Martínez
Anel Sánchez Maldonado*

Resumen—La logística esbelta tiene fundamento en la eliminación de desperdicios que no agregan valor a los productos o servicios. Su funcionalidad radica en la aplicación de cinco fases con apoyo de herramientas de calidad, que permiten identificar y eliminar los despilfarros. La demanda de productos galvanizados está en constante crecimiento por lo que es indispensable disminuir la variabilidad de las cadenas de valor para así satisfacer a los clientes.

En este trabajo se utilizó el principio de la logística esbelta para disminuir la cantidad de piezas galvanizadas que se retrabajan, permitiendo así aumentar la satisfacción de los clientes mejorando el porcentaje de cumplimiento de pedidos. Se empleó el principio de Pareto para determinar las familias de productos con mayor demanda y el principal problema. Para determinar la causa, se utilizó el diagrama de Ishikawa; no contar con un procedimiento de galvanizado provoca un 22% de retrabajo y un 2% de scrap. Empleando un gráfico de balance se determinaron los principales cuellos de botella, así como sus causas, por lo que la solución propuesta fue implementar un procedimiento alineado a los requerimientos del cliente principal. En una primera fase, redujo el retrabajo a un 10%, prediciendo su disminución hasta un 2% cuando los colaboradores se familiaricen con el procedimiento propuesto.

Palabras Clave—Logística esbelta, galvanizado, procedimiento

Introducción

Logística esbelta se define como la entrega de la combinación correcta de producto en el momento y lugar correcto, en todas las actividades que involucran a proveedores y fabricantes [1]. La idea de la logística esbelta es la reducción a su mínima expresión de defectos en la fabricación y entrega de los productos o servicios. La tendencia de aplicar esta filosofía a la gestión logística le apuesta a la reducción de los desperdicios que se dan a lo largo de la cadena de suministro, porque los procesos deben ser siempre mejores en términos de efectividad y tiempo [2].

La mejora continua de los procesos es una estrategia de la gestión empresarial indiscutible, que permite desarrollar mecanismos sistemáticos para mejorar el desempeño de los procesos, dado que los clientes ya no tienen tiempo de inspeccionar los artículos comprados, pues consideran que esto es responsabilidad de los proveedores [3]. Por lo que es responsabilidad del fabricante elevar el nivel de satisfacción de los clientes internos o externos y de otras partes interesadas [4]. La mejora continua se fundamenta en una cultura organizacional sólida de profundos valores, donde el enfoque primordial es el cliente; es también vital contar con un liderazgo de la alta dirección que apoye y reconozca las iniciativas del personal, pues se fundamenta en el sentido común y el trabajo en equipo [5]. Permite el perfeccionamiento constante del diseño original, a cargo de todos los empleados de la empresa, dado que no requiere grandes inversiones para afectar al producto y a los procesos que permiten su obtención, incluyendo los procesos de gestión promoviendo la colaboración del personal haciendo posible su crecimiento en motivación y en “saber hacer” colectivo [6].

El galvanizado por inmersión es el proceso de recubrir el acero con zinc fundido, por medio de un proceso continuo o por lotes. El galvanizado se efectúa para prevenir la corrosión (ataque que sufre un metal por parte del medio en que se encuentra, con el consiguiente deterioro de sus propiedades) en el metal. La relevancia de la corrosión en la sociedad actual se fundamenta en el uso desmesurado de metales en todo tipo de aplicaciones y sectores estratégicos del país [7]. En el proceso de galvanización se produce una reacción entre la superficie del acero y el zinc fundido, en un baño a 445-465 °C, obteniéndose un recubrimiento fuertemente unido al sustrato de acero, constituido por una serie de capas de aleación zinc-hierro en la cual, la capa más externa tiene una composición prácticamente igual a la del zinc fundido presente en el baño de galvanización [8].

El Estado de México es productor de acero líquido con una producción para el año 2022 de alrededor de 410 mil toneladas, lo que lo posiciona en el lugar número 10 a nivel nacional. Los productos más demandados y fabricados se encuentran los componentes galvanizados, tal es el caso de tubos, laminas y accesorios para diferentes sectores industriales [9]. Bajo este contexto es imprescindible la fabricación de productos galvanizados de calidad, refirién-

do a este término no solo a la calidad inherente del producto sino también a la calidad de los procesos que se relacionan con dichos productos [10], para satisfacer las necesidades de los clientes y el logro de la competitividad en todos los niveles del mercado. Actualmente, uno de los sectores con mayor demanda de productos galvanizados es el sector eléctrico. Para ofrecer productos de calidad y competitivos es necesario controlar los procesos de fabricación puesto que, durante el galvanizado en caliente, el zinc fundido utilizado en las plantas industriales siempre contiene impurezas metálicas [11].

El presente trabajo empleo la metodología Logística Esbelta como medio para la resolución de problemas en el proceso de galvanizado por inmersión en caliente para productos del sector eléctrico. Actualmente, el catálogo de productos está conformado por más de 10 familias. La propuesta de mejora se fundamenta en la realidad nacional de una gran cantidad de empresas, ya que en dicho sector empresarial existe la necesidad de ser cada día más competitivos, lo que obliga a las organizaciones a analizar sus procesos para obtener una mejor calidad que le permita cumplir con las necesidades y expectativas de los clientes. La competitividad empresarial, en el contexto de la globalización, exige a las organizaciones para ser sostenible en los mercados nacionales e internacionales, tener una administración de los procesos productivos más eficiente y eficaz de sus recursos financieros, humanos, tecnológicos entre otros [12].

En el complejo donde se desarrolló la presente investigación, se procesan en promedio 500,000 piezas eléctricas mensuales. Se realizó un análisis del catálogo de productos (Figura 1) utilizando el diagrama de Pareto para localizar a los pocos elementos vitales (20%) de entre todos los rubros, quienes tienen mayor influencia y que provocan el 80% de los problemas [13]. El diagrama de Pareto evidencia que las principales familias de productos eléctricos que se galvanizan son; cortacircuitos con más del 50% (más de 275,000 piezas). La segunda familia de productos con mayor frecuencia son los aisladores de vidrio, con aproximadamente el 15% de participación en proceso con alrededor de 75,000 piezas. Con lo anterior, se trabajó con un producto de referencia dentro de estas familias, la cual fue la Capucha Machuelada. Con el análisis de los registros de cumplimiento se determinó que éste tiene porcentaje promedio del 77.64%, con lo cual los pedidos programados no se entregarían en el periodo establecido, provocando insatisfacción de los clientes, para Albrecht (2006), el servicio al cliente involucra la entrega del producto en cantidad y tiempo acordado, ya que su cumplimiento influye de manera determinante en la lealtad de cliente y en la reiteración del consumo de este.

Metodología

El contexto ideal para la aplicación de procesos esbeltos es en la fabricación repetitiva de familias de productos donde los volúmenes pueden ser grandes, medios o pequeños [14]. La mejora continua se fundamenta en buscar los problemas y solucionarlos con pequeñas mejoras que son establecidas de manera continua, con el fin de establecer resultados satisfactorios [15]. La metodología utilizada fue la propuesta por Mantilla y Sánchez (2012), la cual presenta un modelo de mejoramiento de procesos logísticos en la cadena de suministros, cuyo propósito es la reducción de la variabilidad y el desperdicio en la cadena de valor. La metodología está basada en datos para conseguir la calidad más cercana a la perfección, utilizando herramientas estadísticas para mejorar [16]. Los pasos utilizados fueron:

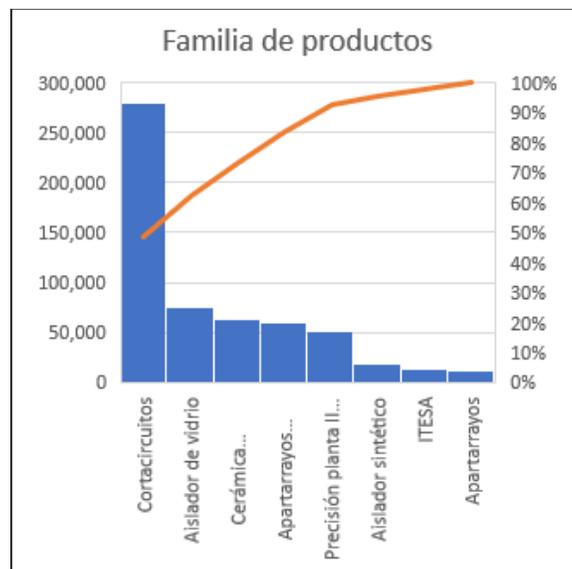


Figura 1. Familia de productos galvanizados. Fuente: Elaboración propia

Tabla 1
Metodología Utilizada

Fase	Herramienta	Objetivo
Definir	Diagrama de Pareto	Análisis del proceso de galvanizado mediante el principio de Pareto
Medir	Gráfico de balance	Selección del proyecto en la cadena de valor mediante la identificación de cuellos de botella
Analizar	Diagrama de Causa y efecto	Análisis de los datos recolectados para detectar las causas de variabilidad

Implementar	Capacitación mediante procedimiento	Formulación de mejoras e implementación
Controlar	Validación	Retroalimentación del ciclo de mejora continua

Fuente: Adaptado de [5]

La gestión de la cadena de suministro facilita el cumplimiento de los pedidos de los clientes de los productos manufacturados para así tener clientes satisfechos a costos razonables [17]. De igual manera, la logística esbelta incluye los esfuerzos por realizar las actividades logísticas requeridas en las empresas, basadas en el principio de eliminar todos los elementos, acciones y operaciones que no agregan valor a la actividad [5].

Resultados

El diagnóstico de situaciones actuales en sistemas productivos industriales bajo el enfoque, uso y aplicación de herramientas esbeltas permiten identificar problemas o afectaciones y residuos en la cadena de valor. Por lo tanto, optimizar y realizar mejoras de manera continua en los procesos, son objetivos con ámbito de obligatoriedad en el sector industrial y de las empresas en estos periodos actuales [18].

En la definición del problema se deberá de considerar los requerimientos del cliente y priorizar los más significativos buscando enfocar el proyecto a la oportunidad de mejora con mayor interés [19]. Por lo que, con el principio de Pareto se determinó que las familias con mayor demanda son cortacircuitos y aisladores de vidrio con un 77.64% de cumplimiento derivado de que el principal rechazo es debido a piezas que tienen zonas no galvanizadas, obligando a re-trabajarlas en un segundo baño de galvanizado, donde se obtiene un *scrap* (el *scrap* es una palabra inglesa que se traduce como chatarra o residuo; en el contexto industrial, *scrap* refiere a todos los desechos y/o residuos derivados del proceso industrial [20]) del 2% (2,236 piezas), que principalmente es originado por la porosidad de las campanas, lo que impide que el zinc se adhiera correctamente.

En la etapa de medición se deberá evaluar la magnitud del problema mediante métricas de desempeño para que sea posible comparar dicha métrica una vez finalizado el proyecto [21]. Con los tiempos ciclos obtenidos de las operaciones se observa que el decapado es la operación que más tiempo involucra (Figura 2). Aunque en la etapa de galvanizado se tiene un tiempo ciclo menor, es ahí donde se realizan actividades de retrabajo cuando los baños no cumplen con los estándares de calidad, pudiendo retrabajar hasta un 22.36% de las piezas el equivalente a 111,800 piezas. Se puede observar que las operaciones que se encuentran por encima del tiempo takt (el *takt time* es el tiempo en el que se debe obtener una unidad

de producto [22]) son: decapado, galvanizado y enfriado y secado. A continuación, se realiza un análisis para estas tres etapas:

- *Decapado*: se realiza con una solución al 16% de ácido clorhídrico, la cual tiene como principal objetivo la limpieza de las piezas de cualquier residuo proveniente de fundición, esta etapa la realiza un solo operador y tiene un tiempo ciclo de 1200 segundos, generando así el primer cuello de botella para la línea de producción.

- *Galvanizado*: la etapa de galvanizado la realizan dos operadores con un tiempo ciclo de baño de 537 segundos, solo 27 segundos por arriba del tiempo takt estimado, pero es en esta etapa donde se realiza el retrabajo del 22.36% de las piezas.

- *Enfriado y secado*: etapa realizada por un operador con un tiempo ciclo de 600 segundos en tinas de agua, donde pieza a pieza se retira de la tina y se seca de forma manual para así pasarla al área de inspección.

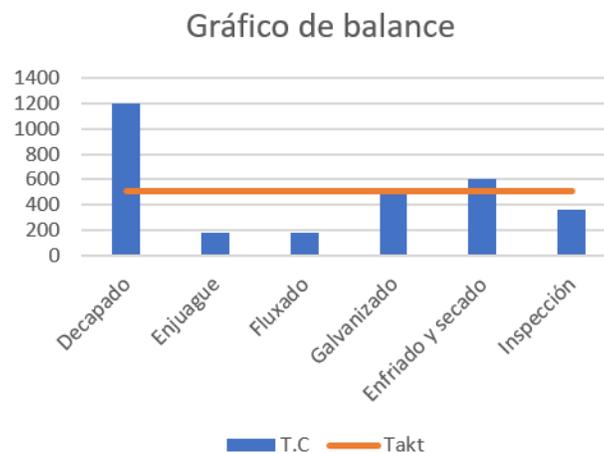


Figura 2. Gráfico de balance. Fuente: Elaboración propia

En la fase de analizar se identifica la causa raíz del problema, para esto es fundamental que el análisis se encuentre respaldado por datos recopilados en la fase de medición, y en caso de ser necesario, ver la posibilidad de volver a la fase anterior para recopilar más información [23]. Para determinar las causas principales al problema detectado (**Figura 3**), se empleó el diagrama de Ishikawa para buscar las diferentes causas que afectan los problemas bajo análisis [24]. Ayudando así a no dar por obvias las causas, sino que se trate de visualizar los problemas desde diferentes perspectivas, permitiendo tener una indagación completa para identificar todas las fuentes de variación [21].

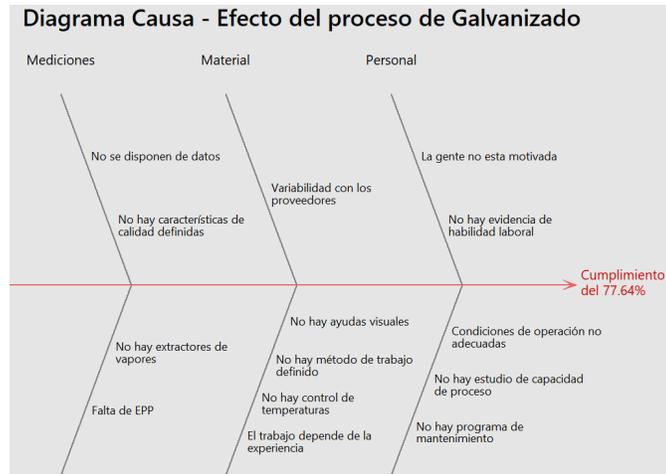


Figura 3. Diagrama de Ishikawa. Fuente: Elaboración propia

Con el diagrama de Ishikawa se asevera que la causa más importante es provocada por que el trabajo se desarrolla directamente por el criterio de los operadores, teniendo variación entre cada cambio de turno y colaborador. Adicionalmente, no se cuenta con un método de trabajo definido, para que así todos los operadores consideren las mismas operaciones, recursos y herramientas que permitan reducir la variabilidad de la operación.

Con base en el resultado obtenido del diagrama de Ishikawa se plantea la siguiente solución:

- Desarrollar un procedimiento para el proceso de galvanizado por inmersión en caliente para determinar los pasos y condiciones del proceso alineado a los requerimientos del cliente y a la NMX-H-004-SCFI-2020.

En la cuarta fase, el rendimiento del proceso se debe mejorar mediante el desarrollo de posibles soluciones que eliminen la causa raíz del problema en cuestión [25]. Se elaboro un procedimiento para el proceso de galvanizado por inmersión en caliente alineado a la normativa aplicable, referencias técnicas bibliográficas y experiencia de los encargados en planta. Las principales diferencias (Tabla 2) de los métodos aplicados se observan en la tabla siguiente:

Tabla 2
Comparación de métodos de trabajo

Método tradicional		Procedimiento propuesto	
Sub-proceso	Descripción	Sub-proceso	Descripción
Carga de material	De acuerdo con geometría de la pieza	Carga de material	De acuerdo con geometría de la pieza
Decapado	16% de ácido clorhídrico durante 20 minutos	Decapado	16% de ácido clorhídrico durante 15 minutos

Enjuague	Se realiza en una paila con agua por 3 minutos	---	----
Fluxado	52% de cloruro de amonio y 48% de cloruro de zinc durante 3 minutos	Fluxado	12% de cloruro de zinc y 26% de cloruro de amonio durante 15 minutos
Galvanizado	Baño en solución de zinc durante 7 minutos	Galvanizado	Baño en solución de zinc durante 5 minutos a 450°C constantes
Secado	En baño de agua directo por 7 minutos	Secado	En baño de agua directo durante 1 minuto
Inspección	De acuerdo con experiencia durante 6 minutos aproximadamente	Inspección	De acuerdo con ISO 1461:2009 durante 3 minutos aproximadamente

Fuente: Elaboración propia

Para determinar si la propuesta de procedimiento al proceso de galvanizado por inmersión en caliente contribuye a la reducción de piezas no conformes y tiempo de entrega al cliente, se decidió realizar dos muestreos: en el primero se recabaron datos del proceso tradicional, y en el segundo muestreo se utilizó el procedimiento propuesto.

En la etapa de controlar se hacen comparaciones del antes y después para evaluar las mejoras del nuevo proceso. Es importante que se utilicen las métricas detalladas en la fase de definición para desarrollar y evaluar un plan que mantenga las mejoras [23]. Por lo tanto, se realizaron dos muestreos para comparar las medias y aceptar o no el procedimiento propuesto.

Análisis del Primer muestreo (Método tradicional)

Se realizó un primer muestreo de 120 productos, modelo Capucha P-2115 Machuelado, considerando como característica de calidad el espesor con el cual el galvanizado debe cumplir (especificación dada por el cliente) siendo de , obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3
Resultados del primer muestreo

Característica	Descripción
Procedimiento empleado	Producción tradicional
Tamaño de muestra	120
Cantidad de productos defectuosos	95
Problema de calidad	Zonas no galvanizadas

Primer retrabajo	30 conformes 65 no conformes
Segundo retrabajo	28 conformes, 37 no conformes
Tercer retrabajo	37 conformes
Tiempo total de proceso	133 minutos

El principal defecto que se encontró fue que el espesor del galvanizado no cumple con las especificaciones del cliente, presentando espesores por debajo de la especificación. Se puede visualizar en la Figura 4 que las piezas inclusive presentan partes sin galvanizar, por lo que se tuvieron que realizar tres retrabajos.



Figura 4. Productos con problemas de espesor.

Con los resultados obtenidos de los estadísticos descriptivos y de dispersión, se puede observar que existe un rango de 146 , por lo cual es una variación muy amplia entre los datos, se obtuvo una media de 115.74 ; sin embargo, la mayoría de los datos (alrededor de 70%) se encuentran fuera de especificación.

Tabla 4
Estadísticos del primer muestreo

Variable	Espesores μm
Tamaño de muestra	120
Media	115.74
Desviación estándar	25.19
Varianza	634.33
Mínimo	85

Se observa en el histograma que existe una tendencia mayormente por debajo de la especificación inferior del galvanizado.

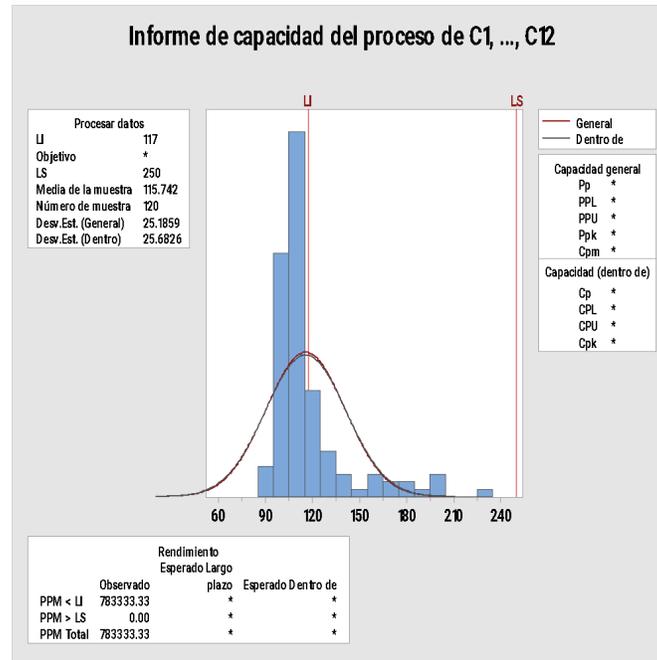


Figura 5. Histograma de datos del primer muestreo.

Todas las áreas de una empresa que generan desperdicios no aportan un valor añadido al producto o servicio, representan un costo directo para la empresa [26]. En conclusión, para éste primer muestreo se obtuvo un sobrecargo de tiempo de 289% del tiempo estimado, utilizando mano de obra y material sobre el planeado por el MRP de planta. Con dicha información, se estima que más del 50% de los productos que se galvanizan por el método tradicional tendrán algún defecto de calidad.

Segundo muestreo (Método propuesto)

Se realizó el segundo muestreo a 120 productos modelo Capucha P-2115 Machuelado, considerando la misma especificación de calidad que en el muestreo anterior, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 5
Resultados del segundo muestreo

Característica	Descripción
Procedimiento empleado	Procedimiento propuesto
Tamaño de muestra	120
Cantidad de productos defectuosos	15
Problema de calidad	Zonas no galvanizadas
Primer Re-trabajo	15 piezas aceptadas
Tiempo total de proceso	50 minutos

Con los resultados obtenidos de los estadísticos se puede observar que existe un rango de 19 , lo cual indica una variación reducida con respecto al primer muestreo, se obtuvo una media de 124.05 , con lo cual la mayoría de los datos se encuentran dentro de especificación.

Tabla 6
Estadísticos del segundo muestreo

Variable	Espesores μm
Tamaño de muestra	120
Media	124.05
Desviación estándar	4.513
Varianza	20.3671
Mínimo	116

Se observa en el histograma que los datos se agruparon en mayor medida al límite inferior, lo que redujo considerablemente la dispersión de los datos y mejorando considerablemente la calidad de los productos galvanizados. Sin embargo, es importante señalar que existe el riesgo de que haya una tendencia hacia el límite inferior, por lo que se deben continuar implementando estrategias de mejora para centrar los resultados.

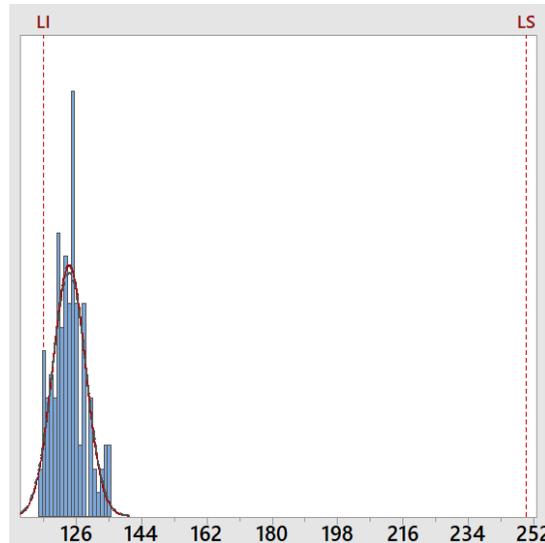


Figura 6. Histograma de datos del segundo muestreo.

La evaluación de las herramientas estadísticas fue un factor importante para definir y detallar los problemas con lo que se realizó la propuesta para dar solución a las inconformidades encontradas. Esto se hizo con el fin de buscar las estrategias más acordes a las características de la empresa [27]. Así, se llevó a cabo una prueba de hipótesis a las medias para corroborar o

descartar la aplicabilidad el procedimiento propuesto y, con ello, reducir la cantidad de productos no conformes y el tiempo de entrega al cliente, los resultados son los siguientes:

La gerencia de planta estableció como objetivo una media de 130 μm de espesor para las Capuchas P-2115 Machueladas, los datos fueron conformados por dos muestras, una para cada población. Se calculó la diferencia de las medias muestrales mediante el procedimiento propuesto por Navidi (2006). Si la diferencia se encuentra alejada del 0, se puede concluir que las medias poblacionales son diferentes. Si la diferencia se aproxima a 0, se puede concluir que las medias poblacionales podrían ser iguales y que la implementación del procedimiento propuesto no genera diferencia entre los procesos [28] para realizar el galvanizado por inmersión.

Tabla 7
Estadísticos de las muestras

1er Muestra (Proceso tradicional)		2da Muestra (Proceso propuesto)	
Muestra	120	Muestra	120
Media	115.74 μm	Media	124.05
Desviación estándar)	25.19 μm	Desviación estándar	4.5130
Mínimo	85 μm	Mínimo	
Rango	146 μm	Rango	

El principal interés radica en la diferencia de las medias poblacionales . Por lo que se deben de establecer las hipótesis nula y alternativa. Por consiguiente:

Contra

La prueba está basada en la diferencia de las medias, debido a que ambos tamaños de muestra son grandes, dichas medias se distribuyen aproximadamente como una normal se tiene que la desviación estándar poblacional (1) se calcula por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{25.19^2}{120} + \frac{4.5130^2}{120}} = 2.336135$$

El valor observado de las diferencias de las medias es: $115.74-124.05=-8.31$

Finalmente, el valor del estadístico z (2) es:

$$z = \frac{(\bar{X}-\bar{Y})-\Delta_0}{\sigma} \quad (2)$$
$$z = \frac{-8.31 - 0}{2.336135} = -3.55$$

El valor crítico es el valor z encontrado en el nivel de significación de la prueba, por lo que, si este valor se encuentra fuera de la llamada región de aceptación, se rechazará la hipótesis nula. El valor p es la probabilidad de que el parámetro que se investiga se encuentre dentro de la región de rechazo. Si el valor p es mayor que el nivel de significancia no se puede rechazar la hipótesis nula [29]. Con ayuda de la tabla de valores "Z", se obtiene una probabilidad de 0.0002. Por lo tanto, efectivamente, con la implementación del procedimiento propuesto se tendrán mejores resultados en los productos galvanizados.

Para ser competitivo, se debe mejorar la productividad, ya que es una medición para lograr un nivel de competitividad en el largo plazo. Mejorar la productividad implica obtener más y mejores productos con los mismos factores productivos o mantener el nivel de producción usando menos y mejores recursos. Por lo que se puede decir que la productividad es producir más al mismo costo o producir lo mismo al menor costo [30].

Se determinó el índice que mide la capacidad potencial del proceso para producir resultados dentro de los límites de especificación establecidos teniendo como especificación superior hasta $170 \mu\text{m}$ e inferior $130 \mu\text{m}$, sin considerar la centralización del proceso mediante:

$$C_p = \frac{ES-EI}{6\sigma}$$

Obteniendo

$$C_p = \frac{170 - 130}{6(4.51)} = 1.47$$

Así mismo, se calculó el índice que indica la capacidad real del proceso, viendo como un ajuste de la capacidad potencial dado que toma en cuenta el centrado del proceso, calculándolo de la siguiente manera:

$$C_{pk} = \left[\frac{\mu-EI}{3\sigma}, \frac{ES-\mu}{3\sigma} \right] (4)$$

Obteniendo el valor del índice se obtiene un valor , que al ser negativo indica que el proceso aún esta produciendo fuera del límite de especificación inferior y que esta significativamente descentrado, esto sucede porque la media del proceso se encuentra con tendencia hacia la especificación inferior [24], tal cual se pudo apreciar en el histograma del segundo muestreo. Esto indica que el desempeño del proceso aún es deficiente y que tiene una alta probabilidad de seguir produciendo productos defectuosos por lo que es necesario continuar aplicando mejoras al proceso de galvanizado por inmersión en caliente para centrar la medial dentro de los limites de especificación y reducir la variabilidad.

Existen varias estrategias para analizar el comportamiento de ciertos fenómenos que, mediante los resultados obtenidos, permiten brindar recomendaciones de mejoramiento [31]. La aplicación de la logística esbelta permitió reducir los desperdicios de tiempo, materiales y procesos para obtener las condiciones de máxima utilización de los recursos [32], ya que en la actualidad las empresas buscan innovar sus procesos, productos o servicios con el fin de prevalecer en mercados altamente competitivos. Cada empresa optará por las herramientas que mejor le convengan y se encuentren dentro de sus posibilidades [21]. Cuando se implementa la metodología lean de manera efectiva, las organizaciones pueden mejorar la calidad de sus productos, ofrecer servicios superiores y reducir costos al mismo tiempo sin comprometer las necesidades del cliente.

Siempre se puede hacer una cosa mejor, no solo la segunda vez, sino cada vez que se intente [33]. Realizar una actividad después de la primera vez implica aprendizaje producto de la experiencia [34]. Este comportamiento, denominado curva de aprendizaje es una característica inherente a toda actividad organizada [35]. La productividad significa realizar una comparación entre la cantidad de recursos utilizados y la cantidad de bienes y servicios que se producen con estos recursos [36].

CONCLUSIONES

La logística esbelta es una filosofía de mejora de procesos de fabricación y servicios que se basa en la eliminación de desperdicios y actividades que no agregan valor al bien o servicio adquirido por el cliente, eliminando la ineficiencia de la cadena de suministro [37]. Esta filosofía no solo mejora la eficiencia, sino que también aumenta la satisfacción del cliente al asegurar que se entreguen productos y servicios de alta calidad de manera consistente y oportuna

Con la implementación del nuevo procedimiento de galvanizado por inmersión en caliente, se predice una reducción significativa del retrabajo en un 20% y del tiempo de ciclo del pro-

ceso, incluso cuando se realicen retrabajos en zonas no galvanizadas. Adicionalmente, los resultados obtenidos de la prueba de hipótesis indican que se puede alcanzar una media de 130 micrómetros en el grosor del recubrimiento para las piezas galvanizadas. Estos resultados son prometedores, pero es importante seguir implementando mejoras continuas al proceso de galvanizado por inmersión para alcanzar un proceso de manufactura esbelta y seis sigma.

Es crucial enfocarse en la reducción de inventarios en proceso, la eliminación de recorridos innecesarios y la minimización de tiempos muertos de fabricación. Estas mejoras no solo optimizarán el proceso, sino que también reducirán costos y aumentarán la productividad. Asimismo, es indispensable que el área de inspección de recepción establezca criterios claros y estrictos para aceptar o rechazar la materia prima proveniente de la planta de fundición. Un gran porcentaje de los productos que requieren retrabajo se debe a la alta porosidad de la materia prima, lo que dificulta la adhesión del zinc a estas superficies. Implementar controles de calidad rigurosos en esta etapa inicial es fundamental para evitar problemas en etapas posteriores del proceso.

El objetivo de la metodología lean aplicada a la cadena de suministro es mejorar los procesos para ofrecer productos o servicios que cumplan con las necesidades de los clientes en cuanto a cantidades, especificaciones, lugares y momentos correctos a lo largo de todos los eslabones de la cadena de valor. Esto no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también fortalece la capacidad de la empresa para responder rápidamente a los cambios en la demanda del mercado, aumentando así su competitividad y sostenibilidad a largo plazo.

En resumen, la adopción de prácticas de logística esbelta y la mejora continua de los procesos de galvanizado no solo contribuirán a la reducción de desperdicios y la optimización de la cadena de suministro, sino que también garantizarán que los productos finales cumplan con los más altos estándares de calidad y satisfacción del cliente.

Referencias

- [1] J. Mesa y D. Carreño, «Metodología para aplicar Lean en la gestión de la cadena de suministro,» *Espacios*, vol. 41, n° 15, pp. 30-43, 2020.
- [2] P. O. J. Martínez, «Reducción de problemas de adherencia en procesos de galvanizado mediante técnicas de minería de datos,» *Revista de Metalurgia*, vol. 43, n° 5, pp. 325-336, 2007.
- [3] L. d. I. L. González Reyes y M. Moreno Pino, «Procedimiento para implementación de

un sistema de gestión de costos de calidad,» *Ciencias Holguín*, vol. 22, n° 2, pp. 1-14, 2016.

[4] G. Gereffi, «International trade and industrial upgrading in the apparel commodity chain,» *International Economics*, vol. 48, pp. 37-70, 1999.

[5] O. L. Mantilla Celis y J. M. Sánchez García, «Modelo tecnológico para el desarrollo de proyectos logísticos usando Lean Six Sigma,» *Estudios Gerenciales*, vol. 28, n° 124, pp. 23-43, 2012.

[6] E. Bonilla, B. Díaz, F. Kleeberg y M. T. Noriega, *Mejora continua de los procesos. Herramientas y técnicas*, Universidad de Lima: Fondo Editorial, 2020.

[7] A. M. Angarita Acosta, D. J. Salas Cortés y A. F. Cruz Palacios, *Determinación de la influencia y valores óptimos de las variables metalúrgicas en el proceso de galvanizado en caliente por inmersión y centrifugado, en la planta piloto de la empresa Metallan S.A.S*, Bucarama: Universidad Industrial de Santander, 2015.

[8] B. E. Palma, *Comportamiento en la atmósfera del recubrimiento 55% Al-Zn sobre acero. Comparación con el recubrimiento galvanizado*, Madrid: Universidad Complutense de Madrid, 1995.

[9] CANACERO, «CANACERO,» 2024. [En línea]. Available: www.canacero.org.mx. [Último acceso: 2024].

[10] G. E. Arellano Chillagano, «Seis Sigma para el proceso de galvanizado por inmersión en caliente en la empresa Fadhelec CIA, LTDA,» Universidad Tecnológica Indoamérica, Quito, 2019.

[11] L. Barahona Castillo y J. Navarro Infante, «Mejora del proceso de galvanizado en una empresa manufacturera de alambres de acero aplicando la metodología Lean Six Sigma,» Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 2013.

