

CULCYT

CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA • ISSN 2007-0411



VOLUMEN 20 | NÚMERO 2

MAYO - AGOSTO 2023

Directorio Institucional

Mtro. Juan I. Camargo Nassar
RECTOR

Dr. Daniel Constandse Cortez
SECRETARIO GENERAL

Dr. Juan F. Hernández Paz
DIRECTOR DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

Mtro. Jesús Meza Vega
DIRECTOR GENERAL DE COMUNICACIÓN UNIVERSITARIA

Dra. Nelly Gordillo Castillo
COORDINADORA DE APOYO AL DESARROLLO DE
LA INVESTIGACIÓN Y AL POSGRADO DEL IIT

Comité Editorial

Dra. Nelly Gordillo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ
Editora en Jefe

Mtro. Raúl Alfredo Meza González
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ
Coordinador Editorial

Dr. Víctor Manuel Castaño Meneses
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. Ramón Gerardo Guevara González
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

Dra. Klavdia Oleschko Lutkova
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. Abdiel Ramírez Reyes
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Dra. Santos Adriana Martel Estrada
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Dr. David Cortés Sáenz
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ

Dr. David Ortega Gaucín
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

CULCYT se fundó en diciembre de 2003 como parte del programa para la formación de investigadores del Instituto de Ingeniería y Tecnología. Lanzó su primer número en abril de 2004. Fundador: Dr. Victoriano Garza Almanza. A partir de 2019, ha fungido como Editora en Jefe la Dra. Nelly Gordillo Castillo.

CULCYT. CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Vol. 20, núm. 2, mayo-agosto 2023, es una publicación académica, editada de manera cuatrimestral por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, a través del Instituto de Ingeniería y Tecnología.

D.R. © UACJ, Avenida del Charro núm. 619 norte, C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

Editora responsable: Dra. Nelly Gordillo Castillo.

Reserva de derechos al uso exclusivo núm. 04-2021-060118164700-203.

ISSN (electrónico): 2007-0411.

Sitio OJS: erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt. Correo electrónico: culcyt@uacj.mx. Teléfono +52 (656) 6884848.

DOI: [10.20983/culcyt.2023.2](https://doi.org/10.20983/culcyt.2023.2)

Modalidad de publicación continua. Tan pronto como un artículo ha sido preparado, se publica en línea.

Los trabajos a publicar en CULCYT deben ser originales e inéditos. En este momento, la revista no tiene costos de publicación para los autores.

El acceso a la revista es libre, sin requerimientos, bajo lo establecido en la normatividad mexicana de acceso abierto, y se da a través de su sitio

<https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt>

o mediante el Repositorio Institucional de la UACJ

<http://ri.uacj.mx/vufind/>



Los artículos firmados son responsabilidad de sus autores.

Se autoriza la reproducción total o parcial, siempre y cuando se cite la fuente.

Información para autores:

<https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/autores>

Los contenidos e imágenes de la publicación están sujetos a una licencia CC 4.0 internacional BY NC.



Contenido
CONTENTS

Artículos de investigación / Research articles

Incentivos como instrumento para mejorar la productividad y eficiencia de una microempresa purificadora de agua **4**

Incentives as an instrument to improve the productivity and efficiency of a water purification microenterprise
Roberto Carlos Carreón Romero, Alfredo Ramírez Torres

Análisis experimental de un dispositivo tope de impacto como atenuador de vibraciones en banco experimental **11**

Experimental analysis of an impact absorber device as a vibration attenuator in an experimental bench
Luis Alberto Baltazar Tadeo, Claudia Cortés García, Eladio Martínez Rayón

Edición especial IWIELF 2022 / Special edition IWIELF 2022

Presentación **E1**

Impacto del liderazgo transaccional en el rendimiento operativo **E2**

Impact of transactional leadership on operational performance
Maribel Mendoza Solís, Jorge Luis García Alcaraz

Gestión de riesgos operacionales en el transporte primario del aguacate Hass **E12**

Operational risks management in the primary transport of Hass avocado
Marcela Cañas Osorio, Alejandro Serna Grisales, Vivian Lorena Chud Pantoja, Juan Carlos Osorio Gómez

Beneficios de Gestión Visual sobre Justo a Tiempo en la industria maquiladora **E20**

Benefits of Visual Management over Just in Time in the maquiladora industry
José Roberto Díaz-Reza, Jorge Luis García-Alcaraz, Luis Javier Márquez Figueroa

Control de inventario mediante método ABC para una empresa de transporte: Análisis sistémico por familias **E29**

Inventory control by ABC method for a transport company: Systemic analysis by families
Dra. Paula Rosalinda Antonio Vidaña, Dra. Rocío Ramos Hernández, Dra. Ivette Pérez Hernández

Impacto ambiental en la cadena de suministro: Una revisión bibliométrica **E37**

Environmental impact in the supply chain – A bibliometric review
Ingrid Iovana Burgos Espinoza, Jorge Luis García Alcaraz, Liliana Avelar Sosa

Diseño de simulador que identifica variables clave y su impacto en la producción de chayote **E47**

Simulator design that identifies key variables and their impact on chayote production
Héctor Daniel García Castro, Cuauhtémoc Sánchez Ramírez, Magno Ángel González Huerta

Dinámica de sistemas para la gestión de salidas de un almacén de certificación portuaria **E55**

Systems dynamics for the management of a certification port storage's orders
Dra. Rocío Ramos Hernández, Dra. Jesabel Gómez Sánchez, Dra. Paula Rosalinda Antonio Vidaña

Incentivos como instrumento para mejorar la productividad y eficiencia de una microempresa purificadora de agua

Incentives as an instrument to improve the productivity and efficiency of a water purification microenterprise

Roberto Carlos Carreón Romero¹, Alfredo Ramírez Torres¹✉

¹Tecnológico Nacional de México | Campus Zacapoaxtla | División de Ingeniería Industrial | Zacapoaxtla, Puebla, México

RESUMEN

El presente trabajo surge de la necesidad de una microempresa purificadora de agua de Teziutlán, Puebla, México, de incrementar su productividad y hacer más eficiente su proceso de producción, ya que no cumple con la demanda de los clientes, así como de motivar a sus trabajadores a cumplir sus metas. Se aplicó y adaptó una metodología ya probada en otros estudios de caso donde se realiza producción en serie. Para lograr la meta de producción se realizó un análisis de proceso mediante un desglose de operaciones, así como un análisis de las operaciones de manufactura, por medio de un estudio de tiempos y movimientos con cronómetro, balanceo de línea y aplicación de tarifas diferenciales a los salarios. Al adaptar y aplicar la metodología se logró mejorar la productividad de 1.67 a 1.51 \$/unidad (pesos mexicanos / garrafón de 19 litros lleno), la eficiencia pasó del 67.54 al 93.80 %, los trabajadores lograron un incremento salarial mínimo de 18.73 % y máximo de 31.93 % dependiendo de la estación de trabajo. Además, con la nueva organización para el trabajo se logró cubrir la demanda de los clientes.

PALABRAS CLAVE: incentivos; eficiencia; producción; microempresa.

ABSTRACT

This work arises from the need for a water purification microenterprise in Teziutlan, Puebla, Mexico, to increase its productivity and make its production process more efficient since it does not meet customer demand, as well as to motivate its workers to meet their goals. We applied and adapted a methodology already proven in other case studies where mass production is carried out. To achieve the production goal, a process analysis was carried out employing a breakdown of operations, as well as an analysis of manufacturing operations through a time and motion study with a stopwatch, line balancing, and the application of differential wage rates. By adapting and applying the methodology, productivity improved from 1.67 to 1.51 \$/unit (Mexican pesos / 5 gallon water bottle), efficiency went from 67.54 to 93.80% and workers achieved a minimum wage increase of 18.73% and a maximum of 31.93% depending on the workstation. In addition, with the new work organization, it was possible to meet customer demand.

KEYWORDS: incentives; efficiency; production; microenterprise.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Alfredo Ramírez Torres
INSTITUCIÓN: Tecnológico Nacional de México, Campus Zacapoaxtla, División de Ingeniería Industrial
DIRECCIÓN: Carretera Acuaco-Zacapoaxtla km 8, col. Totoltepec, C. P. 73680, Zacapoaxtla, Puebla, México
CORREO ELECTRÓNICO: alfredo.rt@zacapoaxtla.tecnm.mx

Fecha de recepción: 13 de julio de 2023. **Fecha de aceptación:** 18 de agosto de 2023. **Fecha de publicación:** 28 de agosto de 2023.



I. INTRODUCCIÓN

Cualquier empresa que aspire a ser exitosa debe proporcionar a sus miembros algún incentivo a cambio de sus esfuerzos y contribución hacia la organización [1]. Por lo tanto, un sistema de incentivos será una variable apta para modificar y modelar el comportamiento organizacional.

Desde 1961, Clark y Wilson distinguieron tres tipos de organizaciones con base en el sistema de incentivos aplicado [2]: las *utilitarias*, que son aquellas que buscan principalmente una ganancia económica, entre ellas firmas lucrativas, la industria manufacturera y los comercios; las *solidarias*, como universidades, hospitales, organizaciones de asistencia pública, es decir, aquellas que no tienen como fundamento el enriquecimiento y sí proveer un beneficio social; y las organizaciones *con propósito*, que son aquellas que promueven o educan con un propósito superior, también identificadas como organizaciones ideológicas, que generalmente luchan por libertades, derechos o incluso por ideales radicales.

De esta manera se distinguen los *incentivos materiales*, los cuales tienen la característica de ser monetarios o pueden ser transformados fácilmente en dinero, y que se aplican generalmente en las organizaciones utilitarias; los *incentivos solidarios*, que son intangibles, al igual que los *incentivos con propósito*, y están relacionados especialmente con la socialización, el sentido de pertenencia, el estatus y la convalidación. Adicionalmente, los incentivos con propósito derivan principalmente de los principios declarados en la organización. Estos se aplican en las organizaciones solidarias y de propósito respectivamente.

Por tanto, el concepto de incentivo está asociado con una recompensa, ya sea tangible o intangible, que motivará al personal a crear un entorno favorable para maximizar el desempeño o alcanzar una meta. De manera más general se distinguen dos tipos de incentivos: los *intrínsecos* y los *extrínsecos* [3], los cuales tienen diferentes efectos en las organizaciones. Los incentivos intrínsecos (intangibles) están relacionados con el propio trabajo, es decir, empoderamiento, reconocimiento, autonomía, reputación y confianza, y producen satisfacción personal, responsabilidad laboral, compromiso emocional y empatía hacia la organización. Los incentivos extrínsecos (tangibles) incluyen pagos extras, regalos, prestaciones complementarias, oportunidades de

ascenso y tienen principal importancia en mantener la fidelidad de los empleados hacia la organización y garantizar el cumplimiento de metas productivas. Y aunque los incentivos es uno de los factores que más influye en el desempeño de las organizaciones, son escasamente aplicados en la gestión del capital humano [4].

Uno de los supuestos a comprobar en este trabajo es que al desarrollar un esquema particular y completo de incentivos se incrementará la productividad de la microempresa de este estudio de caso. Para desarrollar e implementar un esquema de incentivos se usó la Metodología de Incentivos y Organizacional (MIO) [5], un sistema de incentivos extrínseco que es, por ende, apto para aplicarse en una empresa del tipo utilitaria que, en este caso es una microempresa purificadora de agua.

La MIO se aplicó a una empresa textil logrando un incremento en la producción de tela para colchón de un 47 % a un 73 %, hablando en términos de productividad. En este mismo caso, el salario de los trabajadores tuvo un incremento aproximado de un 16 % [5]. Debido a este antecedente y a las características de la microempresa purificadora de agua, se ha realizado la adaptación de la MIO para buscar mayor productividad, eficiencia y motivación en la microempresa, así como la satisfacción de los clientes.

El estudio tuvo una duración de 12 semanas [6]. El diagnóstico inicial sobre una de las líneas de producción de la microempresa purificadora de agua arrojó una producción promedio de 360 garrafones llenos de agua purificada por día, lo que representó una eficiencia (e) del 67.54 %, lo cual ocasionaba que no se cubriera la demanda diaria y generara poca confianza por parte de los clientes. Al adecuar y aplicar la MIO, se logró que la eficiencia alcanzara el 93.80 %, que el salario de los trabajadores aumentara entre 18.73 y 31.93 %, y que se generara un círculo virtuoso, ya que los clientes al recibir sus pedidos muestran fidelidad con la microempresa.

II. METODOLOGÍA

La metodología de incentivos y organizacional [5] está diseñada para aplicarse en sistemas de manufactura en serie, en maquiladoras del ramo textil principalmente, y busca, sobre todo, que las líneas de producción aumenten el número de unidades producidas (garrafones llenos, para este caso) en la jornada laboral, balanceando

líneas y disminuyendo el tiempo de operación, así como incrementando el salario de los trabajadores.

La metodología incluyó las 14 etapas siguientes: 1) análisis del proceso productivo, 2) determinación de indicadores de líneas de producción, 3) análisis de salarios y metas de producción, 4) cálculo de tiempos estándar, 5) determinación de comodines, 6) cálculo de parámetros para el balanceo de líneas, 7) balanceo de líneas, 8) análisis de tiempo ocioso de operadores y comodines, 9) determinación de cuellos de botella, 10) optimización de personal, 11) determinación de tarifas diferenciales para los incentivos, 12) premios por eficiencia, 13) medición y control y, finalmente, 14) cálculo de salarios con el incentivo aplicado.

A grandes rasgos, la MIO hace una recolección de datos en campo del proceso productivo para, posteriormente, hacer un análisis cuantitativo de los datos obtenidos, implementar una mejor organización industrial y, por último, aplicar una combinación de incentivos salariales para motivar a los trabajadores [7]-[10].

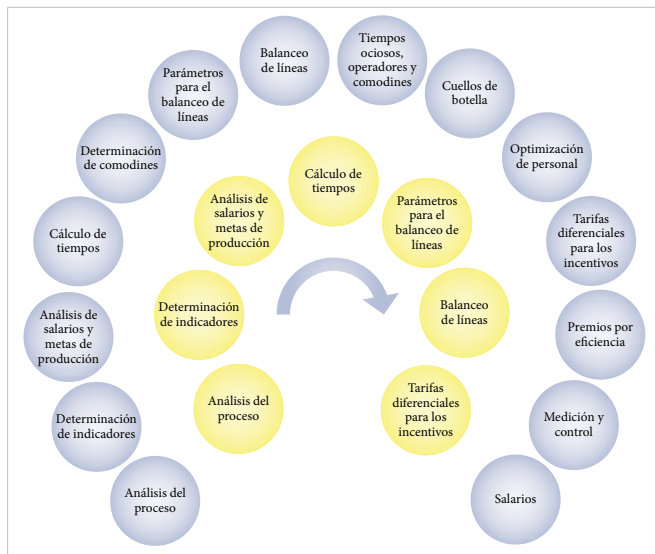


Figura 1. El circuito de esferas grises representa el esquema de la metodología de incentivos y organizacional descrita en [4], mientras que el circuito de esferas amarillas son los pasos que se aplicaron en el presente trabajo.

En este estudio, la MIO no fue aplicada en su totalidad, ya que la metodología se diseñó para sistemas de maquila textil con sus características especiales, sin embargo, se adaptó para aplicarse a la microempresa purificadora de agua. La Figura 1 muestra las etapas de la MIO. El circuito exterior de esferas grises es la metodología original, mientras que el circuito interior de esferas

amarillas son las etapas que se aplicaron en el presente estudio. Con los siete pasos mostrados en amarillo se estará cubriendo el espíritu de la metodología, toma de datos en campo, análisis de datos, mejor organización del trabajo y aplicación de incentivos.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se describen los resultados obtenidos, de acuerdo con la secuencia de puntos aplicados de la MIO.

ANÁLISIS DEL PROCESO PRODUCTIVO

El primer paso fue hacer un análisis del proceso productivo antes de realizar cualquier modificación. En la Tabla 1 se enlistan las actividades: 9 operaciones realizadas por 3 operarios. Las operaciones estaban divididas de forma empírica, es decir, en función del consecutivo de la división de las operaciones, y como estas son nueve, se dividieron en tres estaciones de trabajo (gris, azul y verde) con tres operaciones cada una y una estación para cada operario.

TABLA 1
TIEMPOS ESTÁNDAR PARA EL PROCESO DE LLENADO DE GARRAFÓN DE AGUA

NÚMERO DE OPERACIÓN	OPERARIO	OPERACIÓN CON EL GARRAFÓN	TIEMPO ESTÁNDAR (MIN)
1	A	Revisarlo	0.500
2		Quitar sello y tapa	0.067
3		Lavarlo por dentro y fuera	0.333
4	B	Eliminar etiquetas extrañas	0.167
5		Llenarlo	0.500
6	C	Colocar la tapa	0.050
7		Colocar etiqueta de tapa	0.167
8		Ajustar etiqueta de tapa	0.083
9		Colocar empaque de llave	1.000
		Total	2.867

DETERMINACIÓN DE INDICADORES DE LÍNEAS DE PRODUCCIÓN

La segunda etapa fue la determinación de indicadores [11], ya sean de eficiencia, costo y/o calidad, pero para este caso los indicadores que se utilizan son productividad (P) y eficiencia (e). Por requerimientos de la empresa, aquí se define a la P en la Ecuación (1):

$$P = \frac{N_m}{P_s} \quad (1)$$

donde N_m = nómina de manufactura por semana y P_s = producción de unidades por semana.

La e se define como la relación entre la producción real (P_r) y la producción estimada (P_e):

$$e = \frac{P_r}{P_e} \quad (2)$$

La P_e es la relación de la jornada laboral efectiva multiplicada por el número de operadores en la línea entre el tiempo de producción por unidad. La producción estimada se obtuvo del estudio de tiempos y movimientos realizado en este estudio y la decisión de gerencia.

La microempresa tiene condiciones laborales que para efectos de este trabajo no entrarán a juicio ni a discusión. Por tanto, se consideró una jornada de 8.5 horas efectivas diarias, es decir, descontando comida y descansos, y 6 días a la semana. Los indicadores iniciales en la microempresa son una $P = 1.67$ \$/u y $e = 67.54$ %, donde u corresponde a una unidad: un garrafón de 19 litros lleno.

ANÁLISIS DE SALARIOS Y METAS DE PRODUCCIÓN

Al realizar este análisis, se detectó una disputa entre la gerencia y los operarios de la línea, ya que la primera argumentaba que de acuerdo a la experiencia en otras empresas se puede lograr una producción estimada de 200 unidades por día por operador (600 unidades por línea), mientras que los segundos señalaban que algunos trabajan más que otros, que por ello el salario no es el justo para cada uno (1200 \$/semana) y que, además, consideraban inalcanzable la meta de gerencia.

Esta disputa provocaba una falta de compromiso y motivación en los operarios para realizar sus tareas. Asimismo, la microempresa ha tenido un pronóstico de demanda de 500 u/día/línea, según sus registros históricos. Esta demanda será la meta de producción para el presente caso.

CÁLCULO DE TIEMPOS ESTÁNDAR

En este cuarto paso se utilizó la metodología del desglose de operaciones y cronómetro [12]. La Tabla 1 también condensa los resultados obtenidos. Se encontró que el tiempo de producción por unidad es de 2.867 minutos.

CÁLCULO DE PARÁMETROS PARA BALANCEO DE LÍNEAS

En la Figura 2 se muestra una gráfica de las cargas de trabajo [13], [14] iniciales. Se puede visualizar de una manera muy clara que los tiempos estaban desbalanceados, encontrando que el tiempo ciclo más alto es de 1.250 min. Con una meta de producción de 500 unidades se tiene un *takt time* [15] de 1.02 min.

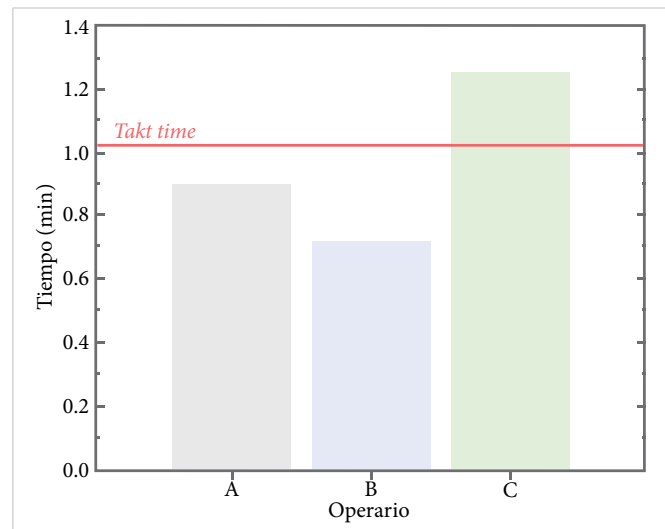


Figura 2. Gráfica de cargas por operario (estación de trabajo). La línea roja representa el *takt time*, es decir, el tiempo necesario para cumplir con la demanda de los clientes.

BALANCEO DE LÍNEAS

Si se considera que el tiempo ciclo máximo en una línea de producción marca el ritmo a lo largo de la jornada laboral, con el tiempo ciclo de 1.250 min el máximo de producción por día será de 408 garrafones llenos, cantidad que es insuficiente para cumplir con la demanda de los clientes. Para corregir este problema, el tiempo ciclo mayor tendrá que estar por debajo del *takt time* y, por ende, es necesario balancear la línea de producción.

La Figura 3 muestra el balanceo de la línea. El operario A se mantuvo sin cambios y las modificaciones se dieron sobre los operarios B y C: al B se le aumentó operaciones y al C se le redujeron para bajar su tiempo ciclo, ya que este era un cuello de botella. Como resultado, el nuevo tiempo ciclo máximo es de un minuto, el cual es menor que el *takt time*, con lo que es posible cumplir con la demanda de los clientes. Este nuevo tiempo ciclo arrojó una producción máxima de 510 unidades por día.

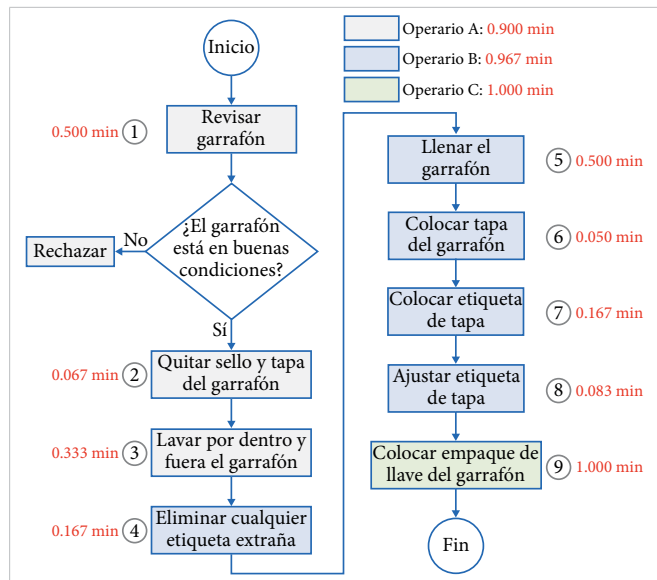


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de llenado de garrafón. La línea de producción se ha balanceado para cumplir con la demanda de los clientes. Los operarios B y C sufren modificaciones para obtener un nuevo tiempo ciclo máximo de 1 min.

DETERMINACIÓN DE TARIFAS DIFERENCIALES PARA LOS INCENTIVOS

Una de las características primordiales de la MIO es el uso de incentivos salariales, en específico, diferenciales. Dentro de este tipo de incentivos salariales se tiene los Gantt por tarea, Taylor, Emerson, Merrick, etc. [10].

Algunos garantizan un salario base y otros no, pero la característica general es que si el trabajador alcanza la norma de producción recibirá en automático un premio y, en caso contrario, solo recibirá el salario base o una reducción de salario y al superar la norma la remuneración variará en una proporción diversa según los niveles de producción.

En la implementación del presente sistema no hay un salario base garantizado y se han establecido tres niveles de producción hasta llegar a la norma de producción (500 unidades). También se ha calculado un costo por operación (CO), estableciendo un salario estándar (SE = 200 \$/ día) y empleando la jornada de trabajo completa (9.5 h). De esta manera, el CO se calcula dividiendo el SE entre el número de operaciones que se pueden realizar en la jornada de trabajo completa. Posteriormente se asigna un salario por operación de acuerdo al nivel de producción, multiplicando el CO por la cota inferior de los niveles de producción y por la tasa diferencial, nivel 1 al 100 %, nivel 2 al 120 %, y nivel 3 al 160 %. Los salarios semanales variarán de acuerdo a los niveles de producción diarios de cada operario, ya que el incentivo es diferencial y diferenciado. La [Tabla 2](#) muestra estos datos para los operarios A, B y C. El salario semanal al que pueden aspirar si cumplen con la norma de producción es de 1424.8, 1530.9 y 1583.2 \$, lo que representa un incremento salarial mínimo de 18.73 % y máximo de 31.93 %.

TABLA 2

ESQUEMA DE TARIFAS DIFERENCIALES AL SALARIO DE LOS OPERARIOS A, B Y C PARA LOGRAR UNA META DE PRODUCCIÓN DE 500 UNIDADES DIARIAS

OPERARIO Y OPERACIONES					NIVELES DE PRODUCCIÓN		
Operario	#OP	TE (min)	SE (\$)	CO (\$/OP)	360-399	400-469	470-500
					Salario por OP a tasa del 100 % (\$)	Salario por OP a tasa del 120 % (\$)	Salario por OP a tasa del 160 % (\$)
A	1	0.5	200	0.175	63.158	84.211	131.930
	2	0.067		0.024	8.463	11.284	17.679
	3	0.333		0.117	42.063	56.084	87.865
	Salario diario total				113.684	151.579	237.474
Salario semanal				682.1	909.5	1424.8	
B	4	0.167	200	0.059	21.095	28.126	44.065
	5	0.500		0.175	63.158	84.211	131.930
	6	0.050		0.018	6.316	8.421	13.193
	7	0.167		0.059	21.095	28.126	44.065
	8	0.083		0.029	10.484	13.979	21.900
Salario diario total				122.147	162.863	255.152	
Salario semanal				732.9	977.2	1530.9	
C	9	1.000	200	0.351	126.316	168.421	263.860
	Salario diario total				126.316	168.421	263.860
Salario semanal				757.9	1010.5	1583.2	

Notas: #OP = número de operación, TE = tiempo estándar, SE = salario estándar, CO = costo por operación.

Para que un sistema de incentivos sea exitoso es indispensable informar a los trabajadores en qué consiste el sistema, enseñarles a calcular sus salarios con el incentivo y despejar sus dudas para eliminar posibles temores. Es por ello que se les comunicó a los trabajadores que su salario dependería de las unidades que produjeran, mostrándoles las cotas superiores de los niveles de producción y las metas a alcanzar para recibir los estímulos salariales, así como el monto máximo que se puede lograr en cada estación de trabajo una vez que se alcanza la meta de producción. Se les concientizó que la meta es alcanzable y superable, ya que ellos estuvieron involucrados en el proceso de la toma de tiempos estándar y métodos de trabajo. También se establecieron las reglas para la asignación de las estaciones de trabajo de la línea de producción.

Se debe recordar que los indicadores por analizar son P y e . Una vez implementado el sistema de incentivos y con una producción promedio de 500 unidades diarias, se obtuvo que los valores de la P pasaron de 1.67 a 1.51 \$/u, mientras que la e pasó del 67.54 al 93.80 %.

IV. CONCLUSIONES

La implementación de un sistema de incentivos en la microempresa purificadora de agua sí ha elevado la productividad y eficiencia de su línea de producción y este ha provocado también un incremento en el salario de los trabajadores. La productividad pasó de 1.67 a 1.51 \$/u, mientras que la eficiencia pasó del 67.54 al 93.80 %. En cuanto al salario de los trabajadores, ha habido un incremento salarial mínimo de 18.73 y máximo de 31.93 %, dependiendo de la estación de trabajo.

También, la metodología de incentivos y organizacional ha mostrado ser una excelente herramienta donde se requiere incrementar la productividad, la eficiencia y la motivación de los trabajadores. Esta se puede adaptar a diferentes entornos con producción en serie como en el presente caso. El fundamento de todo esto es el análisis del proceso productivo en campo, el análisis de datos y la organización del trabajo para mejorar los indicadores seleccionados, basándose en las herramientas del estudio del trabajo, así como la aplicación de incentivos económicos diferenciales, los cuales permiten hacer más justos los salarios y motivan el incremento de producción por parte de los operarios en su estación de trabajo. Lo anterior se traducirá en un trabajador más motivado, así como una empresa con mayor producción, lo que ge-

nerará más ganancias porque se contará con inventario para satisfacer los requerimientos de los clientes.

Finalmente se recalca que los sistemas de incentivos, además de aplicarse en líneas generales de producción, también se pueden introducir en sistemas de producción sencillos, a microempresas, para que no solo tengan como norma el conocimiento empírico, sino que logren un impacto local que detonará en una mayor eficiencia global.

REFERENCIAS

- [1] B. Qi y J. Yao, "A Study of the Moderating Mediation Model of Pay Equity on Job Performance", *Int. J. Membr. Sci. Technol.*, vol. 10, no. 3, pp. 542-551, jul. 2023, doi: [10.15379/ijmst.v10i3.1571](https://doi.org/10.15379/ijmst.v10i3.1571).
- [2] P. B. Clark y J. Q. Wilson, "Incentive Systems: A Theory of Organizations", *Adm Sci Q*, vol. 6, no. 2, pp. 129-166, sept. 1961, doi: [10.2307/2390752](https://doi.org/10.2307/2390752).
- [3] C. Mario, "Comparative Incentive Systems", en *Global Encyclopedia of Public Administration, Public Policy, and Governance*, A. Farazmand, ed., Springer, Cham, 2019, pp. 1-5, doi: [10.1007/978-3-319-31816-5_3706-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-31816-5_3706-1).
- [4] G. P. Baker, M. C. Jensen y K. J. Murphy, "Compensation and Incentives: Practice vs. Theory", *J Finance*, vol. 43, no. 3, pp. 593-616, jul. 1988, doi: [10.1111/J.1540-6261.1988.TB04593.X](https://doi.org/10.1111/J.1540-6261.1988.TB04593.X).
- [5] R. C. Carreón-Romero, A. Ramírez-Torres, L. Carreón-Romero, y M. E. Carreón-Romero, "Incentivos para aumentar la eficiencia de una línea de producción textil", *Coloq. Investigación Multidisciplinaria*, vol. 7, no. 1, pp. 1029-1035, 2019. Accedido: jun. 12, 2023. [En línea]. Disponible en: http://cim.orizaba.tecnm.mx/Journals/Journal_CIM_2019.pdf
- [6] S. Balamurali, R. Göb, y C.-H. Jun, "Attributes Sampling Schemes in International Standards", en *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*, 2014, doi: [10.1002/9781118445112.stat04120](https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat04120).
- [7] B. Niebel y A. Freivalds, *Ingeniería industrial, métodos, estándares y diseño del trabajo*, 12.ª ed. México, D.F.: McGraw-Hill, 2009.

- [8] R. García-Criollo, *Estudio del trabajo, Ingeniería de métodos y medición del trabajo*, 2.^a ed. México: McGraw-Hill, 2005.
- [9] H. Gutiérrez-Pulido, *Calidad total y productividad*, 3.^a ed. México: McGraw-Hill, 2010.
- [10] M. T. Noriega, “Los incentivos salariales”, *Ingeniería Industrial*, no. 012, pp. 30-39, dic. 1994, doi: [10.26439/ing.ind1994.n012.2799](https://doi.org/10.26439/ing.ind1994.n012.2799).
- [11] J. Sauermann, “Performance measures and worker productivity”, *IZA World of Labor*, 1-12, abr. 2023, doi: [10.15185/izawol.260.v2](https://doi.org/10.15185/izawol.260.v2).
- [12] M. Masniar, U. R. Marasabessy, E. Astrides, A. Ahistasari, M. A. N. Wahyudien, y M. M. Rachmadhani, “Analysis of Work Measurement Using the Stopwatch Time Study Method at PTEA”, *J. Ind. Eng. Manag.*, vol. 2, no. 1, pp. 23-31, 2023, doi: [10.56882/jisem.v2i1.14](https://doi.org/10.56882/jisem.v2i1.14).
- [13] R. Chase, R. Jacobs y N. Aquilano, *Administración de operaciones*. México: McGraw-Hill, 2009.
- [14] C. Cuevas, Y. Á. González, M. del C. Torres y M. G. Valladares, “Importancia de un estudio de tiempos y movimientos”, *Inventio*, vol. 16, no. 39, pp. 1-5, 2020, doi: [10.30973/inventio/2020.16.39/7](https://doi.org/10.30973/inventio/2020.16.39/7).
- [15] T. O. Kowang, L. K. Yew, y O. C. Hee, “Takt Time Analysis in Lean Six Sigma: From Conventional to Integration”, *Int J Eng Adv Technol*, vol. 9, no. 2, pp. 4076-4080, dic. 2019, doi: [10.35940/ijeat.B4949.129219](https://doi.org/10.35940/ijeat.B4949.129219).

Análisis experimental de un dispositivo tope de impacto como atenuador de vibraciones en banco experimental

Experimental analysis of an impact absorber device as a vibration attenuator in an experimental bench

Luis Alberto Baltazar Tadeo¹✉, Claudia Cortés García², Eladio Martínez Rayón²

¹Instituto Politécnico Nacional | Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Palenque (UPIIP) | Palenque, Chiapas, México

²Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico | Departamento de Ingeniería Mecánica | Cuernavaca, Morelos, México

RESUMEN

En este trabajo se analiza experimentalmente el funcionamiento de un dispositivo tope de impacto como atenuador de vibraciones de un sistema sometido a vibración forzada. Para este propósito, se diseñó y construyó un banco de pruebas experimentales conformado por una viga en voladizo a la cual se montó en su extremo libre un motor con desbalance rotatorio para hacerla vibrar. El dispositivo tope de impacto se colocó en el extremo libre de la viga y recibió la energía cinética de la viga a través de múltiples eventos de impacto, disipando energía de vibración por un mecanismo de fricción. Asimismo, se realizó un análisis con variables tales como fuerza de fricción (gobernada por un tornillo de ajuste en el dispositivo), rigidez de los resortes del prototipo (que actúan como elementos de restitución del elemento móvil del dispositivo) y el claro entre el tope de impacto y la estructura. En el análisis paramétrico, se identificó, de entre las variables propuestas, los parámetros que mejoran la atenuación de vibración en la estructura vibratoria. Como resultado de este estudio, se lograron importantes reducciones de amplitud de vibración, de más del 90 %, por efecto del dispositivo tope de impacto en el sistema vibratorio.

PALABRAS CLAVE: tope de impacto; amortiguamiento por fricción; atenuador de vibraciones.

ABSTRACT

In this work, the operation of an impact stop device as a vibration attenuator of a system subjected to forced vibration is analyzed experimentally. For this purpose, an experimental test bench was designed and built, made up of a cantilever beam to which a rotary unbalanced motor was mounted at its free end to make it vibrate. The impact stop device was placed at the free end of the beam and received the kinetic energy of the beam through multiple impact events, dissipating vibration energy by a friction mechanism. Likewise, an analysis was carried out with variables such as friction force (governed by an adjustment screw in the device), rigidity of the springs of the prototype (which act as restorative elements of the mobile element of the device) and the clearance between the stop of impact and structure. In the parametric analysis, the parameters that improve the vibration attenuation in the vibrating structure were identified among the proposed variables. As a result of this study, significant reductions in vibration amplitude of more than 90% were achieved due to the effect of the impact stop device in the vibratory system.

KEYWORDS: impact absorber; friction damping; vibration attenuator.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Luis Alberto Baltazar Tadeo
INSTITUCIÓN: Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería Campus Palenque (UPIIP)
DIRECCIÓN: México 199, Nueva Esperanza, C. P. 29960, Palenque, Chiapas, México
CORREO ELECTRÓNICO: lbaltazart@ipn.mx

Fecha de recepción: 1 de mayo de 2023. **Fecha de aceptación:** 22 de agosto de 2023. **Fecha de publicación:** 29 de agosto de 2023.



I. INTRODUCCIÓN

La búsqueda de mejoras en el amortiguamiento de sistemas mecánicos ha impulsado el desarrollo de dispositivos para disminuir o eliminar los efectos negativos de las vibraciones mecánicas. Estos mecanismos utilizan diferentes tecnologías para lograr su propósito y, en términos generales, se pueden clasificar en dispositivos de *control activo*, *semiactivo*, *pasivo* y de *control híbrido* [1].

Los dispositivos de control pasivo destacan por su menor costo y su capacidad para operar sin depender de una fuente de energía externa, misma que podría no estar disponible durante eventos catastróficos como los terremotos [2] y, a su vez, se pueden clasificar como amortiguadores dependientes de la velocidad, amortiguadores dependientes del desplazamiento y una combinación de estos (a la vez, dependientes de la velocidad y el desplazamiento) [2]-[4]. Los amortiguadores dependientes de la velocidad abarcan los de fluido viscoso, viscoelástico de fluido y viscoelástico sólido [5]-[8]. Por otro lado, los dependientes del desplazamiento incluyen al amortiguador de deformación metálica [9]-[11] y el amortiguamiento por fricción [12]-[17].

Los amortiguadores de fricción se distinguen por su simplicidad, confiabilidad, consistencia y capacidad para disipar la máxima energía debido a la generación del ciclo histerético rectangular y, además, representan la opción más adecuada para la disipación de energía a través de un mecanismo pasivo [18]. Sin embargo, es necesario mencionar algunas desventajas que se tienen al emplear amortiguadores de fricción: un comportamiento histerético altamente no lineal debido al deslizamiento brusco del mecanismo de fricción que es causado por las rebabas y la abrasión; un desgaste producido entre los elementos friccionantes y que requiere de fuerzas de sujeción elevadas para generar la fuerza de fricción necesaria; y, también, es común que estos amortiguadores utilicen resortes para autocentrar el dispositivo, lo cual impacta negativamente en el ciclo histerético del amortiguador.

Entre los dispositivos que disipan energía a través de mecanismos de fricción, se encuentra el tope de impacto desarrollado en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) [19]. Este dispositivo fue sometido a pruebas tanto estáticas como dinámicas con el fin de determinar su eficiencia en la disipación de energía de fuerzas de impacto. En el estudio

dinámico se analizó el funcionamiento del prototipo sometido al impacto de una masa en el extremo de un péndulo, simulando condiciones de fuerzas de impacto. Además, fue sometido a pruebas de impacto cíclico con un mecanismo manivela, biela, corredera a una determinada frecuencia de trabajo, con el fin de cuantificar la cantidad de energía que este dispositivo es capaz de disipar. Se ha analizado numérica y experimentalmente la forma en que el prototipo disipa energía a través de sus distintos elementos (vástago, aros deformables, carcasa) y la influencia de las interacciones de contacto entre superficies [20], [21]. Se encontró que el dispositivo es capaz de disipar cerca del 88 % de energía en un evento de impacto y, además, puede disipar energía por varios ciclos, de ahí que el dispositivo presente características de un amortiguador y sea capaz de atenuar las vibraciones en sistemas mecánicos.

En este trabajo se analizó el funcionamiento de un dispositivo tope de impacto diseñado por Romero-Leyva [19] como atenuador de vibraciones en una estructura sujeta a vibración forzada. Para realizar este análisis, se diseñó y construyó un banco de pruebas experimentales conformado por una viga en voladizo, un excitador de desbalance rotario colocado en el extremo libre de la viga para inducir vibraciones y un dispositivo tope de impacto que es excitado por medio de eventos de impacto al entrar en contacto con la vibración de la viga. Este último está diseñado para disipar la energía cinética de un impacto a través de un mecanismo de fricción.

El mecanismo de fricción se compone de un par de aros deformables montados en un elemento móvil que actúa dentro de una carcasa cilíndrica, de tal manera que al recibir un impacto se genera una fuerza de fricción. Esta fuerza de fricción puede ser regulada mediante la deformación radial inducida por un tornillo que se encuentra en la parte posterior del elemento móvil, al recibir un torque de ajuste. Asimismo, para asegurar que el elemento móvil regrese a su posición inicial y pueda seguir disipando energía por más eventos de impacto, se utilizaron resortes como elementos de restitución.

Posteriormente, se realizó un análisis paramétrico del tope de impacto que involucró variables como el torque de ajuste de la fuerza de fricción, la rigidez de los elementos de restitución y el claro entre el tope de impacto y la viga. Una vez realizado el estudio, se determinaron los parámetros del tope de impacto que maximizan la atenuación de las amplitudes de vibración en la viga de

entre todos los parámetros propuestos. Los resultados obtenidos demuestran que el dispositivo tope de impacto es capaz de atenuar las vibraciones de una estructura vibratoria, logrando importantes reducciones de amplitud de vibración.

II. METODOLOGÍA

El presente estudio se planteó demostrar que el dispositivo tope de impacto diseñado por Romero-Leyva [19] es capaz de atenuar las amplitudes de vibración de una estructura sujeta a vibración forzada y, de manera paralela, identificar los parámetros del tope de impacto que tienen mayor influencia en la atenuación de la vibración de la estructura.

EL DISPOSITIVO TOPE DE IMPACTO

El dispositivo tope de impacto fue diseñado para disipar la energía cinética de un impacto a través de un mecanismo de fricción que se compone de un par de aros elásticos deformables montados en un elemento móvil que actúa dentro de una carcasa cilíndrica. Cuando el vástago del elemento móvil recibe una fuerza de impacto, se genera una fuerza de fricción entre los aros deformables y la carcasa, lo que permite la disipación de energía. La fuerza de fricción puede ajustarse mediante la aplicación de un torque a un tornillo que se encuentra en la parte inferior del elemento móvil. Una rondana y un separador metálico transmiten la fuerza de compresión del tornillo hacia los aros deformables. Para garantizar que el mecanismo disipe energía en cada evento de impacto, se agregó al prototipo un par de resortes en paralelo que ayudan al elemento móvil a regresar a su posición inicial y estar disponible para disipar energía de impacto en otro nuevo ciclo. La Figura 1 muestra los elementos que constituyen al dispositivo tope de impacto.

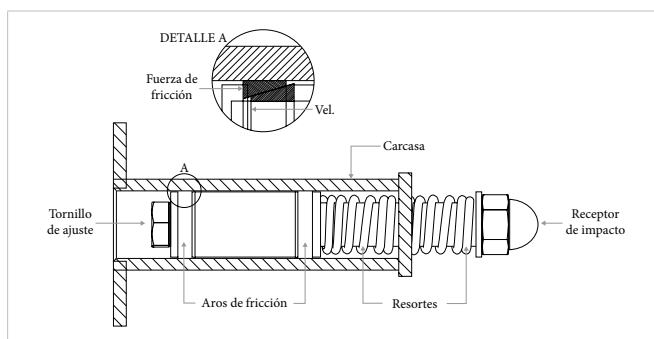


Figura 1. Configuración del dispositivo tope de impacto.

BANCO EXPERIMENTAL

En la Figura 2 se presenta el banco de pruebas experimentales que se diseñó para realizar el análisis del funcionamiento del dispositivo tope de impacto como atenuador de vibraciones en estructuras. El banco está compuesto por una viga en voladizo de acero (2) con un ancho de 51.1 mm, un espesor de 4.85 mm y 300 mm de largo. Por un extremo está anclada a la bancada (7) que soporta todo el banco de pruebas y por el otro extremo de la viga se coloca un excitador mecánico (1) de vibraciones que consiste en un motor de corriente directa con desbalance rotatorio. El desbalance rotatorio está constituido por una masa de desbalance de 0.022 kg con una excentricidad de 0.015 m. La velocidad del motor es controlada por una fuente de voltaje variable (9) que regula el voltaje de alimentación del excitador y es medida por un circuito tacómetro (4).

El movimiento de desbalance provoca que la estructura comience a moverse y ese movimiento se traduce a una amplitud de vibración que es medida por un sensor de desplazamiento (5). La amplitud de vibración está limitada por el prototipo tope de impacto (3) que se coloca en el extremo libre de la viga para cumplir con dicho objetivo. El tope de impacto, al limitar la amplitud de vibración, recibe fuerzas de impacto que son captadas por el sensor de fuerza (6) que se encuentra en la base del prototipo. Posteriormente, la señal de fuerza es enviada a un amplificador de señales (10). Las señales de los sensores de desplazamiento, fuerza y tacómetro se envían al adquirente de datos (8), el cual se encarga de su procesamiento con la ayuda de un equipo de cómputo (11).

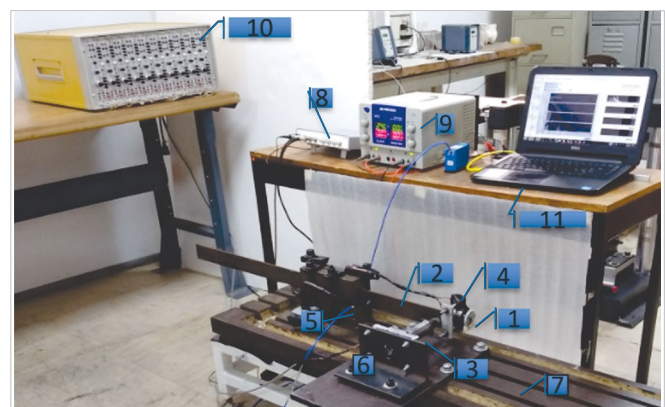


Figura 2. Configuración de banco experimental: 1) excitador mecánico, 2) viga, 3) tope de impacto, 4) tacómetro, 5) desplazómetro, 6) sensor de fuerza, 7) bancada, 8) sistema de adquisición de datos Kistler 5165A4, 9) fuente de voltaje variable, 10) amplificador de señales Vishay 2300 y 11) equipo de cómputo.

En la Figura 3 se observa cómo se encuentran dispuestos el tope de impacto, la viga y el excitador mecánico. La numeración de los elementos de esta figura corresponde con la numeración de los elementos presentada en la Figura 2.

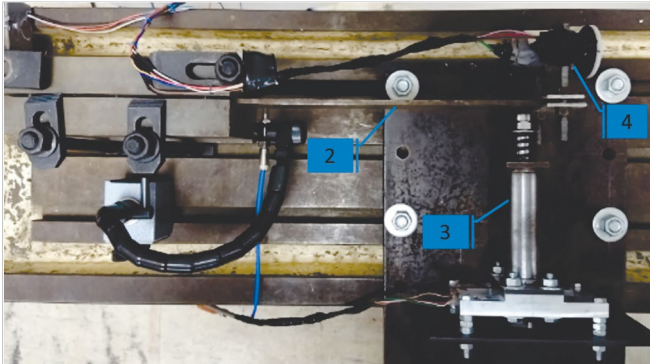


Figura 3. Disposición de elementos en banco experimental: 2) viga, 3) tope de impacto y 4) excitador mecánico.

CONDICIONES DE LA PRUEBA EXPERIMENTAL

En el estudio se comparó la respuesta de la viga con y sin el dispositivo tope de impacto, con la finalidad de observar la disminución de la amplitud de la respuesta vibratoria del sistema debido al dispositivo tope de impacto. Se observó también el efecto que produce la variación de parámetros como el torque de ajuste de la fricción en el dispositivo, la rigidez de los resortes, la frecuencia de excitación (discreta) en un rango de 15 a 20 Hz y el claro que existe entre la punta del tope de impacto y la viga. En la Tabla 1 se muestran las magnitudes de los parámetros propuestos en este estudio.

TABLA 1

PARÁMETROS DEL DISPOSITIVO TOPE DE IMPACTO PARA LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

TORQUE DE AJUSTE DE FUERZA DE FRICCIÓN (T)	RIGIDEZ DEL TOPE DE IMPACTO (K)	FRECUENCIA DE EXCITACIÓN	CLARO (C)
2 Nm	10 kN/m	15-20 Hz	0 mm
3 Nm	30 kN/m		1 mm
4 Nm	50 kN/m		2 mm

Cabe mencionar que la rigidez del prototipo está formada por dos resortes en paralelo que tienen la misma magnitud de rigidez y al sumarse dan como resultado la rigidez del tope de impacto que aparece en la Tabla 1.

Finalmente, se compararon los resultados de las pruebas experimentales para identificar los parámetros que mejoran la atenuación de la vibración de la viga.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el banco experimental descrito líneas arriba y que tiene la configuración mostrada en la Figura 2. Las distintas condiciones de la prueba experimental están definidas por los parámetros presentados en la Tabla 1.

En la Figura 4 se aprecia la amplitud de vibración de la estructura analizada con y sin el dispositivo de tope de impacto, en un rango de frecuencias discretas entre 15 y 20 Hz. Los parámetros del tope de impacto en esta prueba son: torque de ajuste de fuerza de fricción de 2, 3 y 4 Nm; rigidez del dispositivo de 10, 30 y 50 kN/m, y un claro entre la punta del tope de impacto y el extremo libre de la viga de 0 mm.

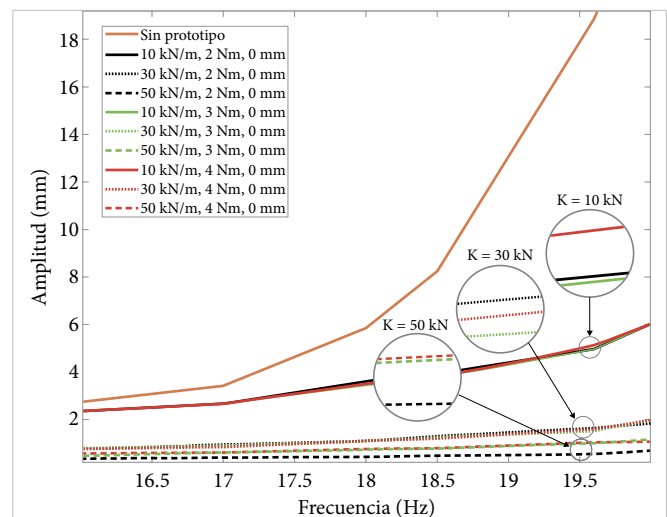


Figura 4. Diagrama de amplitud vs. frecuencia con claro de 0 mm.

En la Figura 4, la línea de color naranja representa la amplitud de vibración de la viga sin el prototipo tope impacto. Las líneas de color negro representan las amplitudes de vibración de la viga cuando el tornillo de ajuste de la fuerza de fricción del tope de impacto tiene un torque de 2 Nm. Asimismo, las líneas color verde y rojo representan las amplitudes de vibración de la viga cuando el torque de ajuste es de 3 y 4 Nm, respectivamente. Por otro lado, las líneas continuas indican que el tope de impacto tiene una rigidez de 10 kN/m y, de la misma forma, las líneas punteadas y discontinuas indican rigideces del tope de impacto con valores de 30 y 50 kN/m, respectivamente.

Los resultados presentados en la Figura 4 muestran una evidente disminución de la amplitud de vibración

de la viga por efecto del dispositivo tope de impacto bajo las condiciones analizadas, considerando que el claro entre el tope de impacto y la viga fue de 0 mm. También en la **Figura 4** se observan importantes disminuciones de amplitudes de vibración en la viga en función de las diferentes rigideces utilizadas en el análisis, siendo poco significativos los torques de ajuste de la fuerza de fricción del tope de impacto, lo cual se aprecia en las agrupaciones de amplitudes de vibración destacadas en círculos en la **Figura 4** para los valores de rigideces utilizados. Los resultados obtenidos muestran que una mayor atenuación de la vibración de la estructura se obtiene cuando la rigidez del dispositivo es mayor. Cabe mencionar que, aunque no se reportan en este estudio, se observaron patrones similares a los descritos en la **Figura 4** durante las pruebas realizadas con las configuraciones detalladas en la **Tabla 1**, utilizando claros de 1 y 2 mm.

En la **Figura 5** se muestran las amplitudes de vibración de la viga a una frecuencia de 19.6 Hz, obtenidas en cada combinación de parámetros de rigidez del tope de impacto (K1, K2 y K3), el torque de ajuste de la fuerza de fricción (T1, T2 y T3) y el claro entre el tope de impacto y la viga (C1, C2 y C3) en las pruebas experimentales realizadas. Cabe mencionar que solo se muestran los resultados obtenidos a una frecuencia de excitación de 19.6 Hz para simplificar el análisis.

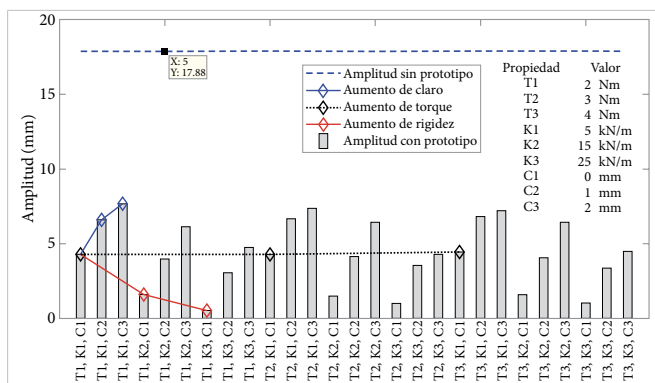


Figura 5. Comparación de amplitud de vibración de la viga vs. configuraciones del banco de prueba a 19.6 Hz.

Al analizar la configuración T1, K1, C1 en la **Figura 5**, nótese que si se aumenta el claro C1 (línea color azul) a C2 o C3, la amplitud de vibración de la viga crece. De manera similar, si el análisis comienza en T1, K1, C1 y se aumenta el torque (línea color negro) a T2 o T3, la amplitud de vibración de la viga disminuye muy ligeramente, casi imperceptible para los toques de ajuste de la

fuerza de fricción seleccionados. Si se hace nuevamente el análisis en T1, K1, C1, se observa que si se aumenta la rigidez (línea color rojo) del tope de impacto a K2 o K3 la amplitud de vibración de la viga disminuye.

Al comparar los datos registrados en la **Figura 5**, se determina que el mayor porcentaje de disminución de la amplitud de vibración de la viga se obtiene con la configuración del claro más pequeño, la rigidez más alta y con el torque más alto, con porcentajes de disminución de amplitud mayores a 90 %.

La energía que se disipa del sistema vibratorio por efecto del prototipo tope de impacto puede estimarse a partir del cambio en la amplitud de vibración de la viga con y sin el dispositivo tope de impacto. En este sentido, la diferencia de la energía de deformación de la viga debido a la deflexión provocada por la vibración, con y sin el dispositivo tope de impacto, será la energía disipada.

De acuerdo a lo reportado por Popov [22], la energía de deformación de la viga debido a la deflexión puede calcularse con la Ecuación (1), a partir de conocer la deflexión medida (Δ) en su extremo libre (definida por la amplitud de vibración en este estudio),

$$U = We = \frac{\Delta^2}{\frac{2L^2}{3EI} + \frac{2L}{5AG}} \quad (1)$$

donde A = área de la sección transversal de la viga, E = módulo de elasticidad, G = módulo del cortante y L = longitud de la viga.

La **Figura 6** muestra la disipación de energía calculada con la Ecuación (1) a partir de los resultados mostrados en la **Figura 5**.

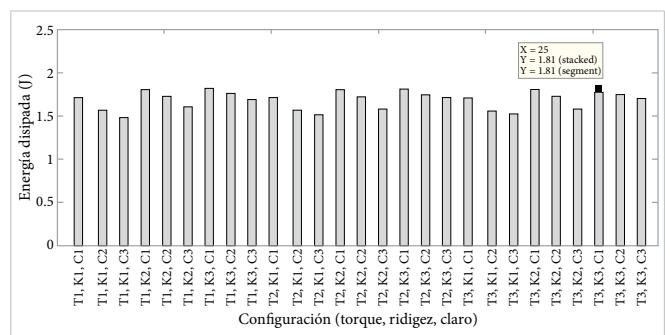


Figura 6. Comparación de disipación de energía, con amplitudes registradas a 19.6 Hz.

Con el análisis realizado se determinó que la energía máxima disipada en las pruebas experimentales fue de 1.8 J, lo que representa más del 90 % de la energía que tenía la viga sin el prototipo tope de impacto. Estos resultados se obtuvieron con la configuración del claro más pequeño, la rigidez y el torque más alto (T3, K3, C1). Cabe mencionar que existen otras configuraciones con las que se pueden obtener niveles similares de disipación de energía, aunque idealmente aquellas configuraciones con mayor torque de ajuste de fuerza de fricción deberían tener mayor disipación de energía. La poca influencia del torque de ajuste en la disminución de la amplitud de vibración, vistos en este estudio, puede deberse a errores de maquinado en el proceso de fabricación del prototipo en elementos como la carcasa y los aros deformables.

Los hallazgos encontrados en esta investigación representan un valioso recurso para el diseño de futuros dispositivos de amortiguamiento por fricción. La combinación de los parámetros claro, rigidez y torque puede servir como pauta esencial en la elaboración de diseños que busquen maximizar la atenuación de vibraciones en contextos similares. Adicionalmente, el dispositivo tope de impacto representa una alternativa a los amortiguadores de fricción mencionados en la sección Introducción [12]-[17] y ofrece la ventaja de que la fuerza de fricción necesaria para la disipación de energía puede regularse fácilmente mediante el tornillo de ajuste y, en caso de desgaste excesivo, los elementos friccionantes pueden ser remplazados.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó el funcionamiento de un dispositivo tope de impacto como atenuador de vibraciones en una estructura sometida a vibración forzada. El estudio realizado se llevó a cabo en el banco experimental que se mostró en la sección Metodología, en donde el parámetro evaluado fue el cambio en la vibración de una viga en voladizo en función de parámetros como el claro o distancia entre el extremo libre de la viga y el tope de impacto, la rigidez del dispositivo tope de impacto y el torque de ajuste de la fuerza de fricción del tope de impacto.

De la comparación de los resultados obtenidos en las pruebas experimentales, se destaca que las amplitudes de vibración de la viga disminuyen al reducir el claro que existe entre el tope de impacto y la estructu-

ra. Asimismo, la amplitud de vibración disminuye al aumentar la rigidez del dispositivo. El aumento en la rigidez del tope de impacto hace que la frecuencia natural del elemento móvil (que contiene los aros de fricción) aumente y, en consecuencia, realice más ciclos de histéresis en cada evento de impacto contra la viga, lo que se traduce en una mayor disipación de energía y por lo tanto la amplitud de vibración disminuye. Por otro lado, aumentar el torque de ajuste también disminuye la amplitud de vibración de la viga, aunque no considerablemente, lo cual se debe a imperfecciones de maquinado en el proceso de fabricación del dispositivo tope de impacto, ya que el incremento del torque de ajuste aumenta tanto la deformación radial de los aros de fricción como la fuerza de fricción y, por tanto, debe mejorar la disipación de energía.

Como resultado de este estudio se obtuvieron los parámetros del tope de impacto que maximizan la atenuación de las amplitudes de vibración de la viga de entre todos los parámetros propuestos, en un rango de frecuencias de entre 15 y 20 Hz. Así, el mayor porcentaje de disminución de la amplitud se encuentra con la configuración del claro más pequeño, con la rigidez más alta y con el torque más alto. La combinación de estos parámetros específicos puede servir como pauta en la elaboración de diseños de dispositivos en contextos similares.

Finalmente, los resultados obtenidos de las pruebas experimentales confirman la capacidad del dispositivo de tope de impacto para atenuar las vibraciones de una estructura sometida a vibración forzada. Esto queda en evidencia al reducir la amplitud de vibración de la estructura propuesta en el banco de pruebas en un notable 97 %, operando dentro de un rango de frecuencias que se extiende desde 15 hasta 20 Hz. Esto, a su vez, permite una efectiva disipación de energía, alcanzando 1.8 J, dependiendo de la rigidez de los resortes empleados.

REFERENCIAS

- [1] T. E. Saaed, G. Nikolakopoulos, J.-E. Jonasson y H. Hedlund, "A state-of-the-art review of structural control systems", *J. Vib. Control*, vol. 21, no. 5, pp. 919-937, abr. 2015, doi: 10.1177/1077546313478294.
- [2] Z. Shu, R. You y Y. Zhou, "Viscoelastic Materials for Structural Dampers: A Review", *Constr. Build.*

- Mater.*, vol. 342, parte B, p. 127955, ag. 2022, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2022.127955](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127955).
- [3] FEMA, “NEHRP commentary on the guidelines for the seismic rehabilitation of buildings”, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA, rep. no. FEMA 274, oct. 1997. Accedido: ag. 6, 2023. [En línea]. Disponible en: www.conservationtech.com/FEMA-publications/FEMA274-1997.pdf
- [4] F. Y. Cheng, H. Jiang y K. Lou, *Smart Structures. Innovative Systems for Seismic Response Control*, 1.ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2008, doi: [10.1201/9781420008173](https://doi.org/10.1201/9781420008173).
- [5] H. Zhang, Y. Su, A. Li y P. Guo, “Experimental investigation of novel pre-compressed viscoelastic dampers with different matrix materials”, *Structures*, vol. 53, pp. 625-641, jul. 2023, doi: [10.1016/j.istruc.2023.04.056](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.04.056).
- [6] Q. Liu, P. Li, C. Yuan, W. Li y S. Ding, “Experimental and analytical modelling on a novel self-centering viscous damper”, *J. Build. Eng.*, vol. 75, p. 107020, 2023, doi: [10.1016/j.jobe.2023.107020](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107020).
- [7] Z.-H. He, Z.-D. Xu, J.-Y. Xue, X.-J. Jing, Y.-R. Dong y Q.-Q. Li, “Experimental study and mechanical model of viscoelastic damping limb-like-structure device with coupling nonlinear characteristics”, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 160, p. 107385, 2022, doi: [10.1016/j.soildyn.2022.107385](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107385).
- [8] A. Naeem y J. Kim, “Seismic performance evaluation of a spring viscous damper cable system”, *Eng. Struct.*, vol. 176, pp. 455-467, 2018, doi: [10.1016/j.engstruct.2018.09.055](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.09.055).
- [9] J. Wang, J. Men, Q. Zhang, D. Fan, Z. Zhang y C.-H. Huang, “Seismic performance evaluation of a novel shape-optimized composite metallic yielding damper”, *Eng. Struct.*, vol. 268, p. 114714, 2022, doi: [10.1016/j.engstruct.2022.114714](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114714).
- [10] A. Farsi, H. R. Amiri y S. H. Dehghan Manshadi, “An innovative C-shaped yielding metallic dampers for steel structures”, *Structures*, vol. 34, pp. 4254-4268, 2021, doi: [10.1016/j.istruc.2021.08.069](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.069).
- [11] M. Ghandil, H. T. Riahi y F. Behnamfar, “Introduction of a new metallic-yielding piston damper for seismic control of structures”, *J. Constr. Steel Res.*, vol. 194, p. 107299, 2022, doi: [10.1016/j.jcsr.2022.107299](https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107299).
- [12] J. Gao, C.-L. Wang, B. Zeng y T. Qiu, “Experimental investigation of a novel sleeved member with additional friction dampers”, *Eng. Struct.*, vol. 277, p. 115420, 2023, doi: [10.1016/j.engstruct.2022.115420](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115420).
- [13] N. Nabid, I. Hajirasouliha, D. Escolano Margarit y M. Petkovski, “Optimum energy based seismic design of friction dampers in RC structures”, *Structures*, vol. 27, pp. 2550-2562, 2020, doi: [10.1016/j.istruc.2020.08.052](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.052).
- [14] Y. G. Wu et al., “Design of semi-active dry friction dampers for steady-state vibration: sensitivity analysis and experimental studies”, *J. Sound Vib.*, vol. 459, p. 114850, 2019, doi: [10.1016/j.jsv.2019.114850](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.114850).
- [15] M. Latour, M. D’Aniello, M. Zimbru, G. Rizzano, V. Piluso y R. Landolfo, “Removable friction dampers for low-damage steel beam-to-column joints”, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 115, pp. 66-81, 2018, doi: [10.1016/j.soildyn.2018.08.002](https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.08.002).
- [16] Y. Xu et al., “Longitudinal displacement control of a long-span suspension bridge under random traffic loads using a polyimide friction damper”, *Structures*, vol. 55, pp. 1861-1873, 2023, doi: [10.1016/j.istruc.2023.05.148](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.148).
- [17] A. A. Kulaksizoglu, C. Yalcin y C. Yilmaz, “Analytical and experimental investigation of a motion amplified rotational friction damper”, *Eng. Struct.*, vol. 288, p. 116184, 2023, doi: [10.1016/j.engstruct.2023.116184](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116184).
- [18] S. Jaisee, F. Yue y Y. H. Ooi, “A state-of-the-art review on passive friction dampers and their applications”, *Eng. Struct.*, vol. 235, no. en., p. 112022, may. 2021, doi: [10.1016/j.engstruct.2021.112022](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112022).
- [19] R. Romero-Leyva, “Prototipo de un tope de impacto ajustable que disipe energía mediante fricción”, tesis de maestría, Tecnológico Nacional de México

- Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Mor., 2006.
- [20] C. Cortés-García, “Análisis de amortiguadores de fricción con elementos deformables aplicados a vibraciones estructurales”, tesis de doctorado, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Mor., 2014.
- [21] J. Bedolla, D. Szwedowicz, J. Jiménez, T. Majewski, C. Cortés y E. S. Gutierrez-Wing, “Improvement of dynamic response in an impact absorber by frictional elements”, *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 4, pp. 1349-1363, abr. 2014, doi: [10.1007/s12206-014-0303-2](https://doi.org/10.1007/s12206-014-0303-2).
- [22] E. P. Popov, *Mecánica de Sólidos*, 2ª. ed. México: Addison Wesley Longman México, 2000.

Edición especial

IWIELF 2022

En 2002, la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), el Instituto Tecnológico de Orizaba (TecNM – ITO) y la Universidad del Valle (Cali, Colombia) organizaron el First International Workshop on Industrial Engineering, Logistics and Finance (IWIELF 2022), con el objetivo de presentar y divulgar los trabajos de investigación más sobresalientes llevados a cabo en universidades, centros de investigación y la industria de Colombia y México.

Estos trabajos de investigación representan una aportación para mejorar los procesos de toma de decisiones en el sector industrial y que, de esa forma, se pueda hacer frente a ciertos desafíos, como satisfacer los requerimientos de los clientes, hacer más eficientes los procesos de producción de bienes y servicios para reducir costos y aumentar las utilidades, mejorar la logística para reducir los tiempos de entrega, colaborar en la reducción del impacto ambiental, producir en tiempos de pandemia y sobrevivir como empresa a los problemas en las cadenas de suministro globales, entre otros.

Este evento tuvo lugar el 18 de noviembre de 2022 en sesiones virtuales, siendo los editores el Dr. Cuauhtémoc Sánchez Ramírez, del Instituto Tecnológico de Orizaba; el Dr. Diego Fernando Manotas Duque, de la Universidad del Valle, y un servidor por parte de la UACJ.

Las ponencias presentadas en el IWIELF 2022 recibieron el respectivo certificado de participación. Se determinó que los mejores trabajos se incluyeran en las memorias para se publicarse como número especial de la revista *CULCYT Cultura Científica y Tecnológica*. Por tanto, en el presente volumen 20, número 2 (mayo-agosto de 2023) se publican siete artículos correspondientes a igual número de trabajos relevantes del IWIELF 2022.

Dr. Jorge Luis García Alcaraz
*Editor Invitado de la Edición
Especial IWIELF 2022*

Impacto del liderazgo transaccional en el rendimiento operativo

Impact of transactional leadership on operational performance

Maribel Mendoza Solís¹, Jorge Luis García Alcaraz¹✉

¹Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

RESUMEN

En este artículo se examina el impacto del liderazgo transaccional en el rendimiento operativo, teniendo como variable mediadora la satisfacción laboral en la industria manufacturera en Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Se realizó una revisión de literatura sobre liderazgo transaccional, rendimiento operativo y satisfacción laboral para generar un cuestionario que fue aplicado a la industria maquiladora. Se obtuvieron 165 respuestas válidas al cuestionario, las cuales fueron analizadas mediante un modelo de ecuaciones estructurales basado en mínimos cuadrados parciales para validar tres hipótesis que relacionan las variables. El principal hallazgo que se encontró fue en la satisfacción laboral, donde se determina por el impacto que es la principal variable para obtener mayores niveles de rendimiento operativo, de forma independiente y mediadora, por lo cual la implicación práctica es implementar estrategias de desarrollo profesional y laboral dirigidas al trabajador para incrementar su satisfacción y así aumentar los beneficios sustanciales para la empresa.

PALABRAS CLAVE: liderazgo transaccional; satisfacción laboral; rendimiento operativo; modelado de ecuaciones estructurales.

ABSTRACT

This paper examines the impact of transactional leadership on operational performance with job satisfaction as a mediating variable in the manufacturing industry in Ciudad Juarez, Chihuahua, Mexico. A literature review on transactional leadership, operational performance and job satisfaction was carried out to generate a questionnaire that was applied to the maquiladora industry. 165 valid responses to the questionnaire were obtained, which were analyzed using a structural equation model (SEM) based on partial least squares (PLS) to validate three hypotheses that relate the variables. The main finding is in job satisfaction, where it is determined by the impact that is the main variable to obtain higher levels of operational performance, independently and moderately, so practical participation is to implement professional and labor development strategies aimed at the worker to increase their satisfaction and thus increase substantial profits for the company.

KEYWORDS: transactional leadership; job satisfaction; operational performance; structural equation modeling.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Jorge Luis García Alcaraz.
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez,
Instituto de Ingeniería y Tecnología.
DIRECCIÓN: , Av. del Charro núm. 450 norte, Ciudad Juárez,
Chihuahua, México, C. P. 32310.
CORREO ELECTRÓNICO: jorge.garcia@uacj.mx

Fecha de recepción: 27 de julio de 2023. **Fecha de aceptación:**
14 de agosto de 2023. **Fecha de publicación:** 30 de agosto de
2023.



I. INTRODUCCIÓN

La evolución del liderazgo ha cambiado en las últimas décadas, de enfocarse en rasgos y características ^[1] a centrarse en las relaciones entre el líder y el seguidor, lo que ha beneficiado la comprensión y el impacto que puede tener el líder en una empresa. Según Carreiro y Oliveira ^[2], el liderazgo puede ser definido como “la capacidad que posee un individuo para influir, motivar y permitir que otros contribuyan a la efectividad y el éxito de las compañías de las cuales son miembros”, y debido a esto el liderazgo debe considerarse igual de esencial que cualquier otro recurso de la organización ^[3].

LIDERAZGO TRANSACCIONAL (LT)

El LT, que comprende una serie de intercambios entre el líder y el seguidor, es decir, se proporcionan recompensas o castigos a los seguidores dependiendo de los resultados obtenidos en la ejecución de tareas ^{[3]-[5]}, tiene como prioridad la supervisión y control a los seguidores. Sin embargo, este liderazgo funciona bien cuando la compañía se encuentra estable, pero si está en renovación entonces este puede ser perjudicial debido a que se enfoca en el desempeño cuantitativo, más que en el cualitativo ^[6].

El LT tiene tres dimensiones: *recompensa contingente*, *gestión por excepción pasiva* y *gestión por excepción activa* ^{[7],[8]}.

Recompensa Contingente (RC): Es la principal dimensión del LT debido a que establece una reciprocidad entre ambas partes: el líder otorga beneficios que pueden ser económicos o sociales ^[5] a cambio de obtener los niveles de rendimientos deseados ^[9].

Gestión por Excepción Activa (GEA): Se basa en la supervisión y el constante monitoreo del cumplimiento en las metas organizacionales ^[10] y está orientada a revisar posibles deficiencias en los sistemas y promover alternativas antes de que se presenten problemas graves, con el fin de mantener el *statu quo* ^[11].

Gestión por Excepción Pasiva (GEP): Esta dimensión puede no aportar beneficios al estilo de liderazgo transaccional, sino que, al contrario, lo debilita debido a su comportamiento descuidado ^[5]. Algunos investigadores eliminan esta dimensión de sus análisis debido al impacto negativo que posee, ya que en este estilo el líder

deja a sus seguidores sin guía y solo participa si es absolutamente necesario ^[5], por lo cual en algunas ocasiones puede verse esta dimensión como un liderazgo liberal o falta de liderazgo.

El liderazgo en sí es visto como un catalizador que mejora el rendimiento organizacional de las empresas ^[12]. El sector manufacturero mexicano es reconocido en el mundo por su alta mano de obra calificada con un total de 2702 116 empleos a nivel nacional. Esa industria ha tenido presencia en Ciudad Juárez desde la década de los 60 y actualmente es el principal sector productivo; cuenta con 24 parques industriales y 328 maquiladoras que generan 322 787 empleos directos en nueve sectores productivos ^[13]. La maquiladora puede ser definida como una empresa filial de capital extranjero que se ubica en territorio mexicano por posición estratégica, mano de obra de calificada y beneficios en tratados comerciales que se tienen con los Estados Unidos de América y Canadá ^[14].

En la revisión de literatura no se encontró ninguna investigación sobre el impacto del liderazgo transaccional en la industria maquiladora en Ciudad Juárez y dada la importancia económica y social que tiene este sector, se requiere de estudios que ayuden a aportar y generar conocimiento en este ámbito y así contribuir a llenar este vacío en el saber. Por ello, la aportación de este estudio se enfoca en la exploración del uso del liderazgo transaccional del personal administrativo de la industria maquiladora y el impacto que tiene en el rendimiento operativo, directa e indirectamente, utilizando la variable mediadora *satisfacción laboral*.

REVISIÓN DE LITERATURA E HIPÓTESIS

En este estudio se analizó el liderazgo transaccional, la relación con la satisfacción laboral y el rendimiento operativo.