[12] N. Labarca y U. Zulia, «Consideraciones teóricas de la competitividad empresarial,» *Omnia*, vol. 13, n° 2, pp. 158-184, 2007.

[13] C. Bonet Borjas, «Ley de Pareto Aplicada a la Fiabilidad,» *12 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura*, vol. 1, n° 52, pp. 1-9, 2004.

[14] V. Gisbert, «Lean manufacturing. Qué es y que no es, errores en su aplicación e interpretación más usuales,» *3C Tecnología*, vol. 13, n° 4, pp. 42-52, 2015.

- [15] J. A. González Baquerizo y M. A. Estéfano Almeida, «Análisis de mejora continua para un sistema de control de inventarios en compañías de transporte en la ciudad de Guayaquil,» *Polo del Conocimiento*, vol. 7, n° 11, pp. 930-950, 2022.
- [16] R. M. Curiel Morales, C. Alvarez Bernal y F. Peraza Solano, «Aplicación de metodología DMAIC para la reducción de nitrógeno total volátil en producto terminado,» *Revista Sinergia*, vol. 1, n° 14, pp. 62-76, 2023.
- [17] H. Wang y J. Cruz R, «Transformational leadership in Supply Chain Management,» *SSRN*, 2018.
- [18] J. S. De la Hoz y C. Díaz Sandoval, «Sistema productivo industrial utilizando modelos de manufactura esbelta,» *Revista Venezolana de Gerencia*, vol. 28, n° Especial 9, pp. 718-730, 2023.
- [19] S. Salah, A. Rahim y J. A. Carretero, «The integration of Six Sigma and lean management,» *International Journal of Lean Six Sigma. Springer*, vol. 1, n° 3, pp. 249-279, 2010.
- [20] K. L. Hernández Montoya y C. J. Pérez Ascencio, «Aplicación de las herramientas de calidad para contabilizar el scrap en una empresa metal-mecánica,» *Revista Ciencia, Ingeniería y Derrollo Tec Lerdo*, vol. 1, n° 5, pp. 144-148, 2019.
- [21] A. V. Marín Calderón, M. Valenzuela Galván, G. Cuamea Cruz y A. Brau Ávila, «Aplicación de la metodología Lean Six Sigma para disminuir desperdicios en una unidad de fabricación de paneles modulares de poliestireno,» *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. XXIV, n° 1, pp. 1-12, 2023.
- [22] M. López Acosta, G. M. Martínez Solano, A. F. Quirós Morales y J. A. Sosa Ochoa, «Balanceo de líneas utilizando herramientas de manufactura esbelta,» *El buzón de Pacioli*, n° 74, pp. 1-22, octubre 2011.
- [23] W. Zhan, *Lean Six Sigma and statistical tools for engineers and engineering managers*, Momentum Press, New York, 2016.
- [24] H. Gutiérrez Pulido y S. de la Vara, *Control estadístico de la calidad y seis sigma*, México: Mc Graw Hill, 2013.
- [25] A. Jiju, V. Sunder, C. Laux y E. Cudney, *Introduction to Lean Six Sigma and Ten Commandments*, 2019.

- [26] E. Ortiz Sánchez, W. García Castro y Y. Ramos Alfonso, «Propuesta de mejora continua mediante la aplicación de una metodología en una planta camaronera,» *Ingeniería Industrial*, vol. XLIV, n° 3, pp. 1-17, 2022.
- [27] L. E. Vargas Ortiz, M. S. Carrillo Landazabal, M. I. Narváez Escorcía, J. C. Vitola Cabarcas y C. A. Serveriche Sierra, «Reducción de cancelaciones de cirugías programadas en IPS a través de la metodología DMAIC de Lean Six Sigma,» *Ingenierías USBMed*, vol. 14, n° 2, pp. 23-32, 2023.
- [28] W. Navidi, *Estadística para ingenieros*, Mc Graw Hill, 2006.
- [29] M. A. Hurtado Obando, «¿Debería ser tan pequeño el nivel de significancia en una prueba de hipótesis?,» *Revista Torreón Universitario*, vol. 12, n° 33, pp. 1-11, 2023.
- [30] X. E. Soledispa Rodríguez, J. M. Pionce Choez y M. C. Sierra González, «La gestión administrativa, factor clave para la productividad y competitividad de las microempresas,» *Dominio de las ciencias*, vol. 8, n° 1, pp. 280-294, 2022.
- [31] J. Teiler, M. Traverso y C. Bustos, «Optimización de procesos relacionados con la gestión del inventario de una farmacia hospitalaria mediante el uso de la metodología Lean Six Sigma,» *Revista de la OFIL*, vol. 31, n° 1, pp. 58-63, 2021.
- [32] D. Palacios y M. Rodríguez, «Herramientas de logística esbelta aplicadas a un sistema de abastecimiento de materiales,» *Revista Iberoamericana de Ciencias*, vol. 8, n° 2, pp. 70-81, 2021.
- [33] R. Martínez Gutiérrez, A. A. Landeros Mada y C. Hurtado Sánchez, «Curva de aprendizaje del ingeniero en comunicaciones y electrónica del espacio aéreo,» *Ciencia y poder aéreo*, vol. 16, n° 2, pp. 128-147, 2021.
- [34] R. Lipsey, *Hammar skjöld: a life*, University of Michigan Press, 2013.
- [35] Y. Rodríguez Romero, R. Cespón Castro y N. J. Tovar Perilla, «Estudio empírico sobre curvas de aprendizaje en sistemas de gestión logística,» *Ingeniare. Revista Chilena de ingeniería*, vol. 30, n° 4, pp. 794-802, 2022.
- [36] J. Ortíz Porras, J. Salas Bacalla, L. Huayanay Palma, R. Marique Alva y E. Sobrado Malpartida, «Modelo de gestión para la aplicación de herramientas Lean Manufacturing para la mejora de la productividad en una empresa de confección de ropa antífama de Lima - Perú,» *Revista Industrial Data*, vol. 25, n° 1, pp. 103-135, 2022.
- [37] R. Bednár, H. Vidová y M. Beluský, «Lean principles application in business logistics,» de *Conference Proceedings, 21st International Conference on Metallurgy and Materials*, 2012.

CAPÍTULO 13

Inventory reduction in the central warehouse of an energy generating company in Mexico

*Belen Mejia Rasso
Lourdes Loza-Hernández
Javier Romero-Torres*

Abstract— Inventory management is a key process in any company, regardless of its size or industry, as it helps maintain a balance in a warehouse's stock and the products or items that are in greatest demand. It can reduce costs because it timely reflects what is not in active rotation and what must be supplied as soon as possible; this avoids delays in orders, spoilage of materials due to poor or prolonged storage, and avoids both shortages and excess inventory. Good inventory management also helps avoid product obsolescence, as it allows you to identify and eliminate those that are close to expiring or that have low demand. This helps to maximize the performance of the company's resources. All the above favors choosing the systems and procedures that best adapt to the inventory requirements of each company. This is intended to manage maximums and minimums, control inputs and outputs, as well as create statistics that allow stock to be calculated in the future, with the support of analysis and performance records. The company case study of this work is a transnational company that has been present in the Mexican wind energy market, which has overstock in its central warehouse, therefore due to organizational changes, it has been decided to reduce the warehouse management budget globally, including the region of Mexico. An analysis based on the financial profile of the stored products is applied to determine obsolete products, technically obsolete products, and high-moving products. After analyzing the information obtained from the current inventory database, the results show that 62.81% of the inventory value is obsolete material, 30% of the inventory value corresponds to technically obsolete material and only 7% is moving

materials. With these results, strategies are proposed to decision-makers that allow the company to maintain a healthy inventory.

Keywords—Inventory, Financial profile, warehouse management, Energy sector, Wind energy

Introduction

Background

[1] in their research on the analysis to improve the inventory management of a marketing company where the level was descriptive and quantitative approach and their population and sample was a marketing company, they reached the following conclusions: For an organization managing stocks involves high costs. Therefore, it is important to keep inventories full and not make excess purchases. The organization left evidence of merchandise shortages due to lack of adequate control in the warehouse. [2] in his research on inventory control and its influence on the profitability of the hardware store Grupo Empresarial Moreno S.A. whose level of study was causal and quantitative approach, concludes that stock control is not efficient, given that the economic benefits were minimal, in addition, it was verified with Pearson's R, that the indicators of inventory control moderately influence the indicators. profitability of (0.707). Likewise, the turnover indicators in days demonstrated a direct impact on profitability, since a value $p=0.04$ was obtained, and a moderate positive coefficient of 0.349.

From a national context, [3], in their article on inventory elements to reduce costs, whose level of study was causal and with a quantitative approach where the population and sample were data from 2015 - 2016, conclude that the preparation of The ABC classification allowed each item of stock to be distributed, likewise, with the proposal developed there was a reduction in inventory costs from S/ 38,102 to S/ 29,259, which represents 23.21% correspondingly. Furthermore, there is a positive relationship between inventory and cost reduction, with a Pearson correlation index of 0.689. Consequently, the inventory rotation in days has a limit of 12 days per month, which has had a positive effect on sales of S/ 56,521.00 and product diversification in the 2019 period.

The Inventory in the supply chain exists due to the mismatch between supply and demand, playing an important role within the supply chain which is to increase the amount of demand that can be satisfied by having the product ready and available when the customer he wants it. Another significant role that inventory plays is to reduce cost by exploiting economies of scale that may exist during production and distribution.

Inventory affects the assets held, the costs incurred, and the responsiveness provided in the supply chain. Other authors define inventory as current assets that are tangible in nature (except for services, which are intangible). They are made up of elements that will be sold in the normal course of operations or incorporated as part of other elements that will be subsequently sold and are generally grouped into one of the following categories: merchandise, raw and auxiliary materials, products in progress, finished products.

Below are those metrics that are related to the inventory, as mentioned by [4][5].

- Cash-to-cash cycle time is a high-level metric that includes inventories, accounts payable, and accounts receivable.
- Average inventory measures the average amount of inventory held. Average inventory should be measured in units, days of demand, and financial value.
- Inventory turns measure the number of times inventory turns over in a year. It is the ratio of average inventory to cost of goods sold or sales.
- Products with more than a specified number of days in inventory identifies products for which the company maintains a high level of inventory. This metric can be used to identify oversupplied products or to identify reasons for high inventory, such as price discounts or very slow movement.
- Average Replenishment Lot Size measures the average quantity in each replenishment order. The stock control unit (SKU) must measure the lot size in terms of both units and days of demand. It can be calculated by averaging over time the difference between the maximum and minimum inventory (measured at each replenishment cycle) available.
- Average Safety Inventory measures the average amount of inventory on hand when a replenishment order arrives. The stock control unit (SKU) must measure average safety inventory in both units and days of demand. The minimum inventory available in each replenishment cycle can be calculated by averaging over time.
- Seasonal inventory measures the difference between the product's inflow (both cycle and safety inventory) and its sales, which is purchased only to meet anticipated sudden increases in demand.
- Fulfillment rate (order/box) measures the fraction of orders/demands that were fulfilled on time with inventory. The fill rate should not be averaged based on time but based on a specified number of demand units (for example, per thousand, million, etc.)
- Fraction of time without inventory measures the fraction of time that a particular SKU had zero inventory. This fraction can be used to estimate lost sales during the period without inventory.
- Obsolete inventory measures the fraction of inventory that has passed a specific obsolescence date.

The financial reasons are small indicators that serve to measure or quantify the economic reality of a given entity. Regarding inventories, there is a great relationship between administrator and inventories, since the administrator has the obligation not only to collect information, but also to analyze it, since this will contribute to the generation of more accurate strategies and decisions.

Within the financial reasons we find the financial profile, which consists of a series of steps that allow us to determine the obsolescence of materials within the inventory and thus determine actions for its reduction.

Description of Case study

The company case study is a transnational company that has been present in the Mexican wind energy market since 2009, being one of the largest wind turbine manufacturers in the world, with subsidiaries in more than 15 countries, Mexico being one of these. When working for this company, the optimization of its central warehouse has been identified as an area of opportunity.

The company has a centralized warehouse located in the northern part of the country, where it stores most of the products that it distributes to its wind farms to carry out their operation and maintenance. Since 2021, there has been a reduction in the contracts that were held, generating a great impact on the warehouse inventory, since many of the materials that various projects had had to be returned to it and orders requested for said parks. They could not be canceled, therefore, they remained in the warehouse, considerably increasing the stock and the cost of maintaining that inventory.

For the year 2023, due to organizational changes, it has been decided to reduce the warehouse management budget globally, including the region of Mexico, with the objective of reducing the level of stock stored in the warehouse to be able to time reduce inventory costs and propose a solution that allows the company to have a robust inventory policy to achieve the stated objectives.

The case study has the need to reduce the costs generated by maintaining inventories in its central warehouse, this being the main objective of the company now and the problem that must be solved: How to reduce the current stock of materials?

By performing a quick analysis of the materials that are currently in stock, materials that have not been rotated in more than 2 years were identified, materials that were designated for a project but that finally, when said project was eliminated due to external factors, did not have any outlet, obsolete materials and expired materials (mostly consumables such as

greases, oils, resins, etc.), which denotes that products are stored that do not add value to the company and generate costs for keeping them within the inventory, in addition to the cost that.

The subcontractor that manages said warehouse is paid

That is why in this research project the problem raised will be addressed to solve it through strategies and methods that allow reducing the current stock and the cost of inventories in the short term. Therefore, the objective of this work is to determine the optimal amount of inventory within the central warehouse, designing strategies that allow the identification of those products that do not add value and work to reduce them, also, to propose strategies to reduce the amount of current stock, and to identify those products that do not add value to the inventory to work on their reduction.

One of the objectives in this project is to identify those products that do not add value to the inventory to work on their reduction. As indicated in previous paragraphs, since 2021 and until now there was a reduction in projects in the country that caused to the company losing profitability and therefore the demand for materials decreased at the same time, in addition to this. Within said company, a budget reduction was made for inventories and related to warehouse management, this project being even more important to provide necessary information to decision makers to carry out the pertinent actions that allow them to achieve their new goal.

The great versatility of the study of the supply chain allows the links of the supply chain to be analyzed in any sector, which is why it was decided to carry out this project within the renewable energy sector, applying a qualitative method that allows the company to mentioned, know the materials that are no longer used or are rarely rotated and focus their efforts on their reduction through strategies or solutions proposed in the first instance in this study. It is important to consider that analyzing the obsolescence of materials in an inventory periodically could serve as a prevention method to stay within the stated objective.

Jara and Sánchez (2017) in their research on the analysis to improve the inventory management of a marketing company where the level was descriptive and quantitative approach and their population and sample was a marketing company from Puebla, they reached the following conclusions: For a organization managing stocks involves high costs; Therefore, it is important to keep inventories full and not make excess purchases. The organization left evidence of merchandise shortages due to lack of adequate control in the warehouse.

Maldonado (2018) in his research on inventory control and its influence on the profitability of the hardware store Grupo Empresarial Moreno S.A. whose level of study was causal and

quantitative approach, concludes that stock control is not efficient, given that the economic benefits were minimal, in addition, it was verified with Pearson's R, that the indicators of inventory control moderately influence the indicators. profitability of (0.707). Likewise, the turnover indicators in days demonstrated a direct impact on profitability, since a value $p=0.04$ was obtained, and a moderate positive coefficient of 0.349.

From a national context, López and Galarreta (2018), in their article on inventory elements to reduce costs, whose level of study was causal and with a quantitative approach where the population and sample were data from 2015 - 2016, conclude that the preparation of The ABC classification allowed each item of stock to be distributed, likewise, with the proposal developed there was a reduction in inventory costs from S/ 38,102 to S/ 29,259, which represents 23.21% correspondingly. Furthermore, there is a positive relationship between inventory and cost reduction, with a Pearson correlation index of 0.689. Consequently, the inventory rotation in days has a limit of 12 days per month, which has had a positive effect on sales of S/ 56,521.00 and product diversification in the 2019 period.

Methodology

The material ordering process

During the development of this project, a series of steps were carried out to reach a solution, the methodology used is qualitative, since it is an interpretive procedure and supported by a quantitative methodology through a financial profile, which was the selected method to determine the value of the products in the inventory.

As shown in Figure 1, the supply process includes from the request or demand for materials from the park to their consumption, thereby creating the needs to be required or better known as the MRP (Material Requirements Planning) and the management of Reverse Logistics.

Once the demand to be satisfied is known, the stock available in the central warehouse is validated. For this step, there are two alternative ways:

1. If the material is in stock, the order preparation request is created to the central warehouse, to later request the transport that will be collecting and delivering the material to its destination, continuing with the validation and reception of the material. sent.
2. The second way is the opposite of having stock in inventory for shipping, if this is the case, then shipping must be managed from Spain, this country being the main su-

pplier. After there is a confirmation of supply from Spain, the corresponding import and shipment to Mexico is managed, which includes carrying out customs clearance, the completion of which is the release of the materials and shipment to the central warehouse to later send it to park where validation, reception and consumption in the system will be carried out.

Since the material is at its destination, it is validated and received in the system, to subsequently carry out the corresponding consumption, MRP and reverse logistics management. It is important to consider that, within the reverse logistics of materials, it is where the damaged or good condition material is collected and then treated for repairs, entered the inventory or scrapped. The main objective of this process is the reuse of materials, reducing the purchases of new material that impacts any budget.

The steps are described in Figure 1.

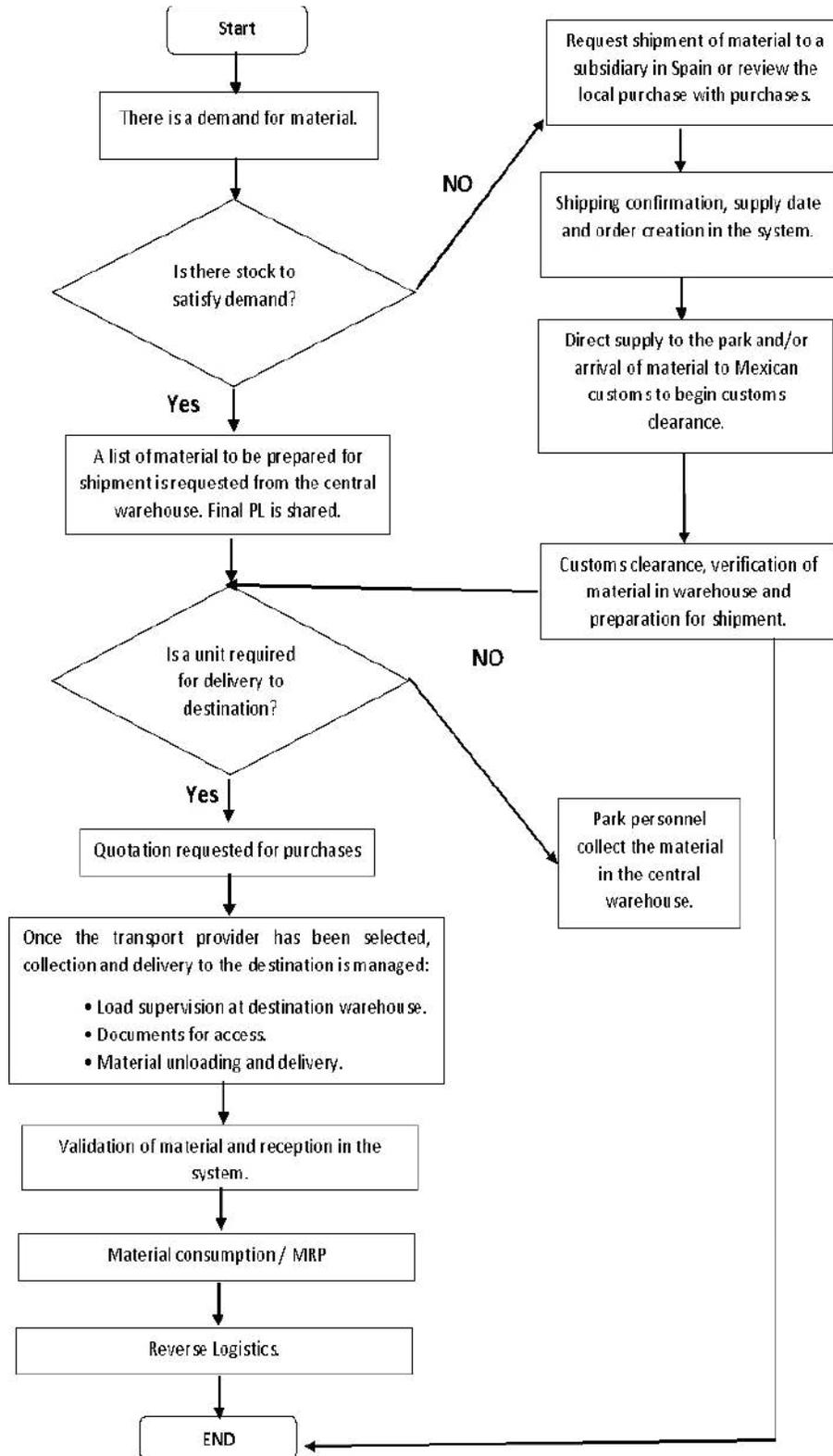


Figure 1. The material ordering process.

At this point, two databases were obtained, one of them was a report on the current stock of materials within the central warehouse and the second was a list of materials requested for 2024. Once the date is available it proceeds to develop the financial profile.

Development of the steps of the financial profile.

Given that one of the objectives is the identification of those products that do not add value to the company and work on their reduction, it was decided to use the financial profile to identify their obsolescence, Table I shows the intervals when the product arrived the warehouse and how long it has been stored.

Tabla 1
Financial profile analysis

OBSOLET	TECHNICALLY OBSOLETE	MOVING
>36	24 < product <36	<24
More than 36 months	(months)	From december 2021 to december 2023

¿The steps of the financial profile are:

1. Set zero the Part # that does not have Entry and Exit dates
2. Sort by departure date from oldest to most recent.
3. Color in Purple all Part # without Exit date
4. Arrange the purple part by Entry date
5. Color by entry date in Red (Obsolete), Yellow (Technically Obsolete) and the part that corresponds to Green (Motion) keep in Purple
6. Quantify the #Part, the Number of Pieces and the Amount of each color
7. Mark Obsolete Part #s by date of departure in Red
8. Arrange the Red part by Entry date
9. Color by entry date in Red (Obsolete), Yellow (Technically Obsolete) and Green (Motion) keep red
10. Quantify the #Part, the Number of Pieces and the Amount of each color
11. Mark by date of departure the Technically Obsolete Part #s in yellow
12. Arrange the yellow part by Entry date
13. Color by entry date in Red (Obsolete), Yellow (Technically Obsolete) and Green (Motion) keep in yellow
14. Quantify the #Part, the Number of Pieces and the Amount of each color
15. Mark the Movement Part #s by departure date in green

16. Arrange the green part by Entry date
17. Color by entry date in Red (Obsolete), Yellow (Technically Obsolete) and Green (Motion)
18. Quantify the #Part, the Number of Pieces and the Amount of each color

For the development of the financial profile, a database of the current stock in the central warehouse was considered, having a total of 1,893 SKUs. In addition, the demands for materials for annual preventive maintenance were analyzed, with the objective of identifying those materials of the which there was an overstock in the central warehouse to fulfill these demands and thus, reduce the orders that could be placed, and further avoiding the accumulation of stock.

Once the segmentation of the materials has been obtained (Figure 2), it proceeds to identify within said file which of the requirements for 2024 (Figure 3) can be supplied immediately from the warehouse stock so as not to order them.

UM	Cantidad	Fecha de entr.	Fecha de ultima salid	Costo unita	Cc
UN	1	16/12/2019	00/01/1900	1660.372	
UN	1	09/12/2020	00/01/1900	318689.518	
UN	480	01/11/2023	00/01/1900	6.4126	
UN	340	17/12/2019	18/10/2019	236.2585	
UN	5	30/12/2020	23/10/2019	1067.8473	
UN	1	16/12/2019	03/12/2020	11263.9892	
UN	1	01/11/2023	18/12/2020	2423.078	
UN	1	02/10/2019	24/05/2023	3636.98	
UN	1	30/12/2020	22/01/2021	9637.2325	
UN	1	01/11/2023	15/07/2022	32866.4159	

Figure 2. Segmentation of the materials.

1015149K0.4	GENERATOR BEARING GREASE	64	UN	1222553
1022394K15	SLIP RING CLEANING SOLVENT	3	UN	1222553
1022511-V1-6K1.5	LUBRIC. WATER-REPELLENT GREASE(CAN1,5KG)	8	UN	1222553
1015149K0.4	GENERATOR BEARING GREASE	64	UN	1222553
1041914	(RVE FILTRO G3 REJILLA 150X150) FILTRO DE MANTA	101	UN	1222553
1000734	AIR FILTER	43	UN	1222553
1021960	CHAIN LUBRICANT SPRAY	43	UN	1222553
1000660-2	NO DESCRIPTION IN EN	10	UN	1222553
1015149K0.4	GENERATOR BEARING GREASE	415	UN	1222561
1022511-V1-6K1.5	LUBRIC. WATER-REPELLENT GREASE(CAN1,5KG)	83	UN	1222561
1023969	2600 R 010 BN4HX /-B4-VPK-KE50-SO616	79	UN	1222561
0392001-V1-1L120	MOBILGEAR SHC XMP 320 (BOTTLE 20L)	35	UN	1222561
1037890	Botella grasa Yaw	1000	UN	1222561
1058851	Tubo de poliamida	2	UN	1222561
1017539	BELLOW SPORT-COVER 95/180 180/ 1297	25	UN	1222561
1103244	PHASE BRUSH	800	UN	1222561
1022750	RAL9006 SPRAY PAINT	30	UN	1222561
1035821	RVE FILTER 216x216 mm IP54	100	UN	1222561
1035822	RVE FILTER284x284 mm IP54	40	UN	1222561
1021960	CHAIN LUBRICANT SPRAY	83	UN	1222561

Figure 3. Requirements for 2024.

Each color represents the amount of products in the inventory and the value that the amount represents in the investment of the company. The colors purple and red indicate the obsolete products, yellow represents all the products that soon became obsolete, and it is important to determine special strategies to sell them before they became obsolete, and green color are the products of fast moving.

Analysis ABC.

Once the segmentation obtained by the financial profile has been analyzed, it has been decided to obtain the ABC classification, as shown in Figure 4. Where the materials classified as A represent 11.06% with a value of \$11,155,855.28, while the Materials with classification B are equivalent to 46.52% with a value of \$47,140,825.55, and finally the least rotated materials represent 42.42% with a value of \$98,468,396.28, which proves the financial profile's results.

Cantidad	Fecha de	Fecha de	Costo uni	Costo tota	Piezas	Costo
480	01/11/2023	00/01/1900	6.4126	3078.048	5935	\$ 45,5
1	16/12/2019	03/12/2020	11263.9892	11263.9892	24886.944	\$ 30,1
1	01/11/2023	18/12/2020	2423.078	2423.078	24586	\$ 29,0
1	16/12/2019	00/01/1900	1660.372	1660.372	4331.18	\$ 13,4
5	30/12/2020	23/10/2019	1067.8473	5339.2365	13971.5	\$ 12,3
1	01/11/2023	15/07/2022	32866.4159	32866.4159	10274	\$ 11,1
340	17/12/2019	18/10/2019	236.2585	80327.89	3605.1	\$ 8,6
1	09/12/2020	00/01/1900	318689.518	318689.518	262	4,
1	30/12/2020	22/01/2021	9637.2325	9637.2325	4393	\$ 1,5
1	02/10/2019	24/05/2023	3636.98	3636.98	641	\$ 6
TOTALES					78218.724	\$ 156,7

Figura 4. Segmentation ABC of the materials.

Results

Once the database has been segmented and orders have been created to supply what is on hand for demands in 2024, it is determined that 62.81% of the inventory value is obsolete material, 30% of the inventory value corresponds to technically obsolete material while only 7% are moving materials (Table 2).

Table 2
Results of Financial profile analysis

Colors	% items	Inventory value (MXN)	% of value
		\$ 156,765,076.98	
Red and purple	42.42	98,468,396.28	62.81
Yellow	46.52	47,140,825.55	30.07
Green	11.06	11,155,855.15	7.12

The interpretation of these results is as follows, according to the colorimetry:

Purple and red: Obsolete, according to the following assumptions:

- Requested even if there has been no check-out in previous years.
- No receipt date, but rather it was due to an inventory adjustment resulting from exits from parks (EU registration of material, US transfer).
- With reception date in 2019 years ago.

Total cost: \$98,468,396.28

Their recommendation is to return to Spain, so that they can be added back to the global stock and can be distributed to other regions that require it (relocate the stock).

Yellow: technically obsolete according to the following assumption:

- With a receipt date close to two years or exceeding the movement time, in the latter case (years 2022 and 2023) it is because no material departures have been recorded since 2020.

Total cost: \$47,140,825.55

The recommendation for this type of materials is to assess whether it continues to be maintained for future demands or even for sale to third parties. Taking into consideration that there is a risk that they will become obsolete.

Green: moving.

- Received within the 2 years allowed and with departures from 2021 to date.

Total cost: \$11,155,855.15

It is recommended to keep in inventory.

Once the analysis has been carried out through the financial profile, the results obtained are shown to the company also the impact that having excess inventory entails, not only in the financial part (using financial resources to maintain merchandise that is not being sold) and in the resources invested to maintain this inventory: reduction in operational efficiency, space used, personnel, etc. In addition to the following recommendations are proposed:

- *Returns to suppliers at a unit value probably lower than the initial acquisition cost.* In this case, it would be decided to return it to the original supplier, who is the company's subsidiary in Spain for subsequent redistribution. Which helps avoid the costly setup (or acquisition) costs associated with meeting likely infrequent demands in other locations.
- *Use of stock for promotional purposes.* Excess stock can be turned into a revenue generator by providing free samples when customers purchase other products or offering customers or subsidiaries around the world such stock for purchase.
- *Discounts or special sales.* The unit price is reduced enough to generate appreciable demand for the product.
- *Sales.* In this case, the company's sales areas would be in charge of planning and carrying out special sales strategies to clean up the inventory.
- *Scrap value disposal.* The best course of action may be to sell the material directly to a scrap metal dealer, a common transaction when there is a major metal component in the item.

Conclusions

Having over inventories can have significant negative consequences for a company. From cash flow difficulties and storage costs to inventory obsolescence, reduced operational efficiency, and lost investment opportunities, it is important that companies take steps to avoid carrying excess inventories and manage their stock inventories. effective way.

It is important to carry out periodic analysis to identify any excess inventory at early stages. This allows corrective action to be taken in a timely manner, such as making order adjustments, making discount decisions, or applying sales strategies to get rid of excess inventory.

This work contributes to the literature on this kind of problem in the industry and also supports the decision-makers who manage and control the inventory in the companies.

References

- [1] Jara, S., and Sánchez, D. (2017). Análisis para la mejora en el manejo de inventarios de una comercializadora. Revista de Ingeniería Industrial., 1(1), 1-18. Obtenido de <https://n9.cl/b6vf>

- [2] Maldonado, M. (2018). Evaluación del control de inventarios y su influencia en la rentabilidad de la ferretería Grupo Empresarial Moreno S.A.C - Nuevo Chimbote, 2017. Universidad Cesar Vallejo, Chimbote, Perú.

- [3] López, B., & Galarreta, G. (2018). Gestión de inventarios para reducir los costos del almacén de Manpower Perú E.I.R.L. Revista de investigación científica Ingnofis, 4(1), 15-28. Obtenido de <http://revistas.ucv.edu.pe/index.php/INGnosis/article/view/2058/1743>.

- [4] Chopra, S y Meindl, P. (2013). Administración de la Cadena de Suministro. México: Pearson.

- [5] Ballou, H (2004). Logística. Administración de la Cadena de Suministro. Quinta edición. México: Pearson Educacion.

CAPÍTULO 14

Determinación de la capacidad de producción de harina en una empresa recicladora de residuos cárnicos

Ernesto Alonso Vega Telles
Ernesto Alonso Lagarda Leyva
Alfredo Bueno Solano
María del Pilar Lizardi Duarte

Resumen—La producción ganadera es fundamental para la seguridad alimentaria y los medios de vida en países en desarrollo, pero genera desechos industriales que pueden causar graves problemas ambientales si no se gestionan adecuadamente. Transformar estos desechos en insumos útiles puede reducir la contaminación y generar ingresos adicionales para todos los participantes. Los procesos de rendimiento en la industria de sacrificio animal buscan mejorar la eficiencia y productividad utilizando prácticas para maximizar la cantidad y calidad de los productos ganaderos. En Sonora, México, se están implementando estos procesos, destacando el reciclaje de residuos cárnicos, para mejorar el manejo nutricional y sanitario optimizando el rendimiento y uso eficiente de los recursos disponibles. La propuesta contempla la construcción de un modelo utilizando la dinámica de sistemas para comprender y optimizar el proceso de producción de harina a partir de vísceras de ave en Sonora. Este modelo permitirá tomar decisiones informadas para maximizar el valor económico, minimizar costos y reducir el impacto ambiental asociado con el manejo inadecuado de los residuos. Su implementación puede ser replicada en otras áreas, contribuyendo así a la sostenibilidad y eficiencia en la producción ganadera.

Palabras Clave— Rendering, Cadenas alimentarias, modelo, dinámica de sistemas, economía circular, sustentabilidad.

Introducción

La producción de alimentos para consumo animal es esencial en países en desarrollo por su impacto en la seguridad alimentaria y los medios de subsistencia. La creciente demanda de producto animal a nivel global, se satisface en gran medida mediante la producción ganadera a gran escala y las cadenas alimentarias asociadas. Sin embargo, la generación de desechos industriales, como mermas por manejo inapropiado de la carne, estiércol y residuos de procesamiento, plantea desafíos ambientales significativos si no se manejan adecuadamente [1].

Una solución prometedora ante la acumulación excesiva de desechos que pueden contaminar el suelo, el agua y el aire, amenazando la salud humana y el equilibrio ecológico, radica en la transformación de estos desechos en insumos útiles que no solo reducen la contaminación ambiental, sino que también puede generar ingresos adicionales para toda la cadena de suministro [2].