Rendimiento Operativo (RO)

Debido a los cambios en el mercado y la globalización, las compañías han tenido que evolucionar para poder competir a lo largo del tiempo, por lo cual se han adaptado a los avances tecnológicos y la personalización en las demandas entre otras cosas. Según Gupta ^[15], con la finalidad de mantener los clientes existentes y llegar a nuevos mercados, las compañías tienen la necesidad de innovar en productos y servicios. De acuerdo a Trattner

et al. [16], el RO y las estrategias de fabricación impactan significativamente en el rendimiento organizacional [17], el cual es de vital importancia para evaluar las metas organizacionales y encontrar discrepancias.

Existen diferentes formas de medir el RO y tradicionalmente se han utilizado métricos de costes, ya sea de material, mano de obra y equipo, sin embargo, El-Khalil y Mezher [18] encontraron cinco principales métricos del RO en la industria automotriz en los Estados Unidos de América, los cuales son calidad, productividad, moral de los empleados, entrega y coste, cada uno de ellos con sus indicadores claves.

Relación del LT con RO

Uslu *et al.* [19] realizaron un estudio sobre los diferentes estilos de liderazgo y el efecto en el RO a través de la gestión del conocimiento y cómo impacta en la innovación organizativa y la iniciativa empresarial. Por otro lado Liphadzi *et al.* [20] llevaron a cabo un estudio donde exploraron los estilos de liderazgo y el éxito en los proyectos en la industria de la construcción en Sudáfrica. La muestra fue de 110 cuestionarios aplicados a directores de proyectos y los resultados indican una relación positiva del LT con el éxito en los proyectos, a diferencia del estilo de liderazgo autocrático y *laissez faire*, donde no se encontró relación. Además, İşcan *et al.* [21] consideran que el RO se puede mejorar a través de la GEA del LT debido a que el éxito en los proyectos y la innovación forman parte del RO en una compañía.

Por tanto, se estableció la siguiente hipótesis para el presente estudio:

Hipótesis 1. El liderazgo transaccional tiene un efecto directo y positivo sobre el rendimiento operativo en la industria maquiladora mexicana.

Satisfacción laboral (SL)

La satisfacción laboral se refiere al grado de conformidad que siente el trabajador por la realización de su propia actividad [22], es decir, la felicidad que experimenta un empleado con respecto a su función, su entorno laboral y las condiciones en su espacio de trabajo. Algunos estudios han demostrado que la alta satisfacción se relaciona con factores intrínsecos, tales como la participación en eventos, comunicación efectiva, logro de resultados y contacto con los clientes [23].

Además, también está presente la superación laboral y la sensación de ayuda [24]. Sin embargo, se ha encontrado que existen diferentes causas por las que el trabajador se siente insatisfecho, tales como burocracia laboral, falta de oportunidades o promoción, carga de trabajo excesiva, limitación de recursos, estrés y constante monitoreo a las actividades que realiza en su puesto de trabajo [22], [25].

Relación del LT con SL

El LT motiva a los seguidores a través de sus intereses personales y necesidades [11], [26] y establece expectativas claras de la función a desarrollar [7], por lo cual se reduce o elimina la ambigüedad que puede ocasionar estrés laboral. En este liderazgo se establecen intercambios intrínsecos o extrínsecos, tales como reconocimiento profesional, elogios o aumento salarial [5].

Debido a que el LT puede influir de forma interna y externa en el trabajador con el respecto a su nivel de motivación y conformidad en su labor, se estableció la siguiente hipótesis:

Hipótesis 2. El liderazgo transaccional tiene un efecto directo y positivo sobre la satisfacción laboral.

Relación del SL con RO

Para Godás *et al.* [22], hay dos variables que están relacionadas con la satisfacción laboral: el rendimiento del trabajo (utilidad, ayuda y autosatisfacción) y el valor del propio trabajo (emocionante e interesante). El-Khalil y Mezher [18] consideran que la moral del empleado es uno de los principales indicadores para medir el rendimiento operativo. Nguyen [27] realizó un estudio donde examina la relación del líder-seguidor y el rendimiento operativo, teniendo como variables mediadoras la satisfacción laboral y la innovación. Los resultados mostraron que se tiene un impacto indirecto en el RO de los empleados a través de estas dos variables, por lo cual sugieren que el personal directivo debe centrarse en desarrollar las relaciones con sus empleados para mejorar la satisfacción, la innovación y el rendimiento operativo. Con base en esto, se estableció la siguiente hipótesis:

Hipótesis 3. La satisfacción laboral tiene un efecto directo y positivo sobre el rendimiento operativo.

La Figura 1 presenta de manera gráfica las relaciones entre las variables que se han planteado en las hipótesis.

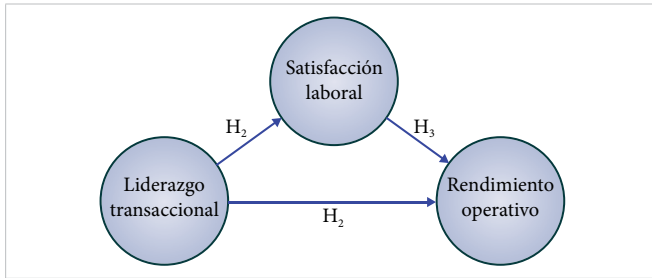


Figura 1. Modelo de investigación e hipótesis.

II. METODOLOGÍA

Para evaluar cada hipótesis planteada en la Figura 1 se procedió a obtener la información necesaria en la industria manufacturera en Ciudad Juárez, por lo cual se ejecutaron las siguientes seis fases.

FASE 1. DISEÑO Y ELABORACIÓN DEL CUESTIONARIO

Se realizó una revisión de literatura de más de cien artículos, la cual se utilizó para la validez de contenido del cuestionario. La búsqueda se hizo con las palabras clave *liderazgo transaccional*, *satisfacción laboral* y *rendimiento operativo*, limitando la búsqueda al periodo 2015-2021. Una vez identificado los ítems que integran cada una de las variables en la Figura 1, se diseñó un cuestionario con una parte introductoria y dos secciones.

La parte introductoria se diseñó para obtener información demográfica asociada al encuestado, tal como el puesto que ocupa, antigüedad en el puesto, sexo y el sector al que pertenece la empresa donde labora y el tamaño de esta. En la primera sección del cuestionario se presentan los ítems del LT [28] y, por último, en la segunda sección se indagó sobre la satisfacción laboral [29] y el rendimiento operativo [30]. Antes de su aplicación, se realizó una validación por jueces, donde 20 gerentes en la industria maquiladora y 15 académicos apoyaron con su experiencia en el proceso de adaptación y contextualización regional. Después de dos rondas con los jueces, se obtuvo un cuestionario final mejorado, mismo que se programó para ser respondido en una escala Likert de cinco puntos usada para indicar el nivel de utilización que los encuestados perciben en la compañía donde laboran.

FASE 2. RECOLECCIÓN DE DATOS

Se utilizó la plataforma de Google Forms para la aplicación del cuestionario con un método de muestreo estratificado, dirigiéndose a gerentes e ingenieros que se encuentran trabajando en la industria manufacturera y que tienen personal a su cargo. La recolección de la información se realizó del 30 de agosto al 10 de octubre de 2021. Fue una condición el que los encuestados fueran responsables de un equipo de trabajo y con más de un año en la compañía y puesto de trabajo, con la finalidad de que tuvieran proyectos concluidos y conocieran el desempeño de estos.

FASE 3. REGISTRO Y DEPURACIÓN DE LA INFORMACIÓN

De la plataforma Google Forms se descargó un archivo con extensión XLSX (Microsoft Excel) y después se utilizó el software SPSS v.25[®] para el análisis, dada la facilidad en la generación de los reportes y gestión de las variables. De acuerdo con [31], la depuración de la base de datos se realizó en dos actividades:

- Se identificaron los valores extremos con la finalidad de evitar sesgo en el análisis, por lo que se estandarizaron los valores de cada ítem, donde valores mayores a 4 en valor absoluto se consideran valores extremos, mismos que fueron remplazados por la mediana.
- Se calculó la desviación estándar de cada fila o caso y cada valor obtenido menor a 0.5 se eliminó del análisis debido a que se asumió que era un encuestado no comprometido.

FASE 4. ANÁLISIS DESCRIPTIVO

Para describir la muestra y sus características, los datos demográficos de la primera sección del cuestionario se analizaron mediante tablas cruzadas, con la finalidad de conocer la estructura de esta, la experiencia de los encuestados y los sectores industriales que más han participado en el estudio.

La sección uno y dos del cuestionario fueron respondidas en una escala ordinal, por lo cual se realizó un análisis descriptivo de los ítems, donde se obtuvo la mediana como medida de tendencia central y el rango intercuartílico como medida de dispersión, que es la diferencia del tercer y primer cuartil [32], [33].

FASE 5. VALIDACIÓN DEL CUESTIONARIO

Para la validación interna se usó el Índice Alfa de Cronbach (IAC) en cada uno de los tres constructos, lo que permitió estimar la consistencia de las variables observadas, así como su independencia y correlaciones [34], [35]. Se consideró que al acercarse a la unidad el valor IAC en cada ítem, este presentó consistencia interna, pero cuando se aproximó a 0 o a un valor menor de 0.7 careció de consistencia.

Cabe mencionar que para mejorar el IAC en los diferentes constructos se eliminaron algunas variables observadas de forma iterativa. Se utilizaron además los siguientes índices de validación [36]:

- Para medir la validez predictiva paramétrica se utilizaron los índices R-cuadrado y R-cuadrado ajustado, de los cuales se desearon valores mayores a 0.02.
- Para la validez predictiva no paramétrica se usó el índice Q-cuadrado y se esperaron valores similares a 0 o similares a R-cuadrado.
- Para medir la validez convergente se reportó la varianza promedio extraída (AVE-Average Variance Extracted), donde se requirieron valores mayores a 0.5.
- Para medir la colinealidad se usó el factor de inflación de la varianza (VIF-Variance Inflation Factor) y se requirió que fueran valores menores a 3.3.

FASE 6. MODELO DE ECUACIONES ESTRUCTURALES

La herramienta de modelo de ecuaciones estructurales se utiliza frecuentemente en estudios en las áreas de ciencias sociales e ingeniería por la facilidad de contrastar las hipótesis que relacionan constructos que se forman por diferentes variables observadas [37], [38], por lo cual ayuda a entender los problemas y validar las relaciones estadísticamente [39]. Esta técnica ha sido usada en investigaciones similares, por ejemplo, en Ebrahimi *et al.* [40], donde se evalúa la relación entre los estilos de liderazgo y el desempeño organizacional en compañías de manufactura y es por ello que se usa en esta investigación.

El análisis se realizó mediante el software WarpPLS v. 7°, el cual se basa en mínimos cuadrados parciales y se recomienda su uso [41] cuando existen muestras peque-

ñas, con distribución no normal en los datos, muestras pequeñas y que los datos sean obtenidos en escala Likert. En este modelo, todas las pruebas de hipótesis se realizaron con un nivel de confianza de 95 % (5 % de significancia).

Para la validación del modelo, antes de su interpretación, Kock [42] sugiere estimar los seis índices de ajuste de eficiencia siguientes:

- Coeficiente medio de trayectoria (APC-Average Path Coefficient) que debe tener un p-valor asociado menor a 0.05.
- R-cuadrado medio (ARS-Average R-squared) y R-cuadrado medio ajustado (AARS-Adjusted Average R-squared) para medir la validez predictiva del modelo y el p-valor debe ser menor a 0.05.
- Factor de inflación de la varianza media del bloque (AVIF, Average Variance Inflation Factor) y medio de colinealidad total VIF (AFVIF-Average Full Collinearity VIF) para medir la colinealidad entre las variables latentes y valores menores a 3.3 son aceptables.
- Tenenhaus GoF para medir el ajuste de los datos en el modelo y valores mayores a 0.36 son aceptables.

ESTIMACIÓN DE LOS EFECTOS

Después se procedió a estimar los efectos directos, mismos que se pueden visualizar en las flechas que conectan los constructos en el modelo propuesto en la Figura 1, se presentan por un valor estandarizado β y sirven para validar las hipótesis planteadas. La hipótesis nula que se prueba es que $H_0: \beta=0$, versus la hipótesis alternativa $H_1: \beta \neq 0$. Si se demuestra estadísticamente con un nivel de confianza del 95 % que $\beta=0$, entonces se concluye que no existe una relación entre los constructos y, en caso contrario, si se demuestra que $\beta \neq 0$ independientemente del signo, entonces se concluye que hay una relación entre los constructos.

Además, en cada variable dependiente se estimó un valor de R-cuadrado como una medida de la varianza explicada por las variables latentes independientes; entonces, a cada efecto estimado se le asignó un tamaño del efecto (ES), lo que indica la cantidad de varianza que explica una variable latente independiente en específico

en la variable dependiente. La suma de los ES son igual a R-cuadrado en una variable dependiente.

Además, se calcularon los efectos indirectos, los cuales se presentan a través de dos o más segmentos y ocurren a través de una variable moderadora. Las pruebas de hipótesis son igual a las realizadas en los efectos directos. Finalmente, se estimaron los efectos totales, los cuales son la suma aritmética de los directos y de los indirectos.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección, dividida en cuatro secciones, se muestran los resultados obtenidos en el análisis del modelo.

ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LA MUESTRA

Se recibieron 168 cuestionarios antes del 10 de octubre de 2021 (fecha de corte), sin embargo, 3 fueron eliminados debido a que no cumplían con el proceso de inclusión que se realizó en el proceso de depuración, quedando un total de 165 encuestas para ser analizadas, donde el 45.5 % fueron hombres y el 54.5 % mujeres.

La *Tabla 1* reporta el puesto de los encuestados y los años que tienen en el mismo, donde se observa que en la categoría de supervisor y técnico respondieron 33 y 103, respectivamente, por lo que esos dos puestos representan el 82.42 %. Asimismo, se observa que la mayoría de los encuestados está en la categoría de 1 a 5 años de experiencia en su puesto, con 84.84 %.

TABLA 1
PUESTO Y AÑOS DE DESEMPEÑO EN ESTE

PUESTO	AÑOS EN EL PUESTO			TOTAL
	1-5	5-10	+10	
Gerente	9	1	2	12
Ingeniero	12	4	1	17
Supervisor	25	7	1	33
Técnico	94	5	4	103
Total	140	17	8	165

La *Tabla 2* muestra el número de empleados en la empresa y el sector industrial al que pertenecen y se observa que la mayoría de las empresas son grandes, ya que 95 de ellas tienen más de 500 empleados (57.57 %) y que los sectores industriales representativos son el automotriz y el de servicios, con 39 y 35 casos, respectivamente.

TABLA 2
NÚMERO DE EMPLEADOS Y SECTOR INDUSTRIAL

NÚMERO DE EMPLEADOS	SECTOR INDUSTRIAL								TOTAL
	A	L	P	M	E	M	C	S	
0-50	1	1	0	3	2	1	1	17	26
51-100	4	3	1	2	2	1	1	2	16
101-200	2	2	1	0	0	0	1	5	11
201-500	2	3	1	0	2	3	1	5	17
501 o más	30	20	3	2	3	24	7	6	95
Total	39	29	6	7	9	29	11	35	165

A-Automotriz, L-Eléctrica/electrónica, P-Plásticos, M-Metales, E-Empaques, D-Médico, C-Comunicaciones, S-Servicios.

ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LOS ÍTEMS

En la *Tabla 3* se presenta el análisis descriptivo de los ítems que conforman los constructos validados y que se integran al modelo. Se puede observar que todos los ítems de cada variable presentan valores por encima de tres. En relación con el rango intercuartílico, los valores bajos indican un consenso adecuado entre los encuestados

TABLA 3
ÍNDICES DE EFICIENCIA DEL MODELO

ÍTEM	MEDIANA	IQR
Liderazgo transaccional		
Centrar la atención en las irregularidades, errores, excepciones y desviaciones de las normas.	4.02	1.53
Concentra su atención en el tratamiento de las quejas y los fallos.	4.1	1.64
Dirige su atención hacia el incumplimiento de las normas.	3.77	1.51
No interviene hasta que el problema se vuelve grave.	3.89	1.6
Satisfacción laboral		
En general, estoy muy satisfecho con este trabajo.	3.93	1.52
El trabajo que hago en este empleo es muy significativo para mí.	3.94	1.72
Estoy satisfecho con las oportunidades de crecimiento y desarrollo personal en mi trabajo.	3.73	1.99
La mayoría de las personas de este trabajo están muy satisfechas con el mismo.	3.52	1.89
Rendimiento operativo		
La empresa aporta al cliente una mayor satisfacción en comparación con los principales competidores.	4.21	1.41
El desarrollo de la calidad de nuestra empresa es mejor que el de los principales competidores.	4.22	1.48
La gestión de costes de nuestra empresa es mejor que la de los principales competidores.	3.92	1.51
La capacidad de respuesta de nuestra empresa es mejor que la de los principales competidores.	3.92	1.48
La productividad de nuestra empresa es mejor que la de los principales competidores.	4.05	1.43

VALIDACIÓN DE LAS VARIABLES LATENTES

La **Tabla 4** presenta los índices de validación de cada constructo y se observa que todos ellos se cumplen. Por ejemplo, para la validez paramétrica se presentan los índices R-cuadrado y R-cuadrado ajustado, los cuales son mayores a 0.02. También, para la validez interna el índice alfa de Cronbach presenta valores mayores a 0.7 en todos los constructos, por lo que se procede a la integración de las variables en el modelo.

TABLA 4
VALIDACIÓN DE VARIABLES LATENTES

ÍNDICE	LT	SL	RO
R-cuadrado		0.059	0.329
R-cuadrado ajustado		0.053	0.320
Fiabilidad compuesta	0.872	0.920	0.926
Alfa de Cronbach	0.779	0.884	0.900
Varianza promedio extraída	0.694	0.742	0.714
VIF de colinealidad total	1.118	1.288	1.356
Q-cuadrado		0.067	0.331

MODELO DE ECUACIONES ESTRUCTURALES

La **Tabla 5** ilustra los índices de eficiencia del modelo, donde APC, ARS y AARS indican que se tiene validez predictiva aceptable, ya que todos los valores tienen un p-valor asociado menor a 0.05. Los valores VIF y AFVIF son menores a 3.3 e indican que el modelo no tiene problemas de colinealidad y, finalmente, se observa que Tenenhaus GoF es mayor a 0.36, por lo que se concluye que el modelo es válido y puede ser interpretado.

TABLA 5
VALIDACIÓN DE VARIABLES LATENTES

ÍNDICE	VALOR
Coeficiente de trayectoria promedio (APC)	0.321, P<0.001
R-cuadrado promedio (ARS)	0.194, P=0.003
R-cuadrado promedio ajustado (AARS)	0.187, P=0.003
VIF de bloque promedio (AVIF), idealmente ≤3.3	1.041
VIF de colinealidad total promedio (AFVIF), idealmente ≤ 3.3	1.254
Tenenhaus GoF (GoF), idealmente ≥ 0.36	0.373

La **Figura 2** presenta el modelo analizado, donde se muestran los valores estandarizados de β y el p-valor asociado para la prueba de hipótesis y en cada constructo dependiente se indica el valor R-cuadrado como

medida de la varianza explicada por las variables independientes.

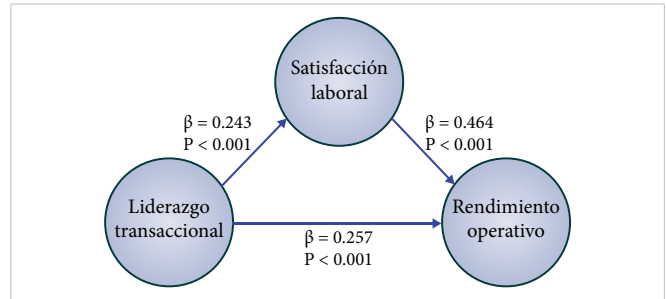


Figura 2. Evaluación del modelo inicial.

EFFECTOS DIRECTOS Y VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS

La **Tabla 6** presenta la evaluación del modelo con los efectos directos entre los constructos, los cuales son representados por las flechas en la **Figura 1** y **Figura 2**. El valor de dependencia entre los constructos se representa por β y está asociado a un p-valor para medir la significancia estadística de las relaciones. Por ejemplo, la relación entre TL y IC muestran valores de $\beta=0.268$ y $P<0.001$, lo cual indica que cuando TL incrementa su desviación estándar en una unidad, IC aumenta en 0.268 unidades, lo que demuestra la relación entre ambas variables.

La **Tabla 6** muestra además el único efecto indirecto (EI) que se obtiene entre los constructos del modelo y, asimismo, se muestran los efectos totales que se obtiene al sumar los efectos directos e indirectos.

TABLA 6
RESUMEN DE EFECTOS

HIPÓTESIS	EFECTO DIRECTO		EFECTO INDIRECTO	EFECTO TOTAL
	β	DECISIÓN		
H1 LT→RO	0.257 (<0.001)	Aceptada	0.113 (0.019)	0.370 (<0.001)
H2 LT→SL	0.243 (<0.001)	Aceptada		0.243 (<0.001)
H3 SL→RO	0.464 (<0.001)	Aceptada		0.464 (<0.001)

IV. CONCLUSIONES

La investigación realizada en la industria manufacturera en Ciudad Juárez ha demostrado que el liderazgo transaccional tiene impacto directa e indirectamente en el rendimiento operativo, sin embargo, el principal

hallazgo que se encontró fue en la satisfacción laboral debido a que presentó el mayor impacto hacia el RO.

La implicación del impacto de SL \rightarrow RO puede servir para que los gerentes en la industria maquiladora mexicana tomen decisiones acertadas, debido a que este hallazgo demuestra cómo las variables cualitativas impactan en las cuantitativas, es decir, un ambiente laboral que promueva el desarrollo de los empleados y estos se sientan satisfechos tendrá un impacto directo en la calidad y la productividad de la empresa y esto, a su vez, en un mejor desempeño en el mercado.

CONCLUSIONES DEL MODELO DE ECUACIONES ESTRUCTURALES

En el modelo inicial, representado en la [Figura 1](#), se establecieron tres hipótesis y con base en los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

H1. Existe suficiente evidencia estadística para afirmar que el LT tiene un efecto directo y positivo en RO en la industria maquiladora, dado que cuando la primera variable aumenta su desviación estándar en una unidad, la segunda variable latente aumenta 0.257 unidades, lo cual implica que los gerentes en la industria maquiladora mexicana pueden promover cambios en el sistema con fin de evitar irregularidades, errores, excepciones y desviaciones de las normas y, por tanto, poder cumplir y aumentar el RO.

H2. Existe suficiente evidencia estadística para afirmar que el LT tiene un efecto directo y positivo en SL en la industria maquiladora, dado que cuando la primera variable aumenta su desviación estándar en una unidad, la segunda variable latente aumenta 0.243 unidades. Esto implica que los líderes en la maquiladora mexicana pueden centrar sus esfuerzos en incrementar la motivación a través de programas que desarrollen al trabajador laboral y profesionalmente para incrementar su satisfacción personal.

H3. Existe suficiente evidencia estadística para afirmar que el SL tiene un efecto directo y positivo en RO en la industria maquiladora, dado que cuando la primera variable aumenta la desviación estándar en una unidad, la segunda variable latente aumenta 0.464 unidades. Esta implicación demuestra que los empleados que tienen un ambiente laboral basado en el crecimiento y desarrollo profesional son más productivos y la compañía obtiene

mejores resultados operativos al aumentar la calidad, la capacidad y la productividad al mismo tiempo que se reducen los costos.

LIMITACIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES

Los resultados obtenidos en el modelo son aplicables a los datos en la industria maquiladora en Ciudad Juárez, lo que puede representar una limitación. Además, el estudio presenta un tamaño de muestra relativamente pequeño y las variables observadas no explican el 100 % de las variables latentes, lo que indica que existen más variables que influyan, por lo que en futuras investigaciones se puede analizar el impacto de los estilos de liderazgo transaccional en el rendimiento financiero e incrementar el tamaño de muestra.

REFERENCIAS

- [1] S. P. Robbins y T. A. Judge, N. Jersey, ed. *Organizational Behavior*, 15.^a ed. New Jersey: Pearson, 2013.
- [2] H. Carreiro y T. Oliveira, "Impact of transformational leadership on the diffusion of innovation in firms: Application to mobile cloud computing", *Comput. Ind.*, vol. 107, pp. 104-113, 2019, doi: [10.1016/j.compind.2019.02.006](https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.02.006).
- [3] B. K. AlNuaimi, S. K. Singh y B. Harney, "Unpacking the role of innovation capability: Exploring the impact of leadership style on green procurement via a natural resource-based perspective", *J. Bus. Res.*, vol. 134, pp. 78-88, 2021, doi: [10.1016/j.jbusres.2021.05.026](https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.05.026).
- [4] B. Mekpor y K. Dartey-Baah, "Leadership styles and employees' voluntary work behaviors in the Ghanaian banking sector", *Leadersh. Organ. Dev. J.*, vol. 38, no. 1, pp. 74-88, 2017, doi: [10.1108/LODJ-09-2015-0207](https://doi.org/10.1108/LODJ-09-2015-0207).
- [5] D. A. Aga, "Transactional Leadership and Project Success: The Moderating Role of Goal Clarity", *Procedia Comput. Sci.*, vol. 100, pp. 517-525, 2016, doi: [10.1016/j.procs.2016.09.190](https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.190).
- [6] A. Eliyana, S. Ma'arif y Muzakki, "Job satisfaction and organizational commitment effect in the transformational leadership towards employee performance", *Eur. Res. Manag. Bus. Econ.*, vol. 25, no. 3, pp. 144-150, 2019, doi: [10.1016/j.iedeen.2019.05.001](https://doi.org/10.1016/j.iedeen.2019.05.001).

- [7] J. Martin, "Personal Relationships and Professional Results: The Positive Impact of Transformational Leaders on Academic Librarians", *J. Acad. Librariansh.*, vol. 43, no. 2, pp. 108-115, mar. 2017, doi: [10.1016/j.acalib.2017.01.012](https://doi.org/10.1016/j.acalib.2017.01.012).
- [8] B. M. Bass, *Leadership and performance beyond expectations*. Nueva York: Free Press, 1985.
- [9] M. S. Gençer y Y. Samur, "Leadership Styles and Technology: Leadership Competency Level of Educational Leaders", *Procedia Soc Behav Sci*, vol. 229, pp. 226-233, 2016, doi: [10.1016/j.sbspro.2016.07.132](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.07.132).
- [10] M. Birasnav y J. Bienstock, "Supply chain integration, advanced manufacturing technology y strategic leadership: An empirical study", *Comput Ind Eng*, vol. 130, pp. 142-157, 2019, doi: [10.1016/j.cie.2019.01.021](https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.021).
- [11] A. R. A. Arokiasamy, A. G. K. b. Abdullah y A. Ismail, "Correlation between Cultural Perceptions, Leadership Style and ICT Usage by School Principals in Malaysia", *Procedia Soc Behav Sci*, vol. 176, pp. 319-332, feb. 2015, doi: [10.1016/j.sbspro.2015.01.478](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.01.478).
- [12] S. Samad, "The Influence of Innovation and Transformational Leadership on Organizational Performance", *Procedia Soc Behav Sci*, vol. 57, pp. 486-493, oct. 2012, doi: [10.1016/j.sbspro.2012.09.1215](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.1215).
- [13] IMMEX, *Monthly Statistical Information*, pp. 1-5, my. 7, 2021.
- [14] J. L. García-Alcaraz, A. A. Maldonado-Macías, S. I. Hernández-Hernández, J. L. Hernández-Arellano, J. Blanco-Fernández y J. C. Sáenz Díez-Muro, "New product development and innovation in the maquiladora industry: A causal model", *Sustainability*, vol. 8, no. 8, 2016, doi: [10.3390/su8080707](https://doi.org/10.3390/su8080707).
- [15] K. Gupta, ed., *Innovations in Manufacturing for Sustainability*. Switzerland: Springer, 2019.
- [16] A. Trattner, L. Hvam, C. Forza y Z. N. L. Herbert-Hansen, "Product complexity and operational performance: A systematic literature review", *CIRP J Manuf Sci Technol*, vol. 25, pp. 69-83, 2019, doi: [10.1016/j.cirpj.2019.02.001](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2019.02.001).
- [17] Y. Yusuf, A. Gunasekaran, T. Papadopoulos, W. Auchterlounie, D. Hollomah y M. Menhat, "Performance measurement in the natural gas industry", *Benchmarking: An International Journal*, vol. 25, no. 8, pp. 2913-2930, 2018, doi: [10.1108/BIJ-11-2017-0301](https://doi.org/10.1108/BIJ-11-2017-0301).
- [18] R. El-Khalil and M. A. Mezher, "The mediating impact of sustainability on the relationship between agility and operational performance", *Oper. Res. Perspect.*, vol. 7, p. 100171, 2020, doi: [10.1016/j.orp.2020.100171](https://doi.org/10.1016/j.orp.2020.100171).
- [19] T. Uslu, I. A. Bülbül y D. Çubuk, "An Investigation of the Effects of Open Leadership to Organizational Innovativeness and Corporate Entrepreneurship", *Procedia Soc Behav Sci*, vol. 195, pp. 1166-1175, 2015, doi: [10.1016/j.sbspro.2015.06.169](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.169).
- [20] M. Liphadzi, C. Aigbavboa y W. Thwala, "Relationship Between Leadership Styles and Project Success in the South Africa Construction Industry", *Procedia Eng.*, vol. 123, pp. 284-290, 2015, doi: [10.1016/j.proeng.2015.10.091](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.091).
- [21] Ö. F. İřcan, G. Ersarı y A. Naktiyok, "Effect of Leadership Style on Perceived Organizational Performance and Innovation: The Role of Transformational Leadership Beyond the Impact of Transactional Leadership – An Application among Turkish SME's", *Procedia Soc Behav Sci*, vol. 150, pp. 881-889, 2014, doi: [10.1016/j.sbspro.2014.09.097](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.09.097).
- [22] A. Godás, A. Quiroga-Carrillo, G. Míguez-Salina y J. Núñez-García, "Motivation, social work and immigration: Job satisfaction according to a qualitative and quantitative evaluation", *Int. Soc. Work*, vol. 66, no. 2, 2022, doi: [10.1177/00208728211065709](https://doi.org/10.1177/00208728211065709).
- [23] V. Papadaki y E. Papadaki, "Job satisfaction in social services in Crete, Greece: social workers' views", *Eur. J. Soc. Work*, vol. 9, no. 4, pp. 479-495, 2006, doi: [10.1080/13691450600958528](https://doi.org/10.1080/13691450600958528).
- [24] N. J. Negi, P. Forrester, M. Calderon, K. Esser y D. Parrish, "We are at Full Capacity": Social care workers persisting through work-related stress in a new immigrant settlement context in the United States", *Health Soc Care Community*, vol. 27, no. 5, e793-e801, sept. 2019, doi: [10.1111/hsc.12802](https://doi.org/10.1111/hsc.12802).

- [25] L. Vyas y S. Luk, "Frazzled care for social workers in Hong Kong: Job stress circumstances and consequences", *Int. Soc. Work*, vol. 54, no. 6, pp. 832-851, 2010, doi: [10.1177/0020872810382684](https://doi.org/10.1177/0020872810382684).
- [26] J. MacGregor Burns, *Leadership*. Nueva York: Harper & Row, 1978.
- [27] T. H. Nguyen, "Impact of leader-member relationship quality on job satisfaction, innovation and operational performance: A case in Vietnam", *J. Asian Finance Econ. Bus.*, vol. 7, no. 6, pp. 449-456, 2020, doi: [10.13106/JAFEB.2020.VOL7.NO6.449](https://doi.org/10.13106/JAFEB.2020.VOL7.NO6.449).
- [28] F. Donkor, Z. Dongmei y I. Sekyere, "The Mediating Effects of Organizational Commitment on Leadership Styles and Employee Performance in SOEs in Ghana: A Structural Equation Modeling Analysis", *SAGE Open*, vol. 11, no. 2, 2021, doi: [10.1177/21582440211008894](https://doi.org/10.1177/21582440211008894).
- [29] E. Ünler y B. Kılıç, "Paternalistic Leadership and Employee Organizational Attitudes: The Role of Positive/Negative Affectivity", *SAGE Open*, vol. 9, no. 3, 2019, doi: [10.1177/2158244019862665](https://doi.org/10.1177/2158244019862665).
- [30] T. T. Son, L. B. Phong y B. T. T. Loan, "Transformational Leadership and Knowledge Sharing: Determinants of Firm's Operational and Financial Performance", *SAGE Open*, vol. 10, no. 2, 2020, doi: [10.1177/2158244020927426](https://doi.org/10.1177/2158244020927426).
- [31] J. F. Hair, Jr., W. C. Black, B. J. Babin y R. E. Anderson, *Multivariate Data Analysis*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010.
- [32] J. García-Alcaraz, A. Maldonado-Macías, G. Alor-Hernández y C. Sanchez-Ramírez, "The impact of information and communication technologies (ICT) on agility, operating y economical performance of supply chain", *Adv. Prod. Eng. Manag.*, vol. 12, no. 1, pp. 29-40, 2017, doi: [10.14743/apem2017.1.237](https://doi.org/10.14743/apem2017.1.237).
- [33] W. J. Tastle y M. J. Wierman, "Consensus and dissent: A measure of ordinal dispersion", *Int. J. Approx. Reason.*, vol. 45, no. 3, pp. 531-545, ag. 2007, doi: [10.1016/j.ijar.2006.06.024](https://doi.org/10.1016/j.ijar.2006.06.024).
- [34] R. Tuesca-Molina, N. Rodríguez-Ávila y C. Moreno-Castro, "Escala de percepción ante crisis y pandemias: desarrollo y validación de una escala pedagógica", *Educación Médica*, vol. 22, no. 4, jul.-ag. 2021, doi: [10.1016/j.edumed.2021.01.005](https://doi.org/10.1016/j.edumed.2021.01.005).
- [35] K. A. Adamson y S. Prion, "Reliability: Measuring Internal Consistency Using Cronbach's α ", *Clin. Simul. Nurs.*, vol. 9, no. 5, pp. e179-e180, 2013, doi: [10.1016/j.ecns.2012.12.001](https://doi.org/10.1016/j.ecns.2012.12.001).
- [36] N. Kock. *WarpPLS 5.0 User Manual*. Laredo, TX, EUA, 2015, pp. 1-108.
- [37] F. Doral, I. Rodríguez y A. Meseguer, "Modelos de ecuaciones estructurales en investigaciones de ciencias sociales: Experiencia de uso en Facebook", *Revista de Ciencias Sociales (Ve)*, vol. 24, no. 1, pp. 22-40, en.-mar. 2018. Accedido: mar. 1, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=28059578003>.
- [38] F. Chan, M. K. Gloria y E.-J. Lee, "Structural equation modeling in rehabilitation counseling research", *RCB*, vol. 511, pp. 53-66, 2007.
- [39] C. Nitzl, "Partial least squares structural equation modelling (PLS-SEM) in management accounting research: Directions for future theory development", *J. Account. Lit.*, vol. 37, pp. 19-35, 2016, doi: [10.2139/ssrn.2469802](https://doi.org/10.2139/ssrn.2469802).
- [40] P. Ebrahimi, S. M. Moosavi y E. Chirani, "Relationship between Leadership Styles and Organizational Performance by Considering Innovation in Manufacturing Companies of Guilan Province", *Procedia Soc Behav Sci*, vol. 230, pp. 351-358, sept. 2016, doi: [org/10.1016/j.sbspro.2016.09.044](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.09.044).
- [41] N. Kock, "From composites to factors: Bridging the gap between PLS and covariance based structural equation modelling", *Info Systems J*, vol. 29, pp. 674 - 706, 2019.
- [42] N. Kock, "Using WarpPLS in e-collaboration studies: What if I have only one group and one condition?", *Int. J. e-Collab.*, vol. 9, no. 3, pp. 1-12, jul.-sept. 2013.

Gestión de riesgos operacionales en el transporte primario del aguacate Hass

Operational risks management in the primary transport of Hass avocado

Marcela Cañas Osorio¹, Alejandro Serna Grisales¹, Vivian Lorena Chud Pantoja¹✉, Juan Carlos Osorio Gómez²

¹Ingeniería Industrial, Universidad del Valle, Sede Zarzal, Colombia

²Ingeniería Industrial, Universidad del Valle, Sede Cali, Colombia

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo presentar una propuesta para gestionar, identificar y priorizar los riesgos operacionales en el transporte primario del aguacate Hass. Dadas las condiciones de la industria frutícola y hortícola en Colombia, se busca gestionar las cadenas agro y reducir las pérdidas de alimentos. Se seleccionó el aguacate Hass por ser uno de los productos agrícolas con mayor acogida dinámica de crecimiento. Para lograr que la cadena de suministro sea más eficiente, es fundamental gestionar los riesgos operacionales, es decir, aquellos eventos inesperados que pueden afectar el desempeño de la cadena y que se asocian a las personas, equipos, procesos y algunos eventos externos. De esta manera, se identificaron los riesgos en cadenas hortofrutícolas con un enfoque de cuestionario, se seleccionaron los riesgos operacionales en el transporte primario del aguacate Hass en una región de Colombia mediante la matriz de probabilidad e impacto y se priorizaron con la aplicación del método Despliegue de la Función de Calidad Difuso. Los principales riesgos fueron fallas técnicas en los vehículos, flotas inapropiadas y malas prácticas en el cargue y descargue. Si bien el trabajo se orienta a una actividad específica dentro de la cadena del aguacate, puede extenderse a otros eslabones y cadenas agroalimentarias.

PALABRAS CLAVE: Aguacate Hass; gestión del riesgo en cadenas de suministro; QFD difuso.

ABSTRACT

The objective of this research is to present a proposal to manage, identify and prioritize operational risks in the primary transportation of the Hass avocado. Given the conditions of the fruit and vegetable industry in Colombia, it seeks to manage agricultural chains and reduce food losses. The Hass avocado is selected, as it is one of the agricultural products with the greatest growth dynamics. To make the supply chain more efficient, it is essential to manage operational risks, that is, those unexpected events that can affect the performance of the chain and that are associated with people, equipment, processes, and some external events. In this way, the risks in fruit and vegetable chains were identified with a questionnaire approach, the operational risks in the primary transportation of the Hass avocado in a region of Colombia were selected through the probability and impact matrix and they were prioritized through the application of the Fuzzy Quality Function Deployment (FQFD) method. The main risks were technical failures in the vehicles, inappropriate fleets and bad practices in loading and unloading. Although the work is oriented to a specific activity within the avocado chain, it can be extended to other links and agri-food chains.

KEYWORDS: Hass avocado; supply chain risk management; fuzzy QFD.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Vivian Lorena Chud Pantoja.

INSTITUCIÓN: Universidad del Valle, Sede Zarzal.

DIRECCIÓN: Calle 14 n.º 7-134, Barrio Bolívar, Zarzal, Colombia.

CORREO ELECTRÓNICO: vivian.chud@correounivalle.edu.co

Fecha de recepción: 31 de julio de 2023. **Fecha de aceptación:** 15 de agosto de 2023. **Fecha de publicación:** 31 de agosto de 2023.



I. INTRODUCCIÓN

Una cadena de suministro consta de dos o más organizaciones legalmente separadas que están conectadas por flujos de materiales, de información y financieros [1] que requieren que el flujo de materiales sea eficiente mediante el adecuado funcionamiento de todos los procesos, sin embargo, existen algunos eventos que pueden producir alteraciones en la cadena que reciben el nombre de *riesgos* y que pueden afectar las actividades o el funcionamiento de las operaciones de esta. Aunque existen diferentes tipos de riesgos en la cadena de suministro [2], esta investigación se centró en los *riesgos operacionales*, catalogados como la posibilidad de que eventos inesperados ocurran como consecuencia de alteraciones en el normal funcionamiento e incluye todas las cosas que pueden pasar en las actividades del día a día [3], generando impactos negativos en el desempeño de la cadena de suministro.

De esta manera, la gestión del riesgo se ha convertido en la clave para evitar las pérdidas de los negocios [4]. En el contexto de la gestión del riesgo en las cadenas de suministro (SCRM, por sus siglas en inglés) los eventos son caracterizados por su probabilidad de ocurrencia y sus consecuencias relacionadas dentro de la cadena [5]. Se considera que el riesgo de la cadena de suministro es la pérdida potencial en términos de sus valores objetivo de eficiencia y eficacia, debido a la evolución incierta de las características de la cadena cuando ocurren eventos detonantes [5].

Se ha identificado que las cadenas de suministros de alimentos y las hortofrutícolas tienen una prioridad en la gestión de los riesgos, dado que el impacto por los riesgos operacionales puede afectar toneladas de alimentos que dejan de ser consumidos por la población y además generan impactos ambientales y económicos. Por ejemplo, de acuerdo con el Departamento Nacional de Planeación, Colombia tiene una oferta disponible de alimentos para consumo humano de 28 millones de toneladas al año [6], sin embargo, no es aprovechada en su totalidad, pues a lo largo de la cadena alimentaria se generan pérdidas y desperdicios. Según este mismo departamento, en el país se pierden y se desperdician un total de 9.76 millones de toneladas, lo cual equivale al 34 % del total de las producidas [6]. En otras palabras, por cada 3 toneladas de producción se pierde o se desperdicia una tonelada y las frutas y verduras representan un 58 % de esos desperdicios. De acuerdo al Ministerio de

Salud y la FAO [7], en Colombia se desperdicia el 39 % total de la oferta de frutas y verduras en postcosecha. De esta pérdida, y conforme al Departamento Nacional de Planeación, el 32 % correspondía a frutas (1154 923 toneladas) y el 7 % a verduras (272.009 toneladas) [6]. La mayoría de los productos perecederos son difíciles de asegurar, por lo que se necesitan unas ciertas condiciones técnicas de transporte y almacenamiento [8].

De esta manera, la industria frutícola y hortícola en Colombia tiene una “gran oportunidad de desarrollo debido a las condiciones especiales que se prestan para que su proceso de cosecha sea altamente efectivo” [9]. Actualmente, uno de los productos agrícolas con gran acogida es el aguacate Hass, ya que es la variedad que más se comercializa en el mundo y la que presenta mayor dinámica de crecimiento [10].

Aunque Colombia se considera un actor nuevo en el mercado mundial de aguacate, sus compradores se concentran en el mercado europeo [11]. La industria del aguacate en Colombia viene presentando una dinámica de crecimiento muy importante [12]: es el tercer frutal en importancia dentro del agro nacional. En el *ranking* mundial del aguacate, Colombia es el cuarto país productor y el tercero en términos de área cosechada, con una participación del 6 % del área mundial y el área sembrada en aguacates aumentó cerca del 49 % en los últimos cuatro años, lo que evidencia un interés por consolidar el cultivo y cosecha del aguacate en la oferta productiva agrícola del país debido a la demanda del producto en los mercados internacionales [13].

Es necesario que las cadenas de suministro sean cada vez más eficientes, como lo es el caso del aguacate Hass en Colombia, para lo cual se deben tener en cuenta algunas consideraciones en la gestión de sus riesgos operacionales. Es así, como se recomiendan a las empresas implementar un marco de trabajo encaminado a la debida gestión de los riesgos a lo largo de las cadenas de suministro agrícola [14], donde se establezcan sistemas sólidos de gestión empresarial para que se identifiquen, evalúen y prioricen los riesgos en la cadena y se diseñen estrategias para responder a los riesgos. Asimismo, se ha propuesto como una de las medidas para la reducción de Pérdidas y Desperdicios de Alimentos (PDA) promover la mejora de las infraestructuras, particularmente el transporte, la energía y las instalaciones del mercado, buscando generar acciones de concientización en estos sectores [14].

Por lo anterior, se considera que la cadena de suministro del aguacate Hass tiene una pérdida potencial, ya que sigue siendo un desafío cumplir con las expectativas de los consumidores en términos de calidad de la fruta después de la cosecha. Los defectos internos que afectan al aguacate representan más del 10 % de esta, lo cual causa una considerable insatisfacción del consumidor e impactan negativamente las intenciones de compra repetidas [15]. Dichos defectos a menudo son consecuencia de la infraestructura, tecnología, transporte, refrigeración y empaque deficientes [16], así como de la falta de relaciones de colaboración entre los segmentos clave del mercado [17].

De esta manera, esta investigación se centró en proponer una metodología para gestionar los riesgos en el transporte primario del aguacate Hass, de tal forma que sirva para definir acciones para minimizar o eliminar de los riesgos operacionales priorizados. A continuación, se presentan los principales conceptos sobre gestión del riesgo.

II. METODOLOGÍA

La metodología propuesta para la priorización de los riesgos operacionales en el transporte primario del aguacate Hass consta de tres fases: 1) caracterizar la cadena productiva del aguacate Hass y definir los riesgos operacionales en el transporte, 2) clasificar y priorizar los riesgos y 3) definir las alternativas de mitigación de los principales riesgos. En la Figura 1 se observa un esquema de la metodología propuesta.

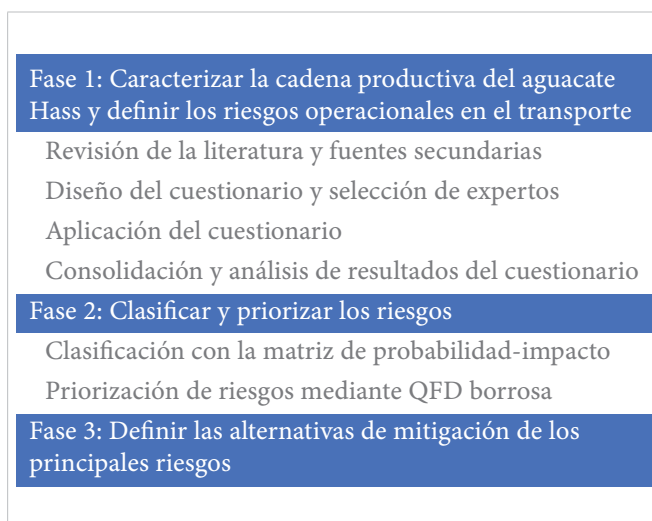


Figura 1. Metodología para priorizar los riesgos operacionales en el transporte primario de aguacate Hass.

En la primera fase se realizó una revisión de la literatura para recolectar los datos históricos de los riesgos presentes en la cadena y posteriormente establecer riesgos operacionales asociados al transporte primario del aguacate Hass, a través del diseño y realización de cuestionarios que involucró a expertos del sector y en gestión del riesgo.

En la fase 2 se clasificaron los riesgos identificados a partir de una matriz de probabilidad-impacto para definir los riesgos críticos. Después, se aplicó la herramienta multicriterio denominada Despliegue de la Función de Calidad Difuso (FQFD-Fuzzy Quality Function Deployment) para priorizar los riesgos identificados.

Una vez que se identificaron los riesgos operacionales con su respectiva probabilidad de ocurrencia e impacto, se realizó la matriz de probabilidad-impacto, donde el eje vertical fue la probabilidad de ocurrencia (P. O.) y el horizontal la magnitud del impacto (M. I.) en un plano cartesiano cuya intersección del eje de las abscisas con las ordenadas equivale a cero.

En la matriz se ubicó cada uno de los riesgos y posteriormente se clasificaron de acuerdo en la zona en que se localizaron. Se manejó un código de colores en la matriz, donde las zonas roja y naranja son críticas, las amarillas medias y las verdes no relevantes.

Los pasos para aplicar la FQFD (o QFD difuso) fueron identificar las variables internas *qués*, determinar la importancia relativa para los *qués*; identificar los objetivos estratégicos o *cómos*; determinar el puntaje de correlación entre los *qués* y los *cómos*; asignar el peso a cada *cómo*, determinar los impactos de los riesgos sobre los objetivos estratégicos y priorizar los riesgos.

Esta metodología ha sido utilizada para priorizar riesgos en otros sectores, como la industria farmacéutica, por ejemplo [15], [16].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

FASE 1. RIESGOS OPERACIONALES EN EL TRANSPORTE PRIMARIO

La Tabla 1 enlista 18 riesgos operacionales en el transporte primario del aguacate Hass encontrados mediante una revisión de la literatura y, además, muestra las referencias correspondientes.

TABLA 1
RIESGOS OPERACIONALES EN EL TRANSPORTE PRIMARIO DEL AGUACATE HASS SEGÚN LA REVISIÓN DE LITERATURA

No.	RIESGO	AUTORES
1	Control inadecuado de la temperatura del vehículo: Mal funcionamiento o falla en el equipo regulador de la temperatura del vehículo	[17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25]
2	Huelgas, paros, manifestaciones: Eventos que se puedan presentar en las vías de transporte	[23], [26]
3	Vías en mal estado	[23], [24], [27]
4	Prácticas, condiciones o equipos inapropiados para el cargue y descargue	[23], [24], [27]
5	Fallas técnicas de los vehículos	[23], [24]
6	Flota inapropiada: Vehículos que no cumplan con las BPM para el transporte de alimentos	[23], [24], [28]
7	Embalaje de los productos deficiente	[23], [24]
8	Contaminación cruzada: Por condiciones higiénicas inadecuadas de vehículos contaminados, herramientas utilizadas en el cargue, descargue y transporte de los vehículos y por parte del personal	[18], [22], [23], [24]
9	Delitos, robos y actos terroristas	[23], [24], [29], [30]
10	Deficientes controles de plagas en unidades de transporte	[23], [24]
11	Variación en los costos del transporte	[23], [24]
12	Falta de trazabilidad de los productos durante el transporte	[23], [24]
13	Problemas de documentación del vehículo	[23], [24]
14	Mala comunicación entre el dueño de la carga y el transportador que hace que se dirija al destino equivocado	[23], [24]
15	Daños mecánicos o lesiones al aguacate (cortes, rasguños, abrasiones, impactos y compresión): Durante el cargue, transporte y descargue	[31], [32], [33]
16	Agotamiento del material para embalaje y transporte: por ejemplo, cajas, canastas, estibas y sacos para el embalaje	[22]
17	Falta de comprensión y/o conocimiento de las operaciones, durante el cargue, descargue. Impericia de los conductores	[22], [23], [24], [26], [27]
18	Contaminación biológica: Por excrementos de roedores o insectos en los vehículos, cajas o recipientes para transportar el aguacate	[22]

* BPM: Buenas Prácticas de Manufactura.

DISEÑO Y APLICACIÓN DEL CUESTIONARIO

Se diseñó un cuestionario digital en el que cada riesgo operacional identificado en la literatura tenía tres preguntas: ¿aplica como riesgo operacional?, ¿cuál es la probabilidad de ocurrencia? y ¿cuál es la magnitud

de impacto? La escala para valorar la ocurrencia y el impacto fue: muy bajo (1), bajo (2), medio (3), alto (4) y muy alto (5).

Para calcular los valores de probabilidad de ocurrencia y magnitud del impacto se emplearon las siguientes ecuaciones:

$$P. O. = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N_i} * \%N_i \quad (1)$$

donde x_i es la respuesta de la probabilidad de ocurrencia dada por el encuestado * peso asignado, N_i el número de encuestados para los cuales el riesgo aplica y N el número total de encuestados.

$$M. I. = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N_i} * \%N_i \quad (2)$$

donde x_i es la respuesta de la magnitud de impacto dada por el encuestado * peso asignado, N_i es el número de encuestados para los cuales el riesgo aplica y N es el número total de encuestados.

En la **Tabla 2** se presentan los riesgos, la probabilidad de ocurrencia y el impacto. Se puede inferir entonces que son factores biológicos los que afectan la calidad del producto y son factores externos los que afectan el transporte primario.

La selección de los expertos se basó en contactar personas relacionadas estrechamente con el transporte primario en la cadena del aguacate Hass, entre los cuales predominaron productores y transportadores. Se tuvo en cuenta a los productores para el caso de estudio, ya que se identificó que la mayoría de estos son quienes realizan el transporte hacia los Centros de Distribución Logística (CEDI) o líneas de empaque.

FASE 2. CLASIFICACIÓN Y PRIORIZACIÓN DE LOS RIESGOS OPERACIONALES EN EL TRANSPORTE PRIMARIO

Matriz de probabilidad e impacto

En la **Figura 2** se presenta la matriz de probabilidad-impacto de los riesgos identificados, que se ubicaron de acuerdo con la valoración que presentan en la probabilidad de ocurrencia y magnitud de impacto dada por los expertos. De acuerdo con estos resultados, los riesgos más importantes para los expertos son R2, R3, R4, R5, R6, R8, R15, R18. Sobre estos riesgos se enfocó la actividad de priorización con la metodología QFD difuso.

TABLA 2
RIESGOS IDENTIFICADOS EN EL TRANSPORTE DEL AGUACATE, OCURRENCIA E IMPACTO

NÚM. DE OPERARIO Y OPERACIONES	RIESGO	% APLICACIÓN	P. O.	M. I.
R2	Huelgas, paros, manifestaciones	100	3.00	4.33
R3	Vías en mal estado	100	2.89	3.89
R5	Fallas técnicas de los vehículos	100	2.44	4.22
R8	Contaminación cruzada	100	2.44	4.89
R15	Daños mecánicos o lesiones al aguacate (cortes, rasguños, abrasiones, impactos y compresión)	100	2.78	4.67
R18	Contaminación biológica	100	2.22	4.78
R4	Prácticas, condiciones o equipos inapropiados para el cargue y descargue	89	2.22	3.67
R6	Flota inapropiada	89	2.78	4.00
R10	Deficientes controles de plagas en unidades de transporte	89	1.67	4.00
R11	Variación en los costos del transporte	89	1.67	2.22
R7	Embalaje de los productos deficiente	78	1.78	3.33
R12	Falta de trazabilidad de los productos durante el transporte	78	1.56	2.22
R13	Problemas con la documentación del vehículo	78	1.22	2.22
R16	Agotamiento del material para embalaje y transporte	78	1.89	3,11
R17	Falta de comprensión y/o conocimiento de las operaciones	78	1.56	3.11
R9	Delitos, robos y actos terroristas	67	1.44	2.56
R14	Mala comunicación entre el dueño de la carga y el transportador que hace que se dirija al destino equivocado	67	0.89	2.67
R1	Control inadecuado de la temperatura del vehículo	56	1.67	2.44

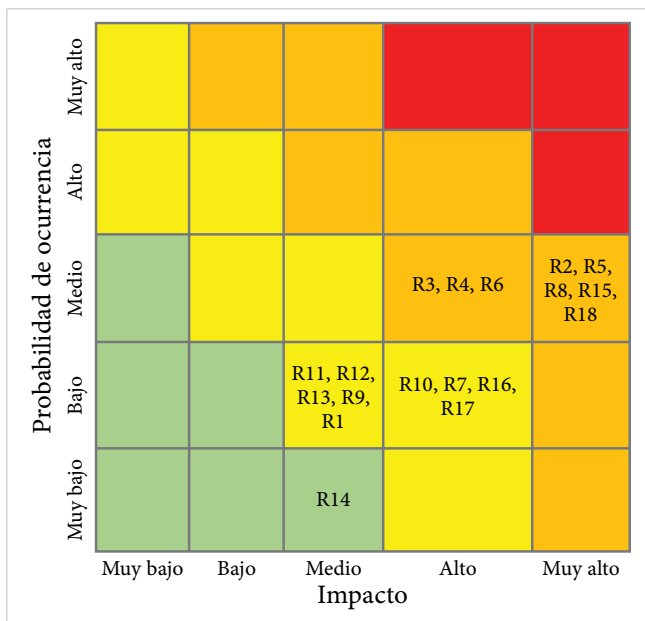


Figura 2. Matriz de P. O. y M. I. de los riesgos presentes en el transporte primario del aguacate Hass.

QFD difuso

Una vez aplicada la metodología QFD difuso se obtuvieron los riesgos priorizados según los valores del Índice de Prioridad de Riesgo Final (IPRF), que sirven

para determinar la prioridad al ser valores no difusos, donde el número mayor obtenido hace referencia a un riesgo prioritario. Además, una ventaja del FQFD es que permite determinar los límites de acuerdo con la perspectiva de la compañía, estableciéndose valores para los riesgos bajos, medios y altos y, de esta manera, tener claro sobre cuáles enfocar acciones de mitigación o eliminación de estos.

En los resultados presentados en la [Tabla 3](#) se muestran tres riesgos en el intervalo entre medio y alto, es decir, que de acuerdo con la metodología desarrollada estos deben ser los primeros en los cuales enfocar las acciones orientadas hacia la mitigación o eliminación de estos.

Además, es interesante ver que los riesgos R5 y R6 están relacionados directamente con los vehículos utilizados para transportar aguacate y el R4 con el cargue y los equipos de este proceso, lo que permite concluir que las acciones quedan en manos directas de los encargados del transporte del aguacate y no depende de terceros, como sí pueden ser las acciones asociadas al riesgo R15, que se encuentra en el siguiente intervalo y que al momento no se considera crítico para el proceso.

TABLA 3
RESULTADO FINAL DE PRIORIZACIÓN DE RIESGOS

RIESGOS	ÍNDICE DE PRIORIDAD DE RIESGO (IPR)			IPR FINAL
Alto				226
R5. Fallas técnicas en los vehículos	92	174	286	181
R6. Flota inapropiada	93	169	278	177
R4. Prácticas, condiciones o equipos inapropiados para el cargue y descargue	85	158	263	166
Medio				
R15. Vías en mal estado	79	149	250	157
R3. Daños mecánicos o lesiones al aguacate (cortes, rasguños, abrasiones, impactos y compresión)	77	146	247	154
R8. Contaminación cruzada	64	124	216	132
R18. Contaminación biológica	62	120	210	128
R2. Huelgas, paros, manifestaciones	59	120	211	127

IV. CONCLUSIONES

La identificación y priorización de los riesgos operacionales en el transporte primario del aguacate Hass permite dar a conocer los riesgos que impactan en esta cadena de suministro, de manera tal que los agentes involucrados en el transporte puedan aplicar acciones orientadas a la mitigación para reducir así daños y desperdicios del aguacate Hass que se ven reflejados en pérdidas económicas y en defectos de no calidad.

Mediante la herramienta metodológica FQFD se logró dar una valoración y priorización de los riesgos más relevantes en el transporte primario del aguacate Hass en el norte del Valle del Cauca, junto con la valiosa ayuda y experiencia de nueve expertos del sector mencionado, quienes atendieron las encuestas y preguntas para poder realizar el proceso de priorización de los riesgos y la utilización de la herramienta metodológica.

Los daños causados al fruto por las malas prácticas en el cargue y descargue son algunas de las falencias que se presentan en el proceso de transporte posiblemente por la falta de inversión en instrumentos que reduzcan la manipulación manual y en materiales de empaque apropiados que disminuyan la vibración del fruto e impidan que el fruto reciba golpes.

Los otros riesgos identificados, valorados y priorizados fueron las fallas técnicas de los vehículos y la utilización de flotas inapropiadas utilizadas para el transporte del aguacate. Esto se debe principalmente a la falta de organización y utilización de listas de chequeo y verificación de los vehículos que permitan identificar fallas que deberían ser avisadas con tiempo para evitar demoras, desperdicios y costos. También, se recomienda realizar mantenimientos periódicos que deben quedar registrados para llevar un mejor control de los vehículos. En el caso del riesgo por utilizar flotas inapropiadas, se recomienda hacer las adecuaciones necesarias a los vehículos para garantizar el adecuado transporte de los aguacates y así evitar contratiempos, daños al producto y desmejorar la calidad o, en su defecto, se sugiere hacer inversiones en nuevos vehículos idóneos para realizar un mejor transporte del aguacate Hass con el fin de mantener la calidad y eficiencia en este proceso.

REFERENCIAS

- [1] H. Stadler y C. Kilger, *Supply chain management and advanced planning. Concepts, models, software, and case studies*, 4.ª ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, doi: 10.1007/978-3-540-74512-9.
- [2] C. S. Tang, “Perspectives in supply chain risk management”, *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 103, no. 2, pp. 451-488, oct. 2006, doi: 10.1016/J.IJPE.2005.12.006.
- [3] C. Bolance, M. Guillén, J. Gustafsson y J. P. Nielsen, *Quantitative Operational Risk Models*. CRC Press, 2023.
- [4] J. C. Osorio, D. F. Manotas y L. Rivera, “Priorización de Riesgos Operacionales para un Proveedor de Tercera Parte Logística - 3PL”, *Inf. Tecnol.*, vol. 28, no. 4, pp. 135-144, 2017, doi: 10.4067/S0718-07642017000400016.
- [5] I. Heckmann, T. Comes y S. Nickel, “A critical review on supply chain risk – Definition, measure and modeling”, *Omega*, vol. 52, pp. 119-132, abr. 2015, doi: 10.1016/J.OMEGA.2014.10.004.
- [6] Departamento Nacional de Planeación, “Pérdida y desperdicio de alimentos en Colombia”, Bogotá, Colombia, vol. 39, p. 116, 2016.
- [7] S. Salcedo y L. Guzmán, eds., *Agricultura familiar en América Latina y El Caribe: Recomendaciones de política*. Santiago, Chile: FAO, 2014.

- [8] Y. Huang, “Based on the Supply Chain of Agricultural Products Logistics Operational Risk Assessment and Avoid”, en *Proc. - 2015 7th Int. Conf. Meas. Technol. Mechatronics Autom. ICMTMA 2015*, sept. 2015, pp. 246-254, doi: [10.1109/ICMTMA.2015.67](https://doi.org/10.1109/ICMTMA.2015.67).
- [9] M. M. Martínez y J. C. Quintero, “Estado actual de los desperdicios de frutas y verduras en Colombia”, 4.º *Congr. Int. AmITIC 2017*, Popayán, Colombia, sept. 6-8, 2017.
- [10] Agronet, “Colombia está cada vez más cerca de lograr exportación de aguacate Hass a EE. UU.”, *Agronet.gov*, jun. 23, 2016. [En línea]. Disponible en: www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/Colombia-está-cada-vez-más-cerca-de-lograr-exportación-de-aguacate-hass-a-EE-UU---24-de-junio-de-2016.aspx
- [11] A. Iragorri, “Organización de cadena productiva del aguacate”, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Colombia, dic. 2015. [En línea]. Disponible en: sioc.minagricultura.gov.co/Aguacate/Documentos/2015-12-30 Cifras Sectoriales.pdf
- [12] A. E. Mejía, “Perspectivas del aguacate Hass en Colombia”, Corpohass, Colombia, 2015. [En línea]. Disponible en: www.avocadosource.com/wac8/section_07/mejiahernandezae2015.pdf
- [13] Minagricultura, “Cadena de aguacate. Indicadores e Instrumentos”, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Ministerio de Agricultura, Colombia, oct. 2018. [En línea]. Disponible en: sioc.minagricultura.gov.co/Aguacate/Documentos/2018-10-30 Cifras Sectoriales.pdf
- [14] OECD/FAO, *Guía OCDE-FAO para las cadenas de suministro responsable en el sector agrícola*. París: OECD Publishing, 2017, doi: [10.1787/9789264261358-es](https://doi.org/10.1787/9789264261358-es).
- [15] M. Mazhar, D. Joyce, P. Hofman y N. Vu, “Factors contributing to increased bruise expression in avocado (*Persea americana* M.) cv. ‘Hass’ fruit”, *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 143, pp. 58-67, sept. 2018, doi: [10.1016/j.postharvbio.2018.04.015](https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.04.015).
- [16] J. Gustavsson, C. Cederberg, U. Sonesson y R. O.k A. Meybeck, *Global food losses and food waste: Extent, causes and Prevention*, Roma: FAO, 2011.
- [17] C. Arias y E. H. M. Moors, “Reducing post-harvest food losses through innovative collaboration: Insights from the Colombian and Mexican avocado supply chains”, *J. Clean. Prod.*, vol. 199, pp. 1020-1034, oct. 2018, doi: [10.1016/j.jclepro.2018.06.187](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.187).
- [18] J. C. Osorio y K. Torres, “Operational risk management in the pharmaceutical supply chain using ontologies and fuzzy QFD”, *Procedia Manuf.*, vol. 51, no. 2019, pp. 1673–1679, 2020, doi: [10.1016/j.promfg.2020.10.233](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.233).
- [19] M. Bill, D. Sivakumar, A. K. Thompson y L. Korsten, “Avocado Fruit Quality Management during the Postharvest Supply Chain”, *Food Rev. Int.*, vol. 30, no. 3, pp. 169-202, 2014, doi: [10.1080/87559129.2014.907304](https://doi.org/10.1080/87559129.2014.907304).
- [20] D. L. Milne, “Avocado quality assurance: Who? Where? When? How?”, *SAAGA*, vol. 21, pp. 39-47, 1998. [En línea]. Disponible en: www.avocadosource.com/Journals/SAAGA/SAAGA_1998/SAAGA_1998_PG_039-047.pdf
- [21] G. J. Eksteen, J. Bezuidenhout, B. Suter, R. Robinson, N. Ray y S. A. Rowe, “The Effect of Preshipment Factors on the Market Quality of Fuerte Avocados 1996 Season”, *SAAGA*, vol. 20, pp. 93-96, 1997.
- [22] Procolombia, *El mercado del aguacate en Estados Unidos 2017*. Gobierno de Colombia, 2017.
- [23] L. Dorantes, L. Parada y A. Ortiz, *AVOCADO: Post-harvest operations*. Roma: FAO, 2004.
- [24] Y. A. Cuero, “Propuesta metodológica de gestión de riesgos para una línea de empaque de aguacate Hass en el Valle del Cauca”, tesis de pregrado, Univ. del Valle, Zarzal, Colombia, 2019.
- [25] J. C. Osorio, D. F. Manotas y L. Rivera, “Priorización de Riesgos Operacionales para un Proveedor de Tercera Parte Logística-3PL”, *Inf. Tecnol.*, vol. 28, no. 4, pp. 135-144, 2017, doi: [10.4067/S0718-07642017000400016](https://doi.org/10.4067/S0718-07642017000400016).
- [26] A. Agredo y D. M. Vargas, “Priorización de riesgo operacional en el transporte tercerizado de frutas y verduras en el valle del cauca”, tesis de pregrado, Univ. del Valle, Zarzal, Colombia, 2017.
- [27] L. L. Vorster, J. C. Toerien y J. J. Bezuidenhout, “Temperature management of avocados — An integrat-

ed approach”, SAAGA, vol.13, pp. 43-46, 1990.

- [28] E. A. Silva de Lima, F. R. Farias, L. Gondim de Almeida y A. O. Girão de Almeida, “Riscos logísticos na distribuição de hortifrúti”, *Gestão e Desenvolvimento*, vol. 14, no. 1, pp. 114-127, 2017.
- [29] “Cadena del Aguacate en Antioquia”, Cámara de Comercio de Medellín para Antioquia, 2012. [En línea]. Disponible en: www.camaramedellin.com.co/Portals/0/Biblioteca/Estudios-economicos/cadenas-productivas-regionales/1_Aguacates_Oct19.pdf
- [30] J. A. Herrera, E. Venegas y L. Madrigal, “Proporciones de daños mecánicos y su efecto en calidad postcosecha de aguacate ‘hass’”, *Remexca*, no. 19, esp., 2017, pp. 3897-3909, dic. 2017, doi: 10.29312/remexca.v0i19.659.
- [31] E. Cerruto, C. Aglieco, K. Gottschalk, J. Surdilovic, G. Manetto y M. Geyer, “FEM analysis of effects of mechanical impact parameters on fruit characteristics”, *Int. Agric. Eng. J.*, vol. 17, no. 3, pp. 430-440, 2015.
- [32] U. L. Opara y P. B. Pathare, “Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce — A review”, *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 91, pp. 9-24, 2014, doi: 10.1016/j.postharvbio.2013.12.009.
- [33] R. Polat, T. Aktas y A. Ikinci, “Selected Mechanical Properties and Bruise Susceptibility of Nectarine Fruit”, *Int. J. Food Prop.*, vol. 15, no. 6, 2012, doi: 10.1080/10942912.2010.498546.

RECONOCIMIENTOS

Se expresan los agradecimientos a la Universidad del Valle, Colombia, por el apoyo para el desarrollo de estas investigaciones que aportan en la formación de los estudiantes de Ingeniería Industrial.

Beneficios de Gestión Visual sobre Justo a Tiempo en la industria maquiladora

Benefits of Visual Management over Just in Time in the maquiladora industry

José Roberto Díaz-Reza¹✉, Jorge Luis García-Alcaraz², Luis Javier Márquez Figueroa¹

¹Depto. de Ing. Eléctrica y Computación, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

²Depto. de Ing. Industrial y Manufactura, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

RESUMEN

Lean Manufacturing es un conjunto de herramientas enfocadas en la mejora continua de los procesos de producción mediante la reducción de los desperdicios para ofrecer un buen servicio al cliente mediante la calidad. En este artículo se presenta un modelo de ecuaciones estructurales que relaciona tres herramientas de Lean Manufacturing (Andon, Gestión Visual y Justo a Tiempo). En este modelo se proponen tres hipótesis que se validaron utilizando la información de 240 empresas maquiladoras del norte de México obtenida mediante un cuestionario. El objetivo de este artículo es cuantificar el efecto de las herramientas de Gestión Visual y Andon sobre Justo a Tiempo dentro de las empresas maquiladoras. Para validar las hipótesis del modelo se utilizó el software WarpPls 7.0[®] con la técnica de mínimos cuadrados parciales. Los resultados indican que existe una relación directa de Gestión Visual sobre Andon con un tamaño de $\beta=0.525$, Gestión Visual afecta de manera positiva a Justo a Tiempo con un tamaño de $\beta=0.256$ y, por último, Andon también tiene un efecto sobre la filosofía Justo a Tiempo con $\beta=0.373$. El análisis de sensibilidad mostró que es importante que los administradores se aseguren de ejecutar las actividades de implementación de Gestión Visual y Andon para garantizar el correcto funcionamiento de Justo a Tiempo.

PALABRAS CLAVE: Andon; Gestión Visual; Justo a Tiempo; industria maquiladora; modelado de ecuaciones estructurales.

ABSTRACT

Lean Manufacturing is a set of tools focused on improving production processes by reducing waste to provide good customer service through quality. This paper presents a structural equation model that relates three Lean Manufacturing tools (Andon, Visual Management and Just-in-time). This model proposes three hypotheses validated using information from 240 maquiladora companies in northern Mexico obtained through a questionnaire. This article aims to quantify the effect of Visual Management and Andon tools on Just-in-time within maquiladora companies. WarpPls 7.0[®] software that integrates the partial least squares (PLS) technique was used to validate the model's hypotheses. The results indicate a direct relationship between Visual Management on Andon with a size of $\beta=0.525$, and Visual Management positively affects Just-in-time with a size of $\beta=0.256$ and, finally, Andon also has an effect on the Just-in-time philosophy with $\beta=0.373$. The sensitivity analysis showed that it is essential for managers to execute the implementation activities of Visual Management and Andon to ensure the proper functioning of Just-in-time.

KEYWORDS: Andon; Visual Management; Just-in-time; maquiladora industry; Structural Equation Modeling.

Correspondencia:

DESTINATARIO: José Roberto Díaz-Reza.

INSTITUCIÓN: Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

DIRECCIÓN: Av. del Charro núm. 450 norte, col. Partido Romero, Ciudad Juárez, Chihuahua, México, C. P. 32310.

CORREO ELECTRÓNICO: inv.pos07@uacj.mx

Fecha de recepción: 27 de julio de 2023. **Fecha de aceptación:** 17 de agosto de 2023. **Fecha de publicación:** 31 de agosto de 2023.



I. INTRODUCCIÓN

La industria maquiladora ha sido el principal motor del comercio transfronterizo a lo largo de la frontera entre México y los Estados Unidos durante décadas. Las primeras maquiladoras fueron establecidas en los años sesenta y desde entonces se les permitió importar material y equipo con aranceles preferenciales para después exportar producto terminado principalmente a los Estados Unidos. Además, en combinación con los bajos salarios, resultaba atractivo para las empresas multinacionales establecer filiales de procesamiento de exportaciones en México [1]. Para mantenerse competitivas en los mercados cambiantes de hoy en día, estas empresas buscan nuevas estrategias que las ayude a mejorar sus procesos de fabricación para ofrecer una mejor respuesta al cliente en cuanto a calidad, tiempo de entrega y servicio, al menor costo posible.

Esas empresas implementan Lean Manufacturing (LM) en sus líneas de producción, que es un conjunto de métodos y técnicas desarrollado por los ingenieros de Toyota y es muy popular en las empresas del mundo para aumentar el valor del producto mediante la eliminación de los residuos [2]. LM es una filosofía de trabajo de mejora continua y optimización de un sistema de producción o de servicio, la cual tiene por objetivo la reducción de los diferentes desperdicios generados en la industria [3].

En ese sentido, existen diferentes herramientas de LM que ayudan a reducir los diferentes desperdicios y potencian la mejora continua. Una de ellas es la Gestión Visual (GV) que se utiliza para comunicar los requisitos y gestionar la eficacia de las acciones, los semáforos y las señales y la alarma de evacuación. Las tarjetas Kanban y los tableros Andon (AN) son algunos ejemplos de estas herramientas [4].

AN es un dispositivo de control visual en un área de producción que alerta a los trabajadores sobre los defectos, las anomalías del equipo u otros problemas mediante señales como luces, alarmas sonoras, etc. [5]. De esta manera, los operarios saben cuándo deben dejar de producir para corregir cualquier anomalía y evitar que los productos defectuosos pasen a la siguiente operación y, en el caso más grave, que se entreguen al cliente.

Otra de las herramientas o filosofías que ayuda a las empresas a obtener una ventaja competitiva en el mercado

es Justo a Tiempo (JIT), cuyos objetivos son entregar la cantidad adecuada en el tiempo adecuado y con la calidad demandada por el cliente mediante el involucramiento de todos los trabajadores de la empresa. Para realizar esto, en JIT se deben cumplir diferentes principios, por ejemplo, en el de producción el objetivo ideal es sincronizar la demanda y la producción para que no haya unidades de producto hasta que se haga un pedido, lo que elimina la producción innecesaria, el inventario no deseado y todos los desperdicios asociados a ellos [6].