Los procesos de rendimiento, en el contexto de la producción animal, están encaminadas a mejorar la eficiencia y la productividad de la producción. Estos procesos involucran una serie de prácticas y medidas diseñadas para maximizar la cantidad y la calidad de los productos obtenidos a partir de los recursos disponibles, como alimentos, agua y espacio.[3]

La industria de los procesos de rendimiento en Sonora se encuentra en crecimiento y desarrollo. En el estado se utilizan procesos de rendimiento para transformar materias primas en productos de alto valor, para el desarrollo de este artículo, resaltaremos como a partir del reciclaje de desperdicios cárnicos se puede impactar positivamente en el manejo nutricional enfocado en asegurar una alimentación balanceada y adecuada para estos y el manejo sanitario que aborda la prevención y el control de enfermedades, y el manejo adecuado de la salud en animales. Ambos aspectos son clave para optimizar el rendimiento al tiempo que se hace uso eficiente de los recursos disponibles. [4]

El proceso de reciclaje de subproductos de origen animal (conocido en inglés como rendering) es un proceso de transformación física y química que utiliza una gran variedad de equipos y procesos, aplicando calor, extrayendo la humedad y separando la grasa, transformando la materia prima en harinas y aceites aptos para la alimentación animal, si no existiese la industria del rendering, la acumulación de los subproductos de origen animal sin procesar obstaculizaría a las industrias cárnicas y significaría un serio riesgo en potencia a la salud ambiental y humana. [4]

Uno de los sectores que resultan ideales para introducir las mejores prácticas de los procesos de rendimiento, es el sector avícola. En México este sector alcanzó las 3.5 millones de

toneladas, generando subproductos como las vísceras (hígado, corazón, molleja), los cuales representan un porcentaje significativo del peso total del ave. El uso más importante y valioso de estos subproductos de origen animal es como ingrediente en alimentos para ganado, aves, acuicultura y caninos. [5]

En este sentido, la problemática que se aborda surge a partir del hecho de que tradicionalmente, las vísceras de aves a menudo son desechadas como subproductos, sin reconocer que son una fuente valiosa de proteínas y nutrientes [6]. Sin embargo y ante la necesidad de mejorar el manejo nutricional del alimento animal como una opción viable, es la creación de harina de pollo a partir de estas vísceras lo que implica un proceso para aumentar su contenido proteico, reducir la grasa y aumentar la humedad.

Este producto final no solo tiene un alto valor nutricional y puede utilizarse como ingrediente clave en la industria de alimentos para animales. Para ello, se propone el construir un modelo que permita comprender con profundidad el comportamiento del proceso que se vive en una organización de rendimiento en el sur de Sonora que produce harina a partir de vísceras y que puede ser fácilmente replicado en otras áreas.

La metodología que se seleccionó fue la dinámica de sistemas ya que es ideal para el análisis de sistemas complejos que involucran proceso de realimentación y comportamientos no lineales a lo largo del tiempo, lo que le permite exhibir comportamientos contra intuitivos además de tener la capacidad de explorar los efectos de diferentes políticas antes de su implementación [7]

Este modelo, permitirá a la toma de decisiones informadas sobre su producción y comercialización, maximizando el valor económico, minimizando el impacto en costos, pero también aquellos relacionados con la contaminación productos del manejo inapropiado de los recursos de residuo.

Método

Objeto de estudio: El objeto de estudio de la investigación es el sistema de producción de harina para alimento animal a partir de vísceras de ave, siendo este un estudio de carácter cuantitativo.

Materiales y equipos

Para el desarrollo del estudio y cumplimiento del objetivo planteado, se emplearon diver-

Los materiales tales como:

- Lucidchart: Software empleado para el desarrollo de diagrama de flujo.
- Microsoft Excel: Empleado para la recolección y agrupamiento de datos del sistema en estudio.
- Stella Architect: Software utilizado para el desarrollo de diagramas de nivel, simulación y validación del modelo, análisis de escenarios y construcción de interfaz gráfica.
- Cronómetro: Equipo implementado para la toma de tiempos en el proceso.

Procedimiento

El desarrollo de esta investigación se basa en una metodología sistémica, o dinámica de sistemas, que se concibe como el cúmulo de métodos que permite estudiar problemas complejos que se suscitan al interior de un sistema donde se analiza como un todo y no como elementos separados considerando procesos de realimentación y comportamientos no lineales en el tiempo [8].

El procedimiento abordado fue basado en la metodología propuesta por [9], donde para su aplicación considera un total de siete pasos desde la conceptualización hasta la construcción e implementación de una interfaz gráfica para la toma de decisiones y con ello la mejora continua, los cuales se describen a continuación:

- 1) *Mapear el proceso y conocimiento de la organización:* Como primer elemento del procedimiento se procedió a desarrollar una conceptualización del sistema bajo estudio, mediante el desarrollo de diagramas de flujo en los cuales se representa el proceso y el análisis de los equipos presentes en el mismo identificando con ello su capacidad de procesamiento.
- 2) *Identificar variables sensibles del proceso:* Partiendo de la identificación de los elementos que conforman el sistema y la interacción entre estos se identificaron las variables presentes en el sistema.
- 3) *Desarrollar diagrama de flujos y niveles:* Con el fin de obtener una representación del sistema en estudio, se procedió a desarrollar el diagrama de flujos y niveles (Diagrama Forrester), el cual se sometió a diversos escenarios con el propósito de generar información cuantitativa para la toma de decisiones.
- 4) *Validar el modelo en estudio:* Para efectos de la validación del modelo actual se sometió él mismo a tres distintas pruebas como lo son, comparación proceso – modelo, consistencia de unidades y pruebas de extremos.
- 5) *Simulación del modelo y Diseño de escenarios.* En lo que respecta a la simulación del modelo este se procedió a ejecutar el simulador (stella architect), posterior a ello se realizó el análisis de los datos proporcionados por éste para su procesamiento y toma de decisiones.

El modelo se sometió a tres escenarios, el primero de este fue el escenario actual (normal) el cual se basó en las situaciones actuales del sistema, mientras que el segundo y tercer escenario son el optimista en donde se generan cambios a las variables sensibles del modelo siendo estas influenciadas a favor del modelo esperando generar resultados positivos a la organización.

6) *Construcción de interfaz gráfica:* Como último paso del procedimiento, una vez que el modelo fue validado y sometido a diversos escenarios, arrojando datos relevantes y certeros, se procedió a generar la interfaz por medio de la cual el tomador de decisiones interactúa con el sistema posteriormente incorporando datos a las distintas variables y con ello generar información como soporte para la toma de decisiones.

Resultados y discusión

Mapeo del proceso y conocimiento de la organización

En un primer momento, como fase de mapeo del proceso se desarrolló un diagrama de procesos del sistema en estudio, desde la recepción de la materia prima (vísceras de pollo) hasta su empaque de producto final (harina), el cual se muestra a continuación en la Figura 1.

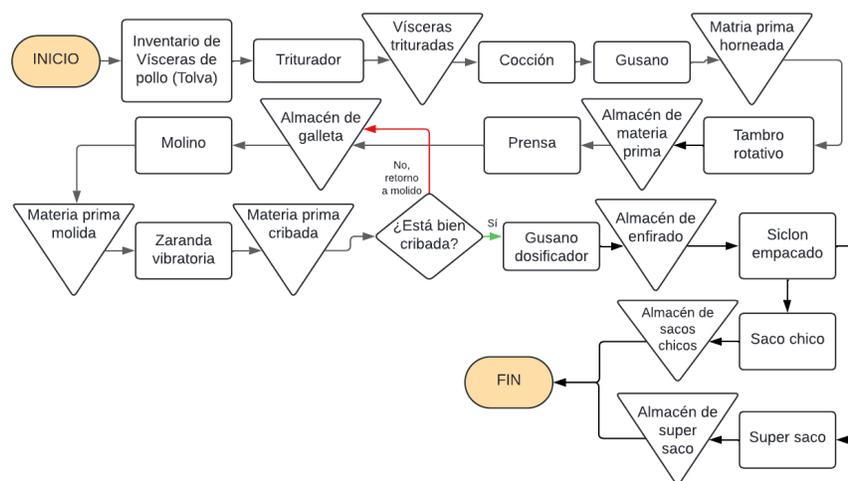


Figura 1. Diagrama de proceso del sistema bajo estudio.

El proceso inicia con la recepción de materia prima y se depositan en una tolva, para luego pasar al triturador, que realiza el cortado de la materia prima para cocción; Una vez cocinada se envía a un tambor rotativo donde este por centrifugación extrae el líquido (aceite) del producto, separando los sólidos de los líquidos, ya que para efectos del estudio se consideran

sólidos como requerimiento para la obtención de harina. El sólido obtenido se somete a una prensa que compacta para extraer el líquido no extraído en la fase anterior, generando de la materia prima en proceso conocida como galleta.

Una vez y obtenida la galleta se pasa al molido para convertirla en harina, después se somete a una zaranda vibratoria que realiza el proceso de cribado para cribar la harina según los requerimientos del cliente, por último, la harina se traslada al enfriado previo a su empaque en dos presentaciones (super sacos de 1400 kg y sacos chicos de 25 kg) para comercializarlo.

Aunado al desarrollo del diagrama de proceso, se realizó un análisis de los equipos que lo conforman, considerando la capacidad de procesamiento para cada uno, donde la información recabada se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1
Capacidad de producción en equipos del proceso bajo estudio

Equipo	Capacidad de producción en toneladas	Tiempo de procesamiento en minutos
Tolva	15	No aplica
Trituradora	6	5
Horno	3	45
Tambor rotativo	6	3
Homogenizador	5	3
Prensa	3	25
Molino	1.4	5
Zaranda vibratoria	.75	2.5
Enfriador	.6	2
Ciclón para empaque/ saco chico	.025	1
Ciclón para empaque/ super saco	1.4	7

Como se observa en la tabla anterior, cada equipo involucrado en el sistema registra una capacidad y tiempo de procesamiento distinto, lo que ocasiona cuello de botella en la producción de harina cuando se recibe mayor cantidad de materia prima, como en el horno donde se realiza la cocción de las vísceras procesadas.

Identificación de variables sensibles del proceso

Considerando cada elemento del sistema en estudio, se identificó cada parámetro y variables presentes en el sistema, donde los primeros se relacionan con las capacidades y tiempos de procesamiento de cada equipo presente en el modelo, siendo estos los descritos en la tabla anterior, y se definieron las variables presentes en el modelo las que se muestran a continuación.

Tabla 2
Variables sensibles presentes en el sistema bajo estudio

Variable	Valor
Volumen de entrada	15 toneladas por turno
Porcentaje de líquido presente en la M.P. (aceite)	78%
Porcentaje de sólido presente en M.P.	22%
Porcentaje de producción a empacar en la presentación de super sacos.	50%
Porcentaje de producción a empacar en la presentación de sacos chicos	50%

Según los valores que guardan cada variable descrita anteriormente, se describe que, durante una jornada de trabajo de nueve horas, se reciben 15 toneladas de vísceras de ave, de las que una vez salen del proceso de cocción e ingresan al tambor rotativo, un 78 % es aceite y el 22 % restantes es materia sólida, que ingresa al proceso de prensado para su posterior molido, enfriado y empacado donde el 50 % restante se envía al almacén de producto terminado.

Desarrollo de diagrama de flujos y niveles

Haciendo uso de la información recabada en las fases anteriores, se procedió al desarrollo de diagrama de flujos y niveles (Forrester) mediante el software Stella Architect, por medio del cual es posible la modelación del sistema en estudio con el propósito de comprender las relaciones existentes en cada uno de los elementos que conforman a este y con ello analizar su comportamiento, dicho modelo se conforma por variables de nivel las cuales representan inventarios, procesos y bandas; Flujos, por lo cuales se mueve el producto desde la recepción de la M.P., hasta su producto terminado; Parámetros, como los elementos de capacidad y tiempo de producción; y variables como el volumen de entrada y tasas presentes en el modelo. En la figura siguiente se presenta el desarrollo de este.

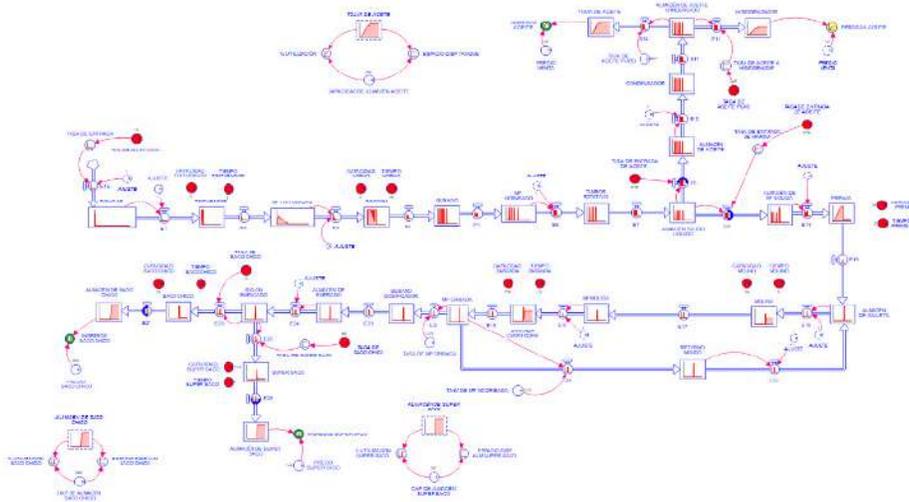


Figura 2. Diagrama de flujos y niveles de la elaboración de harina a base de vísceras de ave.

En el diagrama anterior, se muestra la conformación del sistema bajo estudio, el cual se encuentra compuesto por un total de 16 stocks, 29 flujos, 5 variables, 22 parámetros, 7 procesos, y cuatro bandas transportadoras.

Validación del modelo en estudio

Una vez construido el diagrama de flujos y niveles, se sometió a pruebas de validación con la intención de verificar que el modelo sea confiable para su operación y toma de decisiones a partir de los datos que este emite, para ello se realizaron dos pruebas relacionadas con la consistencia de unidades y prueba de extremos, donde en la primera de ellas se evalúa que el modelo sea consistente y congruente con el manejo de unidades dicha validación se muestra en la figura 3. Validación del modelo bajo la prueba de consistencia de unidades.

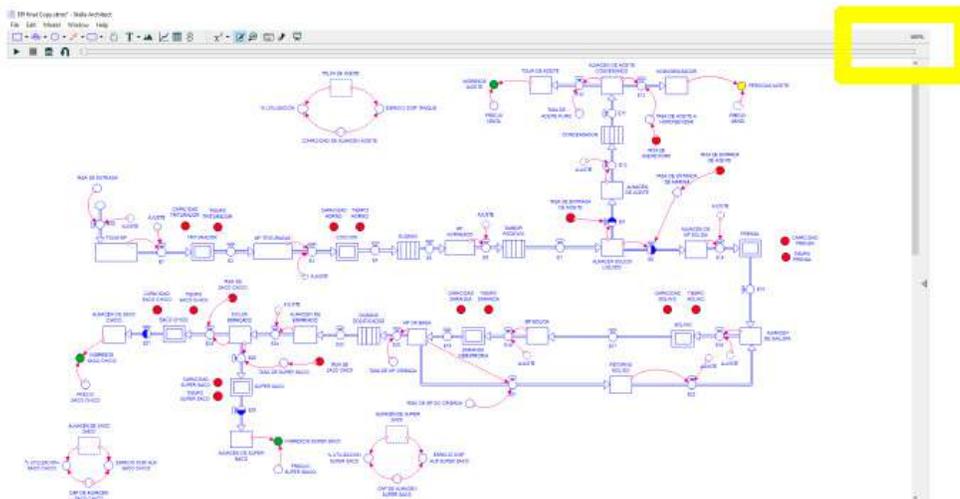


Figura 3. Validación del modelo bajo la prueba de consistencia de unidades

En la figura anterior, en la esquina superior derecha se observa un recuadro sombreado amarillo, que indica que no existen inconsistencias en las unidades del modelo, ya que si fuera el caso de que se tienen incongruencia entre las unidades del mismo, este marcaría un mensaje de alerta en el que anuncia que existen variables inconsistentes que requieren atenderse para la correcta operación de este.

En un segundo momento se tiene la prueba de extremos, en la cual se somete el modelo a un cambio en las variables principales de este y se observa su comportamiento donde para efectos del modelo en curso la variable principal es el volumen de entrada de M.P, al cual se valora en cero toneladas de recepción, registrando con el ello el comportamiento representado enseguida.

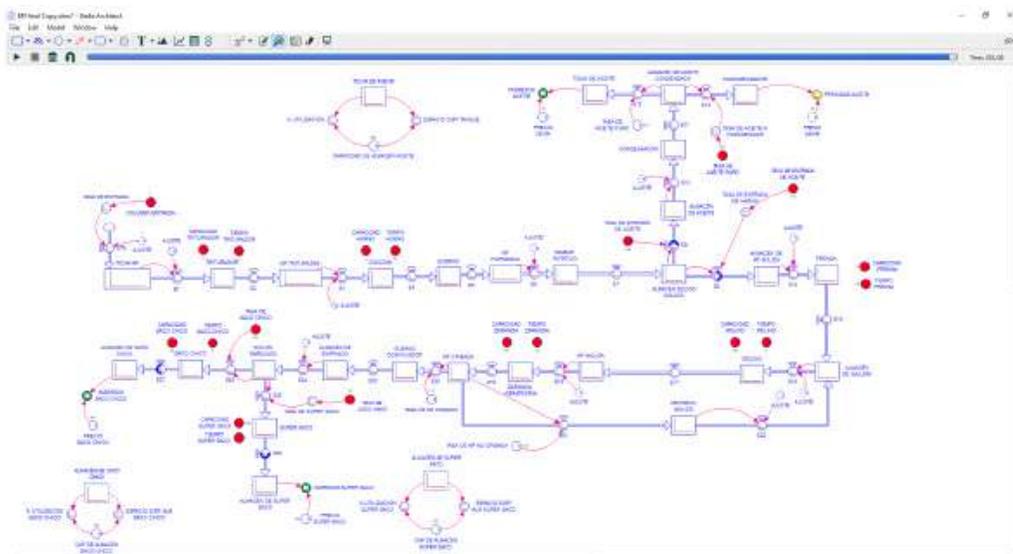


Figura 4. Validación del modelo bajo la prueba de extremos

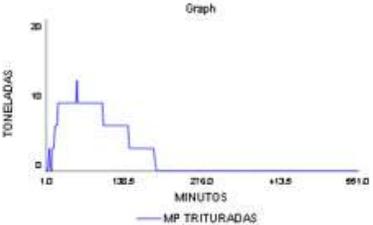
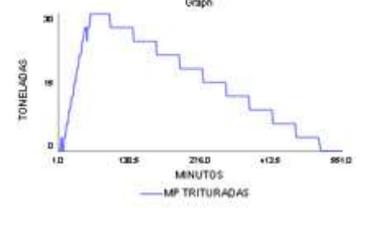
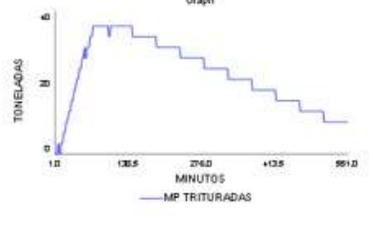
Al someter la prueba de validación del modelo a extremos y asignarle un valor al volumen de entrada de 0 toneladas, se evidencia que el modelo no registra comportamiento en sus flujos y niveles, lo que se interpreta que existe lógica en su comportamiento.

Después de la validación de las dos pruebas descritas anteriormente, el modelo se presentó a los tomadores de decisiones de la organización en estudio, que reafirmaron su confiabilidad, ya que, al analizar retrospectivamente los registros de producción pasados, este guarda un promedio de error de entre el 3 y el 5%, por lo que se considera confiable para la generación de datos y para ello la toma de decisiones cuantitativa.

Simulación del modelo y desarrollo de escenarios.

Después de la validación del modelo y dictaminado que es válido, se procedió a su simulación para lo que se consideró un tiempo de 551 minutos, y se contemplan los valores en los parámetros y variables establecidos anteriormente en las tablas 1 y 2, emitiendo estos comportamientos.

Tabla 3
Simulación del modelo

<p><i>Volumen de entrada de 15 toneladas</i></p>  <p><i>M.P. Triturada: 0 Toneladas</i></p>	<p><i>Producción de harina</i></p>  <p><i>Sacos chicos: 5</i> <i>Super sacos: 1</i></p>
<p><i>Volumen de entrada de 38 Toneladas</i></p>  <p><i>M.P. Triturada: 0 Toneladas</i></p>	<p><i>Producción de harina</i></p>  <p><i>Sacos chicos: 12</i> <i>Super sacos: 3</i></p>
<p><i>Volumen de entrada 45 Toneladas</i></p>  <p><i>M.P. Triturada: 9 Toneladas</i></p>	<p><i>Producción de harina</i></p>  <p><i>Sacos chicos: 12</i> <i>Super sacos: 3</i></p>

Considerando los valores actuales de los parámetros y variables, es posible observar que existe un comportamiento en el cual se cuenta con capacidad disponible para seguir recibiendo M.P., durante la jornada laboral, así mismo se visualiza que el proceso de mayor compromiso actualmente es el horneado, ya que la materia prima triturada en espera de ser cocinada se mantiene desde el minuto 3 hasta el minuto 193 mientras que el resto del tiempo (358) minutos no hay M.P. triturada en espera de ingresar al proceso. Mientras que, para efectos del resto de procesos, esta holgura de disponibilidad aumenta mucho. Así mismo, al final de la jornada laboral se producen 5 sacos chicos y 1 super saco, porque de las 15 toneladas que ingresaron al sistema solo el 22% de este es sólido (3,300 kg) siendo este el total de M.P. que se transforma en producto terminado (harina).

Efectuando un análisis en las capacidades de los procesos se determina que el proceso tiene capacidad de procesar un total de 38 toneladas por turno, registrando un comportamiento en el cual es factible producir hasta un total de 3 super sacos y 12 sacos chicos, siendo en dicha cantidad donde los distintos volúmenes de materia prima no se comprometen ya que de lo contrario al superar dicha cantidad de recepción, el proceso de cocción generaría un cuello de botella quedando producto triturado en espera de ser cocinado, como lo es el caso donde se reciben un total de 45 toneladas por turno, se aprecia que en el almacén de materia prima triturada se mantienen un total de 9 toneladas en espera de pasar al proceso siguiente (cocción) y la salida final no se ve influenciada es decir se mantiene la producción total en 3 super sacos y 12 sacos chicos.

Construcción de la interfaz gráfica

Finalmente, como último paso del procedimiento, se procedió al desarrollo de la interfaz gráfica, siendo esta el medio por el cual el tomador de decisiones interactuara con el sistema, con el fin de generar información cuantitativa útil para la toma de decisiones a futuro, siendo esto posible a partir del suministro de datos a cada uno de las variables y parámetros analizados, dicho entregable se presenta a continuación en la siguiente figura.



Figura 4. Interfaz gráfica, interacción usuario-sistema.

Como se puede observar, en la figura anterior se muestra que la interfaz gráfica está conformada por seis pantallas donde cada una de esta cuenta con información de interés para el usuario, en un primer momento en la filmina No. 1 ilustra la introducción al sistema y este contempla un menú de inicio, antecedentes, modelo y panel de control, por medio del cual el usuario podrá direccionarse a cualquier elemento según lo requiera.

En la pantalla No. 2 se aprecia un elemento de antecedente, por la cual se informa al usuario de la importancia del modelo y la necesidad de su desarrollo, colocando dicha información por cuestiones de que el usuario puede variar por diversos motivos, sin embargo, si el usuario conoce la interfaz es posible omitir dicha sección sin direccionarse a esta desde el menú de inicio.

Por su parte, en la pantalla No. 3, se muestra una representación gráfica del diagrama de flujos y niveles, con el fin de que el usuario comprenda sus elementos y con ello facilitar su utilización, cabe señalar que este solo es de carácter ilustrativo por lo cual no es posible el realizar cambios a la base del mismo, para ello se requiere ingresar directamente al apartado de configuración de este.

En lo que respecta a la 4ta pantalla, esta es de suma importancia ya que es por medio de esta donde el usuario suministrará los datos al sistema para su posterior ejecución de acuerdo a las necesidades pertinentes e información que desee generar, es importante establecer que los valores que pueden ser modificados, son únicamente aquellos relacionados con elementos como variables y parámetros, por lo que no será posible ajustar datos relacionados con las ecuaciones matemáticas, flujos y niveles.

Por último, las filminas 5 y 6, son consideradas como pantallas de visualización, ya que es por medio de estas por las cuales el usuario será capaz de apreciar el comportamiento del modelo y los resultados del mismo en función a la cantidad de producto elaborado en ambas presentaciones como saco chico como super sacos, así como el comportamiento de cada uno de los procesos presentes en el sistema.

Una vez analizado el sistema, será posible la generación de acciones a implementar para el alcance de las metas establecidas por parte de la organización, así como la evaluación de factibilidades en la inversión de nuevos equipos según el comportamiento de la demanda.

Conclusiones

La presente investigación se planteó determinar la capacidad de producción de harina a base de viseras de ave de una empresa productora del sur de Sonora. Para lo cual se construyó un modelo a partir del análisis sistémico de los procesos de la organización, poniendo especial atención en el cocimiento. Con ayuda de la metodología de dinámica de sistemas, se logró mapear y simular el proceso, identificando la producción máxima en las condiciones actuales, como 15 toneladas de materia prima lo que representa un 39.47 % de su capacidad.

Con el apoyo de un análisis de escenarios, fue posible identificar una sub-utilización de los procesos, por lo que, con las observaciones presentadas en el capítulo anterior, sin la necesidad de realizar ajustes mayores, podría incrementarse la producción en el tratamiento de 38 toneladas de materia prima por turno, considerando que la organización labora tres turnos al día, esta pudiera procesar hasta 114 toneladas de viseras de ave.

Con esta información, la empresa está en condiciones de determinar su capacidad disponible y el nivel de servicio al que puede comprometerse con sus clientes y proveedores, además de estar en condiciones de tomar decisiones sobre las inversiones requeridas en el mediano plazo para atender la alta demanda de los productos que esta comercializa.

Reconocimientos

Los autores del presente documento y miembros del Laboratorio Nacional en Sistemas de Transporte y Logística-Consolidación, agradecen el apoyo recibido a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) del programa de “Laboratorios Nacionales”. Asimismo, se agradece el financiamiento por parte del ITSON a través de los proyectos anuales del PROFAPI. En especial a todos los expertos participantes que amablemente compartieron información que permitió dar viabilidad al modelo y a los escenarios bajo análisis en la presente investigación.

Referencias

- [1] Organización de las Naciones Unidas Para la Alimentación y la Agricultura . (S/F). FAO.org. Obtenido de <https://www.fao.org/animal-production/es>
- [2] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2021). La ganadería y el medio ambiente: Resumen para los responsables de las políticas. Roma, Italia: FAO. <https://www.fao.org/livestock-environment/en>
- [3] Rodríguez , N., McLaughlin, M., & Pannock, D. (2019). La contaminación del suelo: Una realidad Oculta. Roma: FAO
- [4] Banco Mundial. (2018). ¿Qué tan grande es el problema de los desechos sólidos? Banco Mundial. Recuperado de <https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/>
- [5] Meeker, D. L. (2009). Lo imprescindible del reciclaje, todo sobre la industria de los subproductos de origen animal. Alexandria, Virginia United States: National Renderers Association
- [6] Cabrera, A., Rentería, I., Sánchez, C., Alacrón , S., Rojas, R., & Jiménez , S. (2018). Aprovechamiento de subproductos avícolas como fuente proteica en la elaboración de dietas para rumiantes. SciELO.
- [7] De Leo , E., Aranda , D., & Gastón, A. A. (Julio de 2020). Econostor. Obtenido de chrome-extension://efaidnbnmnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.econstor.eu/bitstream/10419/238364/1/739.pdf
- [8] Aracil, J. (1995). Dinámica de Sistemas . Madrid: Isdefe.
- [9] Lagarda Leyva, E. A. (2019). Introducción a la dinámica de sistemas . México: Pearson .

SECCIÓN IV

Desarrollo de Infraestructura y Tecnología

CAPÍTULO 15

Exploración preliminar del potencial de los aeropuertos de Minatitlán e Ixtepec para atender la demanda de pasajeros y carga en el Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec (CIIT)

*Alfonso Herrera García
Abraham Cortés Ronquillo*

Resumen— El Corredor Interoceánico de Istmo de Tehuantepec (CIIT) es un proyecto prioritario del gobierno de México. La plataforma logística del CIIT está integrada por servicios portuarios, interconectados por el Ferrocarril del Istmo de Tehuantepec y el sistema carretero nacional; en conjunto con el establecimiento de los polos de desarrollo, que fortalecerán la actividad industrial. El CIIT conectará a México con Estados Unidos, América del Sur, Asia y Europa. A lo largo de las vías férreas que conectan el Océano Pacífico con el Atlántico, estarán distribuidos diez polos de desarrollo, que contarán con las condiciones ideales para la inversión y la instalación de industrias. En este documento se realiza un análisis preliminar de la potencial contribución de la infraestructura aeroportuaria en el CIIT, mediante una investigación descriptiva y exploratoria. Dentro de la carga que atiende normalmente el transporte aéreo, se ubican los productos de alta densidad económica, de los cuales hay varios tipos que están considerados en los polos de desarrollo del corredor; por lo que, en este sentido, sí habría potencial de carga que podría ser atendida por el modo aéreo. Por otra parte, en la actualidad, tanto el aeropuerto de Minatitlán, como el de Ixtepec se caracterizan por su reducida actividad aérea, tanto de pasajeros como de carga. Siendo esta característica más marcada en el aeropuerto de Ixtepec, en donde sólo hay operaciones domésticas. Preliminarmente, se puede señalar que el potencial de los

aeropuertos de Minatitlán e Ixtepec se centra en dos rubros, el primero en el transporte de personas relacionadas con el desarrollo, operación y mantenimiento del corredor; y el segundo, con el transporte de insumos, materiales, componentes, equipos y productos. Sin embargo, se deben realizar estudios de mercado para estos dos aeropuertos, con objeto de cuantificar puntualmente la demanda potencial de carga aérea y pasajeros.

Palabras Clave— aeropuerto; carga aérea; corredor interoceánico; isócrona; Istmo de Tehuantepec; pasajero; polo de desarrollo; relocalización

Introducción

Muy poco se ha investigado en cuanto a la posible aportación logística de los aeropuertos en el Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec (CIIT). Por ello, el objetivo de este artículo es explorar, en forma preliminar, la posible contribución de este modo de transporte en el corredor. Se debe tener presente que el proyecto del CIIT se encuentra actualmente en desarrollo y por lo mismo no toda la información requerida para un análisis detallado está disponible.

El CIIT facilitará la instalación de nueva industria en los estados de Veracruz y Oaxaca; para ello se realizan en forma colaborativa inversiones nacionales y extranjeras. Este proyecto incluye a los polos de desarrollo; la ampliación y modernización de los puertos de Salina Cruz y Coatzacoalcos; así como la infraestructura ferroviaria asociada.

Por otra parte, esta obra forma un corredor logístico para el comercio exterior de mercancías de Asia, Europa y Estados Unidos, complementando la operación del canal de Panamá.

Por su ubicación estratégica en el CIIT, los aeropuertos de Minatitlán e Ixtepec podrían contribuir en esta plataforma logística para el comercio global (Figura 1), tanto en los flujos de mercancías de alta densidad económica, como en el de personas asociadas con las industrias productivas y de servicios instaladas en los polos de desarrollo del corredor.



Figura 1. Infraestructura de transporte y polos de desarrollo en el CIIT [1].

Se trata de un proyecto prioritario del gobierno de México que acortará las distancias comerciales entre naciones, detonando el desarrollo económico y fortaleciendo las regiones de América del Norte y Latinoamérica.

Para lograr este objetivo se rehabilitarán estaciones de tren, se modernizarán 304 kilómetros de vías que unirán los océanos Atlántico y Pacífico, así como los puertos de Coatzacoalcos y Salina Cruz, esto genera ventajas para las cadenas de suministro como son la reducción de costos y de los tiempos en los traslados de bienes y servicios; por esta razón, representa un centro estratégico que además conectará con las costas de Europa, Asia y América del Norte.

La Secretaría de Economía apoyará en el proceso de licitación de los diez polos de desarrollo para el bienestar que se ubican a lo largo del corredor y que favorecerán regionalmente a 79 municipios de Oaxaca y Veracruz, así como a doce y medio millones de habitantes. En esta región egresan anualmente 68 mil estudiantes de nivel técnico y profesional.

Veracruz es el destino ideal para la relocalización por sus recursos naturales, desarrollo industrial y su fuerza laboral joven y capacitada, cuenta con 1,806 kilómetros de vías férreas y tres puertos comerciales (Coatzacoalcos, Tuxpan y Veracruz), que lo posicionan como un referente de comercio exterior, con la modernización de la terminal especializada del puerto de Coatzacoalcos se podrán trasladar hasta un millón cuatrocientos mil contenedores al año, además, es el único puerto que ofrece el servicio de ferrobuzque en México. Estas unidades son del tipo *roll-on/roll-off*, por lo que pueden realizar las operaciones de carga y desembarco en menos de dos horas; cada ferrobuzque puede transportar 135 carros de ferrocarril de catorce metros de largo.

Por su parte, Oaxaca es la entidad con mayor diversidad cultural y recursos naturales del país, su potencial por la generación de energía eólica, aunado a su posición geográfica privilegiada la convierte en un referente y en una excelente oportunidad para la relocalización y el desarrollo de nuevos sectores, cuenta con 649 kilómetros de vías férreas y tres aeropuertos internacionales (Huatulco, Oaxaca y Puerto Escondido), la modernización del puerto de Salina Cruz lo posicionará como uno de los más competitivos a nivel internacional [2].