La GV se ha aplicado en diferentes empresas para mejorar las actividades diarias, por ejemplo, Steenkamp et al. [7] desarrollaron un sistema de GV para investigar la gestión de recursos para mostrar indicadores clave del desempeño (KPI, por sus siglas en inglés) de fabricación. En Airbus UK utilizan tableros de procesos visuales para gestionar un complejo proceso [8]. Shinde et al. [9] presentan la implementación de gestión visual en combinación con otras herramientas como SMED para reducir el tiempo de cambio de modelo.

AN se ha implementado en diferentes escenarios como una herramienta de mejora, por ejemplo, Kattman et al. [10] presentan un caso de estudio dentro de una compañía aeroespacial. Wojakowski [11] utiliza un sistema AN como herramienta de información para controlar las pérdidas de producción necesarias para calcular los indicadores clave de rendimiento. Naciri et al. [12] encontraron que AN ayuda a mejorar la tasa de ocupación de la máquina y la productividad. También AN se ha analizado como herramienta de soporte de la maquinaria y equipo, así como por su contribución en la sustentabilidad ambiental en empresas maquiladoras [13]. Esto último, mediante ecuaciones estructurales.

Como se puede observar, dentro de la literatura se puede encontrar información sobre la implementación de estas herramientas (JIT, AN, GV) de forma individual para mejorar las operaciones en las empresas de manufactura. Además, se ha analizado el efecto de AN como soporte de maquinaria y equipo mediante ecuaciones estructurales. Lo que no se ha encontrado son investigaciones que relacione la GV, AN con una estrategia JIT.

En ese sentido, el objetivo de este trabajo es cuantificar, mediante un modelo de ecuaciones estructurales, la relación de la GV y AN sobre la estrategia JIT dentro de las empresas maquiladoras del norte de México y, de manera específica, en Ciudad Juárez, ya que es-

tas empresas son la principal fuente de inversión y de empleo en la ciudad. De acuerdo con la Asociación de Maquiladoras, A.C., Index Juárez, en el mes de mayo de 2022 se tenía contratadas a 336 018 personas en las 325 maquiladoras de esta ciudad, lo que representa el 6.25 % de las empresas a nivel nacional. De ahí la importancia de encontrar las mejores estrategias para que las empresas permanezcan en esta urbe para poder continuar generando empleos y atraer mayor inversión extranjera.

A continuación, se describen cada una de las herramientas de LM y, asimismo, se justifican las hipótesis a proponer.

GESTIÓN VISUAL (GV)

La GV es una estrategia de gestión que hace hincapié en la comunicación visual de proximidad y se realiza a través de diferentes herramientas, incluidos los controles visuales, que es fácil de entender en su contexto y cuyo objetivo es mejorar el rendimiento de una organización [7], [14], [15]. Un sistema de GV puede implantarse en un entorno de sistema de producción inteligente centrado en el aumento de la eficacia de la producción y la reducción de costes, y además puede ayudar a reducir o eliminar los desperdicios y crear una empresa más productiva y rentable [14], [16], [17].

ANDON (AN)

AN es un tipo de control visual que indica el estado actual del trabajo y se presenta en forma de tableros electrónicos que contienen luces para mostrar el estado de las operaciones en curso, en función de las alarmas seleccionadas y relacionadas con un color determinado. De alguna manera, busca crear conciencia basada en la información visual para mejorar la eficiencia de la industria [18]. Esto ayuda a detener el trabajo cuando se producen errores, lo que ahorra a la organización problemas importantes y costosos en el futuro [19].

Las herramientas de GV se entienden como dispositivos visuales que proporcionan información precisa cuando y donde se necesita [20], que da soporte a los principios lean y que están alineados con los comportamientos sostenibles, ya que pretende optimizar las tareas eliminando las pérdidas, permitiendo productos y servicios de alta calidad a bajo coste [21]. AN ayuda a los equipos a identificar cuándo hay una contrariedad en un proceso o una máquina y, al implementar el mecanismo, los pro-

blemas ya no se ocultan, sino que se pueden detectar y también se pueden arreglar para conseguir una calidad a la primera [22]. En ese sentido, se plantea la siguiente hipótesis:

H1: La GV tiene un efecto directo y positivo sobre AN.

JUSTO A TIEMPO (JIT)

El concepto Justo a Tiempo (JIT) se refiere a qué producir, cuándo producir y en qué cantidad y, además, garantiza la reducción del tiempo (de producción y de respuesta) y de los costes de inventario en el sistema de producción [23]. JIT es un concepto idealizado de la gestión de la cadena de suministro en el que no es necesario gestionar el inventario, pues este se suministra en el lugar y en el momento necesarios y ello trae muchos beneficios, tales como la reducción del tamaño del inventario, la reducción de los costes de almacenamiento, el aumento de la producción y una mayor eficiencia [24]. La parte central de los principios del JIT es la garantía de la satisfacción del cliente y las mejoras continuas motivadas hacia la eliminación de los residuos y la perfección [25].

La GV nació con el objetivo de eliminar los retrasos, generados por los desperdicios, que se presentan en los sistemas donde la orden es fija. Precisamente, ahí es donde AN y Kanban contribuyen a suprimirlos [26]. Ambas herramientas forman parte de dos pilares llamados automatización y JIT. Un sistema de control visual bien desarrollado aumenta la productividad, reduce los defectos y los errores, ayuda a cumplir los plazos, facilita la comunicación, mejora la seguridad y reduce los costes [5]. En ese sentido, se propone la siguiente hipótesis:

H2: La GV tiene un efecto directo y positivo sobre JIT.

AN contribuye a la reducción de los residuos de la producción ajustada reduciendo el tiempo de respuesta a los problemas [27] y puede ayudar a visualizar y controlar el progreso de la manipulación de residuos, como la recogida, el almacenamiento, la carga de camiones y la entrega [28]. Además, AN ayuda en el incremento de la productividad, las ventas y los beneficios de la empresa, y ayuda a satisfacer la demanda de los clientes en tiempo y forma [18]. En ese sentido, se plantea la siguiente hipótesis:

H3: AN tiene un efecto directo y positivo sobre JIT.

II. METODOLOGÍA

EL CUESTIONARIO

Para validar las hipótesis planteadas, se recolectó información con la ayuda de un cuestionario que se creó a partir de una revisión de literatura y que consta de 204 preguntas divididas en 25 herramientas de LM y 27 beneficios divididos en las tres categorías de sustentabilidad. Para realizar esta investigación se utilizaron solo tres variables: GV, AN y JIT, todas con tres ítems.

Para contestar las preguntas se utilizó una escala de tipo Likert de cinco puntos, donde el 1 significa totalmente en desacuerdo, 2 en desacuerdo, 3 neutral, 4 de acuerdo y el 5 totalmente de acuerdo. Además, se agregaron preguntas del tipo demográfico. Antes de utilizar el cuestionario, este se validó por juicio de expertos con la ayuda de cinco gerentes con amplia experiencia dentro de la industria y cinco académicos con el objetivo de depurar las preguntas y adaptarlo a la región. Además, se contó con la aprobación del comité de ética en la investigación de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

El cuestionario se aplicó a través Google Forms, dado que se vivían periodos de pandemia y estaba dirigido a gerentes, ingenieros, técnicos, supervisores y operarios con experiencia en la implementación de estas herramientas de LM. Para establecer contacto con los participantes, se utilizó la ayuda del Programa de la Industria Manufacturera, Maquiladora y de Servicios de Exportación (IMMEX). A cada uno de los posibles colaboradores se les envió un mensaje de correo electrónico invitándolo a participar en este proyecto y se agregó un enlace al cuestionario en línea. El periodo de administración del cuestionario fue de enero a junio de 2022.

Una vez finalizado el periodo de administración del cuestionario, se descargó la información en una hoja de Microsoft Excel y después se pasó a SPSS v.25, donde se depuró para identificar a los participantes no comprometidos, es decir, se calculó la desviación estándar de cada ítem, y si esta resultó menor de 0.5, el cuestionario fue eliminado. Además, se identificaron los valores extremos y se remplazaron por la mediana.

ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LA MUESTRA Y DE LOS ÍTEMS

Para caracterizar la muestra, se analizó toda la información demográfica obtenida, la cual se organizó me-

dante tablas cruzadas, en donde se enlistaron las categorías. Como medida de tendencia central sobre la opinión de los participantes, se calculó la mediana de los ítems, mientras que el rango intercuartílico (IQR) se usó como medida de dispersión, donde valores altos indicaron falta de concordancia entre los encuestados.

VALIDACIÓN DE LAS VARIABLES LATENTES

Antes de integrar las variables latentes al modelo, se realizó una validación estadística, por lo que se usaron los coeficientes recomendados por Kock ^[29]. Para medir la validez predictiva paramétrica, se utilizaron los índices R2 y R2 ajustada, con valores mínimos aceptables de 0.02. La validez interna se midió con los índices de alfa de Cronbach y confiabilidad compuesta, con valores mínimos aceptables de 0.7. Para medir la validez convergente y discriminante se usó el promedio de la varianza extraída, con valores de corte de 0.5. La colinealidad se midió con los índices de inflación de la varianza (VIF), con valores máximos aceptables de 5 e idealmente menores a 3.3, y para medir la validez predictiva no paramétrica se utilizó el índice Q2, con valores aceptables mayores a 0 y cercanos a R2.

MODELADO DE ECUACIONES ESTRUCTURALES

Para validar la hipótesis se utilizó el modelado de ecuaciones estructurales mediante la técnica de mínimos cuadrados parciales (PLS-SEM, por su siglas en inglés) que se ejecuta en el software WarpPLS 7.0*. PLS-SEM permite estimar modelos complejos con muchos constructos, variables indicadoras y trayectorias estructurales sin imponer supuestos de distribución a los datos ^[30]. Dentro de los modelos se pueden identificar tres efectos diferentes entre las variables: los *principales* o *directos* (representan cada una de las hipótesis), los *indirectos* (se dan a través de variables mediadoras) y los *totales* (suma de efectos directos e indirectos). Para cada uno de estos se establece una hipótesis en donde H0: $\beta=0$ y H1: $\beta\neq 0$ con un nivel de confianza del 95 %, en el que β es un valor estandarizado y representa el tamaño del efecto.

Antes de interpretar cada uno de los resultados de estos efectos, es importante analizar los índices de calidad y ajuste del modelo. Por tanto, para evaluar la validez predictiva se usó el coeficiente promedio de trayectoria (APC, por sus siglas en inglés), R2 ajustada (ARS, por sus siglas en inglés) y el promedio de la R2, con p-valo-

res menores a 0.05, ya que se utilizó un nivel de confianza del 95 %. Para medir la colinealidad se utilizó el índice factor de inflación varianza (VIF, por sus siglas en inglés) y colinealidad completa promedio VIF (AFVIF, por sus siglas en inglés), con valores recomendados menores a 5 y de forma ideal menores a 3.3. Por último, se utilizó el índice de bondad de ajuste de Tenenhaus (GoF, por sus siglas en inglés) para medir el ajuste de los datos, cuyo valor recomendado mínimo fue de 0.36.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Si un análisis sugiere que dos variables están vinculadas causalmente, significa que un aumento de la variable de predicción conduce a un aumento de la probabilidad condicional de que la variable de criterio esté por encima de un determinado valor [29]. En este documento se presentan las probabilidades condicionales (IF), las probabilidades de ocurrencia conjunta (&) y las probabilidades para cada una de las variables de forma individual.

III. RESULTADOS

DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA

Para determinar el tamaño de muestra mínimo para obtener un 95 % de confianza, un nivel de potencia de la muestra del 80 % y un mínimo coeficiente de ruta significativo absoluto en el modelo de 0.250, se utilizó el método de la raíz cuadrada inversa, la cual arrojó una muestra mínima de 95 y el método Gamma-Exponencial que arrojó una muestra mínima de 81. Después de la administración del cuestionario y la depuración de este, se obtuvo un total de 240 respuestas válidas, las cuales son suficientes.

Del análisis demográfico se concluyó que hubo una participación del 39 % del sexo femenino y 61 % masculino, los ingenieros son quienes participaron en mayor medida (39 %), seguidos por supervisores (17 %), técnicos (15 %), gerentes (11 %) y otras posiciones (18 %). El sector industrial que más participó fue el automotriz (39 %), seguido por el médico (15 %) y electrónico (13 %), entre otros.

VALIDACIÓN DE LAS VARIABLES LATENTES

La **Tabla 1** muestra los resultados para los coeficientes de las variables latentes. Se puede observar que se tiene suficiente validez predictiva paramétrica y no paramé-

trica, ya que los valores de R2 y R2 ajustada son mayores a 0.02, mientras que los de Q2 son mayores a 0 y similares a R2. Asimismo, las variables cuentan con suficiente validez interna, ya que los índices alfa de Cronbach y de validez compuesta son mayores a 0.7. Asimismo, las variables tienen suficiente validez discriminante, ya que los valores de AVE son mayores a 0.5. Además, no se tiene problemas de colinealidad, ya que el VIF es menor a 3.3. Por lo tanto, es posible integrar las variables latentes en una modelación de ecuaciones estructurales.

TABLA 1
COEFICIENTES DE VARIABLES LATENTES

ÍNDICE	VM	AN	JIT
R ²		0.276	0.309
R ² ajustado		0.273	0.303
Confiabilidad compuesta	0.950	0.936	0.932
Alfa de Cronbach	0.921	0.898	0.889
AVE	0.864	0.831	0.819
VIF	0.411	0.503	0.422
Q ²		0.275	0.312

La **Tabla 2** muestra el análisis descriptivo de los ítems, la mediana y el IQR de cada uno de estos. En cuanto a la variable GV, se puede concluir que la mayoría de los participantes concuerdan que dentro de las empresas se proporcionan señales e indicadores visuales para guiar a los empleados hacia las tareas y ubicaciones adecuadas. Esto porque el valor de la mediana es el más alto, con 4.23, y el IQR es el más bajo, lo que indica que hay un alto consenso.

Además, la mayoría de los participantes coinciden en que dentro de las empresas se fomenta la aplicación de mejoras para reducir los desperdicios, ya que la mediana es 4.11 y el IQR es 1.55. Por último, dentro de las empresas se utilizan indicadores (luminosos o sonoros) para que el operador pueda intervenir en caso de una anomalía.

MODELO DE ECUACIONES ESTRUCTURALES

En relación con el SEM, se concluye que existe asociación entre las variables, ya que los índices APC, ARS y AARS tienen valores de 0.385, 0.292 y 0.288 respectivamente, además es $p < 0.001$ para todos estos. Tampoco se tienen problemas de colinealidad, ya que los índices AVIF = 1.426, AFVIF = 1.445 son menores a 3.3 y se tiene un ajuste adecuado del modelo, ya que el GoF es 0.495. De acuerdo con esos valores, se pueden interpretar los efectos directos, indirectos y totales del PLS-SEM.

TABLA 2
ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LOS ÍTEMS

VAR	DESCRIPCIÓN	MEDIANA	IQR
VM	¿Están a la vista todas las herramientas, piezas, actividades de producción e indicadores de rendimiento del sistema de producción?	4.22	1.61
	¿Se proporcionan señales e indicadores visuales para guiar a los empleados hacia las tareas y ubicaciones adecuadas?	4.23	1.54
	¿Está la visualización de la información integrada en los elementos del proceso (espacio, maquinaria, equipos, componentes, materiales, herramientas)?	4.21	1.57
JIT	Se fomenta la aplicación de mejoras para reducir los desperdicios.	4.11	1.55
	Se minimiza el transporte de materiales.	3.99	1.69
	Se identifican los desperdicios en el proceso de producción y en la cadena de suministro.	4.09	1.63
AN	¿Está el botón para enviar una alerta al alcance del operario?	4.12	1.61
	¿Es breve el tiempo de respuesta tras el envío de una alerta?	4.15	1.60
	¿Se utiliza algún indicador (luminoso, sonoro) para que el operario pueda intervenir en caso de anomalía?	4.19	1.64

En la Figura 1 se muestra un resumen para cada hipótesis, en donde se observa el valor del efecto directo (β), el p-valor y la varianza explicada (R^2) por la variable latente independiente.

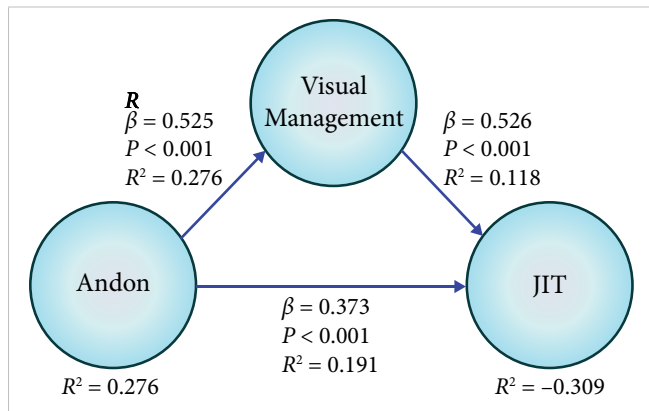


Figura 1. Modelo evaluado.

La Tabla 3 muestra la suma de efectos indirectos y totales (suma de los efectos directos e indirectos). Se puede observar que el efecto más grande es el que se da de GV sobre AN con $\beta=0.525$ (hipótesis H1), seguido por GV sobre JIT (suma del efecto directo y el efecto indirecto) que, como se mencionó anteriormente, GV tiene

un efecto sobre JIT a través de la implementación de herramientas como AN.

TABLA 3
EFECTOS INDIRECTOS Y TOTALES

VARIABLES LATENTES	EFECTOS TOTALES		EFECTOS INDIRECTOS
	VLD/ILV*	GV	AN
AN		$\beta = 0.525$ $P < 0.001$ $ES = 0.276$	
JIT		$\beta = 0.425$ $P < 0.001$ $ES = 0.208$	$\beta = 0.373$ $P < 0.001$ $ES = 0.191$
			$\beta = 0.196$ $P < 0.001$ $ES = 0.090$

*VLD: variable latente dependiente; ILV: variable latente independiente.

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

La Tabla 4 muestra el análisis de sensibilidad del modelo, es decir, muestra todos los escenarios posibles y la combinación de estos para cada hipótesis. Por ejemplo, la fila y la columna llamada probabilidad muestra cada una de las probabilidades de que sucedan dos escenarios: el primero, en el que todas las actividades de cada herramienta se realicen de forma adecuada y se denota por el signo “+” y, el segundo, en el que las actividades no se realicen de forma adecuada “-”. En ese sentido, es más probable que dentro de las empresas se implementen estas herramientas de LM. Asimismo, se puede observar la probabilidad de la combinación los escenarios de dos variables, lo cual se denota por “&”. En ese sentido, es más probable que ambas variables se presenten en sus escenarios más adecuados (+ & +) que en sus escenarios no adecuados (- & -) o la combinación de estos (- & +), (+ & -).

TABLA 4
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

NIVEL	PROB.*	GV+	GV-	AN+	AN-
		0.287	0.179	0.271	0.133
AN+	0.271	&=0.175 IF=0.609	&=0.008 IF=0.047		
AN-	0.133	&=0.017 IF=0.058	&=0.050 IF=0.279		
JIT+	0.221	&=0.129 IF=0.449	&=0.017 IF=0.093	&=0.121 IF=0.446	&=0.013 IF=0.094
JIT-	0.158	&=0.025 IF=0.087	&=0.063 IF=0.349	&=0.017 IF=0.062	&=0.063 IF=0.469

*Prob.: Probabilidad.

Por último, y lo más importante de este análisis de sensibilidad, es la probabilidad condicional denotada por

IF. Por ejemplo, si dentro de las empresas se aseguran de que las actividades de GV se desarrollen de manera adecuada (GV+), hay una probabilidad de 0.446 de establecer una filosofía JIT. Por el contrario, si GV no se implementa de forma adecuada (GV-), existe una probabilidad de 0.349 de que no se trabaje adecuadamente la filosofía JIT.

IV. CONCLUSIONES

La GV es un facilitador de herramientas como AN, dado que tiene un efecto de tamaño $\beta = 0.525$, y también es un facilitador de la filosofía JIT, dado que GV tiene un efecto de tamaño $\beta = 0.256$ dentro de las empresas maquiladoras. Por lo tanto, es importante que los administradores de estas empresas, al momento de implementar herramientas de GV, se aseguren de que las herramientas, piezas, actividades de producción e indicadores de rendimiento del sistema de producción, así como la información que se pretende mostrar en los espacios, maquinaria, equipo, componentes y herramientas, estén debidamente colocadas a la vista. Lo anterior dotará de información para identificar y reducir los desperdicios y minimizar el transporte de materiales.

La implementación de AN facilita la implementación de JIT, ya que al tener indicadores luminosos o sonoros al alcance del operario que le permitan detectar e intervenir cuando hay una avería, se pueden identificar los defectos en un producto y, también, parar el proceso para evitar que se sigan produciendo de forma inadecuada, por lo que este desperdicio se ve reducido de manera importante. Esto se puede ver en el efecto que se da entre AN y JIT que tiene un tamaño de $\beta = 0.373$, por lo que AN explica un 19.1 % de JIT.

En análisis de sensibilidad permite vislumbrar qué pasaría si cada una de las herramientas se implementan de una forma adecuada o inadecuada. Para cada una de las herramientas de manera individual, la probabilidad de que se presente un escenario positivo es más alta que para el caso contrario. Es decir, $P(GV+) = 0.287$; $P(AN+) = 0.271$; $P(JIT+) = 0.221$; $P(GV-) = 0.179$; $P(AN-) = 0.133$; $P(JIT-) = 0.158$, lo que implica que dentro de las empresas es más probable que la implementación se realice de forma adecuada cada una de las herramientas.

Cuando se habla de una probabilidad conjunta, implica, en este caso, que dos herramientas se implementen conjuntamente o que una dependa de la implementación

de otra, es decir, $P(GV+\&AN+) = 0.175$; $P(GV+\&JIT+) = 0.129$; $P(AN+\&JIT+) = 0.121$ y, en el caso contrario, $P(VM-\&AN-) = 0.025$; $P(VM-\&JIT-) = 0.063$; $P(AN-\&JIT-) = 0.063$. Esto indica que es más probable que dos herramientas se implementen de manera adecuada dentro de la industria maquiladora.

Por último, y quizá el escenario más importante, es la probabilidad condicional. En este caso, si los administradores o gerentes de las áreas correspondientes se involucran y aseguran la implementación de cada una de las herramientas, habrá una probabilidad muy alta de implementar otra herramienta que dependa de esta, por ejemplo, la probabilidad condicional (IF) de implementar un sistema AN de forma adecuada, dado que se ha implementado una GV $P(AN+/GV+) = 0.609$, pero la probabilidad de que un sistema AN no se implemente de manera adecuada, dado que un sistema de gestión visual no se haya implementado de forma correcta, es decir, $P(AN-/GV-) = 0.279$. Por tanto, es más probable que AN se implemente adecuadamente, si y solo si los administradores, gerentes o las personas encargadas de implementar estas herramientas se aseguran de hacerlo de forma correcta.

Lo mismo pasa con JIT+ y GV+: la probabilidad condicional de implementar JIT de forma adecuada, dado que se ha implementado una gestión visual adecuada, es decir, $P(JIT+/VM+) = 0.449$ y, por el contrario, $P(JIT-/VM-) = 0.349$. Por último, la probabilidad de tener JIT+, dado que se tiene AN+, es igual a 0.446, y el caso contrario, tener JIT-, dado que se tiene AN-, es 0.469.

Estos resultados otorgan un marco de referencia para las empresas que desean implementar este tipo de herramientas para mejorar sus procesos de producción, pero, sobre todo, para dar un mejor servicio al cliente.

REFERENCIAS

- [1] J. C. Castillo y G. de Vries, "The domestic content of Mexico's maquiladora exports: A long-run perspective", *J. Int. Trade Econ. Dev.*, vol. 27, no. 2, pp. 200-219, 2018, doi: 10.1080/09638199.2017.1353125.
- [2] B. Durakovic, R. Demir, K. Abat y C. Emek, "Lean manufacturing: Trends and implementation issues", *Period. Eng. Nat. Sci.*, vol. 6, no. 1, pp. 130-143, 2018, doi: 10.21533/pen.v6i1.45.

- [3] A. P. Rojas y V. Gisbert, “Lean manufacturing: herramienta para mejorar la productividad en las empresas”, *3C Empresa*, ed. esp., pp. 116-124, 2017, doi: [10.17993/3cemp.2017.especial.116-124/](https://doi.org/10.17993/3cemp.2017.especial.116-124/).
- [4] Y. Eaidgah, A. A. Maki, K. Kurczewski y A. Abdekhodae, “Visual management, performance management and continuous improvement”, *Int. J. Lean Six Sigma*, vol. 7, no. 2, pp. 187-210, 2016, doi: [10.1108/IJLSS-09-2014-0028](https://doi.org/10.1108/IJLSS-09-2014-0028).
- [5] J. K. Liker, *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*. McGraw-Hill, 2004.
- [6] C. D. Singh, R. Singh, J. S. Mand y S. Singh, “Application of Lean and JIT principles in supply chain management”, *Int. J. Manag. Res. Bus. Strategy*, vol. 2, no. 1, pp. 85-98, 2013.
- [7] L. P. Steenkamp, D. Hagedorn-Hansen y G. A. Oosthuizen, “Visual Management System to Manage Manufacturing Resources”, *Procedia Manuf.*, vol. 8, pp. 455-462, 2017, doi: [10.1016/j.promfg.2017.02.058](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.058).
- [8] G. C. Parry y C. E. Turner, “Application of lean visual process management tools”, *Prod. Plan. Control*, vol. 17, no. 1, pp. 77-86, 2006, doi: [10.1080/09537280500414991](https://doi.org/10.1080/09537280500414991).
- [9] S. Shinde, S. Jahagirdar, S. Sane y V. Karandikar, “Set-up time Reduction of a Manufacturing Line using SMED Technique”, *Int. J. Adv. Ind. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 50-53, 2014.
- [10] B. Kattman, T. P. Corbin, L. E. Moore y L. Walsh, “Visual workplace practices positively impact business processes”, *Benchmarking*, vol. 19, no. 3, pp. 412-430, 2012, doi: [10.1108/14635771211243021](https://doi.org/10.1108/14635771211243021).
- [11] P. Wojakowski, “Plant performance calculation in automotive industry using Andon system”, *Research in Logistics & Production*, vol. 5, 2015.
- [12] L. Naciri, Z. Mouhib, M. Gallab, M. Nali, R. Abbou y A. Kebe, “Lean and industry 4.0: A leading harmony”, *Procedia Comput. Sci.*, vol. 200, pp. 394-406, 2022, doi: [10.1016/j.procs.2022.01.238](https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.238).
- [13] J. L. García-Alcaraz, A. S. Morales, J. R. Díaz-Reza, E. Jiménez, C. Javierre y J. Blanco, “Effect of lean manufacturing tools on sustainability: the case of Mexican maquiladoras”, *Environ Sci Pollut Res*, vol. 29, no. 26, pp. 39622-39637, 2022, doi: [10.1007/s11356-022-18978-6](https://doi.org/10.1007/s11356-022-18978-6).
- [14] B. Tezel, L. J. Koskela y P. Tzortzopoulos, “The functions of visual management”, presentado en *International Research Symposium*, Manchester, R. U., 2009.
- [15] A. Tezel, L. Koskela y P. Tzortzopoulos, “Visual management in production management: a literature synthesis”, *J. Manuf. Technol. Manag.*, vol. 27, no. 6, pp. 766-799, 2016, doi: [10.1108/JMTM-08-2015-0071](https://doi.org/10.1108/JMTM-08-2015-0071).
- [16] N. Shimbun, ed., *Visual control systems*. Portland, OR: Productivity Press, 1995.
- [17] M. Bevilacqua, F. E. Ciarapica, G. Mazzuto y C. Paciarotti, “Visual Management implementation and evaluation through mental workload analysis”, *IFAC Proc. Vol.*, vol. 46, no. 7, pp. 294-299, 2013, doi: [10.3182/20130522-3-BR-4036.00065](https://doi.org/10.3182/20130522-3-BR-4036.00065).
- [18] S. E. Munive, V. D. Paucar, J. C. Alvarez y S. Nallusamy, “Implementation of a Lean Manufacturing and SLP-based system for a footwear company”, *Production*, vol. 32, p. e20210072, 2022, doi: [10.1590/0103-6513.20210072](https://doi.org/10.1590/0103-6513.20210072).
- [19] M. Martinelli, M. Lippi y R. Gamberini, “Poka Yoke Meets Deep Learning: A Proof of Concept for an Assembly Line Application”, *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 21, 2022, p. 11071, doi: [10.3390/app122111071](https://doi.org/10.3390/app122111071).
- [20] G. D. Galsworth, *Visual systems: Harnessing the power of the visual workplace*. Nueva York: American Management Association, 1997.
- [21] H. C. Martínez y J. Calvo-Amodio, “Towards lean for sustainability: Understanding the interrelationships between lean and sustainability from a systems thinking perspective”, *J. Clean. Prod.*, vol. 142, pp. 4384-4402, 2017, doi: [10.1016/j.jclepro.2016.11.132](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.132).
- [22] S. Z. Ismail, “Design and Development of Andon System for Machining Machine at FKP Lab”, tesis de licenciatura, Universiti Malaysia Pahang, 2013.
- [23] N. Kumar, S. Shahzeb Hasan, K. Srivastava, R. Akhtar, R. Kumar Yadav y V. K. Choubey, “Lean manufacturing techniques and its implementation: A review”, *Materials*

- Today: Proceedings*, vol. 64, pp. 1188-1192, 2022, doi: [10.1016/j.matpr.2022.03.481](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.481).
- [24] S. Singh y U. Soni, “Predicting Order Lead Time for Just in Time production system using various Machine Learning Algorithms: A Case Study”, *2019 9th Int. Conf. on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence)*, Noida, India, 2019, pp. 422-425, doi: [10.1109/CONFLUENCE.2019.8776892](https://doi.org/10.1109/CONFLUENCE.2019.8776892).
- [25] S. Phogat y A. K. Gupta, “Evaluating the elements of just in time (JIT) for implementation in maintenance by exploratory and confirmatory factor analysis”, *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, vol. 36, no. 1, pp. 7-24, 2019, doi: [10.1108/IJQRM-12-2017-0279](https://doi.org/10.1108/IJQRM-12-2017-0279).
- [26] K. Murata, “On the Role of Visual Management in the Era of Digital Innovation”, *Procedia Manuf.*, vol. 39, pp. 117-122, 2019, doi: [10.1016/j.promfg.2020.01.246](https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.246).
- [27] J. Hirvonen, “Design and implementation of Andon system for Lean manufacturing”, tesis de maestría, Aalto University, 2018.
- [28] N. D. Minh, N. D. Nguyen y P. K. Cuong, “Applying lean tools and principles to reduce cost of waste management: An empirical research in Vietnam”, *Manag. Prod. Eng. Rev.*, vol. 10, no. 1, pp. 37-49, 2019, doi: [10.24425/mper.2019.128242](https://doi.org/10.24425/mper.2019.128242).
- [29] N. Kock, *WarpPLS user manual: version 6.0*. Laredo, TX, EUA, 2021.
- [30] J. F. Hair, J. J. Risher, M. Sarstedt y C. M. Ringle, “When to use and how to report the results of PLS-SEM”, *Eur. Bus. Rev.*, vol. 31, no. 1, pp. 2-24, 2019, doi: [10.1108/EBR-11-2018-0203](https://doi.org/10.1108/EBR-11-2018-0203).

RECONOCIMIENTOS

El doctor José Roberto Díaz Reza recibió apoyo del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCYT) para realizar su estancia posdoctoral con convenio 548515 y el maestro Luis Javier Márquez-Figueroa recibe una beca por parte de CONAHCYT con convenio 960749 para la realizar sus estudios de doctorado, ambos en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

Control de inventario mediante método ABC para una empresa de transporte: Análisis sistémico por familias

Inventory control by ABC method for a transport company: Systemic analysis by families

Dra. Paula Rosalinda Antonio Vidaña¹, Dra. Rocío Ramos Hernández¹✉, Dra. Ivette Pérez Hernández¹

¹Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo mejorar el proceso "control de inventario" aplicando el método ABC y sustentado un análisis sistémico por familias. Se utilizó un enfoque cuantitativo y cualitativo descriptivo no experimental y transversal, considerando el proceso actual para la revisión del inventario, identificando el grado de confiabilidad de la información y aplicando encuestas a todos los colaboradores del almacén. Se obtuvo como resultado una propuesta de clasificación acorde al modelo de operación. La limitación de la investigación fue el tiempo, ya que se desarrolló durante un periodo de cuatro meses, sin embargo, tuvo implicaciones favorables no solo para la empresa en cuestión sino para el aporte científico, ya que permitirá a las empresas su aplicación. Dicha propuesta ha sido original, ya que se realizó a una empresa con el giro de autotransporte de carga. El valor conjunto de aspectos reales en un contexto económico permitió como conclusión establecer las estrategias de *marketing* al control de inventarios y presentar los procesos que permitan fortalecer sus procesos para el control de los mismos.

PALABRAS CLAVE: control de inventario; método ABC; análisis sistémico.

ABSTRACT

The objective of this research is to improve the "inventory control" process by applying the ABC method and based on a systemic analysis by families. A quantitative and qualitative descriptive, non-experimental and transversal descriptive approach was used, considering the current process for the inventory review, identifying the degree of reliability of the information, and applying surveys to all the warehouse collaborators. As a result, a classification proposal was obtained according to the operation model. The limitation for the realization of the investigation was the time since it was developed during a period of four months, nevertheless it had favorable implications not only for the company in question but for the scientific contribution since it will allow the companies its application. This proposal has been original since it was carried out to a company with the turn of auto transport of load. The joint value of real aspects in an economic context allowed as conclusion to establish the strategies of marketing to the control of inventories and to present the processes that allow to strengthen its processes for the control of the same ones.

KEYWORDS: inventory control; ABC method; systemic analysis.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Rocío Ramos Hernández.
INSTITUCIÓN: Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz.
DIRECCIÓN: Av. Universidad núm. 350, Localidad Dos Caminos, Cuitláhuac, Veracruz, México, C. P. 94910.
CORREO ELECTRÓNICO: rocio.ramos@utcv.edu.mx

Fecha de recepción: 27 de julio de 2023. **Fecha de aceptación:** 18 de agosto de 2023. **Fecha de publicación:** 31 de agosto de 2023.



I. INTRODUCCIÓN

Los inventarios están constituidos por bienes destinados a la venta o la producción de artículos para su posterior venta, tales como materia prima, artículos terminados y otros materiales o insumos que se utilicen ^[1] en el proceso de producción y, a partir de un análisis, se tome la decisión que permita determinar si se hace un pedido y cuánto y cuándo se debe adquirir para surtir un artículo concreto. Sus objetivos son a) incrementar la rentabilidad, b) predecir el impacto de las políticas de la empresa involucradas en el nivel de inventario, así como c) minimizar el costo de las actividades logísticas que se requieren para que se garantice el *stock* que propicie las existencias ideales de materias primas y suministros ^[2], ^[3].

En ese sentido, la gestión de inventarios es una función vital para conocer la demanda del mercado, siendo una práctica de supervisión, control, almacenamiento y utilización de cantidades de productos que una organización usa para su producción ^[4], ^[5], es decir, la gestión efectiva del inventario es un elemento crítico para el funcionamiento eficiente de las operaciones en la cadena de suministro que provee una ventaja competitiva a la empresa ^[2] a partir del trabajo mancomunado en el diseño de las estrategias de inventario y reaprovisionamiento que más beneficios otorgue a la rentabilidad para todos los participantes y reduzca las pérdidas, garantizando la calidad del producto y el nivel de servicio al cliente ^[4], ^[7].

Algunos de los problemas más comunes de la gestión de inventarios, son: a) cómo mejorar la eficiencia de la cadena de valor, b) la integración y optimización de los inventarios, c) las rutas de distribución, d) la ubicación del inventario y e) la ruta de ubicación de inventario. Con el fin de evitar estas situaciones se generan los sistemas de clasificación de inventarios que ayudan a los tomadores de decisiones con las diferentes políticas de control que optimicen cuidadosamente los parámetros para cada artículo ^[3].

La clasificación de inventarios puede hacer una diferencia en la elección del tipo de control de inventarios que ayuda a los tomadores de decisiones con las diferentes políticas de control que propicien una apropiada clasificación de artículos. Se busca la respuesta a las preguntas: ¿cuánto inventario se necesita de cada una de las unidades? y ¿cuándo deben ser ordenadas?, cada una brindando un enfoque diferente con puntos que influ-

yen en la toma de decisión, así como el diseño del sistema tomando en cuenta las consideraciones de tiempo y revisión ^[4], ^[8].

Derivado de lo anterior, la ausencia de una administración y control puede afectar los artículos en el tiempo de espera, disponibilidad, operación, costos, ganancias de la empresa, desarrollo financiero, falta de eficiencia en la cadena de valor, integración y optimización de inventarios, así como el diseño de rutas de distribución, entre otros esfuerzos relacionados ^[4], ^[7], ^[9].