El CIIT requiere y busca la llegada de cuantiosas inversiones que sean sostenibles y que ofrezcan ofertas de puestos de trabajo dignos y bien remunerados.

En este sentido cabe señalar que México tiene estabilidad económica, es la economía número quince a nivel global, tiene catorce tratados de libre comercio con cincuenta países y treinta acuerdos para la promoción y protección recíproca de las inversiones con treinta y un países; se trata de una economía históricamente abierta al libre comercio y las inversiones; lo que le ha permitido diversificar su industria y tener acceso a 1,300 millones de consumidores potenciales. En enero de 2023 México se convirtió en el principal socio comercial de Estados Unidos [1 y 3].

Metodología y Aplicación

Esta investigación es del tipo descriptiva y exploratoria. Por lo tanto, se describen las características más relevantes del CIIT con respecto a su operación. En cuanto a la investigación exploratoria, se buscó en una primera aproximación, determinar el potencial de los aeropuertos en la operación del corredor. Esta clase de investigación permite definir nuevas hipótesis, y conocer las variables relevantes. En suma, proporciona la información necesaria para aproximarse al fenómeno con mayor conocimiento en un estudio posterior. Idealmente toda investigación debería incluir una fase exploratoria. En particular, la hipótesis planteada es que la infraestructura aeroportuaria ubicada en el CIIT generará beneficios en su operación.

Así, inicialmente se realizó un análisis para determinar en qué consiste el CIIT, las características de los aeropuertos en el corredor (características físicas y operativas); una cuantificación de la demanda atendida, en términos de pasajeros y carga, y los tipos de servicios nacional y/o internacional. Posteriormente, se determinaron con base en un sistema de información geográfica (SIG), las zonas de influencia de los aeropuertos en el corredor; y finalmente, se determinó si existen industrias (sectores) a los que podría dar soporte el transporte aéreo. De esta forma se estableció si se tiene, al menos inicialmente, la oferta del servicio requerido, de acuerdo con el tipo de demanda que se presenta en el corredor.

El corredor interoceánico

La plataforma logística del CIIT está integrada por servicios portuarios, interconectados por el Ferrocarril del Istmo de Tehuantepec y el sistema carretero nacional. En conjunto con el establecimiento de los polos de desarrollo, que fortalecerán la actividad industrial, con lo que se ofrecerá una alternativa moderna y eficiente para el comercio regional y mundial. El CIIT conectará a México con Estados Unidos, América del Sur, Asia y Europa (Tabla 1).

Tabla 1

Días de viaje desde la región del istmo de tehuantepec [4]

Desde el puerto de Coatzacoalcos hacia:		Desde el puerto de Salina Cruz hacia:	
Nueva York	4	Panamá	2.2
Houston	1.3	Los Ángeles	3.6
Mobile	1.6	Tokio	13.2
Nueva Orleans	1.5	Shanghái	15.1
Tampa	1.8	Singapur	18.2
Hamburgo	15		
Rotterdam	15		
Marsella	15		

Aprovechando la ubicación estratégica del Istmo de Tehuantepec, en el espacio más estrecho de Norteamérica, el CIIT crea una plataforma logística multimodal que conecta el Océano Pacífico con el Océano Atlántico. Estas acciones impulsan el desarrollo del Sur de México con una visión integral, sustentable e incluyente.

La plataforma logística integra los puertos de Salina Cruz, Coatzacoalcos, Dos Bocas y Puerto Chiapas. Tienen acceso al sur de Estado Unidos, Europa, América y Asia, son los puntos de enlace entre los océanos Pacífico y Atlántico, facilitando el intercambio comercial a nivel nacional e internacional. Al vincularse con una red de más de 1,200 kilómetros de vías férreas, carreteras y aeropuertos, optimizan la logística, generan oportunidades y fortalecen la posición estratégica de la región en el mundo. De esta forma se facilita el transporte de carga, permitiendo el tránsito interoceánico y la salida de la producción local; también, se incorporan servicios de pasajeros, ofreciendo así una conectividad integral.

Los polos de desarrollo para el bienestar

A lo largo de las vías férreas que conectan el Océano Pacífico con el Atlántico, estarán distribuidos diez polos de desarrollo (Figura 1), que contarán con las condiciones ideales para la inversión, la instalación de industrias y potenciarán las capacidades productivas de la región.

Las empresas contarán con incentivos fiscales y no fiscales, y un ambiente favorable a los negocios, a fin de fortalecer su competitividad e impulsar la economía regional.

México es un país con ubicación ideal para los negocios, siendo un puente natural entre el Atlántico y la región Asia-Pacífico gracias a su extensa línea costera. Es un mercado con gran potencial, capital humano, una economía sólida y abierta y un ambiente de negocios competitivo. El Istmo de Tehuantepec, con 300 km de distancia entre el océano Pacífico y el Golfo de México, brinda una posición estratégica para el traslado interoceánico y la salida de productos al continente y al mundo [4].

Polo de desarrollo para el bienestar Coatzacoalcos I. Tiene una superficie de 257.70 hectáreas, ubicado en el municipio de Coatzacoalcos, Veracruz, cuenta con frente sobre la carretera federal Coatzacoalcos - Villahermosa (MEX-180). Tiene potencial conectividad hacia otros mercados nacionales e internacionales, debido a su cercanía con el Puerto de Coatzacoalcos (9 kilómetros) y con el Aeropuerto Internacional de Minatitlán (41.5 kilómetros).

Polo de desarrollo para el bienestar Coatzacoalcos II. Tiene una superficie de 131.82 hectáreas, ubicado en el municipio de Coatzacoalcos, Veracruz, cuenta con frente carretero sobre la vialidad del Túnel Sumergido de Coatzacoalcos. Tiene potencial conectividad hacia otros mercados nacionales e internacionales, ya que se encuentra aledaño al Recinto Portuario de Pajaritos.

Polo de desarrollo para el bienestar Texistepec. Tiene una superficie de 462.39 hectáreas, ubicado en los municipios de Texistepec y Jáltipan de Morelos, Veracruz, cuenta con frente sobre la carretera MEX-145D, en el tramo correspondiente a la Autopista La Tinaja - Cosoleacaque. Además, tiene frente ferroviario y se encuentra a 37 kilómetros del Puerto de Coatzacoalcos y a 39.6 kilómetros del Aeropuerto Internacional de Minatitlán.

Polo de desarrollo para el bienestar San Juan Evangelista. Tiene una superficie de 360.25 hectáreas, ubicado en el municipio de San Juan Evangelista, Veracruz, aledaño a la vía férrea "Línea Z" en su tramo Medias Aguas - Coatzacoalcos. Tiene potencial conectividad hacia otros mercados nacionales e internacionales, debido a que se encuentra a 3.5 km del nodo ferroviario de Medias Aguas, donde interseca la vía transístmica con la que va al centro y norte del país.

Polo de desarrollo para el bienestar Matías Romero Avendaño. Tiene una superficie de 179.27 hectáreas, ubicado en el municipio de Matías Romero Avendaño, Oaxaca, cuenta con frente ferroviario correspondiente a la línea Z, en su tramo Salina Cruz, Oaxaca - Medias Aguas, Veracruz. El predio se ubica en un municipio en el que se construye una nueva estación ferroviaria y un complejo logístico. Lo anterior, aunado a su conectividad a través de la carretera MEX-185, le brinda al polo una potencial conectividad hacia mercados nacionales e internacionales.

Polo de desarrollo para el bienestar Asunción Ixtaltepec. Tiene una superficie de 234.10 hectáreas, ubicado en el municipio de Asunción Ixtaltepec, Oaxaca, cuenta con frente sobre la carretera federal MEX-185 “Carretera Transístmica”, lo que implica un trayecto de menos de 40 kilómetros hacia Juchitán de Zaragoza, ciudad comercial con más de 110 mil habitantes. Tiene potencial conectividad hacia mercados nacionales e internacionales, debido a su cercanía con el Aeropuerto Nacional de Ixtepec (47 km) y a la vía férrea línea Z (1 km).

Polo de desarrollo para el bienestar Ciudad Ixtepec. Tiene una superficie de 412.54 hectáreas, ubicado en el municipio de Ciudad Ixtepec, Oaxaca, cuenta con frente sobre la carretera federal MEX-185 D (Supercarretera Salina Cruz – La Ventosa). Tiene potencial conectividad hacia mercados nacionales e internacionales, debido a su cercanía con el Aeropuerto de Ixtepec (33 km) y su localización en el municipio donde confluyen las líneas ferroviarias Z (transístmica) y K (hacia Chiapas y Centroamérica).

Polo de desarrollo para el bienestar Santa María Mixtequilla. Tiene una superficie de 502.42 hectáreas, ubicado en el municipio de Santa María Mixtequilla, Oaxaca, cuenta con frente sobre las carreteras federales MEX-185D (Supercarretera Salina Cruz – La Ventosa) y MEX-190D (Mitla -Tehuantepec). Tiene potencial conectividad hacia mercados nacionales e internacionales, con una conexión ágil y directa hacia la capital de Oaxaca mediante la carretera Mitla – Tehuantepec, así como por su cercanía con el Aeropuerto de Ixtepec (33 km) y con el Puerto de Salina Cruz (45 km).

Polo de desarrollo para el bienestar San Blas Atempa. Tiene una superficie de 331.53 hectáreas, ubicado en el municipio de San Blas Atempa, Oaxaca. Se encuentra a 4.7 kilómetros de la vía férrea correspondiente a la línea Z, en su tramo Salina Cruz, Oaxaca – Medias Aguas, Veracruz. Además, está a pie de la carretera federal MEX-185, en su tramo Juchitán Tehuantepec, se ubica a 18.4 kilómetros del Aeropuerto de Ixtepec y a 25 kilómetros del Puerto de Salina Cruz. Esta ubicación le permite una potencial conectividad hacia otros mercados nacionales e internacionales.

Polo de desarrollo para el bienestar Salina Cruz. Tiene una superficie de 82.08 hectáreas, ubicado en el municipio de Salina Cruz, Oaxaca, al pie de la carretera estatal a San Antonio Monterrey y cercano a la Avenida Oleoducto, en las cercanías de la Refinería Antonio Dovalí. Tiene potencial conectividad hacia otros mercados nacionales e internacionales, debido a que se ubica a 8 kilómetros del Puerto de Salina Cruz y a 36.8 kilómetros del Aeropuerto de Ixtepec [5 y 6].

Incentivos de inversión

Dado que las actividades productivas se caracterizan por tener un alto potencial para de-

tonar el desarrollo económico de una región, es necesario enfocarse en incentivar y atraer al istmo de Tehuantepec inversiones nuevas en actividades industriales, y así aprovechar la capacidad de encadenamiento de estas con el resto de la economía propia de la región, para el desarrollo de las vocaciones productivas, prioritarias y potenciales.

Por ello, se debe alentar la inversión en la instalación de nuevas plantas productivas dentro de los polos de desarrollo que detonen el crecimiento económico de la región y las fuentes de empleo de forma permanente.

Por lo anterior, y de acuerdo con el decreto por el que se fomenta la inversión de los contribuyentes que realicen actividades económicas productivas al interior de los polos de desarrollo para el bienestar del istmo de Tehuantepec [7], se otorgaron beneficios fiscales y facilidades administrativas (artículo primero).

Se entiende por actividades económicas productivas al interior de los polos de desarrollo, conforme a la asignación que se realice a cada uno de ellos, las siguientes vocaciones (artículo tercero):

- I. Eléctrica y electrónica;
- II. Semiconductores;
- III. Automotriz (electromovilidad);
- IV. Autopartes y equipo de transporte;
- V. Dispositivos médicos;
- VI. Farmacéutica;
- VII. Agroindustria;
- VIII. Equipo de generación y distribución de energía eléctrica (energías limpias);
- IX. Maquinaria y equipo;
- X. Tecnologías de la información y la comunicación;
- XI. Metales y petroquímica, y
- XII. Cualquier otra no comprendida en las fracciones anteriores que determine la Junta de Gobierno del Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec.

Incentivos fiscales

Descuento del cien por ciento del impuesto sobre la renta (ISR) en los primeros tres años de operación. Descuento del cincuenta por ciento en los tres años posteriores, sin embargo, si superan las metas de empleo el descuento podrá ser hasta de noventa por ciento (artículo sexto). Depreciación acelerada de inversiones en los primeros seis años de operación (artículo séptimo). Las operaciones que hagan al interior de los polos y entre polos no pagarán impuesto al valor agregado (IVA) durante cuatro años (artículo décimo) [7].

Características físicas y operativas de los aeropuertos de Minatitlán e Ixtepec

Tabla 2

Características del aeropuerto de minatitlán [8, 9, 10 y 11]

Característica	Clasificación o valores
Tipo	Internacional
Administrador	Aeropuertos del sureste (ASUR)
Distancia a Minatitlán	26 kilómetros
Elevación	11 metros
Número de pistas	1
Dimensiones de pista	2,100 x 45 metros
Capacidad pista	20 operaciones/hora
Capacidad edificio terminal comercial	172 pasajeros/hora
Avión máximo operable	B-757-200
Aerolíneas en operación	Aeroméxico
Conectividad	AICM y Toluca
Vuelos semanales (primer trimestre de 2024)	55.7 (725 vuelos en 13 semanas)

Tabla 3

Características del aeropuerto de ixtepec [9, 10 y 11]

Característica	Clasificación o valores
Tipo	Nacional
Administrador	Grupo Aeroportuario, Ferroviario, de Servicios Auxiliares y Conexos Olmeca – Maya – Mexica, S.A. de C.V.
Distancia a Ixtepec	12 kilómetros
Elevación	31 metros
Número de pistas	1
Dimensiones de pista	2,323 x 60 metros
Capacidad pista	17 operaciones/hora
Capacidad edificio terminal comercial	40 pasajeros/hora
Avión máximo operable	ATR 72
Aerolíneas en operación	Mexicana de Aviación
Conectividad	Santa Lucía y Toluca
Vuelos semanales (primer trimestre de 2024)	7.5 (98 vuelos en 13 semanas)
Observaciones	Base Aérea Militar con operaciones de aviación comercial

Demanda y servicios atendidos

En la Figura 2 se presenta la evolución de la carga atendida por los aeropuertos de Mina-

titlán e Ixtepec durante el periodo 2006-2023; y en la Figura 3 la evolución de los pasajeros atendidos por dichos aeropuertos, en el mismo periodo. Se debe señalar que el aeropuerto de Ixtepec era inicialmente un aeropuerto militar, y hasta el 26 de abril de 2017, después de su rehabilitación iniciaron sus operaciones civiles, es decir vuelos con aerolíneas comerciales. Por eso, la información consignada de Ixtepec en las figuras mencionadas inicia en 2017.

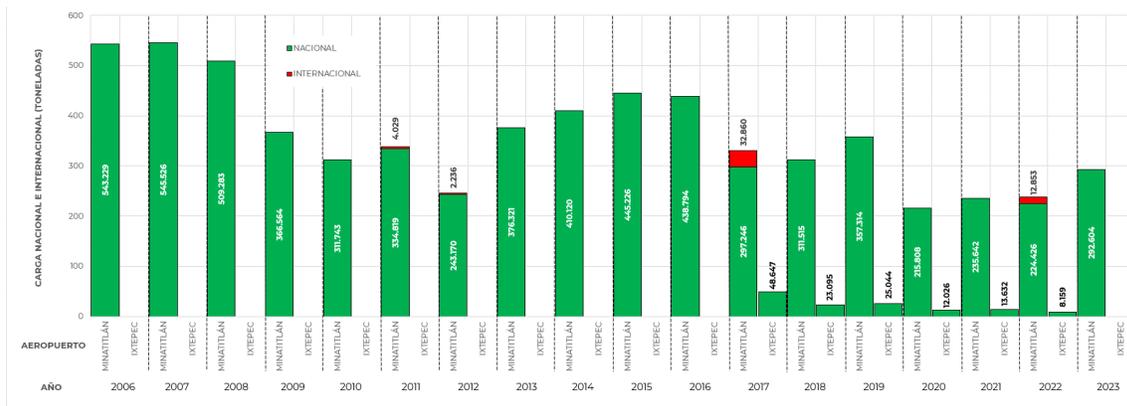


Figura 2. Carga transportada anualmente por los aeropuertos de Minatitlán e Ixtepec (2006-2023) [11].

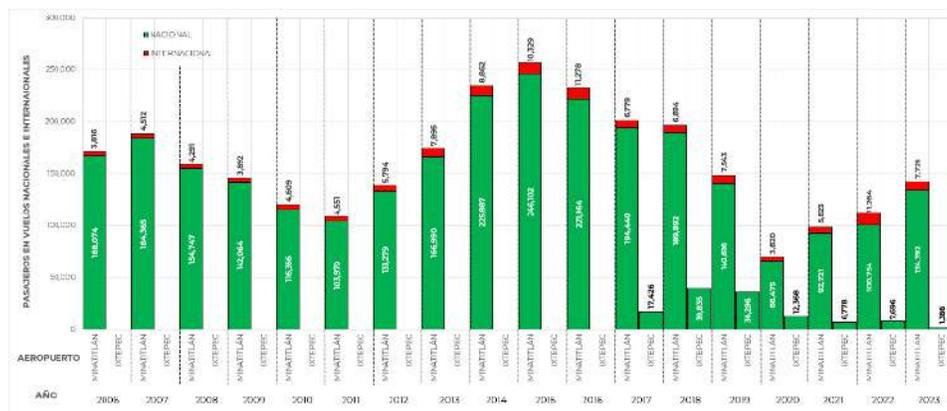


Figura 3. Pasajeros transportados anualmente por los aeropuertos de Minatitlán e Ixtepec (2006-2023) [11].

Zonas de influencia de los aeropuertos en el CIIT

Con base en su accesibilidad espacial (ver los fundamentos en [12]), se determinaron las células de pertenencia o zonas de influencia de los aeropuertos que ofrecerían sus servicios en el corredor interoceánico. Para ello, primero se determinaron cuáles eran los aeropuertos ubicados en toda la región. En particular se trata de los aeropuertos de Veracruz, Tehuacán, Oaxaca, Puerto Escondido, y Huatulco, ubicados al oeste del corredor; de Minatitlán e Ixtepec, sobre el corredor; y de Villahermosa, Tuxtla Gutiérrez y Tapachula, al este del corredor (Figura 4).

En la Figura 5 se presenta un mayor acercamiento y detalle de las zonas de influencia de los aeropuertos de Minatitlán e Ixtepec. Como se observa, los cuatro polos de desarrollo: Coatzacoalcos I, Coatzacoalcos II, Textistepec y San Juan Evangelista se ubican dentro del rango de una hora (vía terrestre) del aeropuerto de Minatitlán (isócrona verde oscura). Por su parte, los otros seis polos de desarrollo: Matías Romero, Ixtaltepec, Ciudad Ixtepec, Santa María Mixtequilla, San Blas Atempa y Salina Cruz, se ubican dentro del rango de una hora (vía terrestre) del aeropuerto de Ixtepec (isócrona verde oscura).

Adicionalmente, con propósitos exploratorios se consideró el caso en donde el aeropuerto de Ixtepec no tiene operaciones en el corredor, debido a que no ofrece actualmente servicio internacional, por lo que no puede recibir o enviar carga de comercio exterior, y tampoco tiene vuelos comerciales internacionales de pasajeros. Bajo este supuesto (Figura 6) la zona de influencia de Minatitlán se extendería más hacia el sur, aunque esto no afectaría los tiempos de acceso terrestre hacia y desde el aeropuerto de Minatitlán, con sus cuatro polos de desarrollo cercanos, por lo que se seguirían manteniendo en el rango de una hora. Sin embargo, como se observa en este caso, la zona sur del CIIT sería atendida ahora por el Aeropuerto Internacional de Huatulco, por lo que los tiempos de acceso a los seis polos de desarrollo, en esa zona, sí se incrementarían significativamente. El polo de desarrollo de Salina Cruz, estaría por tierra a dos horas del aeropuerto de Huatulco (isócrona verde clara); en el caso de los polos de desarrollo de San Blas Atempa, Santa María Mixtequilla, Ciudad Ixtepec e Ixtaltepec estarían ahora a tres horas (isócrona amarilla) por vía terrestre, del aeropuerto de Huatulco; y por último, el polo de desarrollo de Matías Romero se ubicaría en este caso afuera de la zona de influencia de Huatulco, por lo que sería atendido por el aeropuerto de Minatitlán, con un tiempo de acceso terrestre de hasta cuatro horas (isócrona naranja).

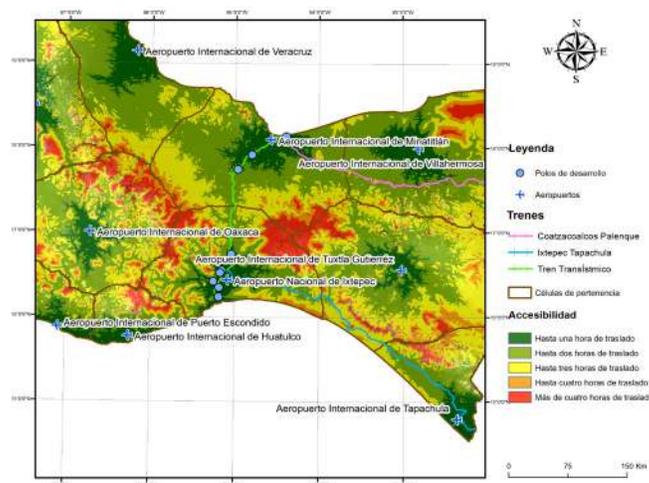


Figura 4. Zonas de influencia de los aeropuertos en el corredor interoceánico y adyacentes [13 y 14].

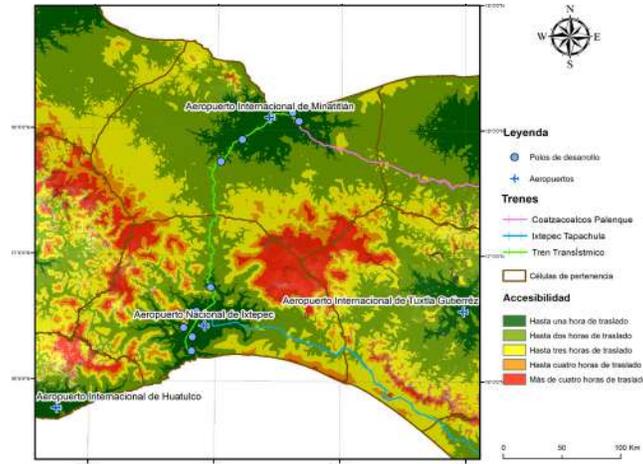


Figura 5. Zonas de influencia de los aeropuertos de Minatitlán e Ixtepec en el CIIT [13 y 14]

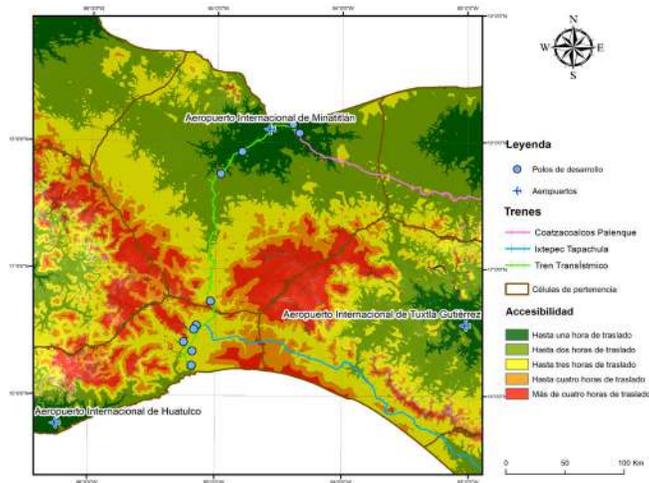


Figura 6. Zonas de influencia de los aeropuertos de Minatitlán y Huatulco, al no considerar a Ixtepec en el CIIT [13 y 14].

Como datos adicionales y con base en el sistema de información geográfica utilizado para determinar las zonas de influencia de los aeropuertos bajo estudio, se obtuvo la información complementaria consignada en la Tabla 4.

Tabla 4

Información complementaria de las zonas de influencia de los aeropuertos en el corredor [13 y 14]

Concepto	Aeropuerto de Minatitlán	Aeropuerto de Ixtepec
Población total (personas)	1,806,854	674,793
Población económicamente activa (personas)	842,107	316,631

Discusión y Análisis de Resultados

Dentro de los rubros de la carga que atiende normalmente el transporte aéreo (productos de alta densidad económica) hay varios que están considerados en los polos de desarrollo del corredor, por ejemplo, de la industria eléctrica y electrónica; semiconductores; componentes y partes automotrices (autopartes); dispositivos médicos; productos farmacéuticos; algunas partes y componentes utilizados en los equipos de generación y distribución de energía eléctrica; y metales preciosos. En este sentido sí habría potencial de carga que podría ser atendida por el modo aéreo, debido a su compatibilidad.

Por otra parte, después de la pandemia por COVID-19 la atención de carga en el aeropuerto de Minatitlán ha tendido a aumentar ligeramente; en cambio, en el aeropuerto de Ixtepec su tendencia ha sido a disminuir, incluso antes de que iniciara la pandemia. En el caso de los pasajeros también se ha presentado el mismo comportamiento.

Es importante mencionar que actualmente tanto el aeropuerto de Minatitlán, como el de Ixtepec atienden muy pocos pasajeros, en comparación con el resto de los aeropuertos mexicanos (0.076 % y 0.001 % del total en 2023, respectivamente), de hecho, el aeropuerto de Ixtepec ocupó la última posición en este rubro, durante el año 2023. En cuanto al manejo de carga, el aeropuerto de Minatitlán también se ubicó dentro de los aeropuertos que atendieron muy poca (0.024 % del total nacional en 2023); y por su parte, el aeropuerto de Ixtepec ni siquiera atendió carga aérea durante 2023.

Además, se observa que el aeropuerto de Ixtepec no tiene registros de carga o pasajeros provenientes de vuelos internacionales (sólo atiende vuelos domésticos). En cambio, el aeropuerto de Minatitlán durante todo su periodo de análisis (2006-2023) sí ha atendido pasajeros provenientes de vuelos internacionales, aunque en una proporción muy baja (en 2023, sólo representaron el 5.4 por ciento del total que atendió); y también, ha recibido carga de vuelos internacionales, pero en forma muy esporádica (sólo en 2011, 2012, 2017 y 2022).

En suma, ambos aeropuertos se caracterizan por su reducida actividad aérea, tanto de pasajeros como de carga. Siendo esta característica más marcada en el aeropuerto de Ixtepec, en donde sólo hay operaciones domésticas.

En el caso de que no se establecieran las instalaciones, equipos y personal para atender los requerimientos de los pasajeros y carga de vuelos internacionales (migración y aduanas) en el aeropuerto de Ixtepec, los flujos en el sur del corredor tendrían que ser atendidos principalmente por el Aeropuerto Internacional de Huatulco, sin embargo, esto implicaría tiempos significativamente mayores de servicio, restando competitividad a los polos de desarrollo ubicados en esta región del corredor.

Aunque la conectividad del aeropuerto de Minatitlán es muy limitada, tiene la ventaja de que una de sus conexiones es con el más importante centro concentrador y distribuidor (*hub*) de pasajeros y carga nacional e internacional, el AICM; y su otra conexión es con el aeropuerto de Toluca, otro importante centro concentrador y distribuidor de carga internacional. Por su parte, Ixtepec tiene conexiones con dos importantes *hubs* de carga internacional, los aeropuertos de Santa Lucía (AIFA) y Toluca.

Otra ventaja de las zonas de influencia de los aeropuertos de Minatitlán e Ixtepec es la disponibilidad significativa de personas económicamente activas, más de 1.15 millones en total.

Conclusiones

Por su ubicación los aeropuertos de Minatitlán e Ixtepec tienen el potencial para atender la demanda que surja en los polos de desarrollo del Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec, debido a que varios de los sectores que atenderían producen bienes de alta densidad económica, los cuales son mercancías ideales para ser transportadas por el modo aéreo. Sin embargo, se deben realizar estudios de mercado para estos dos aeropuertos, con objeto de cuantificar puntualmente la demanda potencial de carga aérea (doméstica y de comercio exterior) y de pasajeros (nacionales e internacionales); y posteriormente se deben establecer los requerimientos de infraestructura, equipos, servicios y personal. Sobre todo, en el caso del aeropuerto de Ixtepec, ya que carece de todo lo necesario para atender vuelos internacionales.

Preliminarmente, se puede señalar que el potencial de los aeropuertos de Minatitlán e Ixtepec se podría centrar en dos rubros, el primero en el transporte de personas relacionadas con las inversiones y el desarrollo del corredor (tanto en la construcción y mantenimiento de la infraestructura de transporte dentro del corredor, como en la planeación, construcción, mantenimiento y crecimiento de los polos de desarrollo) y con aquellos individuos que serían atraídos para trabajar en las empresas ubicadas dentro de los polos de desarrollo, por ejemplo, personal especializado (técnicos e ingenieros) para la planeación, instalación, operación y mantenimiento de los equipos e instalaciones, entre otros. El segundo, se relaciona con el transporte de insumos, materiales, componentes y equipos hacia las distintas empresas dentro de los polos de desarrollo, o el transporte de productos generados desde ellas hacia el exterior. Además de brindar el apoyo logístico a estos flujos, para ofrecer servicios eficientes y oportunos. Los aeropuertos constituyen un importante activo de la infraestructura logística mexicana, posibilitan y facilitan la movilidad de personal especializado, el comercio nacional e internacional de bienes, y el transporte de insumos y equipos requeridos por la industria.

Reconocimientos

Los autores agradecen el apoyo del Instituto Mexicano del Transporte y del Laboratorio Nacional de Sistemas de Transporte y Logística, para la elaboración de este artículo.

Referencias

- [1] Secretaría de Economía. (2023). Panorama económico y ambiente para inversión. 8 de mayo 2023. Con modificaciones propias. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/835077/Presentaci_n_Desarrollo_del_Sur_Sureste_CIIIT_08052023.pdf
- [2] Secretaría de Economía. (2023). Video promocional del Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec. Disponible en: <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/corredor-interoceanico-del-istmo-de-tehuantepec?state=published>
- [3] Secretaría de Economía. (2023). Rumbo a la licitación del Corredor Interoceánico. Disponible en: <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/corredor-interoceanico-del-istmo-de-tehuantepec?state=published>
- [4] Gobierno de México. (2023). Blog. viernes, 01 de diciembre de 2023. Plataforma Logística del Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec. Disponible en: <https://www.gob.mx/ciit/es/articulos/folleto-corredor-interoceanico-del-istmo-de-tehuantepec?idiom=es>
- [5] Gobierno de México. (2023 y 2024). Corredor Interoceánico – Istmo de Tehuantepec. Archivo. Blog. Disponible en: https://www.gob.mx/ciit/archivo/articulos?idiom=es&&filter_origin=archive
- [6] Secretaría de Gobernación. (2023). Acuerdo por el que se emite la declaratoria del polo de desarrollo para el bienestar San Blas Atempa. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5688611&fecha=12/05/2023#gsc.tab=0
- [7] Secretaría de Hacienda y Crédito Público. (2023) Decreto por el que se fomenta la inversión de los contribuyentes que realicen actividades económicas productivas al interior de los Polos de Desarrollo para el Bienestar del istmo de Tehuantepec. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5691049&fecha=05/06/2023#gsc.tab=0
- [8] Aeropuertos del Sureste. (2024). Disponible en: <https://www.asur.com.mx/aerolineas-links-tours-5>

- [9] Zamora, A., Moreno, M., García Ortega, M., Herrera, A., Balbuena, J., Pérez Sánchez, J., Bustos, A., Martínez Antonio, J., y Piña, J. (2023). Manual Estadístico del Sector Transporte 2023. [Manual No. 32]. México: Instituto Mexicano del Transporte. Disponible en: <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/Manual/mn2023.pdf>

- [10] Servicios a la Navegación en el Espacio Aéreo Mexicano (SENEAM). (2024). Publicación de Información Aeronáutica (PIA). Fecha de efectividad 18-abr-2024. México.

- [11] Agencia Federal de Aviación Civil (AFAC). (2024). Estadística Operacional de Aeropuertos y Estadística Operacional de Aerolíneas. Disponible en: <https://www.gob.mx/afac/acciones-y-programas/estadisticas-280404>

- [12] Herrera, A. y Cortés, A. (2024). Accesibilidad espacial del nuevo aeropuerto de Tulum. Una cuantificación espacial de los beneficios potenciales del nuevo aeropuerto. En prensa.

- [13] Red Nacional de Caminos (RNC). (2022). Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463770558>

- [14] Principales resultados por localidad (ITER). (2020). Estados Unidos Mexicanos. Censos y Conteos de Población y Vivienda. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/descarga/ficha.html?tit=326108&ag=0&f=csv>

CAPÍTULO 16

Tecnologías automatizadas de aforos vehiculares para proyectos de análisis de movilidad urbano-portuaria

*José Alfonso Balbuena Cruz
María Aurora Moreno Martínez
Jorge Jerónimo Martínez Antonio
Agustín Bustos Rosales*

Resumen—En la elaboración de estudios de movilidad y conectividad urbano-portuaria en los puertos marítimos de Manzanillo, Altamira y Salina Cruz, donde la realización de estudios de ingeniería de tránsito han sido necesarios, una fuente indispensable son los aforos vehiculares, los cuales son utilizados en diversos análisis como: la estimación del Tránsito Diario Promedio Anual, análisis de capacidad vial, análisis de capacidad en intersecciones viales y como datos para la realización de microsimulaciones de tránsito vial. Por ello, el contar con aforos vehiculares precisos y confiables es importante, ya que son necesarios para las propuestas de solución, mismas que sirven a los tomadores de decisiones en cuanto al diseño y requerimiento de infraestructura vial, y para mejorar las operaciones logísticas de los puertos antes mencionados. Dichos aforos vehiculares se pueden realizar mediante el conteo manual de videos de tránsito grabados previamente. Sin embargo, el método manual tiene desventajas como: tiempos prolongados en la captura de datos; limitaciones por factores humanos; y tiempo considerable para vaciar la información a formatos digitales. Así, se identificó una ventana de oportunidad para optimizar los recursos humanos y de equipo limitados en proyectos de análisis de la movilidad urbano-portuaria, a través del uso de una de las tecnologías automatizadas para aforos vehiculares, las cuales comprenden una gama diversa de dispositivos y métodos que facilitan el conteo vehicular. De esta manera, en el presente artículo se describen las tecnologías automatizadas de aforo vehicular existentes, su evaluación a través del

método Electra I (elección por transitividad), y la selección de la tecnología automatizada de aforo vehicular más conveniente desde el punto de vista costo-beneficio y de acuerdo con las necesidades de los proyectos de análisis de movilidad urbano-portuaria.

Palabras Clave—Tecnologías de aforo vehicular; movilidad urbano-portuaria; método Electra

Introducción

En la elaboración de estudios de movilidad y conectividad urbano-portuaria en los puertos marítimos de Manzanillo, Colima; Altamira, Tamaulipas y Salina Cruz, Oaxaca, donde la realización de estudios de ingeniería de tránsito han sido necesarios, una fuente indispensable son los aforos vehiculares, los cuales han sido utilizados en diversos análisis, como la estimación del Tránsito Diario Promedio Anual, análisis de capacidad vial, análisis de capacidad en intersecciones viales y como datos para la realización de microsimulaciones de tránsito vial.

Contar con aforos vehiculares precisos y confiables es fundamental, ya que son esenciales para las propuestas de solución, que son utilizadas por tomadores de decisiones sobre el diseño y necesidades de la infraestructura vial.

Aunque existen diversos métodos de conteo del flujo de tránsito, por ejemplo, el método de conteo automático que “se refiere al procedimiento de recopilación de datos, con un equipo automático diseñado para registrar continuamente los componentes del flujo de tránsito [in situ] en un tiempo establecido, el cual puede ser: minutos, horas, días, semanas, meses o años” [1], los aforos vehiculares realizados en Manzanillo, Altamira y Salina Cruz se basaron en el método de conteo manual.

Efectivamente, el “conteo manual es un método para obtener atributos del flujo de tránsito a través de personal [de campo -conocido como aforador-] que realiza el conteo vehicular de forma visual... Esta actividad se lleva a cabo cuando la información deseada no puede ser obtenida mediante el uso de dispositivos automáticos o cuando las condiciones ambientales hacen imposible su empleo... La mecánica de este método es simple; consiste en que el personal registre y almacene la información del flujo de tránsito en un formulario especial (previamente establecido con la clasificación vehicular correspondiente). Este formulario puede ser en papel (hoja de conteo) ...” [1].

Actualmente existen aplicaciones que sustituyen los formularios en papel y registran el conteo de forma automática. Este tipo de aforos se conoce como aforos manual-electróni-

cos. El conteo manual también se puede realizar en gabinete mediante el uso de videos de tránsito grabados previamente. En los estudios sobre el análisis de la movilidad urbano-portuaria de Manzanillo, Altamira y Salina Cruz se utilizó este último método.

Sin embargo, el método manual tiene desventajas cuando se utiliza para videos de tránsito, como:

- a. Tiempos prolongados en la captura de datos en papel, ya que no se puede aprovechar el aumento en la velocidad de reproducción de los videos.
- b. Limitaciones debido a factores humanos, ya que el personal no puede concentrarse completamente en el video, lo que causa retrasos en la reproducción y, por lo tanto, más tiempo para capturar los datos.
- c. Tiempo considerable para vaciar la información del formato impreso a los formatos digitales correspondientes.

Con base en lo anterior, se encontró una oportunidad para optimizar los recursos humanos y de equipo limitados en proyectos de análisis de la movilidad urbano-portuaria utilizando una de las tecnologías automatizadas para aforos vehiculares.

Las tecnologías automatizadas para el conteo de vehículos incluyen una variedad de dispositivos y métodos para facilitar el conteo de vehículos. Los sensores de lazo inductivo, los sensores magnéticos, los sensores de manguera neumática, los sensores de radar de microondas, los sensores infrarrojos, los sensores de radar láser, los sensores ultrasónicos y los sistemas de visión por computadora son algunos ejemplos de este tipo de tecnologías. Dado lo anterior, fue necesario realizar un análisis de las diversas tecnologías automatizadas para elegir la más conveniente desde el punto de vista costo-beneficio y de acuerdo a las necesidades de los proyectos de análisis de movilidad urbano-portuaria.

Por lo tanto, en este artículo se describen a grosso modo las diferentes tecnologías automatizadas para aforos vehiculares; además de presentarse el uso del método Electra para la selección de la mejor tecnología automatizada de aforo vehicular más conveniente desde el punto de vista costo-beneficio y de acuerdo con las necesidades de los proyectos de análisis de movilidad urbano-portuaria.

Tecnologías automatizadas para aforos vehiculares

Las tecnologías automatizadas de aforos vehiculares son aplicaciones de ITS (Sistemas Inteligentes de Transporte) [2], que agrupan una variedad de dispositivos electrónicos que, dependiendo de su ubicación en la red vial, permiten el conteo automático de vehículos y cuyos datos se utilizan para el análisis, modelación y planificación de la movilidad urbana, interurbana o, para el caso de este artículo, urbano-portuaria.

Los dispositivos para aforos vehiculares pueden clasificarse como tecnologías intrusivas y no-intrusivas.

Tecnologías intrusivas

Las tecnologías intrusivas son aquellas que se instalan sobre o debajo de la superficie de rodamiento de la red vial. Para lograr esta instalación, se deben realizar modificaciones estructurales en la superficie de la infraestructura vial (rompiendo o deformando la estructura), lo que las hace intrusivas.

“Este tipo de sensores pueden proporcionar información sobre el volumen de tráfico, detección y clasificación de vehículos, e incluso sobre la velocidad. La principal ventaja de los sensores intrusivos en comparación con los no intrusivos es su reducido [costo]. No obstante, presentan importantes inconvenientes como, por ejemplo, la interrupción del [tránsito] durante la instalación y la reparación, conteos erróneos en caso de que la calzada no sea apropiada o por una mala instalación y la necesidad de reinstalación en caso de operaciones de mantenimiento y rehabilitación” [3].

Los sensores de manguera neumática, los sensores magnéticos y los detectores de lazo inductivo se consideran tecnologías intrusivas.

Detectores de lazo inductivo

Este sistema se puede instalar temporal o permanentemente para detectar la presencia o el paso de vehículos en una variedad de situaciones, como estacionamientos, estaciones maestras de aforos y accesos controlados.

El sistema se implementa mediante la instalación de cables en forma de espira-espira, es decir, introduciendo los cables dentro de una ranura rectangular recortada en la superficie del carril, esta forma permite generar un campo magnético con la cual se puede contar, clasificar y calcular la velocidad de los vehículos que cruzan por este campo.

Sensores magnéticos

Un sensor magnético es un dispositivo que puede detectar campos magnéticos creados por corrientes eléctricas o electroimanes. Realizan mediciones de alta precisión sin contacto en tiempo real. Un sensor magnético es sensible a uno o ambos polos de un imán permanente y funciona cuando recibe un campo magnético externo.

Sensores de mangueras neumáticas

Este tipo de sistemas requiere la instalación de una manguera neumática o tubo flexible perpendicular al pavimento. Debe estar cerrado en uno de sus extremos y conectado a un contador o aforador en el otro.

Estos dispositivos generalmente pueden obtener información como el volumen del vehículo, la clasificación del vehículo por número de ejes, la velocidad, la dirección, los intervalos de tiempo entre vehículos y, en algunos casos, la clasificación del vehículo por su longitud, etc. Todo dependerá del modelo y la marca del equipo aforador.

Tecnologías no intrusivas

Las tecnologías no intrusivas son dispositivos electrónicos que no interrumpen o interfieren directamente en el flujo de vehículos porque están ubicados por encima o a un costado de las carreteras o caminos. La ventaja de este tipo de tecnología es que “permiten determinar sin necesidad de ranurar las calzadas de la red vial magnitudes tales como número de vehículos (aforos), velocidades medias de cada vehículo, clasificación del vehículo en función de la longitud o altura del mismo, determinar las dimensiones (alto, largo, ancho) de los vehículos en circulación y capturar el número de placa.” También... “se utilizan para clasificar los vehículos en función del número de ejes o para leer los tags de un vehículo a efectos de identificación” [4].

Los detectores no-intrusivos se clasifican de la siguiente manera [3]:

“Sensores activos: emiten una señal y captan la respuesta reflejada sobre el vehículo” como los radares por microondas, radares láseres y los sensores ultrasónicos.

“Sensores pasivos: captan variaciones producidas, en ciertos parámetros, por el paso de un vehículo”, tal como los sensores infrarrojos y las cámaras de video.

Sensores de radar por microondas

Los radares de microondas utilizan el efecto Doppler, que es cuando el radar emite señales de microondas a una frecuencia específica (generalmente 10.5 GHz) dentro de un área específica y las señales son reflejadas de vuelta al radar por los objetos dentro de esa área. En este caso, el radar detecta los cambios de frecuencia en el vehículo mientras está en movimiento. Este tipo de dispositivos también pueden detectar objetos lejanos para determinar su posición y velocidad. Esto produce datos precisos que ayudan a reducir la congestión del tránsito [5].

Sensores infrarrojos

Los dispositivos llamados sensores infrarrojos pueden detectar la radiación de objetos que están dentro de su campo de visión. La detección del objeto, o vehículo, es cuando se interrumpe dicha radiación [6]. Estos dispositivos se pueden clasificar en detectores pasivos o activos.

“Los detectores infrarrojos pasivos no transmiten energía – en cambio, detectan la energía que es emitida o reflejada desde los vehículos, superficies viales y otros objetos. Los detectores infrarrojos pasivos pueden medir velocidad, largo del vehículo y ocupación, pero su exactitud es afectada por condiciones climatológicas adversas.

Los detectores infrarrojos activos emiten un haz de energía infrarroja el cual es reflejado desde un receptor infrarrojo. Funcionan en forma similar a los detectores tipo radar de microondas – por medio de la dirección de un haz estrecho de energía hacia una superficie vial. El haz es entonces reflejado a los sensores y los vehículos son detectados a través de cambios en el tiempo de viaje de la transmisión del haz infrarrojo. Los detectores infrarrojos activos proveen la información del pasaje, velocidad, presencia y clasificación vehiculares.” [2]

Sensores de radar láser

La tecnología láser funciona con un sensor que envía un impulso de luz intensa en una dirección específica y mide el tiempo hasta que la señal regresa. El tiempo medido es directamente proporcional a la distancia entre el sensor y el primer objeto encontrado por el impulso de luz, ya que la velocidad de la luz es un valor constante.

El sensor de radar láser puede identificar la posición exacta de cualquier vehículo en el área de detección mediante el envío de múltiples impulsos de luz en diferentes direcciones. [7].

Sensores ultrasónicos

“Los sensores vehiculares ultrasónicos funcionan en forma similar a los detectores de microondas por medio de la transmisión activa de ondas de presión, a frecuencias superiores al rango audible humano. Estos detectores pueden medir volumen, ocupación, velocidad, y clasificación. Los sensores ultrasónicos son sensibles a las condiciones ambientales y requieren de un alto nivel de experiencia para su mantenimiento” [2].

Sistemas de detección por visión artificial

Uno de los potenciales más importantes de la Inteligencia Artificial (IA) es la percepción

del entorno y la toma de decisiones, la visión artificial es la ciencia que permite percibir y comprender el mundo que nos rodea a través de un conjunto de imágenes y videos; se utiliza para construir un modelo físico, entenderlo y generar un conjunto de acciones para diferentes situaciones [8].

La substracción de fondo (resta de imágenes a nivel pixel) es una de las funciones más importantes de la Visión Artificial para la gestión de tráfico porque permite detectar, segmentar y seguir objetos en movimiento en un tramo carretero específico [9]. En los últimos años, se han realizado investigaciones para comprender el entorno en este contexto, por ejemplo, los vehículos que pasan, su clasificación, los objetos estacionados, etc.

Selección de la mejor tecnología de aforos vehiculares para proyectos de análisis de la movilidad urbano-portuaria

El crecimiento de los movimientos de carga que tienen los puertos de altura mexicanos más dinámicos en los últimos años, como Manzanillo o Altamira, ha provocado un aumento sostenido de vehículos automotores relacionados con la actividad portuaria, lo cual afecta la operación y planeación de los puertos, así como de la integración puerto-ciudad. En el caso de puertos de cabotaje (por ejemplo, Salina Cruz) su principal objetivo es garantizar las condiciones de operación que permitan a dichos puertos seguir desarrollándose y mantener los niveles crecientes de carga, además de formar parte de las cadenas globales de transporte marítimo.

Ya sea un puerto de altura o cabotaje, las operaciones de carga y descarga de mercancías pueden ver mermada considerablemente su competitividad si la conectividad terrestre del puerto presenta problemas de congestión, ya sea ante la falta de infraestructura o procesos operativos no adecuados que permita la movilidad eficiente de los vehículos de carga. Por ello, es necesario planificar y optimizar los procesos operativos necesarios para el acceso y salida de los vehículos del puerto, con el fin de evitar posibles congestiones, prever una eficaz integración con otros modos de transporte terrestre y un desarrollo adecuado de la integración puerto-ciudad.

Para lograr lo anterior, son necesarios los proyectos de análisis de la movilidad urbano-portuaria, los cuales tienen como objetivo principal:

Analizar el impacto a la viabilidad y conectividad de los flujos de tránsito terrestre de la operación actual y futura del puerto marítimo en estudio, al sistema vial puerto-ciudad y su zona de influencia.

Una de las herramientas fundamentales para alcanzar el objetivo anterior son los aforos

viales. Por ello, en esta sección se describe la selección de la mejor tecnología automatizada de aforos vehiculares que apoyará al desarrollo de los proyectos de análisis de la movilidad urbano-portuaria.

El método Electra como herramienta para la selección de la mejor alternativa tecnológica de aforos vehiculares

La selección de la mejor tecnología automatizada de aforo vehicular puede verse como un problema multicriterio, puesto que la decisión depende de distintos factores a considerar.

Un enfoque que permite trabajar con criterios no necesariamente cuantitativos es el de relaciones de superación, el cual es perfectamente aplicable en casos como el del presente estudio debido a que se cumplen las siguientes condiciones:

- Al menos un criterio es no cuantitativo.
- Las unidades de los distintos factores son tan heterogéneas que codificarlas en una escala común sería una tarea artificial.
- Las compensaciones entre las ganancias de algunos criterios y las pérdidas de otros no son perfectamente claras, por lo que se hace uso de la lógica difusa.

Por lo anterior, para la selección de la mejor tecnología automatizada de aforo vehicular, se utilizó el método de elección por transitividad Electra I (Elimination Et Coix Traduisant la Realite) desarrollado por [10] y adaptado a un caso de estudio sobre transporte rural llevado a cabo por [11].

Los pasos a seguir para aplicar el método Electra son:

1. Establecer las variables relevantes
2. Definir las escalas, rangos y equivalencias
3. Definir la ponderación de las variables relevantes
4. Obtención de la matriz de equivalentes
5. Cálculo de las concordancias de las tecnologías de aforo
6. Cálculo de las discordancias de las tecnologías de aforo
7. Generación de las matrices de concordancias y discordancias
8. Definición de la concordancia mínima y discordancia máxima
9. El Kernel o la red acíclica

Establecer las variables relevantes

En este primer paso del método Electra, se establecen las variables relevantes para la selección de la mejor tecnología de aforo. Para ello, se toma en cuenta la experiencia de campo

(en este caso, se consideró la experiencia de los autores de este artículo) obtenida de los estudios sobre el análisis de la movilidad urbano-portuaria realizados anteriormente. De esta forma, las variables relevantes son:

1. Instalación del dispositivo de aforo.
2. Mantenimiento del equipo.
3. Uso.
4. Seguridad.
5. Disponibilidad del equipo.
6. Costo.

Definir las escalas, rangos y equivalencias

Para definir las escalas, rangos y equivalencias de las variables relevantes, ver Tabla 1, se procede de la siguiente forma. La escala se refiere a distintas categorías dentro de cada variable, por ejemplo:

- Alto, medio, bajo
- Fácil o difícil, etcétera.
- El rango es un conjunto de datos de campo o gabinete, que facilitan la relación de cada variable a una escala en particular, por ejemplo:
- Instalación DIFÍCIL del equipo de aforo: Se requiere hacer modificaciones estructurales a la superficie de la infraestructura vial
- Costo ALTO: 5,000 a 26,000 dólares, etcétera.
- La equivalencia indica el porcentaje de importancia que tienen las escalas y rangos dentro de cada variable relevante. El porcentaje de importancia varía dentro del intervalo de 0 a 100%, siendo el 100% el valor más alto o deseado.

Tabla 1
Ejemplo de escalas, rangos y equivalencias

Variable relevante: Instalación		
Escala	Rango	Equivalencia
Difícil	Se requiere hacer modificaciones estructurales a la superficie de la infraestructura vial	20%
Fácil	Se colocan por encima o a un costado de las carreteras o caminos sin afectar el tránsito	100%

Definir la ponderación de las variables relevantes

En este paso, se asigna un valor en el intervalo del 1 al 10 (donde 10 es el valor más alto) a cada una de las variables, este valor se basa en el grado de importancia que tiene cada variable. Finalmente, se calcula el porcentaje para cada variable y el cual facilita la identificación de las variables más importantes a las menos significativas, ver Tabla 2.

Tabla 2
Ponderación de las variables relevantes

Variabes	W (%)	Valor
Instalación	19.35	9.0
Mantenimiento del equipo	13.98	6.5
Uso	11.83	5.5
Seguridad	16.13	7.5
Disponibilidad del equipo	17.20	8.0
Costo	21.51	10.0
Total	100.00	46.5

Nota: La W es la ponderación de cada una de las variables relevantes

Obtención de la matriz de equivalentes

Esta matriz se obtiene de relacionar cada tecnología de aforo vehicular descrita en el capítulo 1 contra las escalas, rangos, equivalencias y ponderaciones de cada variable relevante, y las cuales fueron definidas en los puntos 2 y 3. De esta forma, la matriz de equivalentes permitirá hacer la comparación entre cada una de las tecnologías de aforo con base en la importancia relativa de cada una de sus variables relevantes (ver Tabla 3).

Tabla 3
Ejemplo de matriz de equivalentes

Variabes	Tecnología 1	Tecnología n	Tecnología 9	W (%)
Instalación	20	...	100	19.35
Mantenimiento del equipo	60	...	60	13.98
Uso	100	...	100	11.83
Seguridad	100	...	100	16.13

Variables	Tecnología 1	Tecnología n	Tecnología 9	W (%)
Disponibilidad del equipo	60	...	100	17.20
Costo	100	...	20	21.51

Nota: Tecnología 1.- detectores de lazo inductivo y tecnología 9.- sistemas de detección por visión artificial

Cálculo de las concordancias de las tecnologías de aforo

En este paso se comparan cada una de las tecnologías de aforo entre sí para determinar qué tecnologías dominan a las demás con base en la importancia relativa de cada una de las variables relevantes. Para llevar a cabo esta comparación, se utiliza el índice de concordancia. Este índice establece la dominación de una tecnología i sobre una tecnología j y se mide por:

$$c(i,j) = \sum_{i=1}^n \frac{Wi^+ + Wi^- + Wi^-}{W}$$

Donde: $Wi^+ = Wi$ para todo $i > j$

$Wi^- = \frac{1}{2} Wi$ para todo $i = j$

$Wi^- = 0$ para todo $i < j$

W = total de la ponderación

$c(i,j)$ es el índice de concordancia de la tecnología i comparada con j

En la Tabla 4 se muestra el ejemplo del cálculo del índice de concordancia de la tecnología 1 con respecto de las demás tecnologías.

Tabla 4
Ejemplo concordancia de la tecnología 1

Variables	1 vs 1	1 vs 2	1 vs n	1 vs 9
Instalación	-	9.68	...	0.00
Mantenimiento del equipo	-	6.99	...	6.99
Uso	-	5.91	...	5.91
Seguridad	-	8.06	...	8.06
Disponibilidad del equipo	-	8.60	...	0.00
Costo	-	21.51	...	21.51
$c(i,j)$	-	0.61	...	0.42

Nota: Tecnología 1.- detectores de lazo inductivo; tecnología 2.- sensores magnéticos y tecnología 9.- sistemas de detección por visión artificial

Cálculo de las discordancias de las tecnologías de aforo

Para este punto se comparan cada una de las tecnologías de aforo entre sí para determinar qué tecnologías son dominadas por las demás con base en la importancia relativa de cada una de las variables relevantes. Para lograr lo anterior, se emplea el índice de discordancia. Este índice refleja cuando la tecnología i es dominada por la tecnología j y se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$d(i,j) = \frac{\text{máximo intervalo donde } i < j}{\text{rango total de la escala}}$$

La Tabla 5 presenta el cálculo del índice de discordancia de la tecnología 1 con respecto de las demás tecnologías.

Tabla 5
Ejemplo discordancia de la tecnología 1

Variables	1 vs 1	1 vs 2	1 vs n	1 vs 9
Instalación	-	0	...	-80
Mantenimiento del equipo	-	0	...	0
Uso	-	0	...	0
Seguridad	-	0	...	0
Disponibilidad del equipo	-	0	...	-40
Costo	-	40	...	80
$c(i,j)$	-	0.00	...	0.80

Nota: Tecnología 1.- detectores de lazo inductivo; tecnología 2.-sensores magnéticos y tecnología 9.- sistemas de detección por visión artificial

Generación de matrices de concordancias-discordancias

Para generar dichas matrices, únicamente se copian en dos tablas los valores de los índices de concordancia y discordancia obtenidos para cada una de las nueve tecnologías de aforo vehicular. De esta forma, las matrices de concordancia y discordancia son las que se observan en la Tabla 6 y la Tabla 7.

Tabla 6
Ejemplo de la matriz de concordancias

	1	2	n	8	9
1	-	0.61	...	0.57	0.42
2	0.39	-	...	0.46	0.42
n	...	...	...	...	...
8	0.43	0.54	...	-	0.46
9	0.58	0.58	...	0.54	-

Nota: Tecnología 1.- detectores de lazo inductivo; tecnología 2.- sensores magnéticos; tecnología 8.- sensores ultrasónicos y tecnología 9.- sistemas de detección por visión artificial

Tabla 7
Ejemplo de la matriz de discordancias

	1	2	n	8	9
1	-	0.00	...	0.80	0.80
2	0.40	-	...	0.80	0.80
n	...	...	...	...	...
8	0.40	0.40	...	-	0.40
9	0.80	0.40	...	0.40	-

Nota: Tecnología 1.- detectores de lazo inductivo; tecnología 2.- sensores magnéticos; tecnología 8.- sensores ultrasónicos y tecnología 9.- sistemas de detección por visión artificial

Definición de concordancia mínima-discordancia máxima

En este paso se establece qué tanto las tecnologías dominan y son dominadas cuando se comparan entre sí. En otras palabras, se establece que la tecnología i es preferida a la opción j si y sólo si:

$$c(i,j) \geq a \text{ la mediana de la matriz de concordancias}$$

$$d(i,j) \leq a \text{ la mediana de la matriz de discordancias}$$

De esta manera, el valor mínimo de la concordancia y el valor máximo de la discordancia es:

$$c(i,j) \geq 0.46$$

$$d(i,j) \leq 0.40$$

El Kernel o la red acíclica

El Kernel o la red acíclica es el último paso para la obtención del conjunto solución, es decir, cuál es la tecnología que domina a las demás y a la vez no es dominada por ninguna de las tecnologías que se comparan con ella. Para lograr esto, se elige de la matriz de concordancias aquellos valores que cumplen con la concordancia mínima, y para la matriz de discordancias se seleccionan los valores que cumplen con la discordancia máxima (ver Tabla 8 y Tabla 9).

Tabla 8
Ejemplo de valores que cumplen con la concordancia mínima

	1	2	n	8	9
1	-	0.61	...	0.57	0.42
2	0.39	-	...	0.46	0.42
n	...	...	...	...	...
8	0.43	0.54	...	-	0.46
9	0.58	0.58	...	0.54	-
$c(i,j) \geq 0.46$					

Nota: Tecnología 1.- detectores de lazo inductivo; tecnología 2.- sensores magnéticos; tecnología 8.- sensores ultrasónicos y tecnología 9.- sistemas de detección por visión artificial.

Tabla 9
Ejemplo de valores que cumplen con la discordancia máxima

	1	2	n	8	9
1	-	0.00	...	0.80	0.80
2	0.40	-	...	0.80	0.80
n	...	...	...	...	...
8	0.40	0.40	...	-	0.40
9	0.80	0.40	...	0.40	-
$d(i,j) \leq 0.40$					

Nota: Tecnología 1.- detectores de lazo inductivo; tecnología 2.- sensores magnéticos; tecnología 8.- sensores ultrasónicos y tecnología 9.- sistemas de detección por visión artificial.

Finalmente, se seleccionan las celdas de las matrices de concordancias y discordancias que cumplen simultáneamente las condiciones de concordancia mínima y discordancia máxima, y con ello se genera el Kernel, ver Tabla 10.

Tabla 10
Ejemplo del Kernel

	1	2	n	8	9
1	-	1-2	...	-	-
2	-	-	...	-	-
n
8	-	8-2	...	-	8-9
9	-	9-2	...	9-8	-

Nota: Tecnología 1.- detectores de lazo inductivo; tecnología 2.-sensores magnéticos; tecnología 8.- sensores ultrasónicos y tecnología 9.- sistemas de detección por visión artificial

Como se observa en la Tabla 10, las filas muestran la dominancia de la tecnología *i* sobre la tecnología *j*, por ejemplo: "3-1" significa que la tecnología 3 (sensores de mangueras neumáticas) domina la tecnología 1 (detectores de lazo inductivo). Y las columnas señalan que la tecnología *j* dominan a la tecnología *i*, por ejemplo: "1-2" indica que la tecnología 2 (sensores magnéticos) está dominado por la tecnología 1 (detectores de lazo inductivo). De esta forma, la tecnología de aforo vehicular que no está dominada por ninguna otra y domina a las demás es la tecnología 4.

Con base en lo anterior, se concluye que la tecnología automatizada de aforo vehicular seleccionada para llevar a cabo estudios del análisis de la movilidad urbano-portuaria es: SENSORES DE RADAR POR MICROONDAS. En la Figura 1 se puede observar el Kernel para la tecnología 4 de forma gráfica.

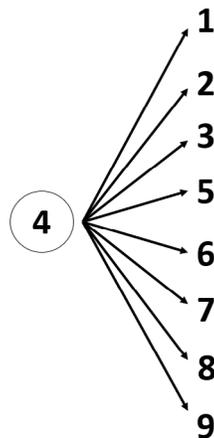


Figura 1. Kernel de la mejor tecnología de aforo vehicular para estudios de movilidad urbano-portuaria: sensores de radar por microondas

Conclusiones

En Manzanillo, Colima; Altamira, Tamaulipas y Salina Cruz, Oaxaca, se han realizado varios estudios sobre el análisis de la movilidad urbano-portuaria, donde uno de los principales insumos para este tipo de proyectos es la realización de aforos vehiculares en distintos puntos de las zonas urbanas y al interior de los puertos marítimos. Estos aforos se han realizado manualmente utilizando videos grabados con el flujo de tránsito de interés, sin embargo, este tipo de aforo requiere mucho tiempo para capturar los datos y tiene limitaciones humanas.

Por ello, para optimizar los recursos humanos, materiales y financieros disponibles en los proyectos de análisis de la movilidad urbano-portuaria, se realizó un estudio sobre las tecnologías automatizadas para aforos vehiculares existentes y se seleccionó la tecnología que mejor se ajusta a las necesidades de dichos proyectos.

Como resultado, se identificó que las tecnologías automatizadas de aforos vehiculares se dividen en dos categorías principales: tecnologías intrusivas y tecnologías no-intrusivas. Las primeras se refieren a que se necesita romper o deformar la superficie del camino para su instalación; mientras que, en las segundas, la instalación de los dispositivos se realiza por encima o a un costado de las carreteras.

Los detectores de lazo inductivo, los sensores magnéticos y los sensores de manguera neumática se agrupan en tecnologías intrusivas. En contraste, los sensores de radar por microondas, sensores infrarrojos, sensores de radar láser, sensores ultrasónicos y sistemas de detección por visión artificial se encuentran en tecnologías no intrusivas.

El método Electra I se utilizó para seleccionar la tecnología automatizada para aforos vehiculares que mejor se ajusta a las necesidades de los proyectos de análisis de la movilidad urbano-portuaria. La instalación del dispositivo de aforo; mantenimiento del equipo; uso; seguridad; disponibilidad del equipo; costo y seguridad son algunas de las variables relevantes que se definen de la experiencia de campo de los responsables de proyectos, lo que permite comparar todas las tecnologías entre sí. Por lo tanto, la tecnología de aforo de vehículos elegida para este caso es: sensores de radar por microondas.

Finalmente, lo descrito en este artículo puede repetirse para incluir nuevas tecnologías de aforo de vehículos, así como nuevas variables pertinentes, para que los responsables y tomadores de decisiones de proyectos de análisis de movilidad urbano-portuaria puedan garantizar la optimización de los recursos disponibles (humanos, materiales y financieros) mediante la selección de la mejor tecnología de aforo vehicular.

Referencias

- [1] Dirección General de Servicios Técnicos [DGST]. 2016. Manual para obtener los volúmenes de tránsito en carreteras. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes
- [2] Asociación Mundial de la Carretera [PIARC]. (2016). Sensores viales. PIARC. Francia: PIARC. p 2.
- [3] Llopis Castelló, D. y Camacho Torregrosa, FJ. (2020). *Gestión de datos masivos*. [Consulta en línea] <http://hdl.handle.net/10251/139862>.
- [4] Kineo Ingeniería del Tráfico, S.L. (2023). *Aforo y clasificación vehicular*. [Consulta en línea] <https://www.interempresas.net/Robotica/FeriaVirtual/Producto-Aforo-y-clasificacion-vehicular-71058.html>
- [5] Lee, Nick. (2022). Cosas que debe saber antes de elegir la detección de vehículos por microondas. Mokosmart. [Consulta en línea] <http://www.mokosmart.com/es/microwave-vehicle-detection/> .
- [6] Lozano, J., Vergara, O., Noriega, S. y Cruz, V. (2020) Evaluación del desempeño de sensores infrarrojos, ultrasónicos y visión para el conteo de vehículos. *Research in Computing Science* 149(11), 159-168. https://www.rcs.cic.ipn.mx/2020_149_11/Evaluacion%20del%20desempeno%20de%20sensores%20infrarrojo_%20ultrasonico%20y%20vision%20para%20el%20conteo%20de%20vehiculos.pdf .
- [7] BEA Américas. (2020). Soluciones de detección vehicular. EEUU: BEA Américas.
- [8] Elgendy, M. (2020). *Deep Learning for Vision Systems*. EEUU: Manning Publications.
- [9] Ascencio, J. A. (2023). Predicción de colas de tráfico en acceso a terminales intermodales para la optimización de tiempos de espera. Tesis Doctoral. México: UDAVINCI.
- [10] Roy, Bernard. (1985). *Méthodologie multicritère d'aide á la decisión*. Francia: Economica.
- [11] Balbuena, J. A. (2003). Análisis del transporte en comunidades rurales: Aplicación de una metodología para diagnósticos locales de transporte. Tesis de maestría. México: Universidad Autónoma de Querétaro

mamsamas

CAPÍTULO 17

Caracterización del centro de acopio y su contribución a la economía circular. Estudio de caso: RSU de botellas de PET

*Juan José Méndez Palacios
Erick Álvarez Alfaro*

Resumen— El residuo sólido urbano (RSU) es un producto desechado, que se reincorpora como materia prima, mediante la logística inversa en su área de retorno de materiales tipo RSU que apoya a la economía circular, ésta se refiere a un rediseño en la manera de manufacturar productos considerando materiales reciclados para la fabricación de nuevos productos, integrándose a una cadena de suministro inversa que parte de su recuperación, su clasificación y su tratamiento para ser incorporado como materia prima a procesos de transformación de productos. La presente investigación expone la caracterización de los centros de acopio (CA), como elemento de la cadena de suministro inversa para el retorno de las botellas de PET, en el caso de Querétaro. El centro de acopio es una instalación cuyo objetivo es valorizar los residuos mediante su desensamblaje, reutilización, remanufactura, rediseño, reciclado y recuperación de materiales. Este trabajo resalta a estas organizaciones como entes económicos que coadyuvan a la sostenibilidad, a través de la valorización de los RSU; y expone la necesidad de la formación de profesionales en este campo. El enfoque utilizado es el método cualitativo, que presenta el contexto en que operan estos entes. El resultado es la caracterología de los CA. La investigación, se limitó a conocer el medio en que se desenvuelven, sentando las bases para una investigación futura para su mejoramiento socioeconómico.

Palabras Clave—economía circular, logística inversa, residuos sólidos urbanos, centro de acopio.

Introducción

En la actualidad, la población urbana está motivada por el uso consciente de los recursos naturales y de los productos que resultan de los procesos de transformación de materiales, sin embargo aún falta mucho trabajo para llegar a lo que se llama desarrollo sostenible.

Esta dinámica de consumo por parte de la población ha permitido su calidad de vida; sin embargo, esto ha generado desechos que han provocado problemas en su manejo. Por otra parte, la escasez de materias primas para los procesos de fabricación y la sobreexplotación de los recursos naturales, ha llevado a implementar políticas internacionales que minimicen la crisis ambiental buscando de manera efectiva la reutilización de materiales ya usados.