Tal es el caso de la empresa sujeto de estudio, donde se observó que no existe un proceso de control de inventarios que soporten las actividades para un buen funcionamiento de este, ya que cuentan con una gran cantidad de ítems, siendo incapaces de identificar cuál de estos tiene mayor importancia para la empresa. Derivado de esto, la presente investigación tiene como objetivo mejorar el control de inventario aplicando el método ABC y sustentado en un análisis sistémico por familias.

II. METODOLOGÍA

Con los estudios descriptivos buscan especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis ^[10]. Por ello, para efectos del presente estudio se utilizó el enfoque cualitativo, cuantitativo, descriptivo no experimental y transversal, con lo cual se establecieron las fases a considerar presentes en la metodología que se muestra en la **Figura 1**.

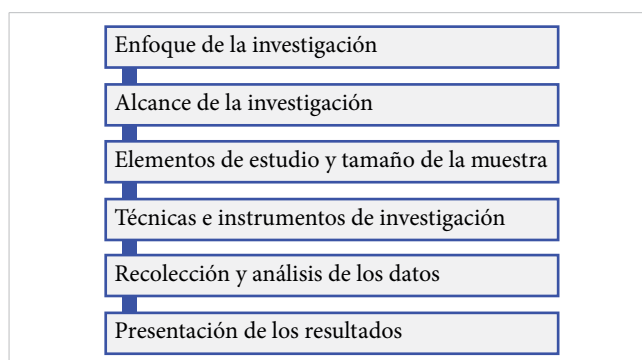


Figura 1. Proceso metodológico propuesto en la investigación.

Estas etapas fueron aplicadas en una empresa que se dedica al transporte de carga y cuenta con almacenes de refacciones de vehículos para su uso y venta, por lo cual se tienen diversos productos de distintos tamaños

y aplicaciones. Esto genera que no exista un control adecuado y haya pérdida de ganancias monetarias derivado del mal manejo administrativo del almacén. La descripción y aplicación de las etapas de la metodología se lista a continuación.

Enfoque y alcance de la investigación. Para poder mejorar el proceso de inventario de la empresa fue necesario realizar un análisis general, presentado a través de un diagrama de Ishikawa (Figura 2), ya que es una técnica que permite la identificación y clasificación de ideas e información relativas a las causas de los problemas [11]. En este diagrama se van identificando las posibles causas que pueden haber llegado a generar un problema, clasificando estas en cuatro o cinco categorías principales, según el equipo de trabajo lo decida. Estas categorías suelen ser las siguientes: materiales, personas, máquinas, procesos y entorno. Con ayuda de este diagrama se identificó que la cantidad de ítems presentes en el inventario es una de las principales problemáticas para el control de este.

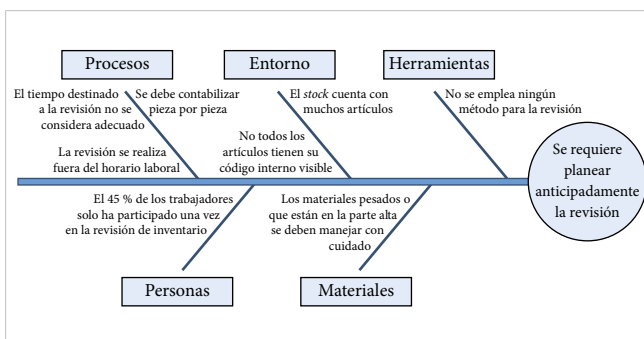


Figura 2. Aplicación del diagrama de Ishikawa.

Elementos de estudio y tamaño de la muestra. Los elementos principales de estudio en esta investigación se describen enseguida:

1) El proceso actual de revisión de inventarios, el cual incluye técnicas, métodos, tiempos requeridos y artículos del *stock*. El propósito es establecer de manera clara cómo se ha llevado a cabo en los últimos años, lo cual permitirá determinar qué actividad puede mejorarse, y por qué sería bueno implementar mejores prácticas. Para este caso, el tamaño de la muestra se determinó por conveniencia, lo que quiere decir que la muestra se selecciona según un criterio de accesibilidad o comodidad [12], [13]. Se ha decidido realizarlo de esta manera debido a que el estudio está enfocado al área de almacén de refacciones, así que los colaboradores asignados a esta unidad del negocio serán los seleccionados para la muestra.

2) El *stock* con el que cuenta el almacén, esto debido a que la descripción de los artículos que lo conforman será requerida para la aplicación de técnicas posteriores, donde primero hay que delimitar el conjunto de productos a estudiar (tamaño de la muestra). En la presente investigación se ha decidido trabajar con el total de las refacciones que componen el *stock*, que son aproximadamente 7000 ítems, pues se busca tener un análisis global del inventario y los datos necesarios pueden obtenerse del sistema que se usa para registrar las entradas y salidas.

Técnicas e instrumentos de investigación. Para el desarrollo del proyecto se utilizaron la técnica de recopilación de datos y el método ABC.

La recopilación de datos se define como el proceso de recopilación y medición de información sobre variables de interés de una manera sistemática establecida que permite responder consultas, preguntas de investigación establecidas, probar hipótesis y evaluar resultados [14]. Esta técnica fue aplicada en primera estancia para recopilar la información de todas las actividades funcionales que componen el control de inventario, se debe validar con el jefe del área y debe corresponder con el flujograma del proceso, ya que, de no ser así, se deberá modificar. Esta información permite visualizar la secuencia de pasos, el objetivo de cada actividad y oportunidades de mejora.

Una vez que se evaluaron las necesidades de los materiales y los criterios para su correcta valuación, considerando que el proceso más complejo que existe es el control y gestión de inventarios [15], se procedió al diseño de documentos que permitieron dar seguimiento a los controles ya establecidos, como se muestra en la Tabla 1. Dado que se considera que el control de inventarios repercute en toda organización, fue necesario establecer una jerarquía para categorizar los materiales que forman parte de una empresa, aplicando métodos de conteo físico y herramientas de análisis, como el método ABC [16], [17].

El método ABC permite asociar cada ítem a una categoría respecto a la importancia que tiene en el inventario [18], siendo la categoría A la de mayor importancia, B importancia media y C la de menor importancia [19]. Para la empresa caso de estudio, se decidió categorizar a los ítems de acuerdo con el valor que representan en el inventario, tal como se muestra en la Figura 3.

TABLA 1
LISTA DEL CHEQUEO DEL ACOMODO Y DISTRIBUCIÓN DEL ÁREA DE ALMACÉN

NOMBRE DE LA EMPRESA			
CHECK LIST: DISTRIBUCIÓN Y ACOMODO DEL ÁREA DE ALMACÉN			
Objetivo: Determinar mediante la observación el cumplimiento de aspectos generales del almacén que ayudan a su correcto funcionamiento	Fecha: 16 feb. 2022		
	Indicar con una "X" lo que aplique para cada rubro		
1. Distribución y manejo del espacio	Cumple	No cumple	En algunos casos
Pasillos bien definidos	X		
Área específica de recepción-entrega de material	X		
Área de evacuación libre de obstáculos	X		
Rampas en lugares adecuados	X		
Escaleras apropiadas	X		
Uso de montacargas	X		
Extintores	X		
Señaléticas de evacuación	X		
Señaléticas de alto voltaje	X		
Pasillos numerados con letreros visibles		X	
Secciones con letreros visibles		X	
OBSERVACIONES: El espacio destinado para el almacén es amplio y está equipado con anaqueles grandes, de aprox. 3 metros de altura, para lo cual es necesario usar una escalera para alcanzar las refacciones ubicadas en la zona superior. Debido a que se almacenan llantas, es necesario contar con rampas que permitan moverlas fácilmente. Los pasillos son lo suficientemente amplios como para mover objetos grandes y permitir el paso de más de dos personas a la vez, sin embargo, no están numerados ni las secciones de las refacciones tienen letreros, lo cual sería de gran ayuda para cuando llega alguien nuevo y no conoce al 100 % el acomodo.			
2. Acomodo y distribución de productos	Cumple	No cumple	En algunos casos
Anaqueles con secciones específicas para cada producto	X		
Nombre visible del producto			
Código visible del producto (código único asignado en el almacén)			
Productos de mayor peso en zonas específicas	X		
Productos de mayores dimensiones en zonas específicas	X		
Área específica para lubricantes	X		
OBSERVACIONES: Los productos están acomodados por secciones. Cada uno tiene su área, gaveta o contenedor específico, los cuales prácticamente en su totalidad están rotulados con el nombre y en algunos casos con su código, sin embargo, debido a la diferencia entre el espacio que ocupan unos y otros, no todos los rótulos son visibles a cierta distancia			
3. Orden y limpieza	Cumple	No cumple	En algunos casos
Anaqueles y gavetas limpias	X		
Refacciones en su lugar (no están fuera del estante)	X		
Pasillos libres de objetos que obstruyan el paso	X		
No hay aceite o grasa derramada	X		
OBSERVACIONES GENERALES: El almacén cuenta con un espacio apropiado y tiene una distribución que ya es conocida por los almacenistas. Lo que en este caso sería de mucha ayuda a la hora de hacer revisiones de inventario es que se colocara en todos los productos de código con el que está registrado en el sistema, ya que en algunos casos no los tienen.			

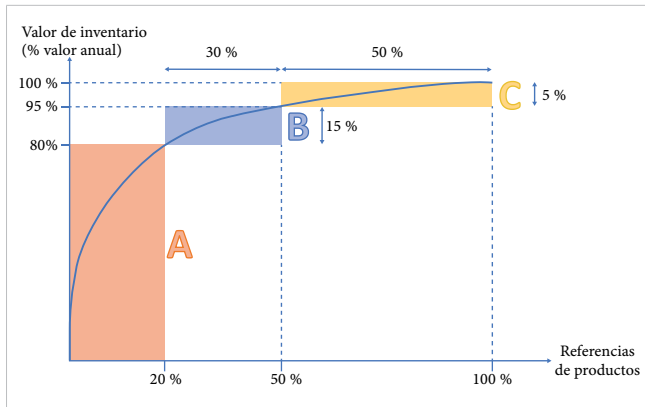


Figura 3. Clasificación de inventarios ABC.

Además, se propuso agrupar los materiales almacenados en familias. El contar con una base de datos consolidada facilita el manejo de la información y aplicación del método. La propuesta fue revisada y validada en la entrevista realizada con el jefe de almacén [20].

Recolección y análisis de datos. Para la aplicación del método ABC, se contó con la siguiente información: ítem, familia, descripción, cantidad, precio unitario y el importe total. La empresa cuenta con un software especializado para el control del inventario, por lo que, previa autorización, se solicitaron los reportes correspondientes y los datos requeridos se exportaron a una hoja de cálculo para poder realizar el análisis pertinente. Resulta imprescindible que no existan refacciones sin codificar “asignación de ítem”.

Para obtener el grado de confiabilidad del stock se tuvo que validar que las cantidades registradas en el sistema de control correspondan con las existencias físicas. Las diferencias encontradas tanto faltantes como sobrantes son consideradas desviaciones del proceso. Una correcta clasificación y acomodo de los materiales facilita y agiliza la revisión, lo cual permitirá definir si la organización es adecuada o si existen aspectos que no estén favoreciendo las actividades realizadas en el almacén.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para llevar a cabo el método ABC, fue necesario identificar mediante Microsoft Excel la gama de productos que la empresa tiene, detectando con ello el porcentaje que cada categoría representa. Como se muestra en la Figura 4, se cuenta con un 65 % del material C, 24 % del material B y el material A con un 11 %.

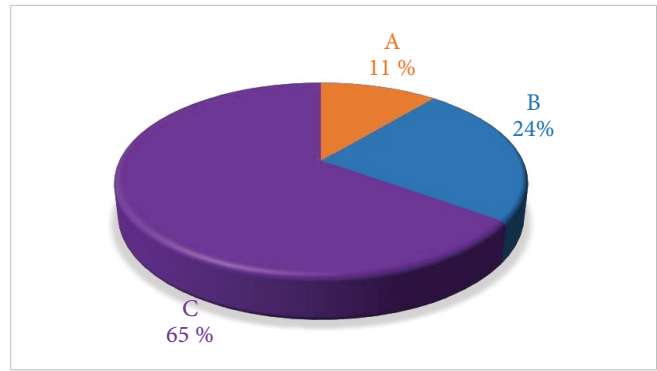


Figura 4. Representación de los productos por categorías.

Al tener la empresa una amplia gama de productos (más de 7000), no es suficiente con solo utilizar el método ABC, por lo que se debe implementar un método que permita categorizar de tal forma que se pueda diferenciar el inventario y, a su vez, el servicio, considerando los canales y su intermediación [21], [22]. Para la empresa se considera óptimo categorizar por el volumen de productos. Una vez que se identificaron estas categorías, se analizó el costo de cada una de ellas.

Esto se puede observar en la Figura 5: la clasificación A representa el mayor costo del inventario, con un 65 %, (solo hay 842 ítems). Con ello se comprueba que en un inventario la mayor cantidad del valor monetario se concentra en un número reducido de refacciones, en comparación con el total de los que se dispone.

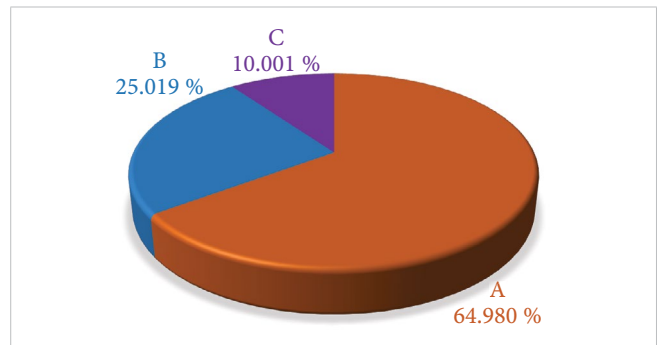


Figura 5. Representación del costo por categoría.

Una vez obtenida esta información, fue necesario identificar a las familias de productos y contabilizar cuántas refacciones de cada categoría tiene cada una de las familias en el inventario para, posteriormente, analizar en qué categorías del total se concentra la mayor cantidad de ítems. En la Figura 6 se muestran los productos que pertenecen a la categoría A.

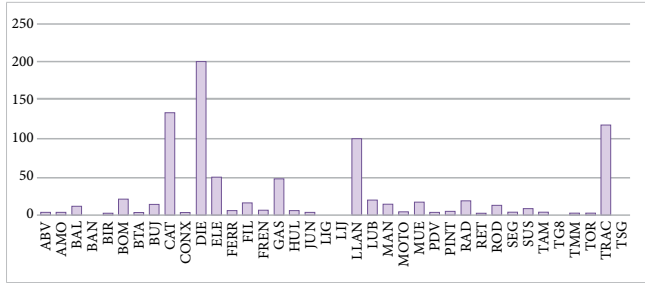


Figura 6. Productos de la categoría A.

Con lo anterior, detectó la ubicación y distribución de los materiales, como se muestra en la Figura 7. Con esta representación del área de almacén, se puede tener una visión general de cómo está distribuido el espacio. Asimismo, se consideraron espacios como lo son el área de entrada y salida, área de entrega de material, utensilios de limpieza, escalera y lo que corresponde a cada espacio asignado para los materiales.

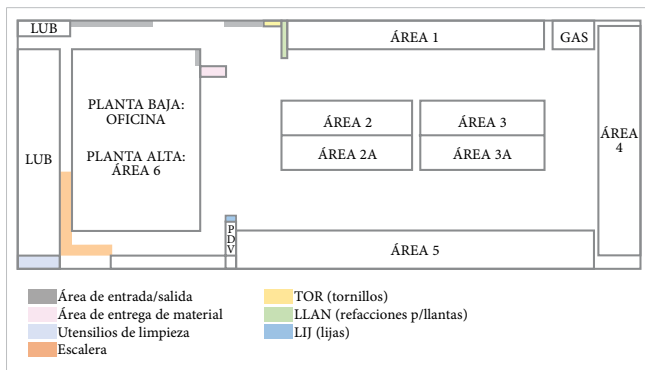


Figura 7. Distribución del almacén.

Para poder asignar los espacios de forma estratégica en el almacén, fue necesario llevar a cabo la distribución de los materiales, sin embargo, para tener datos más detallados del almacenamiento de las diversas líneas de productos, en la Figura 8 se presenta un área y su distribución del material, con sus respectivas medidas y los productos que las ocupan. El área 2 (asignada por la empresa), comparten las áreas de CONX (conexiones), BIR (birlos) y el área correspondiente a las tres líneas de productos que se encuentran en la parte superior, por lo tanto, el espacio para cada uno de los tres grupos queda de la siguiente manera: Birlos (BIR): 2.10 metros cúbicos, refacciones para motor a gasolina (GAS): 8.4 metros cúbicos, refacciones para sistema eléctrico (ELE): 12.6 metros cúbicos, filtros (FIL): 18.165 metros cúbicos, conexiones (CONX): 2.10 metros cúbicos, refacciones para motor a diésel (DIE): 18.165 metros cúbicos parte inferior trasera (la parte superior tiene la misma distribución).

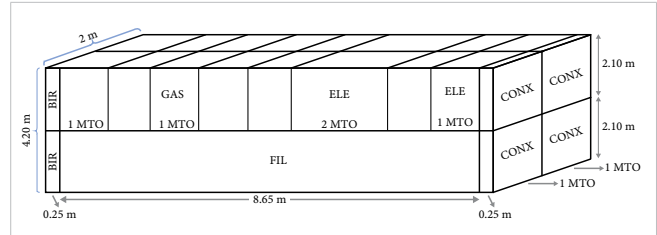


Figura 8. Especificación de la distribución para el área 2.

Una vez que se ubicaron los productos acordes a los espacios del almacén de forma estratégica, se determinó el total de artículos por cada línea de productos. En la Figura 9 se muestran las familias que siguen sobresaliendo. Si se toma como referencia el total de refacciones las familias establecidas (sin considerar las categorías A, B y C), estas son: DIE, CAT, GAS, TRAC, ELE y FIL.

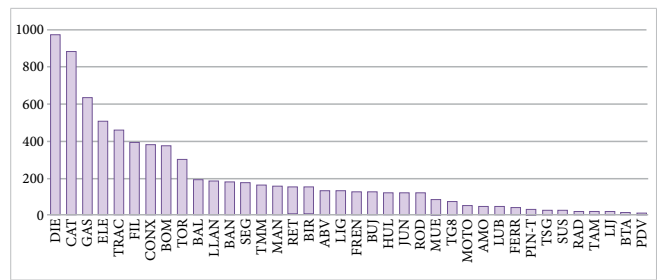


Figura 9. Determinación de artículos por la línea de productos.

Por otra parte, para poder visualizar cuáles son las familias de mayor valor monetario se determinó el valor porcentual y monetario del inventario.

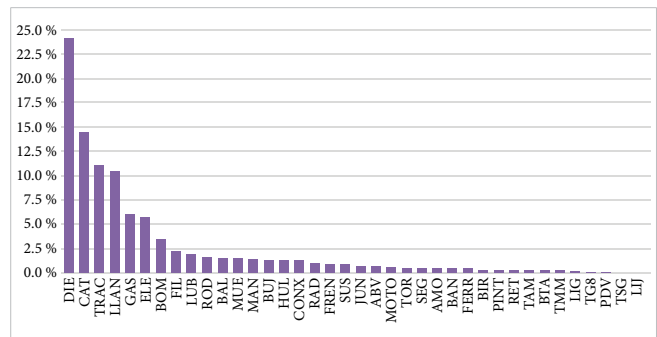


Figura 10. Determinación del valor porcentual de total monetario del inventario.

Como puede observarse en la Figura 10, se han ordenado los valores del mayor al menor, de tal modo que sea más fácil visualizar aquellas familias que resultan más representativas en cuanto al valor monetario, las cuales son: DIE (refacciones para motor a diésel), CAT (refacciones para maquinaria), LLAN (llantas), GAS (refacciones para motor a gasolina) y ELE (refacciones para

sistema eléctrico). Estas familias son las que tienen más refacciones en la categoría A y que tienen más unidades físicas de productos en general, por lo que, teniendo en consideración esos tres factores y el espacio designado a las mismas, estas familias pueden catalogarse como las de mayor importancia dentro del almacén, dando como resultado 10 familias del total de 38.

Las familias identificadas deben priorizarse en las revisiones de inventario para comprobar que sus existencias sean correctas, gestionar el espacio que ocupan, cuidar que estén bien distribuidas, que sean visibles y que no existan obsoletos que estén ocupando espacios que podrían asignarse a otros que sí tengan rotación, con el fin de mejorar el control de inventarios de manera significativa.

Una vez que fue validado el análisis anterior, se generó un proceso de control de inventario en el cual se le propuso a la empresa una nueva estructura de familias más compacta y que se ajuste mejor al modelo de operación.

Se planteó integrar 20 familias, sin embargo, es importante mencionar que la empresa decidió manejar solo 19 dado que la familia de llantas pertenece a otra área funcional de la empresa. A continuación, se mencionan todas las familias: Motor, bandas y filtros; Tren motriz; Tornillería; Dirección; Sistema eléctrico; Frenos, balatas, retenes y baleros; Suspensión; Llantas; Carrocería; Accesorios; Mangueras y conexiones; Herramienta; Pinturas, lijas, limpieza; Lonas y plásticos; Lubricantes y aceites; Abrazaderas; Juntas; Sistema de aire; Accesorios y partes de llantas; y, finalmente, Equipo de seguridad.

IV. CONCLUSIONES

Al llevar a cabo la aplicación del método ABC, se cumplió la regla del 20/80 de Pareto, pues en efecto, el mayor porcentaje del valor monetario se concentra en una cantidad reducida de familias. Esto ayudó a sustentar la propuesta basada en priorizar, durante las revisiones, aquellas zonas donde se concentren una mayor cantidad de artículos pertenecientes a la categoría A. Finalmente, con toda la información recabada, el análisis realizado permitió establecer los pasos para la implementación del método ABC para la empresa, considerando la valoración, control y supervisión, además de complementar con información de espacio que se ocupa para cada material, permitiendo con ello la optimización de espacios acorde al valor que representa cada material.

Por tanto, se logró el cumplimiento del objetivo de este proyecto, aportándole a la empresa la propuesta de un proceso para la aplicación del método ABC del tal forma que pueda desarrollarlo en futuras ocasiones, con la finalidad de obtener mejores resultados, y pretendiendo que cada uno de los colaboradores del área comprenda la importancia de priorizar las zonas más significativas del almacén en cuanto a valor monetario y espacio de almacenaje, con el fin de darles un mejor mantenimiento y supervisión y que estén abiertos a nuevas ideas para tener una mejora continua en los procesos de dicha área.

En cuanto al método ABC, permitió evaluar el *stock* y determinar la relevancia de los artículos que lo conforman, tal como se mostró en la sección de resultados, además de que permitió ayudar a la creación de nuevas estrategias para mejorar la gestión del inventario en el almacén administrado por la empresa.

En el presente proyecto, para el análisis ABC se consideraron únicamente los valores monetarios y el espacio de almacenamiento, por lo que una propuesta futura sería la aplicación del mismo método e incluyendo también la rotación de los productos, cuestión que por tiempo y limitación de la información no se llevó a cabo esta vez.

REFERENCIAS

- [1] M. I. Duque, J. A. Osorio y D. M. Agudelo, “Los inventarios en las empresas manufactureras, su tratamiento y su valoración”, *RevConta*, no. 56, pp. 61-79, 2010, doi: [10.17533/udea.rc.14693](https://doi.org/10.17533/udea.rc.14693).
- [2] D. A. R. Nirmala, V. Kannan, M. Thanalakshmi, S. J. P. Gnanaraj y M. Appadurai, “Inventory management and control system using ABC and VED”, *materialstoday: PROCEEDINGS*, vol. 60, parte 2, pp. 922-925, 2022, doi: [10.1016/j.matpr.2021.10.315](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.315).
- [3] E. Theodorou, E. Spiliotis y V. Assimolapoulos, “Optimizing inventory control through a data-driven and model-independent framework”, *EURO J. Transp. Logist.*, vol. 12, p. 100103, 2023, doi: [10.1016/j.ejtl.2022.100103](https://doi.org/10.1016/j.ejtl.2022.100103).
- [4] A. Contreras, C. A. Zuñiga, J. L. Martínez y D. Sánchez, “Análisis de series de tiempo en el pronóstico de la demanda de almacenamiento de productos perecederos”, *Estudios Gerenciales*, vol. 32, no. 141, pp. 387-396, 2016, doi: [10.1016/j.estger.2016.11.002](https://doi.org/10.1016/j.estger.2016.11.002).

- [5] F. M. Zowid, M. Z. Babai, M. R. Douissa e Y. Ducq, "Multi-criteria inventory ABC classification using Gaussian Mixture Model", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 13, pp. 1925-1930, 2019, doi: [10.1016/j.ifacol.2019.11.484](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.484).
- [6] D. López-Soto, F. Angel-Bello, S. Yacout y A. Alvarez, "A multi-start algorithm to design a multi-class classifier for a multi-criteria ABC inventory classification problem", *Expert Syst. Appl.*, vol. 81, pp. 12-21, 2017, doi: [10.1016/j.eswa.2017.02.048](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.02.048).
- [7] L. Song y Z. Wu, "An integrated approach for optimizing location-inventory and location-inventory-routing problem for perishable products", *Int. J. Transp. Sci. Technol.*, vol. 12, no. 1, pp. 148-172, mar. 2023, doi: [10.1016/j.ijst.2022.02.002](https://doi.org/10.1016/j.ijst.2022.02.002).
- [8] M. Mehdizadeh, "Integrating ABC analysis and rough set of theory to control the inventories of distributor in the supply chain of auto spare part", *Comput Ind Eng*, vol. 139, p. 105673, 2020, doi: [10.1016/j.cie.2019.01.047](https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.047).
- [9] Y. Zhang, F. Chu, F. y A. Che, "Closed-loop Inventory Routing Problem for Perishable Food With Multi-type Returnable Transport Items", *IFAC-PaperOnLine*, vol. 55, no. 10, pp. 2828-2833, 2022, doi: [10.1016/j.ifacol.2022.10.159](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.159).
- [10] R. Hernández, *Metodología de la investigación*, 6.ª ed. México: McGraw-Hill / Interamericana Editores, 2014.
- [11] P. López, *Herramientas para la mejora de la calidad. Métodos para la mejora continua y solución de problemas*. Madrid: Fundación Confemetal, 2016.
- [12] I. Grande y E. Abascal, *Fundamentos y técnicas de investigación comercial*. Madrid: ESIC Editorial, 2007.
- [13] H. G. Huamán, *Manual de técnicas de investigación. Conceptos y aplicaciones*, 1.ª ed. Lima: IPLADEES, 2005
- [14] Publicaciones Vértice, *Aprovisionamiento y almacenaje en la venta*. España: Editorial Vértice, 2010.
- [15] C. A. Castro, M. C. Vélez y J. A. Castro, "Clasificación ABC Multicriterio: Tipos de Criterios y Efectos en la Asignación de Pesos", *ITECKNE*, vol. 8, no. 2, pp. 163-170, 2011.
- [16] H. Tang, H. Zhang, R. Liu y Y. Du, "Integrating Multi-Index Materials Classification and Inventory Control in Discrete Manufacturing Industry: Using a Hybrid ABC-Chaos Algorithm", en *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 69, no. 4, pp. 1276-1293, ag. 2022, doi: [10.1109/TEM.2020.2971109](https://doi.org/10.1109/TEM.2020.2971109).
- [17] S. Olivos y J. W. Penagos, "Modelo de gestión de inventarios: conteo cíclico por análisis ABC", *Ingeniare*, año 8, no. 14, pp. 107-111, 2013, doi: [10.18041/1909-2458/ingeniare.14.617](https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.14.617).
- [18] P. Berling, L. Johansson y J. Marklund, "Controlling inventories in omni/multi-channel distribution systems with variable customer order-sizes", *Omega*, vol. 114, 2023, p. 102745, doi: [10.1016/j.omega.2022.102745](https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102745).
- [19] A. Singh, S. K. Rasanía y K. Barua, "Inventory control: Its principles and application", *IJCH*, vol. 34, no. 1, 2022, doi: [10.47203/IJCH.2022.v34i01.004](https://doi.org/10.47203/IJCH.2022.v34i01.004).
- [20] L. Grasso, *Encuestas: elementos para su diseño y análisis*, 1.ª ed. Córdoba: Encuentro Grupo Editor, 2006.
- [21] J. López, *UF0476: Gestión de inventarios*, ed. 5.1. España: Editorial Elearning S.L., 2014.
- [22] C. Arenal y M. A. Ladrón, *Gestión de Inventarios*. Logroño: Editorial Tutor Formación, 2020.

RECONOCIMIENTOS

El agradecimiento para la alumna Gerarda Berenice Álvarez Montalvo, quien colaboró en la realización del reporte como parte de una propuesta a la empresa durante el periodo enero-abril de 2022.

Impacto ambiental en la cadena de suministro: Una revisión bibliométrica

Environmental impact in the supply chain – A bibliometric review

Ingrid Iovana Burgos Espinoza¹, Jorge Luis García Alcaraz²✉, Liliana Avelar Sosa²

¹Doctorado en Ciencias de la Ingeniería Avanzada, Depto. de Ing. Eléctrica y Computación, Instituto de Ingeniería y Tecnología (IIT), Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), México

²Depto. de Ing. Industrial y Manufactura, IIT, UACJ, México

RESUMEN

El presente estudio presenta una revisión bibliométrica sobre el impacto ambiental en la cadena de suministro, teniendo como objetivo analizar y proporcionar una visión actualizada del tema. Los documentos analizados fueron extraídos de las bases de datos como Scopus, con la metodología PRISMA para su clasificación, análisis y revisión. Los documentos finales fueron analizados en el software VOSviewer, enfocándose en identificar las principales áreas de investigación, autores, instituciones, países, documentos y revistas que publican sobre este tema. Los resultados indican que los países que más investigan sobre este tema son los Estados Unidos y Reino Unido, la principal agencia de financiamiento es la Fundación Nacional de Ciencias Naturales de China y los autores más productivos son M. Kucukvar, S. Sala y A. Azapagic, entre otros.

PALABRAS CLAVE: cadena de suministro, impacto ambiental, PRISMA.

ABSTRACT

The present study presents a bibliometric review on the environmental impact in the supply chain, aiming to analyze and provide an updated vision of the topic. The analyzed documents were extracted from databases such as Scopus, with the PRISMA methodology for classification, analysis and review. The final documents were analyzed in the VOSviewer software, focusing on identifying the main research areas, authors, institutions, countries, documents and journals that publish on this topic. The results indicate that the countries that do the most research on this topic are the United States and the United Kingdom, the main funding agency is the National Natural Science Foundation of China, and the most productive authors are M. Kucukvar, S. Sala, and A. Azapagic, among others.

KEYWORDS: supply chain, environmental impact, PRISMA.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Jorge Luis García Alcaraz.

INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

DIRECCIÓN: Av. del Charro núm. 450 norte, col. Partido Romero, Ciudad Juárez, Chihuahua, México, C. P. 32310.

CORREO ELECTRÓNICO: jorge.garcia@uacj.mx

Fecha de recepción: 28 de julio de 2023. **Fecha de aceptación:** 17 de agosto de 2023. **Fecha de publicación:** 31 de agosto de 2023.



I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, debido a los grandes cambios que han sucedido en el mundo, las empresas han hecho modificaciones en sus estructuras para adaptarse a los nuevos métodos y mercados, ayudándose de procesos relacionados con la Cadena de Suministro (CS) [1], la cual se define como “un conjunto de empresas que incluyen proveedores, fabricantes, distribuidores y vendedores (mayoristas o minoristas) que trabajan juntos en una relación de cooperación para satisfacer la demanda de insumos o productos en cada eslabón de la cadena en el momento exacto al menor costo, buscando el mayor impacto en la cadena de valor de los integrantes para satisfacer las necesidades del consumidor final” [2]. Es decir, la CS se refiere a la integración de los procesos productivos y negocios de diferentes organizaciones para lograr una mayor reducción de costos, velocidad de comercialización, servicio al cliente y rentabilidad financiera de cada una de las partes involucradas [3].

Actualmente, la importancia de la CS radica en la integración de los socios, los cuales generalmente se encuentran distribuidos geográficamente en diferentes países y tienen procesos globalizados en los que materias primas, información y recursos financieros deben fluir constantemente en todas direcciones. Muchas de esas actividades de la CS y asociadas al transporte de insumos no generan valor al producto, pero sí un impacto ambiental que debe ser monitoreado.

Ante los impactos negativos de los procesos productivos y de la CS, se han tenido que tomar decisiones y reglamentaciones. Por ejemplo, se ha decretado como una situación de emergencia el estado ambiental en México y países Europeos han adquirido compromisos asociados a la reducción de emisión de gases para años futuros, lo que ha involucrado las CS [4]. Así, la evaluación de la CS se convierte en parte del diagnóstico del sector productivo con la finalidad de que se alinee con la sostenibilidad y hoy es común escuchar hablar de cadena de suministro sustentable (CSS), amigables con el medio ambiente, así como con la sociedad.

Por consiguiente, esta investigación tiene como objetivo, analizar y proporcionar una visión amplia y actualizada acerca del impacto ambiental en la cadena de suministro, resaltando las tendencias, desafíos y oportunidades para la mejora de la CS.

CADENA DE SUMINISTRO SUSTENTABLE

Hoy en día, en diversos países se exige a las empresas que asuman una mayor responsabilidad, social y ambiental en su cadena de suministro [5]. Si bien es posible que se requiera una inversión adicional en tecnología para lograr la sostenibilidad, los beneficios se obtendrán a largo plazo. En el corto plazo, las buenas prácticas ambientales permiten a las empresas forjar alianzas con socios extranjeros que las necesitan, así como la estrecha relación que se tiene con los sistemas de gestión de la calidad, cuyo objetivo es reducir los residuos y, reportar beneficios económicos y mejorar el desempeño ambiental [6].

En los últimos años, los términos *gestión de la cadena de suministro verde* y CSS son temas de relevancia en la industria y la política [7]. Así, la CSS se encarga de medir y reducir el impacto ambiental generado por las actividades de la CS tradicional, en la que se busca vincular elementos ecológicos en las estrategias de las organizaciones. Sus objetivos se centran en medir el impacto adverso en el medio ambiente de todas las actividades que en ella se realizan, enfocándose en las emisiones generadas al aire y ruido, reducción de la energía usada durante el proceso, reducción de materiales utilizados y la eliminación de residuos generados [8].

IMPACTO AMBIENTAL DESDE LA CADENA DE SUMINISTRO

Algunos autores han identificado ocho procesos principales de dimensiones de desempeño en la gestión de la CSS, entre las que se encuentran el enfoque verde desde el diseño, compras, manufactura, distribución, *marketing*, innovación y gestión de recursos humanos y logística inversa [9]. De esa lista se observa que la CSS abarca todo el proceso productivo, iniciando en proveeduría y proceso de transformación y culminando en la distribución.

Sin embargo, implementar una CSS no es fácil y debe seguir ciertas normas, por lo que se ha identificado y dado estructura a los elementos estratégicos y operativos para el desarrollo de una herramienta que ayude a los directivos en la toma de decisiones para desarrollarla. Sarkis [10] identifica y da estructura a los elementos estratégicos y operativos para el desarrollo de una herramienta que ayude a los directivos en la toma de decisiones para desarrollarla. En su marco de referencia establece la importancia de definir quién establece las relaciones con

proveedores, los tipos de tecnologías amigables con el medio ambiente que deben adquirirse o tipo de prácticas organizacionales que se pueden adoptar.

Este fue el primer intento de establecer una estructura de implementación de la CSS, por lo que diferentes autores se han enfocado a analizar diferentes etapas de la misma, siendo más específicos. Por ejemplo, Lin y Juang ^[11] analizaron la selección de proveedores ecológicos en la CS de la industria de la biotecnología, logrando la estructuración de los criterios y atributos más importantes a ser tomados en cuenta y facilitar la evaluación y proceso de selección de proveedores con un enfoque verde. En la India, se realizó un trabajo de investigación basándose en una revisión de literatura proponen un marco para la evaluación y selección de proveedores sostenibles mediante el uso de una jerarquía analítica, obteniendo un total de 22 criterios, divididos en tres secciones: económico, ambiental y social ^[12]. De igual manera, existen otros sectores interesados en la selección de proveedores verdes, tales como el de salud, donde los criterios de selección son muy críticos ^[13].

CSS EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN

Con el paso del tiempo, el interés por la cadena de suministros ha ido creciendo y se han desarrollado nuevas cualidades para cubrir las necesidades emergentes. De acuerdo con una propuesta de clasificación de los atributos verdes de la cadena de suministro ^[14], los principales que se encuentran durante el proceso de producción son el consumo de energía, los costos ambientales y la producción limpia, entre otros.