El presente trabajo comprende secciones dedicadas a: describir el marco gubernativo en México que rige la recuperación de RSU; la importancia de la economía circular y su relación con la logística inversa; conduciendo a la conceptualización del CA y la metodología para estudiarlo y caracterizarlo. Planteando finalmente algunos elementos relacionados con los costos de operación, concluyendo con los hallazgos y propuestas.

Contexto gubernamental

En México, se ha emitido la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) que establece que los residuos sólidos urbanos denominados RSU: “son los residuos generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; así como los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública”. [1]

También la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) a través del programa sectorial derivado del plan nacional de desarrollo 2020 - 2024 (PROMARNAT) en el objetivo prioritario 4 “Promover un entorno libre de contaminación del agua, del aire y el suelo que contribuya al ejercicio pleno del derecho a un medio ambiente sano” [2]; informa acerca de la generación de RSU en el país donde menciona que en los últimos años, en México se observa un crecimiento del índice de generación de RSU en 2017, se generaron 122 mil toneladas diarias en promedio, produciéndose anualmente 44.6 millones de toneladas, e incrementándose en un 36% en el año 2003. [2]

Por otra parte, la SEMARNAT informa que de las 56, 427 toneladas de residuos orgánicos que se generan por día en México, solo 6.2% se recolectan de manera separada, por ejemplo a nivel municipal, se observa que 144 de los 2, 474 municipios y alcaldías del país hacen separación de basura y el resto no lo hace. [2]

También la SEMARNAT observa que a nivel nacional la recuperación de los residuos es limitada; pues en las plantas de selección de residuos reciclables se recuperan solo 417 de las 6,472 toneladas potencialmente recuperables, es decir, alrededor del 6% [2]

Es así como el artículo 10 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos (LGPGIR) establece que: “los municipios tienen a su cargo las funciones de manejo integral de residuos sólidos urbanos, que consisten en la recolección, traslado, tratamiento, y su disposición final” [2]. Entonces de acuerdo al Instituto Nacional de Ecología y cambio climático los residuos sólidos urbanos que han sido tratados para el caso del estado de Querétaro en el año 2022 que tenía una población de 2,368,467 habitantes en 18 municipios, se muestran en la tabla 1. [3]

Tabla 1
Tipo de residuos enviados a tratamiento

Tipos de residuos	Cantidad (kg)
Papel y cartón	520
PET	266
Aluminio	340
Fierro, Lámina, Acero	241
Cobre, Bronce, Plomo	0
Vidrio	0
Eléctricos y Electrónicos	3
Plásticos	114
Materia orgánica	128
Otro material	39, 580

Fuente: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). 2022. Ruiz Suárez LG, Gavilán García A, Mendoza Cantú A, Ramírez Muñoz T, Araiza Aguilar JA. Atlas Nacional de Residuos Sólidos Urbanos. pp. 217.

Por otra parte el Plan Municipal de Desarrollo de Querétaro 2021-2024 PMDQ en su capítulo eje 4, informa que se incrementó la cantidad de RSU enviada al relleno sanitario de Mompaní, y se han mantenido los índices de recolección, reutilización y reciclaje debido a la operatividad de la planta de separación municipal. [4]

Mediante este plan el Municipio de Querétaro creó el programa de recolección de Tili-ches, desechos de objetos y/o menajes de casas habitación, que para 2021 recopiló 1,488.28 toneladas de RSU; en establecimientos públicos y privados recabo 7,026.49 toneladas y la recolección en eventos públicos y privados fue de 555.80 toneladas. [4]

También en los últimos registros que presenta INEGI en su informe de 2023, en Querétaro se recolectaron 32,000 kilogramos diarios de RSU desde el año 2012 a tratamiento, de los cuales se recuperan 2,669 kilogramos [5], como se muestra en la tabla 2:

Tabla 2
Recuperación de materiales en kilogramos

Material	Cantidad en kilogramos	Composición porcentual
Papel	1062	0.03328
PET	373	0.01165
Aluminio	15	0.00046
Fierro	133	0.00041
Cobre	0	0
Vidrio	492	0.01537
Electrónicos	0	0
Materia Orgánica	0	0
Plástico	527	0.01646
Otros	67	0.002093

Fuente: INEGI (2023). <https://www.inegi.org.mx/app/buscador/default.html?q=residuos+solidos+urbanos>.

Esta situación observa que solo se recupera el 0.083% de las 32 toneladas enviadas a tratamiento diariamente. La cadena de suministro inversa en el ámbito urbano, ya que la ciudad es el mayor centro generador de desechos; parte de la recuperación del RSU a través de organizaciones llamadas centros de acopio (CA), que llevan a cabo los procesos adecuados para transformar los desechos y lograr su disposición como materia prima reciclada ante las empresas productoras.

Este trabajo de investigación expone el CA como un elemento clave en la economía circular urbana, en este caso se habla del reciclado de las botellas de PET que tienen un alto impacto en la contaminación ambiental, por ello se realiza un estudio organizacional y operativo buscando resaltar su importancia. El objetivo es mostrar una caracterización del centro de acopio como empresa productiva, que contribuye a la economía circular urbana; además de ser una entidad que parte de los incentivos económicos y gubernamentales para que se desarrollen y colaboren con la cadena de suministro inversa de RSU de las ciudades y con ello fomentar la cultura de la sostenibilidad.

Antecedentes

Economía Circular

El modelo de producción tradicional denominado economía lineal establece que para producir productos y/o servicios se usan materias primas que después de su transformación no se ven recuperadas. [6]

También se considera que la economía lineal expone que para fabricar productos se extraen materias primas, se produce y luego se desecha, sin tener en cuenta la huella medioambiental y sus consecuencias. [7] Sin embargo, el concepto de Economía Circular, describe que se debe producir con el menor impacto medioambiental. Basándose en tres ejes fundamentales: reducir, reutilizar y reciclar. Con ello generar productos que en todas las etapas de su diseño, producción y consumo debe considerarse la sostenibilidad. [7]

La premisa de sostenibilidad consiste en fabricar con el mínimo de energía, y que ésta provenga de fuentes renovables y ya no de combustibles fósiles que dañan el medio ambiente, considera el uso y creación de materias primas no contaminantes, además establece que la vida útil del producto no sea limitada a una sola vez de uso, sino que se incremente la posibilidad de reparación y que al final sean reciclables.

En la actualidad, las políticas públicas basadas en economía circular proponen atender los problemas que se han generado por los desechos urbanos, es aquí donde se considera que la logística inversa puede contribuir a mantener en condiciones de uso productos desechados, y minimizar la contaminación por basuras.

Para esta situación se considera a la Logística Inversa como el control de flujos de materiales desechados, cuya cadena de suministro parte del punto de desecho, y de ahí pasa por operaciones de transporte, de procesos de clasificación y acondicionamiento, para ser distribuidos como materia prima a clientes.

Las cadenas de suministro inversas pueden clasificarse de acuerdo al objeto de la reutilización:

- Puede ser legal (relacionada con el medioambiental)
- Puede ser económica (que busca recuperar el valor del producto usado);
- Por el tipo de artículo recuperado (por ejemplo: embalajes, componentes de repuestos y artículos domésticos);
- Por la forma de reutilización (para reparación, renovación, reciclaje, reprocesamiento, canibalización y reutilización)
- Por los actores implicados (productor, consumidor, recogedor y en su caso el reciclador).

Cabe destacar que la logística en la cadena de suministro directa: el momento, cantidad y calidad de los productos entregados puede ser controlado de acuerdo con los requerimientos de venta del producto terminado; sin embargo, en la logística inversa aplicada a la recuperación de RSU la proveeduría puede ser difícil de predecir lo que lleva a no cumplir con demandas previamente planeadas.

Y finalmente, la Ley para la Prevención, Gestión Integral y Economía Circular de los Residuos del Estado de Querétaro, considera a la Logística Inversa como el procedimiento mediante el cual los productos y envases postconsumo, así como los residuos valorizables son retornados al sector primario para ser utilizados como insumos en nuevo proceso productivo.

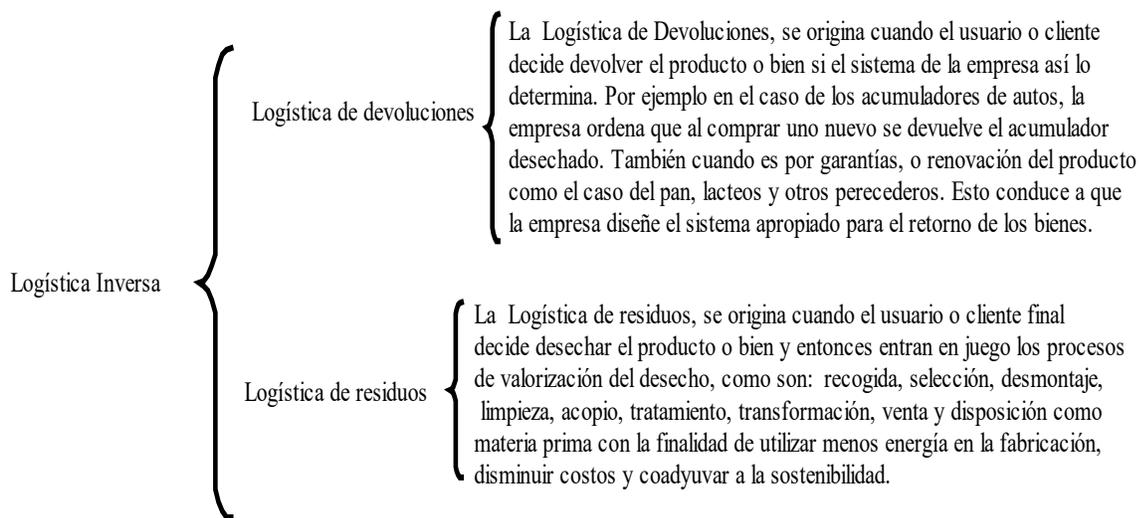


Figura 1. Logística Inversa y sus divisiones.

En este sentido, los RSU presentan la problemática de no ser materia prima inmediata para proceso, debido en principio al número de orígenes suelen ser más numerosos y en ocasiones impredecible, en contraste con los puntos de suministro en logística directa.

Por esta razón se ha desarrollado la logística inversa, que como se observa en la figura 1, se ha separado en dos clasificaciones una de devolución que está desarrollada por la empresa fabricante y otra de residuos que inicia con la recolección de los RSU, pasa por la inspección de viabilidad de ser recuperado y en su caso selección, desmontaje, reprocesado, eliminación y, termina con la venta y distribución de los productos recuperados a los clientes que son los fabricantes de productos nuevos.

Uno de los residuos sólidos urbanos que más se recolectan son los envases de PET, que principalmente se han vendido como botellas para contener refrescos y diferentes tipos de

productos líquidos ofreciendo portabilidad, ligereza, diseños variados e incluso diferentes colores, aunque a pesar de ello es una de las principales causas de contaminación en las ciudades.

Características del envase del PET

El Polietileno de Tereftalato (PET), es un polímero termoplástico que pertenece a la familia de los poliésteres y es derivado del petróleo. Es uno de los plásticos más utilizados en la industria, especialmente en la fabricación de envases y embalajes. La fórmula química del PET es $(C_{10}H_8O_4)_n$, donde «n» indica el número de unidades repetitivas en el polímero. Este plástico se origina a partir de la polimerización del ácido tereftálico y el etilenglicol. [8].

Propiedades

- *Transparencia:* El PET es transparente, lo que lo vuelve ideal para envases que muestran el contenido.
- *Resistencia:* Robustez y resistencia al desgaste, impacto y factores ambientales.
- *Flexibilidad* Permite que se moldee en una amplia variedad de formas y tamaños.
- *Liviano:* Su peso es ligero; por lo que se vuelve portable.

Aplicaciones

- Producción de Envases de bebidas.
- Producción de Empaques para alimentos.
- Fabricación de Textiles.
- Elaboración de Películas fotográficas y de rayos X.
- Producción de Artículos publicitarios.
- Fabricación de Maquinaria.

Problemática desde la economía circular

De acuerdo a la Comisión Nacional de áreas Naturales Protegidas de la SEMARNAT, en el año de 2018 se estimó que se estaban produciendo 200 botellas de pet por cada mexicano, lo que si esto sigue en el tiempo y considerando la población actual que es de 125.7 millones de mexicanos, se tiene una producción de botellas de pet de 25,500 millones de botellas al año. [9]

Por otra parte, de acuerdo a la asociación civil de Ecología y Compromiso Empresarial (ECOCE, A.C.), se tiene que en México se generan 120,128 toneladas de residuos sólidos cada día, de las cuales se recolectan 106,523. Es decir, el 88.6% del total de los residuos generados en México. De estos, sólo el 10.3% de los residuos corresponde a envases y empaques de plástico (PET, PEAD, PEBD), y que son reciclables.

En México el Consumo Nacional Aparente de Envases de PET es de 860,000 toneladas al año, de las cuales: 177,000 tons son de resina reciclada y 683,000 son de resina virgen.

Así en 2023, en México se recuperaron 540,000 tons es decir el 63% de todo lo que se genera. Y en los últimos 12 años, México ha recuperado más del 50% de los envases de PET enviados al mercado. La meta para el 2025, es llegar a una tasa del 70%, y para el 2030 el 80% [10].

Desafíos medioambientales y de reciclaje del PET

El impacto ambiental del PET se observa en todas las etapas de su ciclo de vida. Que comienza desde la extracción de petróleo o gas, proceso en el cual se generan emisiones de gases de efecto invernadero. Posteriormente, su producción consume grandes cantidades de energía y agua, y genera contaminantes atmosféricos y residuos químicos. Finalmente, después de ser utilizado se desecha y eso contribuye a la contaminación del suelo y del agua, pues sus residuos tienen una degradación de cientos de años.

Como se puede observar, el PET presenta muchos desafíos a la sostenibilidad; que es un tema de actualidad a nivel global. Para ello, actualmente se están desarrollando nuevas versiones de PET para lograr su descomposición en menor tiempo; como son: el biodegradable y las tecnologías para descomponer el plástico a nivel celular, lo que aún se encuentra en etapa de desarrollo.

Para medir el grado de contaminación originado por el PET, se realiza un estudio que considera diferentes indicadores. Uno de los más utilizados es el Índice de Contaminación del PET (ICPET), que evalúa la cantidad de residuos de PET generados, la tasa de reciclaje y la cantidad de residuos de PET que terminan en vertederos y océanos, entre otros como la huella de carbono [10].

Es por ello que actualmente, los fabricantes para hacer frente a la Agenda 2030 de la ONU, deben modificar sus procesos y basar su producción futura en la economía circular para reducir el impacto negativo en la ecología, biodiversidad y el medio ambiente.

Dicho lo anterior, otras alternativas que se han estado trabajando para reducir el uso del PET son: los envases de papel, bioplásticos elaborados a base de maíz o caña de azúcar, botellas reutilizables de metal o vidrio y el reciclaje del PET, que es la alternativa analizada en el presente trabajo.

La recuperación de PET

De acuerdo a datos de la ECOCE A.C, el 86% del PET (463,00 tons) recuperado se utiliza para fabricar nuevos productos en México, siendo 62.2% para nuevos envases grado alimenticio y no alimenticio, 30.3% otros tipos de envases y empaques, así como otras aplicaciones y el 7.5 % para fabricar diversos tipos de fibras. El 14% restante (77,000 tons) se exporta a países como China y Estados Unidos.

Empresas captadoras de RSU, llamadas Centro de Acopio

Los RSU se llevan a entidades denominadas Centro de Acopio. De acuerdo a la SEMARNAT, el **Centro de Acopio** en una instalación operada por la administración municipal o delegacional que tienen por objeto captar materiales seleccionados para dar un confinamiento adecuado o canalizarlos a procesos de reciclaje. [11]

También se denomina así a las instalaciones donde se reciben, acumulan, acondicionan y almacenan temporalmente los residuos reciclables o aprovechables de los residuos sólidos urbanos o de manejo especial, que han sido separados previamente en la fuente de origen o durante el flujo de los residuos. [12][13]

Por lo anterior se plantean los siguientes cuestionamientos para guiar la investigación acerca del Centro de Acopio cómo Organización Productiva.

¿Mejorar la productividad de la empresa captadora de RSU tiene relación con el crecimiento de la Economía Circular en cuanto a minimizar el impacto ambiental provocado por el desecho de envases de PET?

¿Para mejorar la productividad del centro acopio, requiere de una reorganización como empresa productiva?

¿Qué tipo de estructura organizacional requiere un Centro de Acopio en México para ser una empresa competitiva?

Metodología

Para la presente investigación se utilizó el método cualitativo que se enfoca en crear a partir de los datos obtenidos del fenómeno de estudio y de su exploración, considerando la perspectiva de los participantes en su ambiente natural y el contexto mismo, una explicación conceptual.

El planteamiento cualitativo inicia con la definición inicial del ambiente o contexto donde se realizará la investigación. Así en relación con el Centro de Acopio "CA" como organización productora y sustentable para el medio ambiente;

En este artículo, se expone al CA no sólo como integrante de la cadena de suministro inversa para el tratamiento de los RSU, sino también como una organización productiva que contribuye a la economía circular y a generar empleos mediante el tratamiento de los residuos urbanos.

Se realizó la investigación documental en las dependencias y agencias gubernamentales relacionadas con el manejo de RSU, Los tipos de muestras que se utilizan en las investigaciones cualitativas son las no probabilísticas o dirigidas, cuya finalidad no es la generalización en términos de probabilidad. Para este caso se determinó utilizar la muestra homogénea [14]. En estas muestras las unidades que se van a seleccionar poseen un mismo perfil o características compran RSU plásticos, o bien comparten rasgos similares resguardan y venden. En este tipo de muestra se busca centrarse en el tema por investigar o resaltar situaciones, procesos o episodios en un grupo social, que es el caso de los agentes involucrados en las organizaciones llamadas Centros de Acopio.

También se llevaron a cabo entrevistas con involucrados en los procesos, quienes dieron pauta para conocer las actividades que se realizan en los CA, teniendo preguntas de investigación referentes a la definición de esta entidad como organización productiva, sus procesos, los costos de operación. Además, para entender sus operaciones y los costos de producción, que les permitan ser organizaciones productivas.

El propósito de la indagación cualitativa es el de profundizar en casos o unidades (participantes, organizaciones, manifestaciones humanas, eventos, animales, hechos, etc.) que ayuden a entender el fenómeno de estudio y a responder a las preguntas de investigación mostradas anteriormente. Es así que con esta información recabada se pudo caracterizar los tipos de CA y sus atributos que se presenta en el estudio.

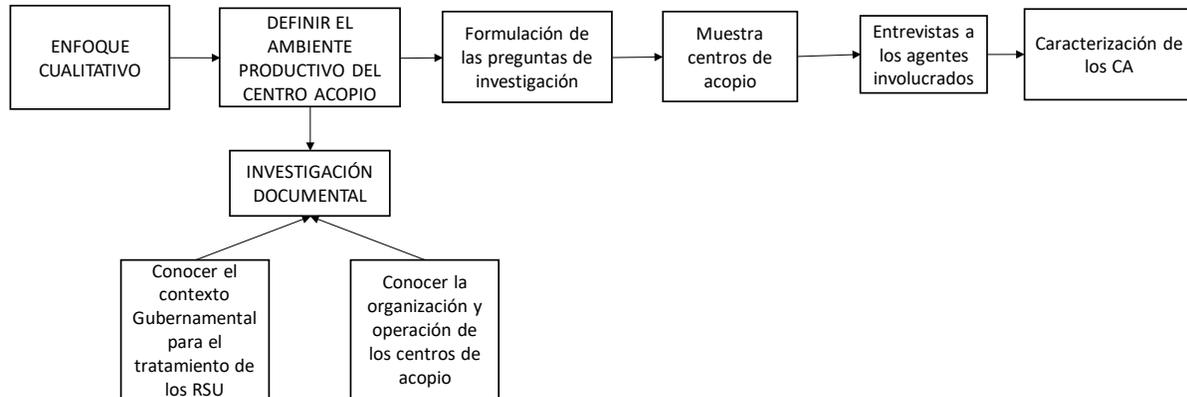


Figura 2. Diagrama Metodológico para entender y comprender el fenómeno de estudio.

Organizaciones que evolucionan de resguardo a procesamiento del RSU

En esta investigación, se han encontrado que existen diferentes tipos de centros de acopio de acuerdo a su nivel de operaciones, desde el acopio y resguardo hasta su procesamiento y venta, así como el tipo de capital económico que lo opera, es decir; los centros de acopio son empresas que al ser operados por particulares buscan entre sus actividades la mayor valorización de los residuos.

La Logística inversa

Para entender el funcionamiento de un CA como elemento de la cadena de suministro inversa, es importante hablar de la logística inversa, que dice que es el control que comienza cuando el usuario decide desechar el producto y en su caso es recolectado iniciando el viaje de retorno para ser transformado y de ahí hacia las empresas que han de utilizarlo nuevamente como materia prima para la fabricación de productos nuevos.

La logística inversa “permite gestionar eficientemente los procesos de retorno de productos al final de su vida útil o productos fuera de uso, y de esta forma recuperar el valor que aún pudieran incorporar o proceder a su adecuada eliminación”[15]

Por otra parte, la logística inversa “se refiere a la recolección, reciclaje y tratamiento de los desechos generados por el producto final una vez consumido. Lo anterior con la finalidad de reducir el impacto ambiental una vez utilizados, que ahora son desechos y también para cumplir con el objetivo logístico de reutilizarlos como materia prima, repuestos, entre otros y generar valor nuevamente”[16]

Como se puede observar, este concepto se refiere a conocer el inicio del retorno del producto que será reaprovechado, el cual comienza con el usuario como generador del desecho, con lo cual abastece a los recolectores que pueden ser pepenadores, empresas, limpia pública, incluso él mismo puede llevar su producto al CA. En el caso de algunas empresas, pepenadores y limpia pública normalmente realizan más actividades, buscando generar una mayor valorización del residuo. Estos últimos abastecen al centro de acopio que dependiendo de su tipo puede realizar diferentes procesos con la finalidad de valorizar los productos y entregarlos a las empresas transformadoras para su uso como materia prima de reutilización. Esta logística inversa se puede apreciar en la figura siguiente:

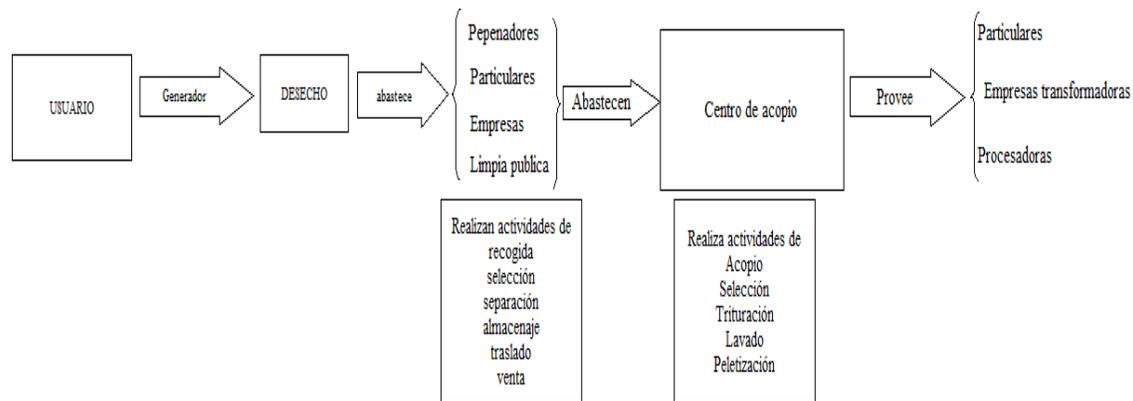


Figura 3. La Logística Inversa en el manejo de los Residuos.

Características de los Centros de Acopio

Los centros de acopio tradicionales que han proliferado en México, consisten en instalaciones integradas por un terreno de aproximadamente 200m², normalmente bardeado, con un espacio techado donde se encuentra una báscula para pesar los RSU que venden los pepenadores, en otros casos es una bodega pequeña con una oficina improvisada y báscula.

Su distribución interna o Layout consiste en espacios donde se acumulan los diversos materiales que recibe, como PET, plástico soplado, metales e incluso lixiviados.

Sus instalaciones son totalmente austeras, con pocas medidas de seguridad y de higiene, incluso sus conocimientos son totalmente empíricos al igual que sus procesos.



Figura 4. Centro de acopio tradicional.

Nota: <https://www.elsoldeparral.com.mx/local/parral/verificara-municipio-a-chatarreras-de-la-ciudad-permisos-renovacion-robos-parral-7370864.html>

En cuanto a recurso humano, comprende un administrador y un par de personas que se dedican a la separación, clasificación y almacenamiento de los materiales.



Figura 5. Personal de un centro de acopio tradicional

Nota: <https://www.elsoldeparral.com.mx/local/parral/verificara-municipio-a-chatarreras-de-la-ciudad-permisos-renovacion-robos-parral-7370864.html>

Los mayores proveedores de los centros de acopio son los pepenadores, quienes traen el producto ya separado por sus características inherentes y su producto les es comprado por kilo.

También se adquieren materiales por parte de particulares, camionetas de recolección de tiliches e incluso a veces personal de limpia pública.

Por otra parte, también se venden diversos materiales a clientes varios como metales, madera, entre otros en cantidades menores.

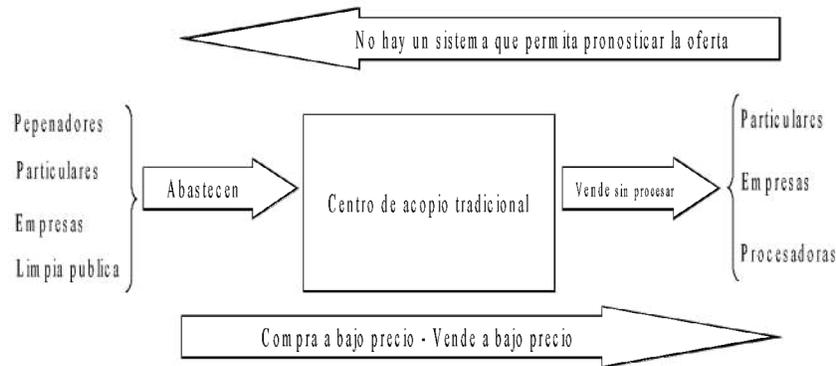


Figura 6. Operación general de un centro de acopio tradicional

Análisis de la Información Obtenida

Operación General del Centro de Acopio

En la figura 3 se observa que al ser organizaciones que de forma tradicional almacenan los RSU plásticos para su venta posterior, siempre buscan tener costos muy bajos lo que conduce a creer que entre menos procesos tengan, menor será su inversión y probablemente mayor ganancia. Algo que no es del todo cierto.

Como se ve en el diagrama existen varios entes que abastecen de materiales al centro de acopio con diversos materiales como son polímeros, maderas, vidrio, metales, entre otros. El centro de acopio los recibe y de ser necesario el personal hace la separación cuando vienen insertos en ensambles, claro que esto ocasiona que el precio de compra se reduzca para amortizar la operación de desensamble. Una vez realizada esta operación se acumula en el área que ha sido designada para cada material. Otra de las actividades que realiza es la de vender los materiales a particulares y empresas al menudeo buscando ganar más de los que les pagaría una planta procesadora, teniendo así un margen mayor de utilidades. Cuando llegan a determinadas cantidades en toneladas, las empresas procesadoras envían por el material sin cobro de flete. Sin embargo, si los centros de acopio desean venderles cantidades más pequeñas de material deben absorber este costo.

El administrador del centro de acopio debe estar siempre muy pendiente de las fluctuaciones en el precio de los materiales, los cuales pueden variar de un día a otro de acuerdo a las necesidades que tengan las empresas procesadoras.

Sin embargo, es importante plantear que este tipo de negocios no deja grandes ganancias como puede pensarse, ya que la competencia es fuerte en este nivel de establecimiento.

Gestión Tecnológica en el Centro de Acopio

En la figura 4, se observa como a medida que el negocio se vuelve más tecnificado, la ganancia es mayor.

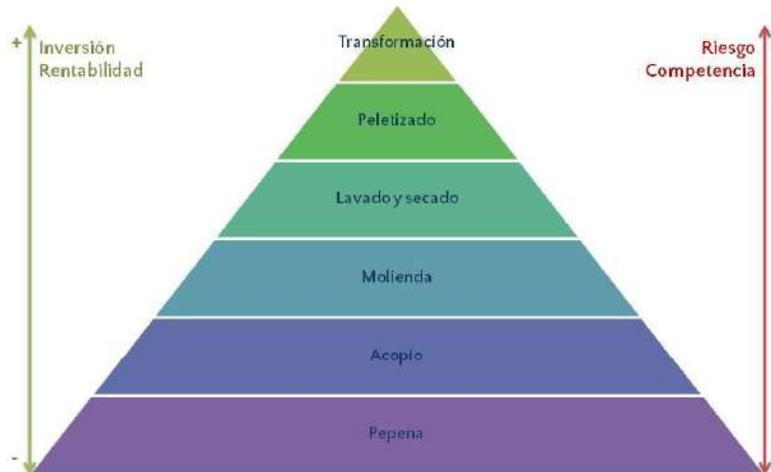


Figura 7. Pirámide del reciclaje de plásticos.

Nota: <https://www.recimex.com.mx/blog/?p=336>

En la pirámide se observa que en la pepena y el acopio es donde se concentra mayor número de competidores, quienes buscan que los productos lleguen al menor costo y que sus operaciones sean mínimas para no hacer inversiones que les conduzca a ver reducida su ganancia. Estos son dependientes de las necesidades que reflejan las empresas productoras que son quienes reciben de parte de los fabricantes las necesidades de materias primas.

Siguiendo hacia arriba en la pirámide, lo que se busca es lograr contar con organizaciones que se desarrollen cada vez más y puedan lograr ser transformadoras y especialistas en ciertos materiales para que de esta forma efectúen una gestión tecnológica apropiada. Como se ve en la parte alta de la pirámide hay menos riesgos y menor competencia y una mayor rentabilidad del negocio.

Sin embargo, a través de este trabajo de investigación se visualiza que existe desconocimiento por parte de los trabajadores en lo referente a los diferentes tipos de polímeros y en ocasiones llegan a vender un producto por otro debido a que superficialmente pueden verse similares y eso les conduce a tener pérdidas sustanciales.

Por ello, es importante comenzar a ver estas unidades de negocio como tal y plantear una evolución donde pasen de ser solo centros concentradores de materiales y se conviertan en

entidades que realicen los procesos de reutilización, remanufactura, rediseño, reciclado y recuperación, buscando una valorización eficiente de los residuos.

Para evolucionar de resguardo a procesamiento de los RSU, lo que el CA debe hacer es conocer la industria y definir cuál será el tipo de material en que se especializará el centro. Hay que tener cuidado en manejar multiproductos, porque esto lleva a tener gran variedad de materiales y se disgregue el capital invertido en pequeñas cantidades de materiales que no se venderán tan fácil a las empresas procesadoras ya que están solicitando grandes cantidades.

Por otro lado, para conocer la industria del reciclado, es importante investigar e informarse acerca de los materiales que son susceptibles de ser reciclados. Para ello, si se trata de polímeros, existe una pirámide que permite observar la clasificación y aplicación de los materiales, ver figura 5.

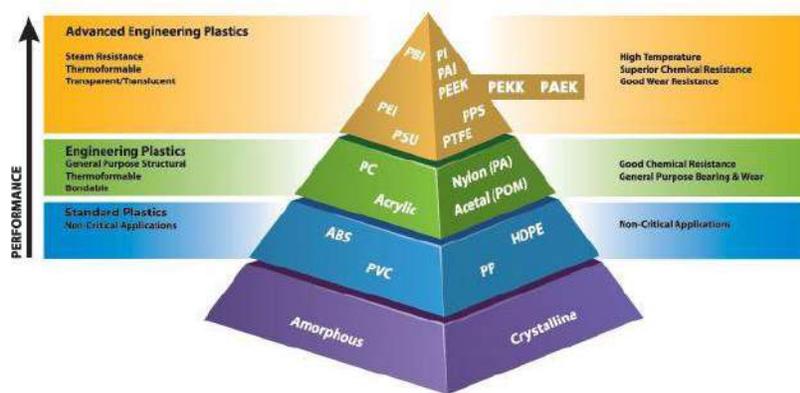


Figura 8. Pirámide de clasificación de los polímeros.

Nota: <https://www.drukatt.com/2022/02/17/polimeros-de-alto-rendimiento-para-fabricacion-aditiva/>

Es necesario e importante para operar un CA conocer los materiales que se estarán acopiando y saber sus características y del mismo modo poder identificar los entes que los utilizan en el entorno y determinar el mercado de abastecimiento de estos materiales, así como las empresas que los requieren como materia prima. Es decir, identificar proveedores y clientes.

Por otra parte, los administradores del CA, deben tener la información de cómo se comporta el mercado nacional e internacional respecto del o de los materiales que se van a acopiar. De acuerdo a los siguientes cuestionamientos:

¿Cuál será la producción mundial de botellas de plástico este año?, ésta información sirve para conocer las necesidades del mercado a nivel mundial, saber qué países requieren polímeros como materias primas y prever cómo estará la demanda de los productos que se podrán vender y acopiar para abastecer el mercado internacional.

¿Cuánto se producirá en México?, esto de igual manera apoya en realizar un pronóstico de la demanda nacional, apoya a identificar las empresas que requieren estos materiales y que serán los clientes potenciales para venderles producto a lo largo del año y también conocer donde se encuentran. De igual manera permite establecer la cadena de abastecimiento que se tendrá con los pepenadores, particulares, empresas y gobierno que serán quienes integren el producto a la cadena logística de retorno.

Teniendo esta información, se puede hacer una proyección de las necesidades del mercado meta que son las Procesadoras de materiales (transformadoras y productoras de envases), y poder determinar el nivel de abastecimiento que se estará comprometiendo cada periodo.

Después de tener la información de las necesidades del mercado, ahora es importante conocer ¿dónde se encuentra este producto para reciclarse?, es decir qué empresas o en qué procesos se utiliza y se puede obtener ya sea como postproceso que es el resultante de desperdicios del mismo proceso o productos que no pasan el indicador de calidad y que son rechazados y van para el desecho, tratándose de un material muy limpio, ya que no ha sido contaminado con otras sustancias, o bien en el postconsumo que quiere decir que los usuarios lo estarán desechando por lo que es necesario saber dónde están esos consumidores y la forma en que se puede hacer la pepena, que en este caso es probable que el material venga mezclado o contaminado a cierto grado.

Otra pregunta que apoya en esto es saber si ¿se encuentra en el entorno? por razones de costos es necesario saber si en el área inmediata se puede tener para no invertir en traslados distantes o si lo fuera así que la cantidad de material a traer sea suficiente para absorber los costos de trasportación y almacenaje, lo que permitirá establecer las estrategias apropiadas para la obtención de este material.

Una forma de caracterizar la evolución a un Centro de Acopio Competitivo es considerando los siguientes atributos: maquinaria, capacidad de equipamiento, instalaciones, inversión para la compra e identificar a las empresas a las que se venderá el producto. Lo que se irá viendo en la descripción de cada tipo de CA.

Centro de Acopio de menudeo

Como ya se ha comentado, un CA de menudeo, minorista o tradicional es el que más ha proliferado y se encuentra en muchas partes de una ciudad, se encarga de recibir diversos materiales que ellos consideren que pueden llegar a valorizar, le compran a todo aquel que les lleve materiales, no poseen tecnologías para hacer su trabajo y generalmente cuentan con una báscula hasta 50 o 100kg.

Poseen una instalación en condiciones precarias y pagan en efectivo en pequeñas cantidades. Son atendidos por 2 o 3 personas quienes poseen conocimientos empíricos y realizan todas las actividades que se requieren como pesar, revisar, separar y amontonar los materiales. Sus principales funciones son acopio, separación y transporte.

Centro de Acopio de mayoreo

Son instalaciones que compran materiales de una manera más selectiva y en grandes cantidades del orden de toneladas, cuentan con un espacio grande de terreno o naves industriales, poseen transporte y equipo para carga y descarga, básculas para toneladas y sus principales proveedores son los centros de acopio minoristas, también cuentan con equipo para compactación para poder hacer pacas, sin embargo al igual que los minoristas buscan hacer inversiones mínimas en equipo de seguridad y actividades que consideran superfluas, para obtener mayores ganancias. Son atendidos por 5 a 10 personas quienes poseen conocimientos empíricos o muy poco tecnificados para el manejo de compactadoras, camiones y equipo de carga y descarga, ellos realizan todas las actividades que se requieren en el local.

Reciclador de plástico (centro de acopio competitivo)

Es el centro más competitivo de los que se conocen actualmente, ya que realiza diferentes actividades de procesamiento como es el acopio y almacenaje, selección y separación de materiales, lavado, trituración y peletización, lo cual es preparar los materiales para ser integrados como materias primas a la cadena inversa de manufactura directamente. Es decir, estos CA entregan los materiales a las empresas manufactureras que lo toman como materias primas para sus procesos de fabricación. Su personal operativo es capacitado y posee conocimientos técnicos para poder realizar las operaciones eficientemente. Sus instalaciones son formales y se ve como una empresa competitiva. Como se aprecia su capital invertido es mayor; pero también lo es su ganancia.

Este tipo de CA se encuentra en la parte alta de la pirámide donde hay menos competencia, pero mayores inversiones en equipamiento.

Costos de las operaciones logísticas en el Centro de Acopio

El valor logístico en cada etapa donde se realizan las operaciones logísticas y que contribuyen a mejorar la competitividad de las organizaciones implicadas, como es el caso de las operaciones en el Centro de Acopio, aportan utilidad al usuario o consumidor final que es el empresario del Centro [17] [18] [19].

En el caso de estudio, el valor logístico que se genera en la parte correspondiente al CA

donde se realiza el pesaje para la compra del PET, su almacenamiento, clasificación y en su caso procesamiento para su venta, es la suma de las operaciones de logística inversa:

Valor Logístico por la recuperación de cada kilogramo de PET = Beneficio por la venta de 200 a 5000 kg - costos integrados del sistema de logística inversa, para el caso del centro de acopio de menudeo.

Costos del SLI = Costos de adquisición de los envases de PET + costo de procesamiento + costo de materiales usados + costo de manejo de residuos.

Beneficio por unidad = Por la venta de cada kilogramo de botella de PET recuperado.

Para el caso de estudio, el valor logístico por la recuperación de botellas de PET para su venta, se presenta de acuerdo al peso como factor de venta:

Tabla 3
Recuperación de materiales en kilogramos.

Tipo de centro de acopio	Kg PET por semana (venta)
Menudeo	200 a 5000 kg/semana
Mayoreo	20 a 80 tons/semana
Reciclador	10 a 110 tons/semana (proceso)

Elaboración propia. Diseño propio.

Conclusiones

En la economía circular la reutilización de RSU de botellas de PET apoya a mitigar la alta acumulación de basura en los rellenos sanitarios, además de ayudar a minimizar la contaminación ambiental en las ciudades y comunidades.

También es importante considerar la necesidad de formar profesionales dedicados a gestionar empresas dedicadas al reciclaje de productos, tal como Técnicos Superiores Universitarios en Gestión de Empresas Recicladoras de RSU, Licenciados en Gestión de empresas recicladoras de RSU, buscando desarrollar agentes con la capacidad y habilidad de organizar e implementar procesos productivos basados en el manejo de RSU.

Ello fomentara el empleo de personal técnico calificado, así como la eficiencia en la producción de materias primas apoyado con el uso de tecnologías actuales.

Existen organizaciones dedicadas al acopio de botellas de PET, algunas de ellas como los Centros de Acopio de menudeo solo operan en base a la experiencia de sus empleados y del dueño en el manejo de los procesos. No cuentan con equipamiento tecnológico que les de seguridad y eficiencia en el manejo de los materiales. Lo que genera contaminación y problemas de salud a los operadores y vecinos de la empresa en su caso.

Por lo que se destaca que a la fecha no hay suficientes estudios que profundicen en lo referente a innovar en mecanismos tecnológicos y organizacionales para su mejor productividad, lo que podría apoyarles a incentivar la consolidación de cadenas de suministro inversa plenamente dedicadas al reciclaje de productos. Uno de los hallazgos es que la materia prima recuperada se encuentra almacenada mucho tiempo hasta que se reúnen las cantidades apropiadas para su venta y su incorporación a una cadena de suministro convencional, también que se tienen retrabajos por desconocimiento de los tipos de materiales cuando estos se encuentran mezclados. Por otro lado, la falta de conocimientos sobre las características de los materiales y su manipulación lleva a que en algunos CA cuenten con equipos rudimentarios o manejo de utensilios manuales.

Sin embargo, es de observarse que los Centros de Acopio de mayoreo tienen un esquema organizacional que apenas les permite ser productivos y emplear gente, además de usar tecnologías para agilizar los procesos de manejo de materiales.

Es en el Reciclador de Plástico en dónde se observa una organización formal y productiva y directamente están vinculados con los fabricantes de productos de plástico.

Referencias

[1]<https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPGIR.pdf>

[2]https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5596232&fecha=07/07/2020#gsc.tab=0

[3] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). 2022. Ruiz Suárez LG, Gavilán García A, Mendoza Cantú A, Ramírez Muñoz T, Araiza Aguilar JA. Atlas Nacional de Residuos Sólidos Urbanos. pp. 217. <https://www.gob.mx/inecc>

[4] Plan Municipal de Desarrollo de Querétaro 2021-2024 <https://pmd.municipiodequeretaro.gob.mx/>

[5]INEGI <https://www.inegi.org.mx/app/buscador/default.html?q=residuos+solidos+urbanos>

[6]Arcoya, E. (2022). Qué es la economía lineal. Economía Finanzas. Recuperado de <https://www.economiafinanzas.com/que-es-la-economia-lineal/>

[7]<https://www.santander.com/es/stories/economia-lineal-y-circular-a-que-se-refieren-cada-uno-de-estos-terminos-y-cuales-son-sus-diferencias>}

[8]<https://www.plastico.com/es/noticias/guia-sobre-el-pet-propiedades-produccion-y-aplicaciones>

[9] <https://www.conanp.gob.mx/LogrosConanp/Logros2018.pdf>

[10]https://landing.ecoce.mx/conocenos/?source=google&medium=cpc&campaign=9713867743&term=152159334883&gBraid=0AAAAACeQ0W_GASr8GnloARfZ44_K1yBxz&gad_source=1&gclid=EAIalQobChMI0LeJw7n-hQMVLovCCB1VyQz6EAAYASAAEglyPPD_BwE

[11]SEMARNAT(2018) https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2018/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet5c54.html

[12]https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2018/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet5c54.html

[13] <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CD000929.pdf>

[14] Hernández, R. (2023). Metodología de la Investigación. 2ª. Edición. Mc Graw Hill. Julio4, 2023.

[15] Revista CIMEXUS Vol. XIV No.2 Julio - Diciembre 2019Glenda Marisa Chavez - Marco Alberto Valenzo-Jiménez - Bayte Nares

[16] Revista vértice universitario 24 agosto 2021 recuperado de <https://www.scielo.org.mx/pdf/vu/v23n91/2683-2623-vu-91-3.pdf>

[17] Méndez, J. Alvarez, E. (2021) Modelo de costos de sistemas de logística inversa. Estudio de caso. Artículo presentado en libro: Regionalización logística. Análisis y Aplicaciones. Edit. ITSON. PP-78-86.

[18] Méndez, J. Alvarez, E. (2022) La gestión de los residuos urbanos para la creación de organizaciones para abastecimiento de materiales recuperados. Artículo presentado en el CILOG 2022 como Paper 27.

[19] Méndez, J. Alvarez, E. (2023) Economía circular y Logística Inversa en sistemas abiertos. Estudio de caso: reconstrucción de colchones. Artículo presentado en el CILOG 2023

CAPÍTULO 18

Analysis of the LITHIUM model of the Lithium Battery Supply Chain

Roberto Hernández Torres
Alberto A. Aguilar Lasserre
Constantino Gerardo Moras Sánchez
Ulises Juárez Martínez
Rubén Posada Gómez
Miguel Gastón Cedillo Campos

Abstract— Lithium-ion batteries play a fundamental role as essential components in a wide range of devices in today's society, spanning from smartwatches, medical equipment, computer systems, communication devices, and home energy storage solutions to vehicles such as cars and trucks. The LITHIUM model (Sverdrup, 2016) elaborates in detail on the processes related to extraction, distribution, pricing, and ultimately the depletion of exploitable lithium reserves on a global scale. It focuses particularly on the complex network of factors influencing the production of rechargeable Lithium-ion batteries, the fundamental aspect of recycling, and the critical vulnerability associated with potential disruptions in the lithium supply chain. The aim of this article is to provide a comprehensive understanding of the interconnected elements of the LITHIUM model, from exploration to end-of-life disposal, and highlight potential vulnerabilities and opportunities for improvement within the supply chain. By utilizing Scenario Analysis, our research delves into the potential implications of technological progress and policy modifications on the Lithium-ion Battery supply network, providing valuable perspectives for industry participants and decision-makers. Overall, the analysis of the LITHIUM model is intended to facilitate the formulation of an optimal efficiency Lithium-ion Battery supply chain model, a strategic endeavor that can be further optimized through the application of diverse Artificial Intelligence techniques. Finally, implications for the design of an efficient Lithium-ion Batteries Supply Chain are presented as conclusions.

Keywords — lithium batteries; system dynamic; supply chain; recycling; resources; critical materials

Introduction

Technologies for the generation, use, and storage of energy are changing radically around the world due to various factors, including global warming, the limited existence of organic fuels, and the development of new green technologies, which include energy generation from sunlight, wind, and wave movement, among others (D. Liu et al., 2019). These new technologies are focused on solving the disadvantages of the current ones, but, as happens in all cases, they also have factors that seem adverse initially.

One of the main issues that concerns this regard is the storage of the electrical energy generated for later use. To solve this, we resort to the use of rechargeable batteries, of which there are different technologies, highlighting Lithium-ion batteries (LiB), which, as their name indicates, use lithium salts among other materials, for a storage process and discharge that, due to the characteristics of the devices, as well as their duration, has better performance than the rest of the current battery technologies (Ren et al., 2023).

Lithium (Li) is a light metal, the color of silver, with physical and chemical characteristics that allow its application in the chemical, metallurgical, aerospace, nuclear, and medical industries, as well as in battery energy storage technology. The volume of extraction, production and consumption has increased constantly for 6 decades, increasing 400% in the last 2, specifically in the production of lithium batteries (Mousavinezhad et al., 2024).

However, some issues related to this technology arise: (i) Lithium is an element whose supply chain (SC) is not yet fully developed at a global level; (ii) the extraction and chemical transformation processes of the materials for the manufacture of the battery cells impact the environment and (iii) the energy storage cells, once their useful life has ended, constitute special waste handling (Nowsheen Sharmili et al., 2023).

The electric vehicle (EV) market covers the majority of LiB demand, followed by electronic devices and power backup systems (Calisaya-Azpilcueta et al., 2020). Some countries have established economic and administrative policies for the development of infrastructure for the processing of raw materials, the chemical processing of materials, the manufacturing of the cells that make up the batteries, and their assembly. Strategically, companies locate their manufacturing plants in places close to electric car manufacturing plants and where the Lithium mineral from which this raw material is extracted, notably Australia, Argentina, Chile and

China (Thies et al., 2019). In numerous nations, Li is currently recognized as a pivotal material (Alessia et al., 2021), emphasizing the necessity to enhance its Criticality Score worldwide. This entails two primary goals: enhancing the effectiveness of the supply chain and reducing environmental repercussions.

The management of LiB SC in its three links, 1) supply, 2) manufacturing, and 3) distribution and transportation, becomes a concern in different sectors and depends on economic, political, technological, social, and environmental factors (Wentker et al., 2019).

As part of research carried out by the authors to optimize the LiB SC through AI techniques, it is required to analyze existing SC models to deepen the knowledge of their causal relationships and flows of information and materials. The aim of this paper is to analyze how the effects of potential implications of political, economic and social changes, as well as technological evolution, can be represented and evaluated in the LITHIUM system dynamics (SD) supply chain model.

The rest of the document is organized as follows. Section 2 presents the justification for this research, highlighting the need to study the lithium supply chain, derived from the economic-political activity in Mexico. Section 3 presents the LITHIUM model, its configuration, parameters and specifications. Section 4 describes the model analysis, through the causal diagram, the flowchart, the forrester diagram, the characterization of the model variables and the execution of the scenario analysis. Section 5 presents results and discussion and finally section 6 includes the conclusions of the article.

Justification

The rise of green technologies and the emission of greenhouse gases (GHG) have meant that internal combustion engines are gradually being displaced by engines powered by fuels of plant origin, hydrogen, electric energy, and hybrid forms (Jung et al., 2023). Among these technologies, the most advanced currently is electric motors that rely on Lithium-ion batteries (LiBs), due to their lower impact on the environment (Maisel et al., 2023).

While the demand for electric vehicles has steadily risen, projections suggest that its expansion will follow an exponential pattern. As a result, there will be a significant surge in the need for lithium across various sectors in the foreseeable future (Xu et al., 2020). This causes concern in the sector regarding the ability to satisfy its demand since although Lithium is a very abundant material in the Earth's crust, its extraction and production are reserved for a limited group of geographic locations, extraction, and refining techniques, as well as forms

of distribution (Jones, 2024). Regarding environmental aspects, the extraction and processing of lithium, whether from minerals or brines, as well as the recycling and final disposal processes, are associated with different environmental and social impacts, which must be considered within SC (Marmolejo Cervantes & Garduño-Rivera, 2021).

The current status of the lithium battery supply chain in Mexico remains at an early stage, yet it exhibits significant potential for advancement. Mexico has substantial lithium reserves in regions such as Baja California, San Luis Potosí, Zacatecas, and Sonora (Vivoda et al., 2024). In 2022, the Mexican government nationalized lithium mining and extraction, creating Lito para México (or LitoMx) and granting it exclusive rights to extract it. This measure has generated uncertainty in the private sector, which has expressed concern about its impact on investments. However, it has also sparked the interest of foreign companies, which see Mexico as an opportunity to develop a regional LiB supply chain. In this context, corporations like Ganfeng Lithium (China) and Tesla (United States) have disclosed their investments in Mexico to extract and refine lithium. Establishing the lithium battery supply chain in Mexico has the potential to enhance the diversification of the Mexican economy and generate employment opportunities. Furthermore, it has the capacity to bolster other facets, such as the energy security, given that lithium batteries play a pivotal role in electric vehicles and renewable energy sources (Biney et al., 2024).

In the immediate future, Mexico's lithium battery supply chain will primarily concentrate on lithium extraction and its subsequent processing (Marmolejo Cervantes & Garduño-Rivera, 2021). Looking ahead, there is an anticipation for establishing manufacturing facilities for cells and batteries within the nation. Various obstacles stand in the way of progress in Mexico's lithium battery supply chain development. These include: 1) the uncertainties of a legal and political nature stemming from the lithium nationalization; 2) the insufficiency of infrastructure and skilled workforce; and 3) the competitive landscape posed by nations such as China, Australia, and Argentina, which are prominent lithium producers globally. To address these challenges effectively, the Mexican government needs to focus on crafting a legal framework that instills confidence in investments, building the required infrastructure, and enhancing the capabilities of the labor force. Current strategy of near-shoring may enhance the advancement of lithium batteries for electric vehicles through leveraging resource proximity, shortening the supply chain, promoting collaboration, and facilitating regulatory coherence. Nevertheless, the implementation of a nearshoring approach to boost Mexico's role in the international electric vehicle sector necessitates attention to infrastructure development, workforce training, and regulatory backing (Villa-Mendoza et al., 2023).

LITHIUM model

The LITHIUM model is part of the WORLD7 model, a project funded by the European

Union's Horizon 2020 research and development program. WORLD 7 links natural resources, the economy, climate change, population and society in an interconnected system of systems dynamics. The model is unique in its approach to dynamically generating prices over time, rather than using static or statistical relationships to force price production.

Harald Ulrik Sverdrup and Kristin Vala Ragnarsdottir (2016), from the University of Iceland, conceived the LITHIUM model to establish a streamlined representation of the worldwide lithium cycle and enable an assessment of the viability of lithium utilization in LiB CS.

Model analysis

The LITHIUM model was formulated using systems analysis and system dynamics (SD) methodologies, which several authors have applied to analyze the effects of uncertainty in global supply chains (Cedillo-Campos et al., 2014; Mutanov et al., 2020; Tama et al., 2018). Using flowcharts and a causal loop diagram, authors of LITHIUM model established the mass balance equations differentially, subsequently resolving them computationally within the Stella® software.

Through the model, they reconstructed the past (1900-2015) and evaluated its performance. When it was satisfactory, they simulated the possible future (2015-2400). The model is numerically integrated using a 1/18-year time step and a 4-step RungeKutta numerical integration method.

Causal diagram

The causal diagram constructed by Sverdrup et al (2016) illustrates that with the rise in population and wealth, there is an escalation in the demand for lithium and, subsequently, in the market. This leads to a reduction in the lithium stock available in the market, resulting in a hike in its price. Consequently, this price shift influences alterations in the extraction coefficients and their associated expenses, thereby fostering an increase in the inclination toward production. This, in turn, triggers fluctuations in the accessibility of lithium in the market, catering to diverse purposes such as the production of LiB for EV, ceramic and glass manufacturing, air conditioning, industrial lubricants, among others. The extraction process of lithium not only diminishes the existing reserves but also impacts their quality (Figura 1).

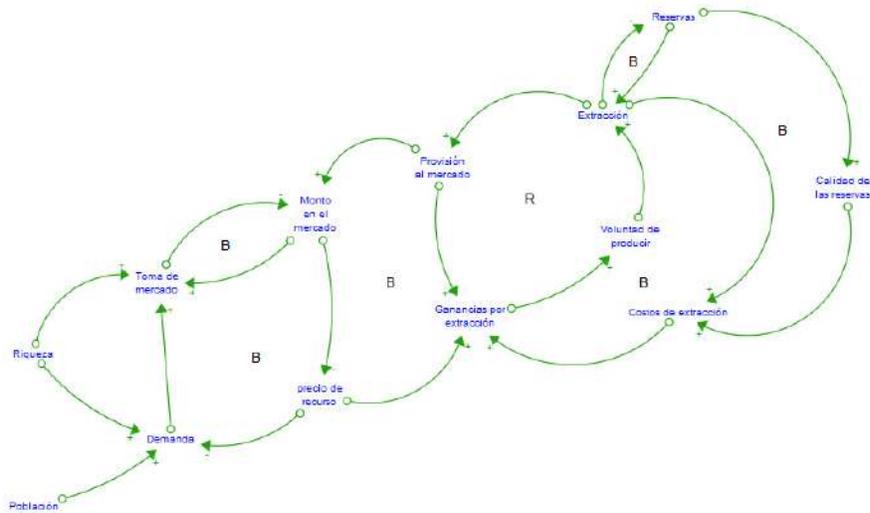


Figura 1. Causal diagram of the LITHIUM model (Sverdrup, 2016)

Model structure

The model is based on the availability of three commercial sources of lithium extraction: a) high-grade lithium reserves, b) low-grade reserves, and c) ultralow-grade reserves. The model does not consider whether they come from rock, brine or lateritic clay sources. The mining process delivers raw material to the refining process where recycled lithium is added. Lithium obtained from the refining process, in the form of lithium carbonate, hydroxide and chloride, as well as a very small fraction of lithium metal. (Figura 2)

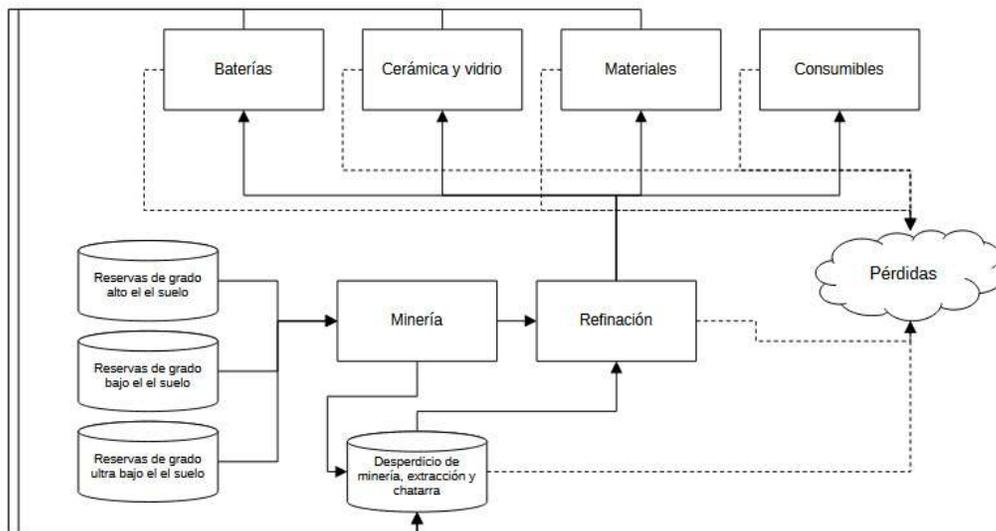


Figura 2. Flowchart of the LITHIUM model (Sverdrup, 2016)

Refined lithium is distributed in various sectors of the industry, mainly towards the manufacture of batteries, ceramics and glass, industrial lubricants, aluminum and metal alloy smelting processes, refrigeration and air conditioning, medicine and other uses. Recycling is present in almost all processes, both mining and extraction, refining and manufacturing. The model also considers non-recoverable losses of lithium in all processes.

Identification of model components

The model is divided into three segments: 1) mining segment, 2) market segment and 3) social and industry segment (Figura 3). The inputs of the model are the sources of minerals and brines for their extraction, and the outputs of the system are the quantities of lithium in the sectors in industry and society.

In the mining segment of the LITHIUM model, the amount of lithium mined depends directly on the mining factor, the price of lithium and the mineral reserves in rock (pegmatites), brines and lateritic clays. These three types of substrate handle respective degrees of element concentration: very high, low and very low. The segment uses two extraction-type change controllers based on the price of lithium in the market, determining extraction from a lower-quality substrate when the extraction price increases and vice versa. Variables also participate that consider prospecting and exploration factors for each level of substrate concentration, as well as the collection of data on lithium mining.

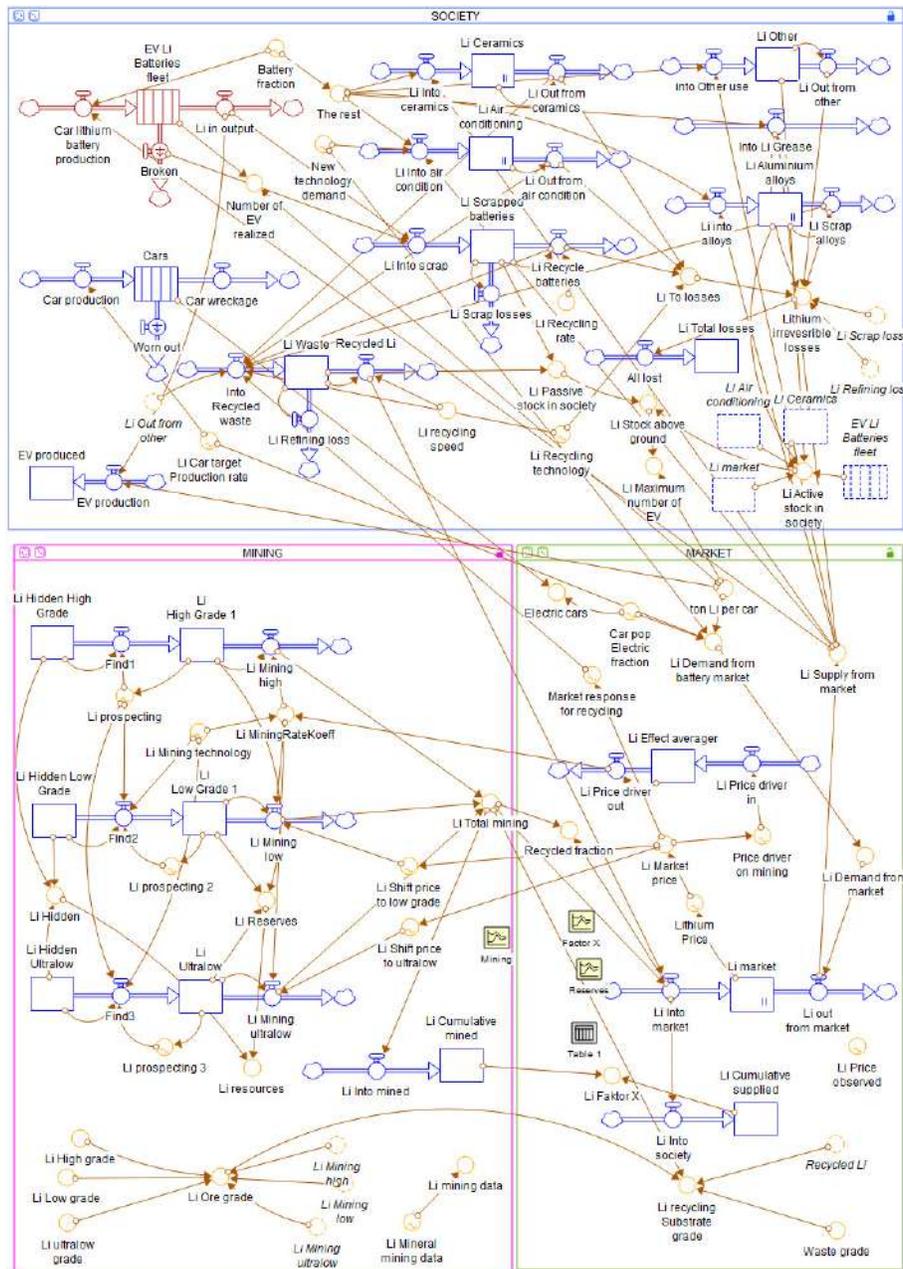


Figura 3. Forrester diagram of the LITHIUM model (Sverdrup, 2016)

The market segment is developed to dynamically represent the behavior of the global lithium market, determining the quantities of lithium available in society and in the market, and has an averaging component of its mining costs, which is directly related to the extraction type change controllers of the mining segment. This segment of the model acts as a link between the mining and society segments, determining market behavior through variables such as the X factor (the ratio of the total quantity supplied to society divided by the quantity

extracted from the ground), the degree of recycling substrate, the price of lithium in the market, the number of electric cars on the market, the tons of lithium required per electric car, as well as the demand and supply of lithium.

The society segment models the interactions between people and industries with lithium, first considering its use in LiB for electric cars. One of its main variables is the battery fraction function, which determines the proportion of lithium that is allocated to the manufacture of LiB, allocating the remaining proportion to ceramic and glass, aluminum and alloys, industrial lubricants, air conditioning and other uses. The model can estimate the number of electric vehicles produced over time, a variable dependent on the availability of LiB and the demand for electric cars. Recycling is an important component of the model, which considers LiB scrap and lithium waste in various industries to allocate them to recycling processes that depend on the technologies available over time for this purpose. Irreversible losses of Lithium are also considered

Characterization of variables

The model in total has 101 variables distributed in 20 stock variables, 35 flow variables and 46 auxiliary variables; plus 11 constants, 70 equations and 16 table functions. The mathematical model of the model is based on three main equations that determine its behavior. The general equation of the model, which applies the general principle of mass balance with all inputs balanced with the outputs:

$$\text{Production} + \text{recycling} = \text{accumulation in society} + \text{losses} + \text{recycling} \quad (1)$$

the mining coefficient

$$r_{\text{mineria}} = k * m^n \quad (2)$$

where k is the mining rate, m is the mass of the mineral body and n is the mining exponent determined by the geometry of mining, which has a value of 1.0 when mining is carried out by extracting liquids throughout the ore body, 0.66 when mining is carried out through underground tunnels to the ore body and 0.33 when open pit mining is carried out through a flat landscape.

Mining rate

$$k_{\text{mining}} = k_0 * f(\text{Technology}) * g(\text{price}) \quad (3)$$

Where $k_0=0.001$, it is related by the value function of the driver of lithium prices and extraction over time and by the technological factor function. Such functions will keep mining intensity low only when

simple technology is available and demand is not very strong, but will increase it significantly when demand increases and technology improves significantly.

Formulation

First, the formulas and initialization parameters of the 101 model variables were obtained (Table 1). This is essential to configuring the model at time 0 of the simulation and ensuring the expected results.