El consumo de energía durante la manufactura de un producto es otro punto crítico dentro de los insumos requeridos durante el proceso de producción de bienes y servicios. En Colombia, se propuso ^[15] una metodología de administración energética empresarial, la cual consiste en controlar los gastos en energía requerida en el proceso, disminuir las pérdidas técnicas, obtener una mayor eficiencia en sistemas térmicos, disminuir pérdidas en fuerza motriz e iluminación, etc.

Los costos ambientales de la producción de productos se hacen presentes desde el inicio de la operación y cuando se impacta negativamente el ambiente se generan pagos o sanciones que pueden afectar la continuidad de las operaciones, es decir, se deben realizar estudios de impacto ambiental y permisos, entre otros.

En general, los costos se pueden dividir en aquellos de prevención e inspección ambiental, así como en costos de mantenimiento y sanciones administrativas ^[16].

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente en 1989 introdujo el concepto Producción más Limpia (PML), el cual se define como “una estrategia integrada y continua de prevención aplicada a los procesos, productos y servicios con el fin de lograr un uso más eficiente de los recursos, mejorando el desempeño ambiental, reduciendo los desechos y los riesgos a la salud y al medio ambiente” ^[17]. Un estudio de la producción más limpia en la industria alimentaria ^[18] presentó estrategias para el desarrollo de programas y ejemplos exitosos en la implementación de estos.

Según el consejo de profesionales de la CS de EUA, la logística produce hasta un 75 % de la huella de carbono de las industrias y, además, el impacto de la logística en el medio ambiente obliga a las organizaciones a considerar la sostenibilidad de sus operaciones. En las últimas décadas, la evolución de la globalización y las oportunidades que brinda la innovación tecnológica han incrementado la importancia de la logística a nivel nacional e internacional. Sin embargo, la creciente preocupación medioambiental de los ciudadanos y la introducción generalizada del concepto de sostenibilidad en las actividades del sector logístico requiere que sean considerados todos los impactos asociados a estas actividades ^[19].

En estos casos se ha desarrollado la logística inversa o la logística verde. De León *et al.* ^[20] resalta las características de ambas prácticas desde una perspectiva conceptual, identificando las entradas, las actividades intermedias y las salidas. Herrera ^[19] plantea estrategias sustentables de fácil aplicación en la cadena de suministro, como es la logística, la distribución inversa, el ciclo sostenible de fin de vida, los empaques y embalajes sostenibles, para posicionarse y cumplir con los objetivos mundiales de la sustentabilidad y la sostenibilidad.

REVISIONES SOBRE CSS

Dada la importancia de la CSS y los diferentes enfoques con que se ha abordado, en la actualidad existen revisiones de literatura sobre ese tópico, entre ellas las siguientes: acerca del tipo de tecnologías que se utilizan para el almacenamiento de energía, lo cual es de vital importancia para la CSS porque ayuda a mejorar la estabilidad de una red y la eficiencia de los sistemas energéticos ^[21];

sobre problemáticas que enfrentan los países en vías de desarrollo [22]; acerca de una propuesta de lista de factores críticos de éxito para la implementación de la CSS [23] y la realizada para conocer y comprender la situación en la que se encuentran las cadenas de suministro sustentable y las pequeñas y medianas empresas que tienen inversión nacional en México [24].

También, existen proyectos enfocados a explicar las opciones de empaque y embalajes para el óptimo transporte de los productos y el cuidado del ambiente, por ejemplo, un estudio sobre las políticas de Latinoamérica y Ecuador que interfieren en el cuidado del medio ambiente y el empaque y embalaje de los productos [25] y una revisión de literatura para establecer la importancia de la logística inversa como estratégica para el manejo de residuos de empaques y embalajes, esto debido al alto crecimiento del uso de empaques plásticos debido a los protocolos y cuidados sanitarios a causa de la COVID-19 [26].

Además, se diseñó un modelo multiobjetivo no lineal entero mixto con la finalidad de diseñar cadenas de suministro para el reciclaje de distintos materiales, integrando objetivos económicos y medio ambientales para la toma de decisiones estratégicas y tácticas [27]; se presentaron datos estadísticos obtenidos de la aplicación de un cuestionario, analizando la relación de directivos con talento verde y la implementación de prácticas en la cadena de suministro verde [28] y se publicó una revisión de la evolución de la fabricación y recuperación de productos conscientes del medio ambiente, así como de las nuevas áreas de oportunidad, obteniendo un análisis de los avances y oportunidades de nuevas áreas de investigación relacionadas con el tema [29].

Otras investigaciones han sido orientadas a determinar el impacto de las prácticas de gestión en la cadena de suministro esbelta, resiliente y ecológica en la cadena de suministro sostenible, proporcionando una taxonomía para las prácticas de la gestión de la CSS en el que se presenta un enfoque innovador, ya que estudia simultáneamente las tres dimensiones de la sostenibilidad (ámbitos social, ambiental y económico) [30] y a desarrollar una perspectiva de la CSS al presentarla como un proceso de gestión de riesgos y analizar la naturaleza de los riesgos de la cadena de suministros relacionados con la sustentabilidad, categorizarlos y desarrollar un proceso analítico para su gestión [31].

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una de las principales razones para elaborar un artículo científico es la necesidad de encontrar información que sea relevante y brinde un buen funcionamiento a la investigación que se está realizando [32]. El paso del tiempo y el crecimiento exponencial de la información ha llevado a la comunidad científica a proponer nuevos métodos de investigación, surgiendo así la bibliometría, la cual está compuesta por métodos matemáticos y análisis estadísticos para la obtención de indicadores fiables y de calidad [33].

En este proyecto se realiza un análisis bibliográfico de la cadena de suministro y el impacto ambiental en las industrias mediante una búsqueda sistemática de información en bases de datos y análisis de casos de éxito. Cabe mencionar que esto es relevante, ya que en las investigaciones bibliográficas es posible obtener información del número de documentos publicados por una institución, país, agencia de financiamiento, autores o grupos de investigación de calidad y cierto grado de impacto en la sociedad. Además, las revisiones sistemáticas son útiles, ya que pueden proporcionar una síntesis del conocimiento de un área y se pueden identificar futuras prioridades de investigación [34].

II. METODOLOGÍA

IDENTIFICACIÓN DE LAS REFERENCIAS

En el presente estudio se implementó la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Figura 1), la cual está diseñada para evaluar revisiones de estudios de manera sistemática que analizan intervenciones e ítems aplicables a revisiones con diferentes objetivos y, de igual manera, está destinada para ser utilizada en revisiones sistemáticas que incluyen síntesis [34].

La búsqueda de documentos se realizó en la base de datos Scopus en septiembre de 2022, utilizando una ecuación de búsqueda (TITLE-ABS-KEY (“Supply chain”) AND TITLE-ABS-KEY (“Environmental impact”)) AND (EXCLUDE (PUBYEAR, 2023) AND EXCLUDE (PUBYEAR, 2022)). Se identificaron documentos que tienen en su contenido las palabras conjuntas *cadena de suministro e impacto ambiental*. La plataforma Scopus permitió descargar una base de datos para su posterior análisis bibliométrico en extensión de archivo CSV.

Como resultado de la búsqueda, se identificaron 3804 documentos iniciales, posteriormente estos se limitaron hasta 2021 y se excluyeron aquellos que no se encontraron en idioma español e inglés, obteniéndose un total de 3404 documentos en Scopus (Figura 1).

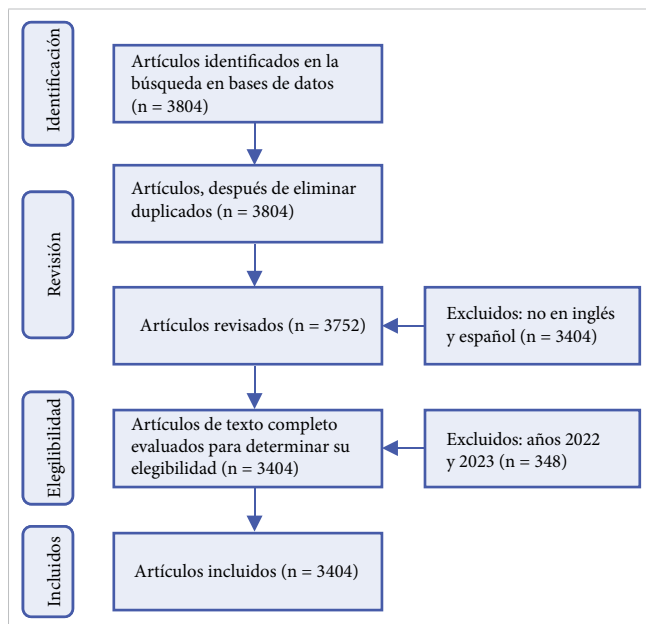


Figura 1. Metodología PRISMA.

ANÁLISIS DE REFERENCIAS

Una revisión de los trabajos publicados sobre las variables que intervienen en la cadena de suministros sustentable y el impacto ambiental, mostró un crecimiento exponencial en los últimos años, lo que se considera un tema de interés científico y académico.

La lista de referencias se analizó con el software VOSviewer 1.6.18, el cual es gratuito y permite el análisis mediante la creación de mapas visuales con datos cuantitativos y, además, el programa posibilita examinar mediante un visor los mapas bibliométricos con todo detalle [35]. Dicho análisis tiene como objetivo el identificar, analizar y cuantificar las publicaciones científicas que mencionan los temas relacionados con la cadena de suministro y el impacto ambiental.

Dada la importancia del tema, se plantean interrogantes importantes de responder, tales como ¿dónde se encuentran los principales grupos de investigación?, ¿qué instituciones son pioneras en el tema?, ¿cuáles son los autores más productivos y citados? y ¿qué países están apoyando este tipo de investigación?

El análisis bibliométrico es la base para darle respuesta a las preguntas anteriores e, incluso, este se considera necesario para evaluar el estado actual del tema y los aportes de investigadores y países a las áreas de conocimiento, porque ayuda a orientar futuras líneas de investigación hacia campos específicos [36].

III. RESULTADOS

De acuerdo a datos obtenidos en la revisión bibliométrica, se aprecia que las investigaciones sobre la cadena de suministro y el impacto ambiental han ido en aumento en los últimos años (Figura 2).

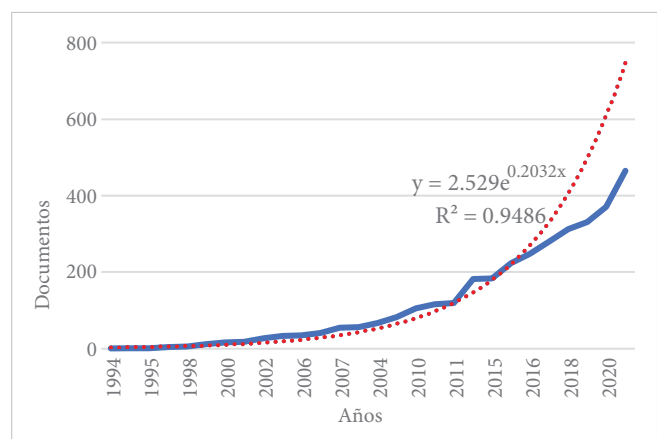


Figura 2. Línea de tiempo de documentos por año.

El tipo de documentos que se han publicado acerca de la cadena de suministro e impacto ambiental son artículos (2190, 64.30 % del total), documentos de conferencias (660, 19.40 %), capítulos de libros (228, 6.70 %), revisiones (216, 6.30 %) y libros (34, 1 %), siendo los artículos científicos los que tienen un mayor número de presencia en el mundo científico, demostrando que es un tema de interés.

PRINCIPALES ÁREAS DE INVESTIGACIÓN

Las principales áreas interesadas en publicar sobre el impacto ambiental en la cadena de suministro son: ciencias del medio ambiente (20.3 % del total); ingeniería (18.2 %); negocios, gestión y contabilidad (al menos 11.9 %), energía (11.6 %) y ciencias sociales (6.3 %). En la Figura 3 se puede observar la distribución de las áreas interesadas en publicar sobre el tema (en cifras redondeadas).

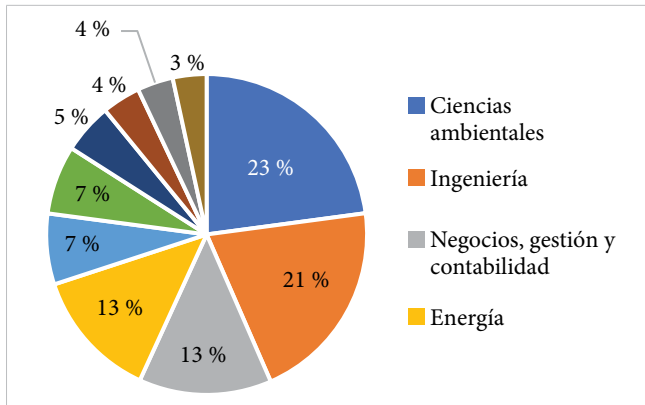


Figura 3. Principales áreas interesadas en el tema.

AGENCIAS DE FINANCIAMIENTO INTERESADAS EN EL TEMA

Se han interesado en financiar estos temas al menos 160 instituciones, siendo la National Natural Science Foundation of China la de mayor número de aportaciones (124 documentos), seguida por la European Commission (108), la National Science Foundation (79), el Engineering and Physical Sciences Research Council (57) y el Horizon 2020 Framework Programme (54), entre otras (Figura 4).

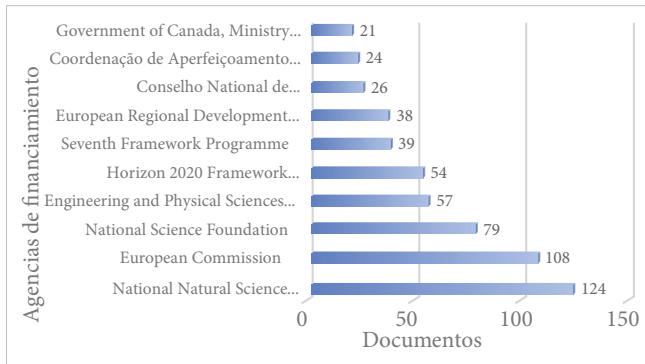


Figura 4. Principales agencias de financiamiento.

PRINCIPALES AUTORES, PAÍSES E INSTITUCIONES INVOLUCRADOS EN LA INVESTIGACIÓN

Ciento cincuenta y ocho autores fueron identificados en publicaciones sobre cadena de suministro e impacto ambiental. En la Figura 5, obtenida de VOSViewer, se aprecia la relación entre los autores y los grupos con los que comparten publicaciones. Los autores que cuentan con un mayor número de documentos son M. Kucukvar (21 documentos), S. Sala (19), A. Azapagic y M. Lenzen (18), A. Carvalho y J. Sarkis (15). La Tabla 1 muestran los autores y el número de documentos con el que cuentan

tan y la Figura 5 se exhibe la relación de autores y los grupos existentes.

TABLA 1 DOCUMENTOS POR AUTOR

AUTORES	Docs.
M. Kucukvar	21
S. Sala	19
A. Azapagic; M. Lenzen	18
A. Carvalho; J. Sarkis	15
A. Horvath; J. M. Ponce-Ortega	14
G. Guillén-Gosálbez; K. R. Haapala	13
R. Clift; J. Dewulf; K. Feng; G. Thoma; R. Wood; F. You	12
K. Hubacek	11
K. Govindan; H. L. Lam; M. T. Moreira; N. C. Onat; M. S. Pishvae; L. Puigjaner; S. Suh; O. Tatari	10
R. Aldaco; A. P. Barbosa-Póvoa; R. Manzini; F. D. Mele; K. Nansai; S. Pfister; J. E. Santibañez-Aguilar; T. Wiedmann	9
R. Accorsi; A. Acquaye; G. Egilmez; A. Espuña; S. M. Gupta; T. Ibn-Mohammed; J. J. Klemeš; S. C. L. Koh; H. S. Matthews; M. L. Tseng	8
B. R. Bakshi; G. Feijoo; M. Finkbeiner; A. Genovese; M. I. Gomes; S. Hellweg; H. K. Jeswani; S. Kara; J. Laso; A. Malik; M. Margallo; S. A. Miller; B. Mota; T. Paksoy; R. Parajuli; R. R. Tan; I. Vázquez-Rowe	7

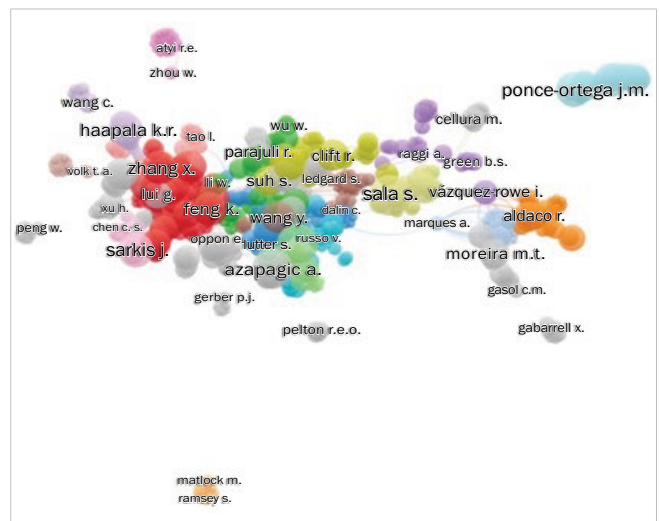


Figura 5. Autores.

Un total de 103 países se encuentra investigando sobre la cadena de suministro e impacto ambiental, entre los cuales quienes tienen un mayor número de publicaciones son los Estados Unidos (735 documentos), seguido por

Reino Unido (416), Italia (350), China (278), Alemania (214) y Australia (175). En la Figura 6 se muestran los cinco principales países interesados en el tema.

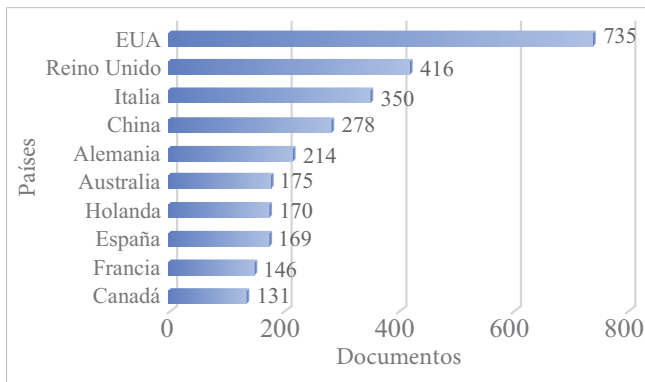


Figura 6. Documentos por país.

Se detectaron 170 instituciones, con 8 publicaciones como mínimo, que tienen un número mayor de publicaciones, entre ellas la Wageningen University & Research (45 documentos), el European Commission Joint Research Centre (41), The University of Manchester (38), The University of Tehran y ETH Zúrich (33) y la Universidad de California en Berkeley y la Universidad de Sídney (30). En la Figura 7 se muestran las principales universidades dedicadas en este tema.

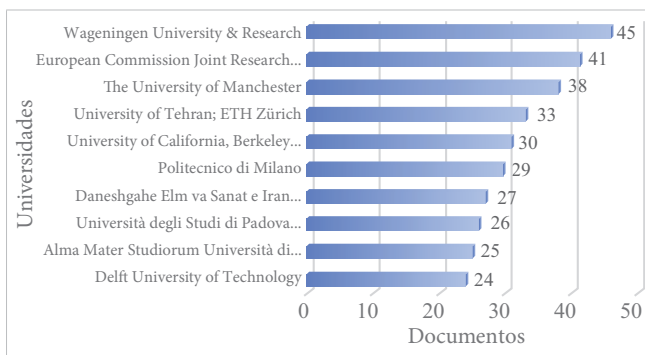


Figura 7. Documentos por universidad.

PRINCIPALES PALABRAS CLAVE UTILIZADAS

Los autores utilizaron 160 palabras clave en sus trabajos de investigación, de las cuales las más comunes son *environmental impact* (2204), *supply chains* (1546), *sustainable development* (831), *life cycle* (720), *supply chain management* (696), *LCA (life cycle assessment)*, (375), *environmental management* (374), *decision making* (345), *greenhouse gases* (337) y *carbon footprint* (327). En la Figura 8 se muestran las palabras más utilizadas y los grupos en los que se desarrollan.

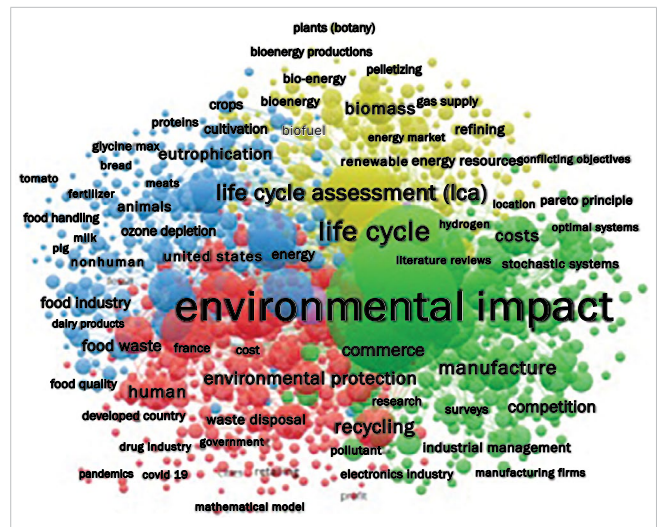


Figura 8. Palabras clave.

PAÍSES MÁS CITADOS

Se identificó 103 países que se encuentran citados en algún tipo de documento, entre los cuales se encuentran los Estados Unidos (31 011 citas), Reino Unido (17 424), Holanda (12 047), China (9314), Australia (8292), Italia (7478), Canadá (6143), Dinamarca (114), Francia (4520) y España (4091), tal como se muestra en la Figura 9.

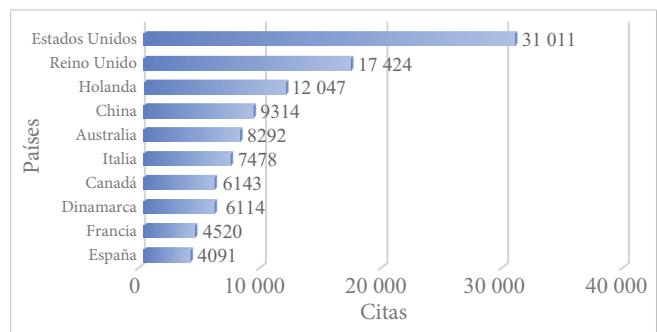


Figura 9. Citas por país.

DOCUMENTOS MÁS CITADOS

En la Tabla 2 se muestran los documentos con más citas. El artículo *Theecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology* es el más citado desde el año 1016 (1830 citas), seguido por *Reducing food's environmental impacts through producers and consumers* (1324) y *Additive manufacturing and its societal impact: a literature review* (1120). Estos han sido de gran impacto para la investigación y difusión de información acerca de la cadena de suministro y el impacto ambiental.

TABLA 2
DOCUMENTOS MÁS CITADOS

DOCUMENTOS	CITAS
<i>The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology</i> ^[37]	1830
<i>Reducing food's environmental impacts through producers and consumers</i> ^[38]	1324
<i>Additive manufacturing and its societal impact: A literature review</i> ^[39]	1120
<i>Environmental management and manufacturing performance: The role of collaboration in the supply chain</i> ^[5]	1104

IV. CONCLUSIONES

Esta investigación se centró en el análisis y la presentación del conocimiento existente acerca del impacto ambiental en la cadena de suministro. A lo largo de esta revisión se examinaron diversos estudios con el propósito de comprender a profundidad cómo las actividades de la cadena de suministro y el medio ambiente se relacionan. De igual manera, se identificaron estrategias que van desde la adopción de tecnologías limpias hasta la implementación de prácticas de eficiencia energética y reducción de residuos, así como también la adopción de estilos de vida que ayuden al consumo de productos favorables con el medio ambiente.

Con base en los documentos analizados se observó que el tema del impacto ambiental y la cadena de suministro está en constante crecimiento y aunque la revisión que se presenta aquí es amplia, es importante mencionar que no se contempla la totalidad de documentos existentes, debido a que estos se pueden encontrar en bases de datos diferentes a las utilizadas o en aquellas incorporadas a las plataformas digitales después de la publicación de este artículo.

Así pues, en 1994 se tiene el registro del primer y único documento del año y esta cifra aumentó a 2 en 1996, sin embargo, el primer repunte de publicación de documentos de este tema fue hasta 1999 con 12 y al cierre del 2021 se tiene un registro en la base de datos Scopus de 467 documentos.

Al analizar los países más interesados en publicar este tipo de investigaciones destacan los Estados Unidos de América, Reino Unido, Italia y China, sin embargo, no son los países más citados, ya que en los principales puestos en cuanto a citas bibliográficas se puede apreciar que los Estados Unidos de América se mantiene en

el primer lugar, seguido por Reino Unido y Países bajos, sin embargo, México aún no forma parte de los principales creadores de documentos.

Es importante mencionar que la información está en constante crecimiento y día a día se encuentra información relevante y con la posibilidad de múltiples líneas de investigación para la comunidad científica.

REFERENCIAS

- [1] H. Camacho, K. Gómez y C. A. Monroy, "Importancia de la cadena de suministros en las organizaciones", presentado en *Tenth LACCEI Lat. Am. Caribb. Conf. (LACCEI'2012)*, Panamá, Panamá, jul. 23-27, 2012.
- [2] E. Jiménez, "Análisis de las cadenas de suministro en el marco de la competitividad internacional", propuesta doctoral inédita, Universidad Nacional Autónoma de México, 2000.
- [3] J. E. Jiménez y S. Hernández, "Marco conceptual de la cadena de suministro: un nuevo enfoque logístico", publicación técnica no. 215, 2002. [En línea]. Disponible en: imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt215.pdf
- [4] E. G. R. Pérez, R. A. D. Torres y J. M. Gómez, "Estudio exploratorio sobre la cadena de suministros 'verde' y el capital humano 'verde' en organizaciones del área metropolitana de Monterrey", *Innovaciones de Negocios*, vol. 18, no. 35, 2021, doi: [10.29105/rinn18.35-7](https://doi.org/10.29105/rinn18.35-7).
- [5] S. Vachon y R. D. Klassen, "Environmental management and manufacturing performance: The role of collaboration in the supply chain", *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 111, no. 2, pp. 299-315, 2008, doi: [10.1016/j.ijpe.2006.11.030](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.11.030).
- [6] M. del C. Torres, "Cadenas de suministro verdes, una respuesta al desempeño ambiental", *Inventio*, vol. 10, no. 20, pp. 43-48, 2014, inventio.uaem.mx/index.php/inventio/article/view/325/416.
- [7] J. D. Silva, "Gestión de la cadena de suministro: una revisión desde la logística y el medio ambiente", *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 11, no. 22, pp. 51-59, 2017.
- [8] J. H. Calderón y J. F. Bermeo, "Metodología de la huella de carbono en las operaciones logísticas empresariales aplicada al sector alimentos", tesis de maestría,

- Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia, 2012. [En línea]. Disponible en: red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/5018/TML01399.pdf
- [9] W. A. Sarache-Castro, Y. J. Costa-Salas y J. P. Martínez-Giraldo, “Evaluación del desempeño ambiental bajo enfoque de cadena de abastecimiento verde”, *DYNA*, vol. 82, no. 189, pp. 207-215, 2015, doi: [10.15446/dyna.v82n189.48550](https://doi.org/10.15446/dyna.v82n189.48550).
- [10] J. Sarkis, “A strategic decision framework for green supply chain management”, *J. Clean. Prod.*, vol. 11, no. 4, pp. 397-409, 2003, doi: [10.1016/S0959-6526\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(02)00062-8).
- [11] S.-S. Lin y Y.-S. Juang, “Selecting green suppliers with analytic hierarchy process for biotechnology industry”, *Oper. Supply Chain Manag.*, vol. 1, no. 2, pp. 115-129, 2014, doi: [10.31387/oscm020012](https://doi.org/10.31387/oscm020012).
- [12] S. Luthra, K. Govindan, D. Kannan, S. K. Mangla y C. P. Garg, “An integrated framework for sustainable supplier selection and evaluation in supply chains”, *J. Clean. Prod.*, vol. 140, parte 3, pp. 1686-1698, 2017, doi: [10.1016/j.jclepro.2016.09.078](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.078).
- [13] K. Ahsan y S. Rahman, “Green public procurement implementation challenges in Australian public healthcare sector”, *J. Clean. Prod.*, vol. 152, pp. 181-197, 2017, doi: [10.1016/j.jclepro.2017.03.055](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.055).
- [14] J. R. M. Fong, J. L. G. Alcaraz, A. A. M. Macías y G. C. Robles, “Validación de atributos verdes utilizados en la selección de proveedores verdes”, *Cult. Científ. y Tecnol.*, no. 58, 2016.
- [15] C. A. Serna, “Gestión energética empresarial una metodología para la reducción de consumo de energía”, *Producción+ Limpia*, vol. 5, no. 2, pp. 107-126, 2010.
- [16] W. L. Becerra y D. H. Montoya, “Los costos ambientales en la sostenibilidad empresarial. Propuesta para su valoración y revelación contable”, *Contaduría Universidad de Antioquia*, no. 65, pp. 173-195, 2014, doi: [10.17533/udea.rc.24400](https://doi.org/10.17533/udea.rc.24400).
- [17] I. Varela-Rojas, “Definición de producción más limpia”, *Tecnología en marcha*, vol. 16, no. 2, pp. 3-12, 2003, revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/1481.
- [18] M. Restrepo, “Producción más limpia en la industria alimentaria”, *Producción+Limpia*, vol. 1, no. 1, 2006.
- [19] K. Carrillo, “Estrategias sustentables en logística y cadenas de suministro”, *Loginn*, vol. 1, no. 1, 2017.
- [20] V. Reyes, D. Zavalay J. Gálvez, “Una revisión del proceso de la logística inversa y su relación con la logística verde”, *Revista Ingeniería Industrial*, vol. 7, no. 2, p. 8, 2008.
- [21] M. Aneke y M. Wang, “Energy storage technologies and real life applications—A state of the art review”, *Applied Energy*, vol. 179, pp. 350-377, 2016, doi: [10.1016/j.apenergy.2016.06.097](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097).
- [22] S. K. Al-Josaiman y M. N. Faisal, “State-of-the-art literature review of sustainable supply chain management: A developing countries perspective”, *Int. J. Bus. Innov. Res.*, vol. 26, no. 1, pp. 82-109, 2021, doi: [10.1504/IJBIR.2021.117739](https://doi.org/10.1504/IJBIR.2021.117739).
- [23] F. Nilsson y M. Göransson, “Critical factors for the realization of sustainable supply chain innovations - Model development based on a systematic literature review”, *J. Clean. Prod.*, vol. 296, p. 126471, 2021, doi: [10.1016/j.jclepro.2021.126471](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126471).
- [24] Y. L. Santos, “La administración de la cadena de suministro sustentable y las pequeñas y medianas empresas de economías emergentes: caso México”, *RICEA*, vol. 8, no. 15, pp. 54-81, 2019, doi: [10.23913/ricea.v8i15.124](https://doi.org/10.23913/ricea.v8i15.124).
- [25] F. Castillo y K. E. Ochoa, “La importancia de utilizar empaques y embalajes amigables con el medio ambiente para exportaciones desde Ecuador”, *Observatorio de la Economía Latinoamericana*, no. 248, oct. 2018.
- [26] Z. J. F. Montes y M. del C. Rodríguez, “La logística inversa en el manejo de los residuos de empaques y embalajes en el contexto del COVID-19”, *Vértice universitario*, vol. 23, no. 91, pp. 3-13, 2021.
- [27] M. Feitó, R. Cespón y M. A. Rubio, “Modelos de optimización para el diseño sostenible de cadenas de suministros de reciclaje de múltiples productos”, *Ingeniare*, vol. 24, no. 1, pp. 135-148, 2016, doi: [10.4067/S0718-33052016000100013](https://doi.org/10.4067/S0718-33052016000100013).
- [28] M. del C. Torres-Salazar, A. E. Escalante-Ferrer, E. Olivares-Benítez y J. C. Pérez-García, “Talento verde y

- cadena de suministro verdes: ¿existe una relación significativa?”, *Nova Scientia*, vol. 8, no. 16, pp. 421-454, 2016.
- [29] A. Gungor y S. M. Gupta, “Issues in environmentally conscious manufacturing and product recovery: a survey”, *Comput Ind Eng*, vol. 36, no. 4, pp. 811-853, 1999, doi: [10.1016/S0360-8352\(99\)00167-9](https://doi.org/10.1016/S0360-8352(99)00167-9).
- [30] K. Govindan, S. G. Azevedo, H. Carvalho y V. Cruz-Machado, “Impact of supply chain management practices on sustainability”, *J. Clean. Prod.*, vol. 85, pp. 212-225, 2014, doi: [10.1016/j.jclepro.2014.05.068](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.068).
- [31] M. Giannakis y T. Papadopoulos, “Supply chain sustainability: A risk management approach”, *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 171, parte 4, pp. 455-470, 2016, doi: [10.1016/j.ijpe.2015.06.032](https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.06.032).
- [32] L. A. Calle, “Metodologías para hacer la revisión de literatura de una investigación”. researchgate.net. www.researchgate.net/publication/301748735_Metodologias_para_hacer_la_revision_de_literatura_de_una_investigacion (accedido: ag. 21, 2022.).
- [33] A. Góngora, “la Importancia de los estudios bibliométricos. El caso de Orinoquia”, *Orinoquia*, vol. 14, no. 2, pp. 121-122, 2010.
- [34] M. J. Page et al., “Declaración PRISMA 2020: una guía actualizada para la publicación de revisiones sistemáticas”, *Rev Esp Cardiol*, vol. 74, no. 9, pp. 790-799, 2021, doi: [10.1016/j.recesp.2021.06.016](https://doi.org/10.1016/j.recesp.2021.06.016).
- [35] N. van Eck y L. Waltman, “Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping”, *Scientometrics*, vol. 84, no. 2, pp. 523-538, 2010, doi: [10.1007/s11192-009-0146-3](https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3).
- [36] I. E. Corrales-Reyes, Y. Fornaris-Cedeño y J. J. Reyes-Pérez, “Análisis bibliométrico de la revista investigación en educación médica. Período 2012-2016”, *Inv Ed Med*, vol. 7, no. 25, pp. 18-26, 2018.
- [37] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz y B. Weidema, “The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology”, *Int J Life Cycle Assess*, vol. 21, no. 9, pp. 1218-1230, sept. 1, 2016, doi: [10.1007/s11367-016-1087-8](https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8).
- [38] J. Poore y T. Nemecek, “Reducing food’s environmental impacts through producers and consumers”, *Science*, vol. 360, no. 6392, pp. 987-992, 2018, doi: [10.1126/science.aag0216](https://doi.org/10.1126/science.aag0216).
- [39] S. H. Huang, P. Liu, A. Mokasdar y L. Hou, “Additive manufacturing and its societal impact: a literature review”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 67, no. 5, pp. 1191-1203, 2013, doi: [10.1007/s00170-012-4558-5](https://doi.org/10.1007/s00170-012-4558-5).

Diseño de simulador que identifica variables clave y su impacto en la producción de chayote

Simulator design that identifies key variables and their impact on chayote production

Héctor Daniel García Castro¹, Cuauhtémoc Sánchez Ramírez²✉, Magno Ángel González Huerta²

¹Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, Tecnológico Nacional de México campus Orizaba, México

²División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México campus Orizaba, México

RESUMEN

El presente artículo reporta un caso de estudio desarrollado en una empresa agroindustrial mexicana que produce chayote, durante el cual se desarrolló un modelo de simulación de pronósticos que sirve de apoyo para estimar el rendimiento de las huertas, así como su merma, y que ayuda a evaluar el nivel de satisfacción de los clientes por la entrega de sus pedidos. Se analizaron variables clave de la cadena de suministro del chayote, tales como condiciones climatológicas, mermas, área sembrada, rendimiento promedio por hectárea, tasas de exportación y contratos celebrados con los clientes. Con esta herramienta, la empresa podrá tomar medidas oportunas de abastecimiento, considerar a otros productores para que sean sus proveedores, cumplir con los pedidos de los clientes y, de esta forma, incrementar su nivel de satisfacción. En el desarrollo del modelo, se utilizó la metodología de Dinámica de Sistemas. La empresa realizó la validación del modelo y recibió una interfaz gráfica que permite la manipulación de ciertas variables para entender como estas afectan al proceso productivo del chayote mediante una serie de indicadores clave de desempeño.

PALABRAS CLAVE: agroindustria, dinámica de sistemas, pronósticos, cadena de suministro, chayote.

ABSTRACT

This article reports a case study developed in a Mexican agroindustrial company that produces chayote,, during which a forecast simulation model was developed that serves as support to estimate the yield of the orchards, as well as their loss, and that helps to evaluate the level of customer satisfaction with the delivery of their orders. Key variables of the chayote supply chain were analyzed, such as weather conditions, losses, planted area, average yield per hectare, export rates and contracts signed with clients. With this tool, the company will be able to take timely supply measures, consider other producers to be its suppliers, fulfill customer orders and, in this way, increase their level of satisfaction. In the development of the model, the System Dynamics methodology was used. The company validated the model and received a graphical interface that allows the manipulation of certain variables to understand how they affect the chayote production process through a series of key performance indicators.