Num.	Ecuation
1	conveyor Cars = 0 | Transit time = 7
2	conveyor EV_Li_Batteries_fleet = 0 | Transit time = 7
3	stock EV_produced = 0
4	stock Li_Air_conditioning = 0
5	stock Li_Aluminium_alloys = 0
6	stock Li_Ceramics = 0
7	stock Li_Cumulative_mined = 0
8	stock Li_Cumulative_supplied = 0
9	stock Li_Effect_averager = 0
10	stock Li_Hidden_High_Grade = 16
11	stock Li_Hidden_Low_Grade = 24
12	stock Li_Hidden_Ultralow = 29
13	stock Li_High_Grade_1 = 4
14	stock Li_Low_Grade_1 = 0
15	stock Li_market = 0
16	stock Li_Other = 0
17	stock Li_Scrapped_batteries = 0
18	stock Li_Total_losses = 0
19	stock Li_Ultralow = 0
20	stock Li_Waste = 0
21	converter Li_Car_target_Production_rate = Time
22	converter New_technology_demand = Time
23	constant ton_Li_per_car = 0.03
24	converter Car_pop_Electric_fraction = Time
25	converter Li_Demand_from_battery_market = Li_Car_target_Production_rate * New_technology_demand * ton_Li_per_car * Car_pop_Electric_fraction
26	converter Li_Demand_from_market = Li_Demand_from_battery_market
27	flow Li_out_from_market = Li_Demand_from_market
28	converter Li_Supply_from_market = Li_out_from_market
29	converter Battery_fraction = TIME
30	converter The_rest = 1 - Battery_fraction
31	flow Into_Li_Grease = Li_Supply_from_market * 0.3 * The_rest

32	flow into_Other_use = Li_Supply_from_market * 0.11 * The_rest
33	flow Li_Out_from_other = Li_Other * 1
34	converter Li_Recycling_technology = Time
35	flow Broken = Leakage outflow
36	flow Li_in_output = Conveyor outflow
37	flow Li_Into_scrap = Broken + Li_in_output
38	constant Li_Recycling_rate = 1
39	flow Li_Recycle_batteries = Li_Recycling_rate * Li_Scrapped_batteries
40	flow Li_Out_from_air_condition = Li_Air_conditioning / 7
41	flow Li_Out_from_ceramics = Li_Ceramics * 0.05
42	flow Li_Scrap_alloys = Li_Aluminium_alloys / 7
43	converter Lithium_Price = Li_market
44	converter Li_Market_price = Lithium_Price * 70
45	converter Market_response_for_recycling = Li_Market_price
46	flow Into_Recycled_waste = Li_Recycling_technology * (Li_Recycle_batteries + Li_Out_from_air_condition + Li_Out_from_ceramics + Li_Scrap_alloys * 0.5 + Li_Out_from_other * 0.2) * Market_response_for_recycling
47	constant Li_recycling_speed = 12
48	flow Recycled_Li = Li_recycling_speed * Li_Waste
49	flow Li_Refining_loss = Li_Waste * 0.05
50	flow Li_Scrap_losses = Li_Scrapped_batteries * 0.02
51	converter Li_To_losses = (Li_Out_from_air_condition + Li_Recycle_batteries + Li_Out_from_ceramics) * (1 - Li_Recycling_technology)
52	converter Lithium_irreversible_losses = (Into_Li_Grease + Li_Out_from_other * 0.8 + Li_Refining_loss + Li_Scrap_losses + Li_To_losses + Li_Scrap_alloys * 0.5)
53	flow All_lost = Lithium_irreversible_losses
54	flow Car_lithium_battery_production = Li_Supply_from_market * Battery_fraction
55	flow Car_production = 2 * Li_Car_target_Production_rate
56	flow EV_production = Li_in_output/ton_Li_per_car
57	converter Li_prospecting = Li_High_Grade_1
58	flow Find1 = Li_Hidden_High_Grade * 0.2 * Li_prospecting
59	converter Li_prospecting_2 = Li_Low_Grade_1
60	converter Li_Mining_technology = TIME
61	flow Find2 = Li_Hidden_Low_Grade * 0.02 * (Li_prospecting_2 + Li_prospecting) * Li_Mining_technology
62	converter Li_prospecting_3 = Li_Ultralow
63	flow Find3 = Li_Hidden_Ultralow * 0.01 * (Li_prospecting_3 + Li_prospecting) * Li_Mining_technology
64	flow Li_Into_air_condition = Li_Supply_from_market * 0.07 * New_technology_demand * The_rest
65	flow Li_into_alloys = Li_Supply_from_market * 0.07 * The_rest
66	flow Li_Into_ceramics = Li_Supply_from_market * 0.45 * The_rest
67	converter Price_driver_on_mining = Li_Market_price
68	flow Li_Price_driver_in = Price_driver_on_mining

69	flow Li_Price_driver_out = Li_Effect_averager * 0.3
70	converter Li_MiningRateKoeff = 0.001 * Li_Mining_technology * Li_Price_driver_out
71	flow Li_Mining_high = Li_MiningRateKoeff * Li_High_Grade_1
72	converter Li_Shift_price_to_low_grade = Li_Market_price
73	flow Li_Mining_low = Li_Low_Grade_1 * Li_MiningRateKoeff * Li_Shift_price_to_low_grade * 0.7
74	converter Li_Shift_price_to_ultralow = Li_Market_price
75	flow Li_Mining_ultralow = Li_Ultralow * Li_MiningRateKoeff * Li_Shift_price_to_ultralow * 0.3
76	converter Li_Total_mining = Li_Mining_high + Li_Mining_low + Li_Mining_ultralow
77	flow Li_Into_market = Li_Total_mining + Recycled_Li
78	flow Li_Into_mined = Li_Total_mining
79	flow Li_Into_society = Li_Into_market
80	flow Worn_out = Leakage outflow
81	flow Car_wreckage = Conveyor outflow
82	converter Electric_cars = Car_pop_Electric_fraction * Cars
83	converter Li_Active_stock_in_society = Li_market + Li_Ceramics + Li_Air_conditioning + EV_Li_Batteries_fleet + Li_Other + Li_Aluminium_alloys
84	converter Li_Faktor_X = Li_Cumulative_supplied / (Li_Cumulative_mined+0.1)
85	converter Li_Hidden = Li_Hidden_High_Grade + Li_Hidden_Low_Grade + Li_Hidden_Ultralow
86	constant Li_High_grade = 1
87	constant Li_Low_grade = 0.1
88	converter Li_Passive_stock_in_society = Li_Scrapped_batteries + Li_Waste
89	converter Li_Stock_above_ground = Li_Passive_stock_in_society + Li_Active_stock_in_society
90	converter Li_Maximum_number_of_EV = 3 * Li_Stock_above_ground * 0.85/ton_Li_per_car
91	converter Li_Mineral_mining_data = Time
92	converter Li_mining_data = Li_Mineral_mining_data * 0.0575427
93	constant Li_ultralow_grade = 0.01
94	converter Li_Ore_grade = (Li_High_grade * Li_Mining_high + Li_Low_grade * Li_Mining_low + Li_Mining_ultralow * Li_ultralow_grade) / (Li_Mining_high + Li_Mining_low + Li_Mining_ultralow + 0.00001)
95	converter Li_Price_observed = Time
96	constant Waste_grade = 0.3
97	converter Li_recycling_Substrate_grade = (Recycled_Li * Waste_grade + Li_Total_mining * Li_Ore_grade) / (Li_Total_mining + Recycled_Li + 0.0001)
98	converter Li_Reserves = Li_High_Grade_1 + Li_Low_Grade_1 + Li_Ultralow
99	converter Li_resources = Li_Reserves + Li_Hidden
100	converter Number_of_EV_realized = 3*EV_Li_Batteries_fleet / ton_Li_per_car

Input data and scenarios

The model input data were determined based on the authors' experience as well as studies by other authors that resulted in three scenarios: a high scenario, where all lithium reserves are considered assuming they are fully extractable with an amount of ultimate recoverable resources (URR) of 116 million tons of lithium, an intermediate scenario in which it assumes that only 50% of the resources are extractable with a URR of 73 million tons of lithium, and a low scenario in which the author agrees with various studies assuming that a lower proportion of the resources are extractable, URR=34 million tons of lithium.

Sensitivity analysis

One of the key factors to consider in the model analysis the energy density of LiBs, derived from the materials processing techniques used in the fabrication of the battery's core components, such as the cathode, anode, and separator. Extensive research has been conducted to develop and improve these materials, focusing on enhancing their energy density, power capabilities, and safety characteristics (Barman et al., 2023). One option to increase certainty about the provision of LiB for electric cars based on the availability of lithium may be the reduction of the amount of lithium required per battery, derived from the improvement in the storage density of the batteries, thereby which could extend the supply of lithium in the market for longer, stabilize prices and produce more LiB to satisfy current and future demand (Pesaran, 2023).

Scenario Analysis

The available quantity of Li for LiBs manufacturing is a growing concern as the adoption of electric vehicles continues to increase globally. Therefore, it is crucial to maximize the efficiency and performance of existing LiBs in order to fully utilize the available Li resources. One way to ensure the provision of Li during the transition to e-mobility is to optimize the design and operation LiBs, addressing various technical aspects. Key parameters that must be observed and optimized include energy density, thermal stability, charge and discharge efficiency, durability and life cycle, safety, and cost (Sutopo et al., 2013).

Energy density is a fundamental factor that determines the range of an electric vehicle or the runtime of a portable device. Through careful selection of anode and cathode materials, as well as optimization of electrode geometry and packaging design, it is possible to significantly increase the energy density of lithium-ion batteries. Another way to maintain the provision of lithium would be to improve lithium extraction and production technology, as well as develop more efficient recycling methods. The recycling of End of Life (EOL) LiBs is an area that deserves greater attention, as it would allow the recovery and reuse of this valuable resource, reducing the dependence on new extraction sources (Z. Liu et al., 2024)

To evaluate this scenario in greater detail and improve the understanding of the model, a scenario analysis was carried out through the variable *ton Li per car* (tons of lithium per electric car). 4 simulations were programmed assigning an incremental distribution to the study variable, with values from 0.03 Ton (run 1) per car, which is the value in the model, to 0.005 Ton (run 4) per car. As the amount of lithium per electric car is reduced, variations in the behavior of the reserves are observed, ie the high-grade lithium substrate (Figura 4) remains available throughout the simulation time (the year 2250), as smaller quantities of lithium are consumed as the lower demand for LiB in the market is met.

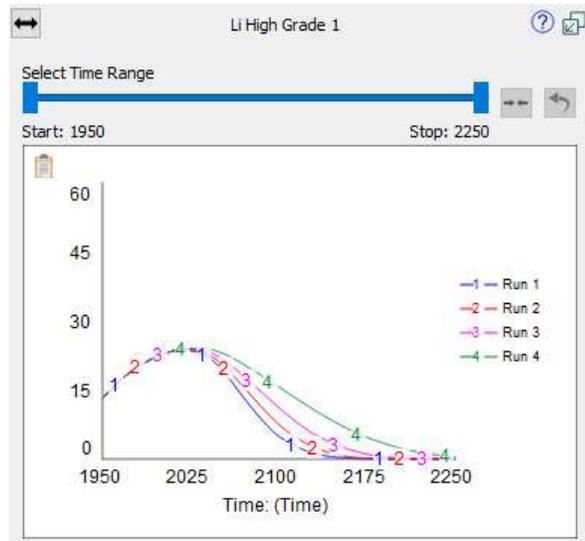


Figure 4. High-grade lithium substrate available

The mining coefficient (Figura 5), which is the intensity with which lithium is mined concerning market demand, is reduced at the end of the simulation time to 38.7% compared to the original model parameter.

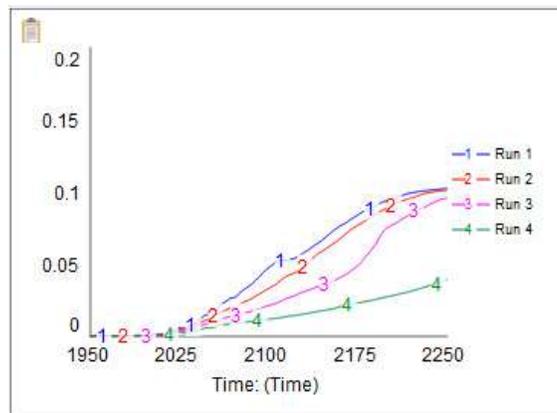


Figure 5. Mining coefficient

The world's lithium reserves, as they are not depleted due to the reduction in lithium requirements per car, allow an increase in the accumulated lithium mined over time (Figura 6).

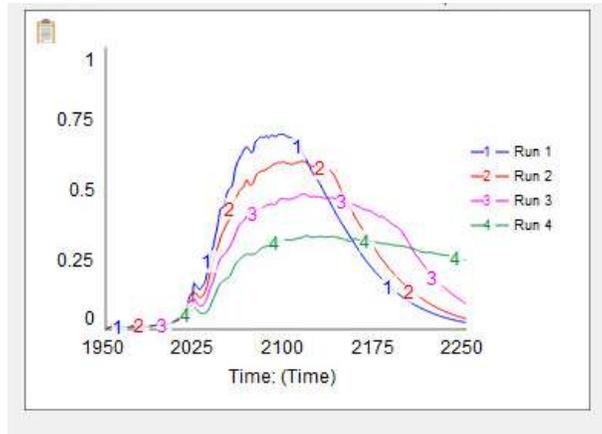


Figura 6. Total lithium mined over time

Similarly, the amount of lithium on the market (Figura 7), which is depleted before the simulation time in the initial scenario, is maintained until beyond the year 2250.

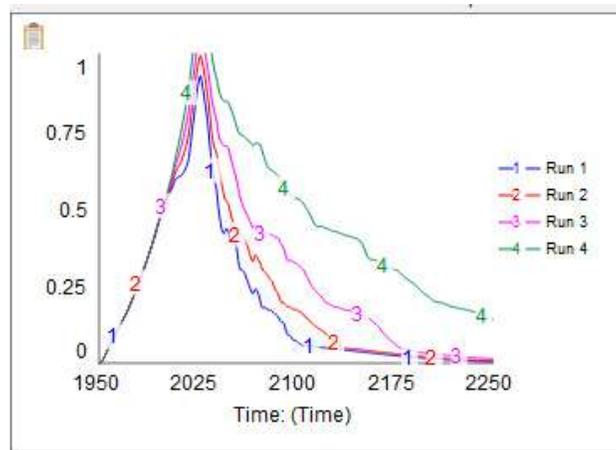


Figure 7. Lithium on the market

The cumulative production of electric cars (Figura 8) suddenly declines as global lithium reserves are depleted under the model's original parameterization but remains constant beyond the simulation time.

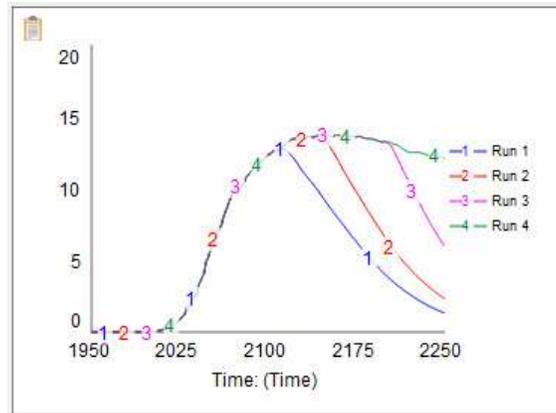


Figure 8. Production of electric cars

In the same sense, the lithium LiB fleet for electric cars (Figura 9) manages to supply the market demand throughout the simulation, derived from the lower lithium consumption per car.

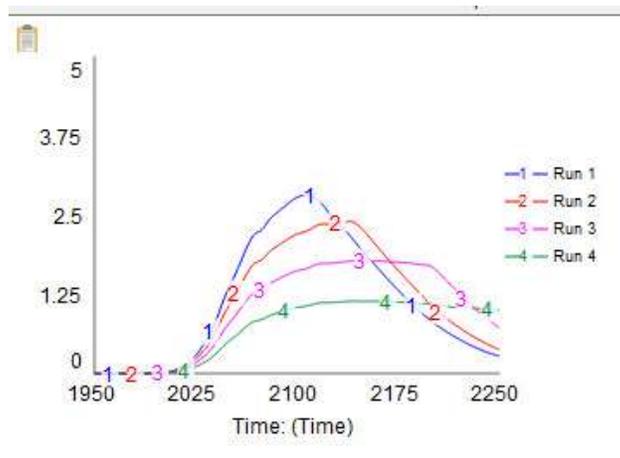


Figura 9. Stock in use of batteries for electric cars

As a smaller amount of lithium is required per car, demand is reduced (Figura 11) and the price of lithium (Figura 10) follows the same trend.

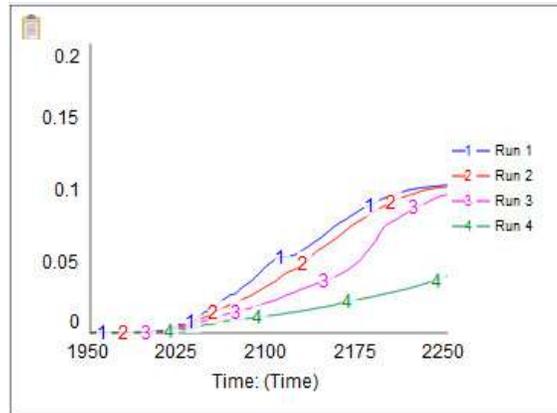


Figure 10. Price of lithium in the market

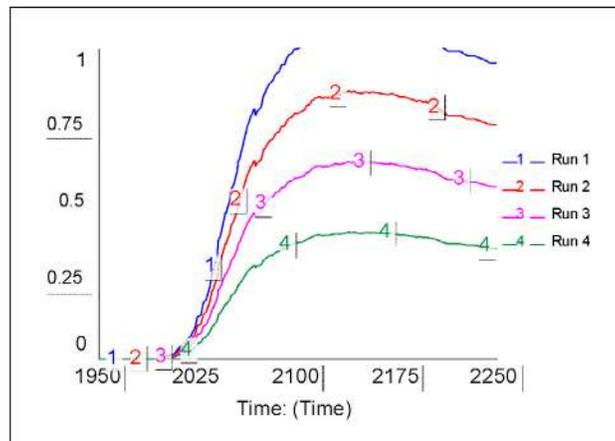


Figura 11. Lithium demand

Results and discussion

The analysis carried out on the LITHIUM model allows us to deepen our knowledge of a global lithium CS, and identify the causal relationships between its components, the uncertain parameters of the model and its behavior under changing conditions. This model, represented under SD, considers aspects such as market price, the duration of extractable resource sources and the destination given to lithium on a commercial level, with emphasis on the production of Lithium-ion batteries.

According to the LITHIUM model, global lithium production depends on these factors: 1) the amount of lithium available in the three types of extractable reserves, 2) market demand, 3) the available extraction technology and 4) lithium recycling. The model does not consider political, legal, or environmental aspects.

Regarding the extraction stage, the model considers aspects such as known reserves, unknown reserves, ore grade, exploration factor, available mining technology, mining factor, and additionally, although they are not represented in any output, the amount of data on lithium mining over time. Through this set of components, the model can represent the evolution of exploration and extraction technologies, the relationship of the extraction stage with the lithium market, and the certainty about the availability of reserves. The model does not consider the refining stage of lithium carbonate, lithium chloride, lithium hydroxide, or lithium metal.

Li recycling is a prominent component of the model, which is present in its three segments, through which the authors represent how the flow of lithium in society is maintained when its production decreases. The model considers the recycling of waste from all target industries, battery scrap, and finally, the irreversible losses of lithium. Recycling affects the price of lithium in the global market and the mechanism that switches the source of lithium that must be extracted concerning the cost of its extraction. The model does not consider the second life phase, which begins when the retention capacity of a battery falls below 75%, making it no longer helpful for use in electric cars but can be used in energy domestic backup systems.

The market segment is the connection between the mining and social segments. This segment begins by considering the total demand for lithium regardless of its use, the amount of lithium available on the market, the price of lithium, the cost of extraction, and finally, the fraction of recycled lithium and its substrate grade. The main outputs of the segment are the supply of lithium in the market, the market response to recycling, an extraction price averaging mechanism, and the amount of lithium required per car. This last factor represents the battery's energy density and is very relevant in various outputs of the model. The authors established this factor as a parameter, which prevents its value from evolving at the pace of the simulation.

The social segment shapes lithium in the industry and the world. The segment inputs are the supply of lithium in the market, the market response to recycling, and the amount of lithium per electric car. The model represents the distribution of lithium to its different destination industries through a proportion variable. The rest of the lithium is distributed to other industries through fixed factors, so the model cannot record changes between distribution percentages.

The useful life of a battery (the number of charge cycles that a battery can have before losing a certain retention capacity) is considered a parameter, so the model cannot record the technological improvement of this property of batteries in time.

The supply chain model has limitations: a) it does not consider the stages of lithium refining, battery manufacturing, distribution, second life, collection or recycling, b) it does not

consider political or environmental aspects, c) two variables of important technological evolution are represented as parameters, d) the model assumes that the percentages of lithium distribution between industries other than batteries are fixed and e) all uncertain parameters of the model are represented through table functions, with historical data to date. of model development and then data determined under the experience of the authors, instead of using probability distribution functions.

Conclusions

The LITHIUM model emphasizes the critical role of Li recycling in maintaining its flow in society, especially when production decreases. Recycling impacts the global market price of Li and influences the source of its extraction based on cost. The model does not account for the second life phase of LiBs, which begins when their retention capacity falls below 75%. This phase is significant for applications like domestic energy backup systems. LiBs SC models must take in count EOL LiBs and recycling to reach an optimal efficiency.

About market dynamics, the model highlights the relationship between Li extraction, market price, and the availability of reserves. It considers known and unknown reserves, ore grade, and mining technology, but does not include the refining stage of lithium compounds. This stage must be present in any LiB supply chain model.

Analyzed model represents the distribution of Li to various industries through a proportion variable, but it cannot record changes in distribution percentages. It also considers the total demand for Li, the amount available in the market, and the fraction of the recycled element.

Technological progress and global policy modifications can significantly impact the LiBs supply network. Scenario analysis used in this research explored these potential implications, providing valuable insights for industry participants and decision-makers. The mining rate of Li is influenced by the technological factor. The mining rate equation indicates that mining intensity increases with technological advancements and higher demand. Advanced mining technology can improve the efficiency of Li extraction from various substrates, including high-grade rock (pegmatites), brines, and lateritic clays. This efficiency helps in better utilization of available reserves. The model uses extraction-type change controllers that switch between high and low-quality substrates based on market prices. Improved technology can lower extraction costs, making it feasible to mine from lower-quality substrates, thus extending the life of Li reserves. As technology improves, the ability to extract it from previously uneconomical sources increases. This means that known reserves can be exploited more fully, and the effective amount of extractable Li. Our scenario analysis shows that as the amount of Li

required per electric car decreases, the reserves last longer. In summary, mining technology significantly influences Li reserves by improving extraction efficiency, enabling the use of lower-quality substrates, and reducing the amount of Li required per application, thereby extending the lifespan of available reserves.

References

- Alessia, A., Alessandro, B., Maria, V.-G., Carlos, V.-A., & Francesca, B. (2021). Challenges for sustainable lithium supply: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 300, 126954. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126954>
- Barman, P., Dutta, L., & Azzopardi, B. (2023). Electric Vehicle Battery Supply Chain and Critical Materials: A Brief Survey of State of the Art. *Energies*, 16(8), 3369. <https://doi.org/10.3390/en16083369>
- Biney, J., Jones Jnr, E. C., & Jones, E. C. (2024). Assessing the Impacts of Domestic Lithium Processing Capacity Expansion on the Battery Supply Chain. *International Supply Chain Technology Journal*, 10(2). <https://doi.org/10.20545/isctj.v10i2.328>
- Calisaya-Azpilcueta, D., Herrera-Leon, S., Lucay, F. A., & Cisternas, L. A. (2020). Assessment of the Supply Chain under Uncertainty: The Case of Lithium. *Minerals*, 10(7), 604. <https://doi.org/10.3390/min10070604>
- Cedillo-Campos, M. G., Sánchez-Ramírez, C., Vadali, S., Villa, J. C., & Menezes, M. B. C. (2014). Supply chain dynamics and the “cross-border effect”: The U.S.–Mexican border’s case. *Computers & Industrial Engineering*, 72, 261–273. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.03.015>
- Jung, F., Schröder, M., & Timme, M. (2023). *Exponential Adoption of Battery Electric Cars* (arXiv:2306.16152). arXiv. <http://arxiv.org/abs/2306.16152>
- Liu, D., Gao, X., An, H., Qi, Y., Sun, X., Wang, Z., Chen, Z., An, F., & Jia, N. (2019). Supply and demand response trends of lithium resources driven by the demand of emerging renewable energy technologies in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 145, 311–321. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.02.043>
- Liu, Z., Liu, G., Cheng, L., Gu, J., Yuan, H., Chen, Y., & Wu, Y. (2024). Development of sustainable and efficient recycling technology for spent Li-ion batteries: Traditional and

- transformation go hand in hand. *Green Energy & Environment*, 9(5), 802–830. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2023.09.001>
- Maisel, F., Neef, C., Marscheider-Weidemann, F., & Nissen, N. F. (2023). A forecast on future raw material demand and recycling potential of lithium-ion batteries in electric vehicles. *Resources, Conservation and Recycling*, 192, 106920. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.106920>
- Marmolejo Cervantes, M. Á., & Garduño-Rivera, R. (2021). Mining-Energy Public Policy of Lithium in Mexico: Tension between Nationalism and Globalism. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3924366>
- Mousavinezhad, S., Nili, S., Fahimi, A., & Vahidi, E. (2024). Environmental impact assessment of direct lithium extraction from brine resources: Global warming potential, land use, water consumption, and charting sustainable scenarios. *Resources, Conservation and Recycling*, 205, 107583. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107583>
- Mutanov, G., Ziyadin, S., & Serikbekuly, A. (2020). Application of System-Dynamic Modeling to Improve Distribution Logistics Processes in the Supply Chain. *Communications - Scientific letters of the University of Zilina*, 22(3), 29–39. <https://doi.org/10.26552/com.C.2020.3.29-39>
- Newsheen Sharmili, Rakesh Nagi, & Pingfeng Wang. (2023). A review of research in the Li-ion battery production and reverse supply chains. *Journal of Energy Storage*, 68, 107622–107622. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107622>
- Pesaran, A. A. (2023). Lithium-Ion Battery Technologies for Electric Vehicles: Progress and challenges. *IEEE Electrification Magazine*, 11(2), 35–43. <https://doi.org/10.1109/MELE.2023.3264919>
- Ren, Z., Li, H., Yan, W., Lv, W., Zhang, G., Lv, L., Sun, L., Sun, Z., & Gao, W. (2023). Comprehensive evaluation on production and recycling of lithium-ion batteries: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 185, 113585. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113585>
- Sutopo, W., Maryanie, D. I., Purwanto, A., & Nizam, M. (2013). A comparative value chains analysis of battery technologies for electric vehicles. *2013 Joint International Conference on Rural Information & Communication Technology and Electric-Vehicle Technology (rICT & ICeV-T)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/rICT-ICeVT.2013.6741514>

- Sverdrup, H. U. (2016). Modelling global extraction, supply, price and depletion of the extractable geological resources with the LITHIUM model. *Resources, Conservation and Recycling*, 114, 112–129. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.07.002>
- Tama, I. P., Akbar, Z., & Eunike, A. (2018). Implementation of system dynamic simulation method to optimize profit in supply chain network of vegetable product. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 337, 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/337/1/012014>
- Thies, C., Kieckhäfer, K., Spengler, T. S., & Sodhi, M. S. (2019). Assessment of social sustainability hotspots in the supply chain of lithium-ion batteries. *Procedia CIRP*, 80, 292–297. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.12.009>
- Villa-Mendoza, K. S., Santoyo-Castelazo, E., Otero-Herrera, L., Vallarta-Serrano, S. I., & Ramirez-Mendoza, R. A. (2023). Lithium-Ion Batteries in Mexico: Electromobility Application and Supply Chain Overview. *2023 International Symposium on Electromobility (ISEM)*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/ISEM59023.2023.10334791>
- Vivoda, V., Bazilian, M. D., Khadim, A., Ralph, N., & Krame, G. (2024). Lithium nexus: Energy, geopolitics, and socio-environmental impacts in Mexico's Sonora project. *Energy Research & Social Science*, 108, 103393. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103393>
- Wentker, M., Greenwood, M., Asaba, M. C., & Leker, J. (2019). A raw material criticality and environmental impact assessment of state-of-the-art and post-lithium-ion cathode technologies. *Journal of Energy Storage*, 26, 101022. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.101022>
- Xu, C., Dai, Q., Gaines, L., Hu, M., Tukker, A., & Steubing, B. (2020). Future material demand for automotive lithium-based batteries. *Communications Materials*, 1(1), 99. <https://doi.org/10.1038/s43246-020-00095-x>

COORDINADORES

Miguel Gaston Cedillo-Campos

El Dr. Gastón Cedillo cuenta con más de 20 años de experiencia en logística, consolidándose como un actor clave en el rediseño de cadenas de suministro en contextos complejos y cambiantes. Su perfil no es solo como un reconocido académico: es un constructor de plataformas de valor que conectan la inteligencia logística con la toma de decisiones.

Actualmente, es responsable de la Iniciativa Estratégica Nacional en Logística del Tecnológico de Monterrey y miembro del Texas Center for Border Economic and Enterprise (Texas A&M International University), desde donde ha impulsado modelos de colaboración binacional y estrategias aplicadas al fenómeno del *"Nearshoring."*

Diseñó y fundó el primer centro de investigación en cadenas de suministro de México, el Centro de Investigación y Desarrollo de Cadenas de Suministro (CiDECS) en el Tec de Monterrey, Campus Guadalajara. Igualmente, diseñó y cofundó el Laboratorio Nacional CONACYT en Sistemas de Transporte y Logística, con sede principal en el Instituto Mexicano del Transporte (IMT). También es iniciador y cofundador tanto de la Asociación Mexicana de Logística y Cadena de Suministro (AML), como del Clúster para la Innovación Logística de Querétaro (CiLQRO), así como consejero del Clúster Logístico de San Luis Potosí (CLSLP), desde donde impulsa ecosistemas de colaboración entre la industria, la academia y el gobierno.

Formado en Francia como Doctor en Sistemas de Transporte y Logística por la Universidad de París, cuenta además con dos Maestrías y una Especialidad en el área. Ha sido reconocido con premios nacionales e internacionales, entre ellos el Premio Nacional de Logística, el Premio InterTraffic Latinoamérica, el Premio UANL a la Innovación Tecnológica y el Premio Anáhuac al Liderazgo en Ingeniería.

Su impacto también se refleja en el conocimiento que genera y comparte a través de más de 50 publicaciones en revistas científicas de alto impacto, 3 libros, 8 libros científicos como co-editor, múltiples capítulos técnicos y más de 40 conferencias internacionales. Ha formado talento en todos los niveles académicos y liderado investigaciones de alto impacto aplicadas al mundo real.

María Paz Guadalupe Acosta Quintana

Profesor investigador del Departamento de Ingeniería Industrial del Instituto Tecnológico de Sonora. Líder del Cuerpo Académico Consolidado de Cadenas Productivas, miembro del núcleo académico de la Maestría en Ingeniería en Logística y Calidad y de los programas de Licenciatura en Ingeniería Industrial y de Sistemas e Ingeniería en Logística. Pertenece al Sistema Nacional de Investigadores (Candidata) CONAHCYT. En el 2001 recibió el reconocimiento al Mérito Estudiantil otorgado por la Universidad Autónoma de Baja California por la titulación oportuna y el promedio obtenido durante sus estudios de Posgrado. En 2012, recibió la Mención Honorífica por el Doctorado en Logística y Dirección de la Cadena de Suministros (UPAEP). Es miembro del comité editorial del Instituto Tecnológico de Sonora y forma parte del comité técnico del Congreso Internacional en Logística y Cadena de Suministro. Además, colabora en proyectos del Laboratorio Nacional de Sistemas de Transporte y Logística-ITSON como miembro del equipo de proyectos. Es miembro de la Asociación Mexicana de Logística. Ha asesorado trabajos de tesis tanto a nivel licenciatura como maestría en temas relacionados con Cadena de Suministro y Logística, aplicando herramientas de Lean Logistics, modelación matemática, programación de la producción, entre otras, cuyos proyectos han permitido generar desarrollos tecnológicos y artículos que se han presentado en congresos y trabajos publicados en revistas indexadas. Cuenta con el reconocimiento al perfil deseable de PRODEP y ha sido reconocida desde 2002 a la fecha dentro del programa de desempeño académico que maneja el Instituto Tecnológico de Sonora. Sus principales contribuciones han sido soluciones para el sector industrial y de servicios a través de la solución de problemas que han impactado en la reducción de costos como en la mejora de sus procesos y servicio.

Carlos Daniel Martner-Peyrelongue

El Dr. Carlos Martner es uno de los referentes más reconocidos en América Latina en la integración territorial del transporte y la logística multimodal. Con una trayectoria de más de tres décadas vinculando la planeación urbana, la movilidad de mercancías y la operación de puertos y corredores logísticos, su trabajo ha inspirado políticas públicas, estrategias empresariales y desarrollos académicos que hoy redefinen cómo se mueve el comercio en la región.

Actualmente es Coordinador de Integración del Transporte en el Instituto Mexicano del Transporte (IMT), donde lidera proyectos que conectan la infraestructura física con los grandes desafíos de eficiencia, sostenibilidad y competitividad logística del país. Además, es miembro del Sistema Nacional de Investigadores del CONACYT, lo que avala la profundidad técnica de sus contribuciones.

Con estudios de doctorado en Desarrollo Regional y Transporte en la UAM-X, el Dr. Martner combina una sólida base académica, con una visión aplicada al desarrollo económico y logístico de los territorios. Es un impulsor clave de la logística marítima y la integración modal de los puertos, áreas en las que forma a nuevas generaciones como profesor visitante en universidades de México y América Latina.

Es autor de múltiples publicaciones científicas y capítulos especializados, y un conferencista habitual en foros de alto nivel como el Congreso Internacional de Logística y Cadena de Suministro (CiLOG), donde comparte estrategias basadas en evidencia para una logística más conectada, resiliente y alineada con el desarrollo regional.

Para los tomadores de decisiones del sector logístico, el Dr. Martner representa un puente entre el conocimiento técnico y la toma de decisiones estratégicas. Su enfoque combina análisis territorial, diseño de sistemas de transporte y visión de largo plazo, con el objetivo: transformar la logística en un verdadero motor de crecimiento regional.

**Estrategias y soluciones en Logística:
Modelos avanzados y tecnología para un mundo en constante cambio**

Se terminó de editar en Ciudad Obregón, Sonora; el 30 de julio de 2025, por la Oficina de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Sonora. Fue puesto en línea para su disposición en el sitio <https://www.itson.mx/publicaciones/> en la sección Ingeniería y tecnología.

Estrategias y soluciones en logística: Modelos avanzados y tecnología para un mundo en constante cambio

El libro presenta un compendio de investigaciones organizadas en cuatro secciones temáticas que abordan distintos enfoques para la mejora de procesos logísticos e industriales. La primera sección incluye aplicaciones de simulación y métodos avanzados de optimización, como FlexSim en manufactura cerámica, el uso de GRASP para rutas con ventanas de tiempo, algoritmos genéticos para la recolección de residuos, localización óptima de unidades de negocio y la comparación de algoritmos inspirados en la conducta humana. En la segunda sección se destacan estudios sobre procesos logísticos, como el análisis del cumplimiento normativo en el transporte de carga mediante GPS, la relación entre personalidad y accidentes, el potencial del transporte intermodal, modelos de pronóstico de demanda y mejoras operativas mediante DMAIC. La tercera sección se centra en la gestión de almacenes y logística esbelta, incluyendo reacomodo de materiales en el sector automotriz, casos de éxito en galvanizado, gestión de inventarios en energía y simulaciones de capacidad en plantas recicladoras. Finalmente, la cuarta sección explora el desarrollo de infraestructura y tecnología, como el análisis de aeropuertos clave para el Corredor Interoceánico, tecnologías de aforo vehicular, centros de acopio para PET en la economía circular y el modelo LITHIUM aplicado a la cadena de suministro de baterías de litio. En conjunto, estos estudios ofrecen soluciones prácticas y reflexiones académicas con un alto valor técnico y aplicado, dirigidos no solo a investigadores y académicos, sino también a profesionales, consultores y tomadores de decisiones en políticas públicas. Este compendio se presenta como una obra de referencia fundamental para enfrentar los desafíos logísticos contemporáneos, promoviendo un enfoque reflexivo y estratégico para el diseño de sistemas más eficientes, sostenibles y resilientes en el ámbito de la logística y la ingeniería industrial.



MéxicoLogístico®

Asociación Mexicana de Logística & Cadena de Suministro, A.C



International Congress on
Logistics & Supply Chain