KEYWORDS: agroindustry, system dynamics, forecast, supply chain, chayote.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Cuauhtémoc Sánchez Ramírez.

INSTITUCIÓN: Tecnológico Nacional de México campus Orizaba.

DIRECCIÓN: Av. Oriente 9 núm. 852, col. Emiliano Zapata, Orizaba, Veracruz, México, C. P. 94320.

CORREO ELECTRÓNICO: csanchezr@ito-depi.edu.mx

Fecha de recepción: 30 de julio de 2023. **Fecha de aceptación:** 18 de agosto de 2023. **Fecha de publicación:** 31 de agosto de 2023.



I. INTRODUCCIÓN

El chayote (*Sechium edule*) es un fruto ampliamente conocido en todo el continente americano, llegando a ser considerado parte de la dieta básica en México. Su popularidad se debe no solo a su sabor, sino a los beneficios y propiedades que su consumo causa en la salud, gracias a la aportación de vitaminas y minerales [1]. México cubre el 53 % del mercado de consumo para este fruto, dejando una derrama económica estimada en más de 190 millones de pesos [2]. Veracruz es el estado con más producción registrada a nivel nacional, alcanzando más de 160 000 toneladas [3]. En los últimos años el mercado ha tenido un aumento en su competitividad derivado de la implementación de nuevas estrategias ante un mercado cada vez más exigente.

Exportar no solo el chayote, sino cualquier producto agrícola, es un proceso complejo debido a los estándares de calidad e higiene que los importadores exigen. En adición a lo anterior, la siembra y cosecha están estrechamente relacionadas a variables inciertas que influyen en gran medida al rendimiento de las huertas. Esto se traduce en un reto importante para los productores, quienes se encuentran ante incertidumbre y falta de herramientas para tomar decisiones adecuadas.

En la actualidad es normal que los productores trabajen con base en los conocimientos adquiridos a lo largo de años de experiencia en el ramo agroindustrial, sin embargo, al estar basados en un método empírico, se carece de fiabilidad al tomar decisiones en momentos críticos y es ahí donde el presente artículo encuentra el área de oportunidad a explotar.

El objetivo de este trabajo es analizar las variables inciertas críticas presentes en la cadena de suministro del chayote y cómo estas impactan al sistema estudiado, todo ello orientado a generar una herramienta que sirva para planear estrategias que eleven la satisfacción del cliente. Para ello, se seleccionó la metodología de dinámica de sistemas, cuya filosofía gira en torno a la retroalimentación o causalidad circular entre variables observables [4].

A continuación, se resumen los trabajos consultados para el desarrollo del artículo.

Se consultaron artículos donde se aplican diversos métodos basados en series de tiempo para el pronóstico de

precio y costos de productos y consumos energéticos [5]-[8] mostrando resultados de confiabilidad de por lo menos el 90 % en todos los casos, razón por la cual se evaluó el uso de estas técnicas para ciertas secciones del modelo a desarrollar.

Posteriormente, se examinó el uso de la dinámica de sistemas para el análisis de cadenas de suministro agroindustriales, metodología que demostró ser capaz de analizar de forma satisfactoria escenarios altamente complejos e inciertos [9]-[11], siendo la principal ventaja la posibilidad de manipular variables clave para estudiar su efecto en el sistema y, de esta forma, evaluar posibles escenarios para el desarrollo de estrategias oportunas que mitiguen condiciones desfavorables del sistema.

Por último, se repasó un trabajo donde se mezclaron las técnicas antes analizadas [12] y se usaron pronósticos matemáticos clásicos para alimentar un modelo de simulación basado en dinámica de sistemas, trabajo que arrojó resultados altamente fiables.

Una vez estudiado lo anterior, se decidió desarrollar un modelo de pronósticos basado en dinámica de sistemas y alimentado por series de tiempo para evaluar las variables críticas que impactan el proceso productivo del chayote, con la finalidad de analizar el impacto de estas variables en la satisfacción de la demanda de los clientes.

Para ello, se plantearon los objetivos siguientes:

- Identificar las variables claves en el proceso productivo del chayote.
- Definir la relación de las variables identificadas, así como el diagrama causal del proceso productivo del chayote.
- Desarrollar un modelo de simulación de pronósticos que ayude a la empresa a evaluar escenarios de alta, media y baja producción de chayote para analizar si se cumplirán los pedidos de los clientes, de igual forma, que el modelo ayude a la toma de decisiones oportunas como estrategias de ventas a corto plazo, cuando se presentan variantes climáticas en un ciclo de producción.
- Validar, mediante pruebas estadísticas, el error de los datos generados en el simulador con respecto a los datos históricos reales de la empresa.

II. METODOLOGÍA

IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES

El primer paso para el desarrollo del proyecto fue identificar claramente las partes que componen a la *cadena de suministro del chayote* para especificar y definir las variables presentes en él.

Esta cadena se divide en tres eslabones principales (Figura 1), los cuales se definen a continuación:

Aprovisionamiento: Fase donde se obtiene la materia prima, el chayote, ya sea mediante huertas propias (suministro propio) o comprando el producto a terceros (suministro tercerizado).

Producción: Etapa donde el producto es adquirido, seleccionado y empaquetado para su posterior distribución.

Distribución y entrega: Etapa final donde se hace llegar el producto al consumidor final, para este caso, se tienen dos mercados: el nacional y el de exportación.

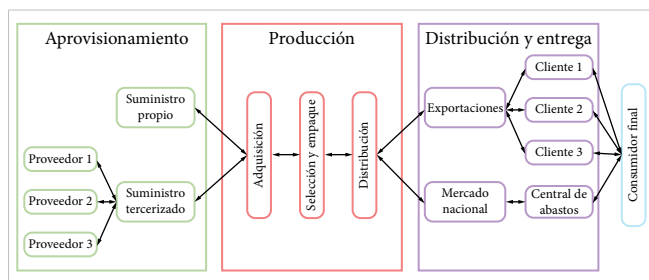


Figura 1. Cadena de suministro de una empresa agroindustrial.

ELABORACIÓN DEL DIAGRAMA CAUSAL

Posteriormente, se elaboró un diagrama causal (DC) donde se manifiestan las relaciones que las variables identificadas tienen unas con otras. La Figura 2 muestra un fragmento del DC correspondiente al producto en su presentación de 18 kg para el mercado de exportación.

Una variable tiene una influencia positiva en otra cuando estas dos son directamente proporcionales, lo cual es representado por una flecha con un símbolo positivo en su punta, y, contrario a esto, una variable tiene una influencia negativa en otra cuando estas dos son inversamente proporcionales, lo que es representado por una flecha con un símbolo negativo en su punta.

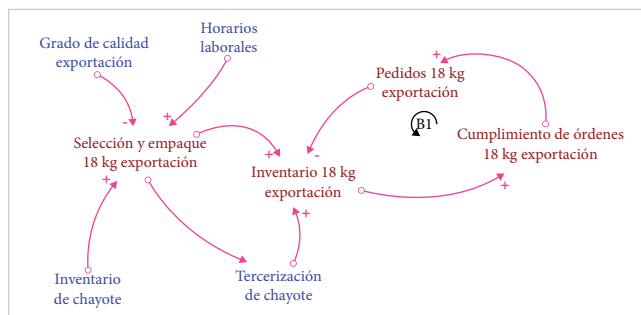


Figura 2. Diagrama causal.

CREACIÓN DEL DIAGRAMA DE FORRESTER

El siguiente paso fue la transformación del DC a un diagrama de Forrester, el cual no es más que la simulación del modelo estudiado.

El software elegido para el desarrollo del trabajo es Stella Architect®, el cual se ajusta con un Delta Time (DT = 1 hora) para trabajar hora por hora durante un año calendario (8761 horas).

Enseguida, se empezó con la construcción del diagrama de Forrester y para ello el modelo se dividió en “sectores”, cada con la programación de una parte específica del modelo, los cuales se detallan a continuación.

Primero se programó un calendario con el fin de identificar en qué momento del año simulado se encuentra el modelo con exactitud.

Las condiciones climatológicas se pronosticaron haciendo uso de modelos matemáticos. En particular, se eligió promedios móviles para la temperatura y la humedad, y promedios móviles dobles para la lluvia debido a que mostraron una confiabilidad del 90 % y 95 %, respectivamente, para pronosticar datos a un año calendario. Para alimentar a los modelos se consultó la base de datos de la NASA [13], donde los 8760 datos fueron descargados y canalizados al modelo de pronósticos.

Antes de implementarlos al modelo, se realizaron pruebas t apareada pronosticando las condiciones para el año 2021, arrojando una confiabilidad en los pronósticos del 95 % para la temperatura y la humedad, y un 90 % para la lluvia. Con el fin de ilustrar mejor lo anterior, en la Figura 3 se muestra el comportamiento de las variables pronosticadas contra los datos reales para la temperatura del 2021.

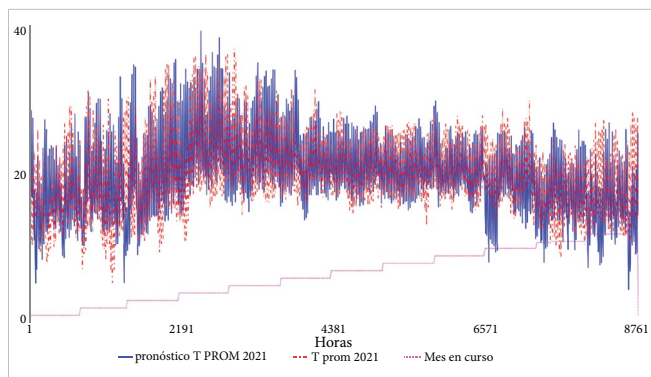


Figura 3. Comparación entre las temperaturas pronosticadas para 2021 vs. las temperaturas reales de 2021.

El modelo analiza cada dato pronosticado y detecta cuando una condición climática es desfavorable para el desarrollo del chayote, convirtiendo esta señal en merma para el cultivo.

Después de esto, el sistema calcula un rendimiento por huerta de acuerdo a variables como la superficie de cada huerta, la cantidad de charolas cosechadas en cada corte y su peso, entre otras.

El sistema es capaz de identificar cuando el cultivo sembrado está listo o no para ser cosechado, esto gracias a un sector dedicado al inicio y fin de la cosecha. Es importante mencionar que la empresa donde se realizó la investigación siembra sus huertas en dos partes con un desfase de tiempo, por lo que se tuvo cuidado con hacer esta diferencia en el modelo. Los rendimientos de todas las huertas analizadas se concentran en una variable llamada cosecha total para posteriormente ingresar a las bodegas de la empresa para iniciar con el proceso de selección y empaque.

Finalmente, se incluyó un sector dedicado al análisis mensual del cumplimiento de las órdenes de los clientes con el fin identificar los periodos de tiempo críticos en que no se podrán cumplir con ello, lo cual puede ayudar que se implementen estrategias oportunas que permitan contra arrestar esta situación.

VALIDACIÓN DEL MODELO

Para asegurar un buen funcionamiento lógico del modelo, se realizaron dos pruebas:

Consistencia dimensional: Se verificó que cada dimensión tenga un comportamiento lógico y esperado

de acuerdo a la situación analizada. Para ilustrar lo anterior, se presenta la gráfica de las temperaturas pronosticadas para el año 2022 (Figura 4).

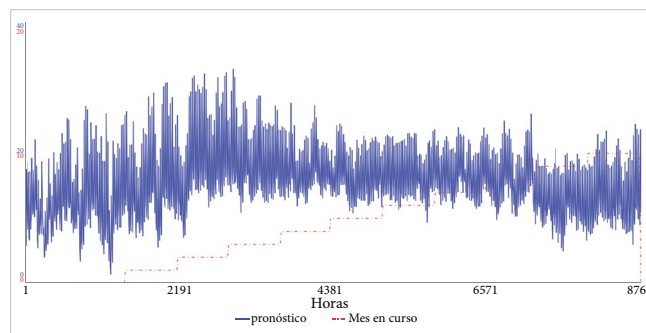


Figura 4. Pronóstico de la temperatura para el año 2022.

La gráfica demuestra que las temperaturas más altas tienen su registro en los meses de abril y mayo, mientras que las más bajas se presentan en noviembre, diciembre y enero. Con lo anterior se puede concluir que la variable analizada cumple con un comportamiento lógico esperado.

Valores extremos: Es una prueba dividida en dos partes: condición extrema inferior y condición extrema superior.

Para la condición extrema inferior a los valores de la superficie de cada huerta analizada se le asigna el valor cero y se obtienen los siguientes resultados en los inventarios (Figura 5).

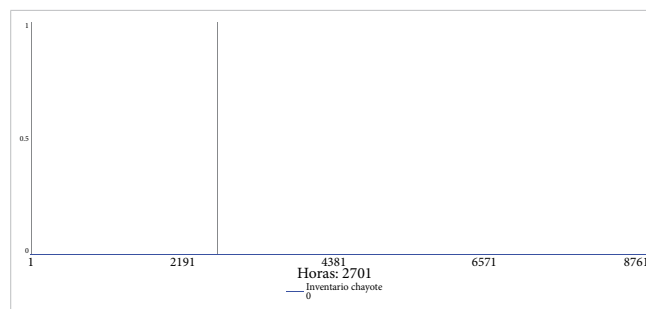


Figura 5. Prueba de valores extremos inferiores.

Se observa que al no haber superficie que cosechar, el inventario de chayotes durante todo el año permanece constante en cero, por lo cual se puede concluir que el comportamiento es el esperado

Para la condición extrema superior, la variable seleccionada para su modificación es la de embarque, la

cual hace referencia a la cantidad de chayote enviado al cliente en cada pedido. Si esta variable sufre una modificación en su valor a una cantidad exageradamente grande, la empresa no podrá completar ni una orden colocada por el cliente (Figura 6).

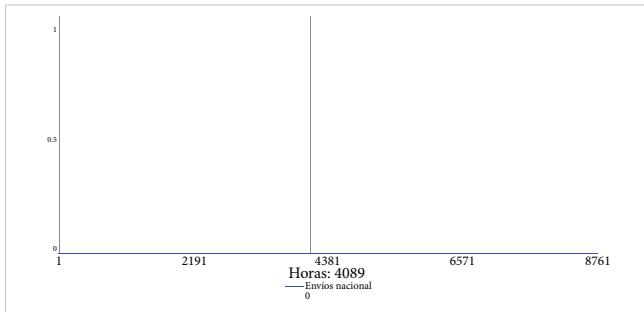


Figura 6. Prueba de valores extremos superiores.

Se observa que, al ser un pedido exageradamente grande, el inventario nunca alcanza a ser suficiente para mandarlo, por eso la variable envíos nacional permanece constante en cero, por lo cual se puede concluir que el comportamiento es el esperado.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para un uso más sencillo y amigable del modelo, se desarrolló una interfaz gráfica que permite visualizar e interpretar de forma más clara las variables analizadas, de forma tal que el agricultor sea capaz de tener un estimado del comportamiento de sus huertas y, de esta forma, establecer estrategias de venta que le permitan incrementar el nivel de satisfacción de sus clientes.

La página de inicio (Figura 7) es encargada de correr, pausar, resumir o detener la simulación del programa. Cuenta con una barra indicadora en la parte inferior de la ventana para mostrar gráficamente el estatus de carga del programa. Adicional a lo anterior, desde esta página se pueden acceder a las diferentes secciones del modelo de simulación, las cuales son: Cosecha 1, Cosecha 2, Ajustes generales, Inventario, Condiciones climatológicas y Resumen anual.

Como se mencionó anteriormente, la empresa siembra sus huertas en dos partes, motivo por el cual existen dos páginas dedicadas a la representación del comportamiento de cada una de ellas (Figura 8). Estas páginas contienen las mismas variables, indicadores y botones que se explican a continuación.



Figura 7. Página principal.



Figura 8. Página cosecha 1.

Las variables que el usuario puede modificar son día y mes del inicio de la cosecha, así como día y mes del fin de la misma. Los indicadores que el usuario puede ver son los rendimientos mensuales y anuales de cada huerta sembrada, así como una escala de colores tipo semáforo superpuesta en el mapa de las huertas. Además, cada página cuenta con sus respectivos botones de navegación para ir a las diferentes páginas del modelo, así como un botón para acceder a diferentes gráficas (Figura 9).

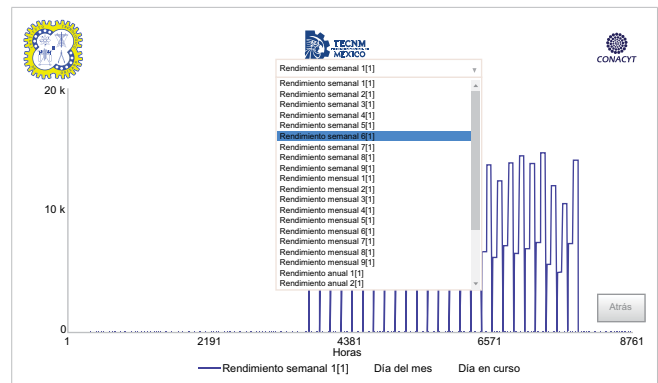


Figura 9. Gráficas de las cosechas 1.

La página Inventario (Figura 10) ofrece información en cuanto a tres tipos de inventario:

- **Inventario chayotes:** Cuantifica la cantidad total de chayote que la empresa cosecha en todas las huertas.
- **Inventario exportación:** Cuantifica el chayote seleccionado para el mercado de exportación.
- **Inventario nacional:** Cuantifica el chayote seleccionado para el mercado nacional.

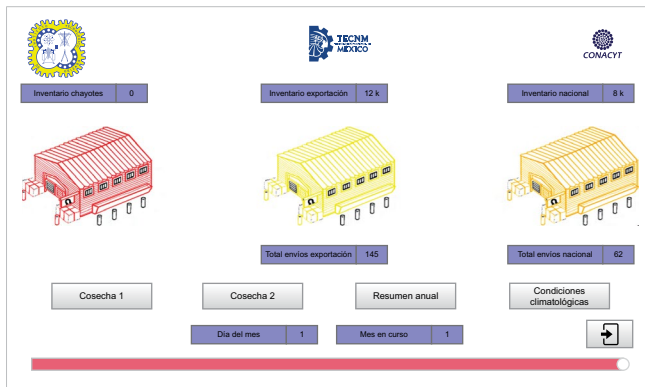


Figura 10. Página inventario.

De igual forma, el modelo es capaz de mostrar un resumen mensual acerca del cumplimiento de órdenes para los mercados nacionales y de importación (Figura 11)

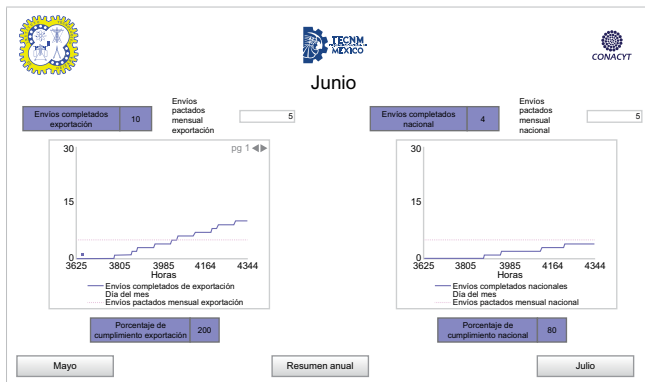


Figura 11. Resumen del mes de junio.

Es importante hacer mención que el usuario puede modificar el número de pedidos pactados para el envío de cada mercado y de esta forma se puede ver gráficamente si se alcanzará o no el objetivo.

El usuario tiene un concentrado de todas las variables que es capaz de modificar (Figura 12). Es importante señalar que una vez que el usuario modifique la variable

que desee, hay que volver a la página de inicio para correr el modelo y que el cambio haga efecto.

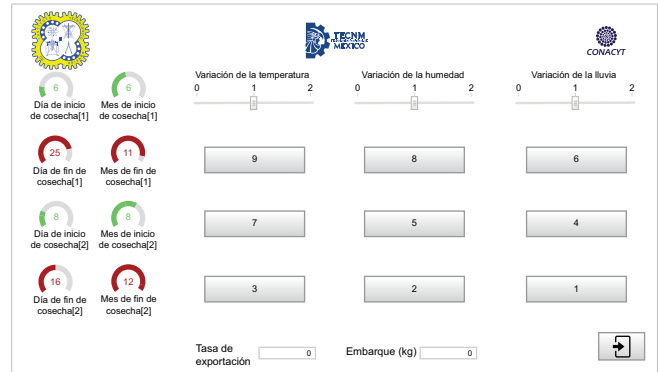


Figura 12. Página de ajustes generales.

Adicional a esto, cada huerta analizada dispone de un botón en el cual, haciendo clic, el programa desplazará una nueva ventana (Figura 13) donde aparecerán nuevas variables modificables por el usuario.

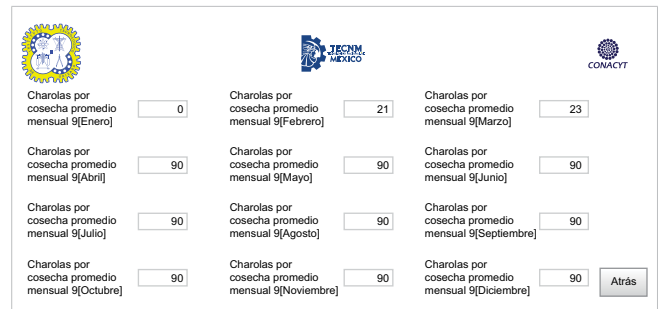


Figura 13. Página de parámetros modificables para cada huerta.

Finalmente, el modelo cuenta con una página donde se muestran las gráficas que representan a las variables climáticas pronosticadas por el modelo de simulación y, de igual manera, se cuenta con tres controles deslizantes para modificar el pronóstico calculado por el programa, tal como se muestra en la Figura 14.

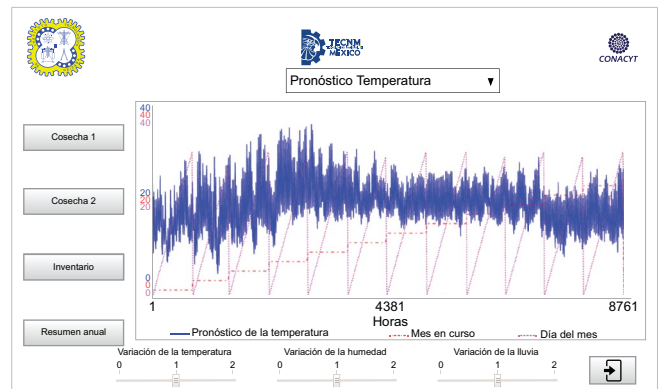


Figura 14. Página de condiciones climatológicas.

Finalmente, el modelo se presentó ante los expertos en el tema. Como prueba final, se comparó los resultados obtenidos en el modelo contra los datos históricos registrados por la empresa donde se llevó a cabo el proyecto, arrojando un error máximo del 10 %.

IV. CONCLUSIONES

El simulador no solo arrojó resultados muy importantes para la empresa, sino también permite llegar a conclusiones muy significativas durante el análisis del comportamiento de la siembra del chayote a lo largo del ciclo de cosecha, como lo son los siguientes:

- Si bien es cierto que existen muchas variables que impactan al proceso productivo del chayote, se determinó que las que tienen una mayor influencia en él son variables totalmente incontrolables por los productores, como lo son las condiciones climáticas.
- Una variación en las variables críticas identificadas en la cadena de suministro desencadena un efecto dominó, haciendo que la satisfacción del cliente se vea afectada. Por tanto, volvieron a ser identificadas las variables inciertas como las más desestabilizantes.
- Al momento de presentar el proyecto a los directivos de la empresa donde se llevó a cabo, estos quedaron muy satisfechos pues vieron en el sistema no solo una manera de saber sus tasas de satisfacción al cliente, sino la oportunidad de desarrollar estrategias que permitan elevarla y el momento oportuno para aplicarlas.
- En adición a lo anterior, el sistema permite identificar los tiempos de crisis en la cosecha del chayote y su posible razón, gracias a lo cual se pueden implementar estrategias en campo para contrarrestar dichas situaciones.

Es muy importante señalar que el trabajo desarrollado no predice el futuro, pero, como su nombre lo indica, pronostica y prevé posibles escenarios con una tasa de confiabilidad muy alta. Para comprobar lo anterior, se compararon los datos arrojados por el simulador para el mes de septiembre de 2022 contra los datos reales de la empresa, obteniendo un error del 3 %. Gracias a esto, se puede confiar en el simulador para tomar decisiones oportunas en base a sus pronósticos, como estrategias de ventas a corto plazo.

REFERENCIAS

- [1] SIAP. “Chayote, hortaliza que pertenece a la familia de las calabazas contribuye a la salud”. Gob.mx. <https://www.gob.mx/siap/articulos/chayote-hortaliza-que-pertenece-a-la-familia-de-las-calabazas-contribuye-a-la-salud> (accedido en: ag. 15, 2022).
- [2] H. Avendaño, J. Cadena, M. L. C. Arévalo, E. Campos, V. M. Cisneros y J. F. Aguirre, *Las variedades del chayote mexicano, recurso ancestral con potencial de comercialización*, 1.ª ed. México: GISEM, 2010, pp. 88. [En línea]. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/231856/Las_variedades_del_chayote_mexicano.pdf
- [3] J. Nataren-Velazquez, A. L. Del Angel-Pérez, J. Valente Megchún-García, E. Ramirez-Herrera, C. A. Hernandez-Estrada, I. Meneses-Marquez, “Caracterización del cultivo de chayote (*Sechium edule Jacq*) (Swartz) en la zona de Altas Montañas del estado de Veracruz”, *RINDERESU*, vol. 5, no. 1, pp. 134-152, sept., 2020. [En línea]. Disponible en: <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/52/56>.
- [4] L. R. Izquierdo, J. M. Galán, J. I. Santos y R. Del Olmo, “Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas”, *EMPIRIA*, no. 16, pp. 85-112, 2008. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2971/297124024004.pdf>.
- [5] S. A. David, D. D. Quintino, C. M. C. Inacio Jr. y J. A. T. Machado, “Fractional dynamic behavior in ethanol prices series”, *J. Comput. Appl. Math.*, vol. 339, 2018, pp. 85-93, doi: 10.1016/j.cam.2018.01.007.
- [6] M. V. Turdera, “Energy balance, forecasting of bioelectricity generation and greenhouse gas emission balance in the ethanol production at sugarcane mills in the state of Mato Grosso do Sul”, *Renew. Sust. Energy. Rev.*, vol. 19, 2013, pp. 582-588, doi: 10.1016/j.rser.2012.11.055.
- [7] L. G. Tapia, “The effects of oil price volatility on ethanol, gasoline, and sugar price forecasts”, *Energy*, vol. 181, 2019, pp. 1012-1022, doi: 10.1016/j.energy.2019.05.067.
- [8] A. Sanchez y D. Gomez, “Analysis of historical total production costs of cellulosic ethanol and forecasting for the 2020-decade”, *Fuel*, vol. 130, 2014, pp. 100-104, doi: 10.1016/j.fuel.2014.04.037.

- [9] D. C. Tascón y O. Díaz, “Air traffic forecast and its impact on runway capacity. A System Dynamics approach”, *J. Air Transp. Manag.*, vol. 90, p. 101946, 2021, doi: 10.1016/j.jairtraman.2020.101946.
- [10] Y. He, J. Jiao, Q. Chen, S. Ge, Y. Chang y Y. Xu, “Urban long term electricity demand forecast method based on system dynamics of the new economic normal: The case of Tianjin”, *Energy*, vol. 133, 2017, pp. 9-22, doi: 10.1016/j.energy.2017.05.107.
- [11] W. Wang, K. Li, Y. Liu, J. Lian y S. Hong, “A system dynamics model analysis for policy impacts on green agriculture development: A case of the Sichuan Tibetan Area”, *J. Clean. Prod.*, vol. 371, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133562.
- [12] W. Zhou, A. Moncaster, E. O’Neill, D. M. Reiner, X. Wang, P. Guthrie, “Modelling future trends of annual embodied energy of urban residential building stock in China”, *Energy Policy*, vol. 165, 2022, doi: 10.1016/j.enpol.2022.112932.
- [13] POWER | *Data Access Viewer*, National Aeronautics and Space Administration, ag. 16, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la empresa agroindustrial el tiempo y buena disposición para brindar no solo los datos necesarios para llevar a cabo la investigación, sino la asesoría en todo momento.

También se agradece al CONAHCYT la beca de maestría que sirvió de soporte, entre otras cosas, para la realización del trabajo presentado.

Finalmente, se reconoce el apoyo del investigador Dr. Cuauhtémoc Sánchez Ramírez, quien en todo momento tuvo fe en el proyecto y colaboró en la supervisión del mismo.

Dinámica de sistemas para la gestión de salidas de un almacén de certificación portuaria

Systems dynamics for the management of a certification port storage's orders

Dra. Rocío Ramos Hernández¹, Dra. Jesabel Gómez Sánchez¹✉, Dra. Paula Rosalinda Antonio Vidaña¹

¹Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, México

RESUMEN

La cadena de suministro del azúcar cuenta con procesos logísticos complejos que cuando no son coordinados de manera tiene como consecuencia directa la disminución de la satisfacción del cliente. En la empresa mexicana Logistics, dedicada a almacenar, verificar y mandar costales de azúcar a buques de carga para su exportación, este proceso genera un contrato en el cual se pacta el tiempo de entrega de la carga solicitada (usualmente expresado en horas). En este proceso, los últimos meses no se ha cumplido con la meta establecida de satisfacción debido a que las entregas pactadas se han estado retrasando por horas o incluso días. Por esta razón, en el presente artículo se desarrolla un modelo de simulación que permite evaluar el comportamiento actual del sistema, tomando en cuenta los tiempos de ocio programados y no programados. Se identificó que menos del 10 % de las cargas son entregadas de manera satisfactoria a causa de prometer un determinado tiempo de entrega, por lo cual el modelo de simulación implementado otorga al usuario el tiempo estimado promedio que debe pactar para no reducir la satisfacción del cliente, teniendo como resultado un aumento de casi el 90 % en el número de cargas entregadas a tiempo.

PALABRAS CLAVE: dinámica de sistemas; gestión de almacenes; sistemas complejos; cadena de suministros.

ABSTRACT

The sugar supply chain has complex logistical processes that, when not coordinated, have the direct consequence of reducing customer satisfaction. In the Mexican company Logistics, dedicated to storing, verifying, and sending bags of sugar to cargo ships for export, this process generates a contract in which the delivery time of the requested cargo is agreed (usually expressed in hours). In this process, in recent months the established goal of satisfaction has not been met because the agreed deliveries have been delayed by hours or even days. For this reason, in this article a simulation model is developed that allows evaluating the current behavior of the system, considering scheduled and unscheduled leisure times. It was identified that less than 10% of the loads are delivered satisfactorily due to promising a certain delivery time, for which the implemented simulation model gives the user the average estimated time that must be agreed upon in order not to reduce customer satisfaction, resulting in an almost 90% increase in the number of loads delivered on time.

KEYWORDS: system dynamics; storage management; complex systems, supply chain.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Jesabel Gómez Sánchez.

INSTITUCIÓN: Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz.

DIRECCIÓN: Av. Universidad núm. 350, Localidad Dos Caminos, Cuitláhuac, Veracruz, México, C. P. 94910.

CORREO ELECTRÓNICO: jesabel.gomez@utcv.edu.mx

Fecha de recepción: 27 de julio de 2023. **Fecha de aceptación:** 20 de agosto de 2023. **Fecha de publicación:** 31 de agosto de 2023.



I. INTRODUCCIÓN

La industria azucarera en México tiene un papel fundamental en el desarrollo económico, ya que es uno de los sectores más importantes del país que genera 930 000 empleos directos y una producción de 6.12 millones de toneladas anuales, de las cuales el 18 % se destina a las exportaciones, teniendo como mayores socios comerciales a los Estados Unidos y Puerto Rico, quienes adquieren el 67.6 % del total.

En la república mexicana, el estado de Veracruz genera el 37 % de la participación nacional, por lo cual es considerado como el mayor productor de azúcar nacional [1]-[3]. Derivado de lo anterior, la industria azucarera busca ser más competitiva y para esto debe considerar como parte de sus funciones principales el diseño de procesos logísticos, los cuales juegan un papel estratégico en la cadena de suministros, con el fin de mejorar la competitividad y satisfacción de los clientes [4]-[6]. En ese sentido, se considera [7] que el éxito de las empresas se centra en el principio competitivo de un modelo operacional en donde los indicadores y las prácticas están alineadas al marco estratégico de la organización, en busca de la actividad competitiva bajo el objetivo de capturar el mayor porcentaje de valor de la cadena de suministro [4]-[6], [8].

Por esto, se destaca de manera importante la correcta administración de la cadena de suministro como factor estratégico de satisfacción, donde parte del valor agregado es la disponibilidad en tiempo y forma del producto [9], [10]. Por lo tanto, la gestión de los almacenes es parte fundamental del proceso crítico debido a que se encarga de la administración de los inventarios y gestiona la necesidad de los clientes, así como el desarrollo de estrategias competitivas que forman parte integral de la cadena de valor.

Para lograr lo anterior, se necesita la integración y coordinación de sus actores y procesos involucrados para satisfacer las necesidades a través de la adecuada identificación e información de los productos, así como el análisis de los tiempos y movimientos que permita el diseño, la creación y selección de los procesos, herramientas, equipos y habilidades ideales [11]-[13]. Por tanto, las decisiones de logística deben ser creadas de acuerdo a las estrategias de negocio, pero al mismo tiempo en la búsqueda de superar a la competencia y el incremento de los índices de satisfacción del cliente, lo que implica

mayores costos, llevando a los clientes a ser más exigentes y preferir plazos de entrega más estrictos [14]. Este es el caso de la empresa Logistics, que se dedica a certificar productos de exportación como el azúcar, cuenta con diferentes almacenes en la ciudad de Veracruz, Veracruz, y se enfrenta al problema de mantener un nivel de satisfacción bajo debido al incumplimiento en los plazos de entrega con los clientes.

Lo anterior se debe a que los distintos elementos y procesos logísticos que conforman la cadena de suministro crean un sistema complejo con bucles de retroalimentación que son difíciles de prever, sin embargo, existen herramientas que sirven para modelar y simular este tipo de situaciones [15], [16], entre ellas *dinámica de sistemas*, que es una de las más utilizadas y que se basa en el estudio de las relaciones causales que existen entre las partes del sistema para tomar decisiones en entornos complejos.

Para esto, en el presente estudio se utilizaron dos tipos de diagramas: causales y de Forrester, que tienen su origen en la Teoría General de Sistemas [17] que al usarse en conjunto dan como resultado el poder analizar la causa de las variaciones existentes en el sistema, lo que puede permitir incrementar la satisfacción del cliente [18]-[20]. Por otra parte, es posible realizar análisis más complejos de las funciones necesarias a partir de la aplicación de algoritmos, modelos y técnicas que fortalecen y optimizan el transporte de productos, considerando el entorno del almacén, y uso de Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) en los procesos de recepción y despacho [21], así como la gestión óptima de los recursos y capacidades del almacén dependiendo de sus características y volumen de los productos a manipular [22].

Uno de los trabajos más relacionados con el presente caso de estudio fue el realizado por Sugars International, quien en 1986 desarrolló el software de modelado y simulación de procesos Sugars para la industria azucarera, que permite incrementar la eficiencia de procesos, capacitación, diseño de nuevas fábricas y evaluar la viabilidad de proyectos de Investigación y Desarrollo (I+D.) Así, lo que antes tomaba semanas, hoy se puede realizar en un par de horas gracias al software de simulación [23], basándose en la metodología propuesta por Jay Forrester en la obra *Industrial Dynamics* en 1961 [17]. Además, hoy en día, el análisis de la cadena de suministro, que conlleva complejos sistemas dinámicos, puede ser modelado y simulado mediante softwares como

Dynamo, Vensim, Powersim Studio, Consideo, Simile y Stella, que además son utilizados por distintas ciencias.

Por lo descrito previamente, el presente trabajo aborda el tema de la cadena de suministro del azúcar y se centra en la gestión de los almacenes de productos de exportación, por lo que se eligió trabajar con el software Stella 9.1 para realizar el modelado del sistema y la simulación, con el fin de identificar necesidades y evaluar escenarios para el apoyo a la toma de decisiones orientada a mejorar la satisfacción de los clientes.

II. METODOLOGÍA

En este trabajo se utilizó la metodología de dinámica de sistemas —una herramienta poderosa para simular modelos complejos [24]-[26]—, mediante los cuatro pasos siguientes: conceptualización, formulación, validación y evaluación [27], los cuales se utilizaron para poder crear un modelo de simulación que permitiera determinar tiempos reales de entrega de producto de la empresa Logistics (la cual es llamada así por cuestiones de confidencialidad). Los pasos se describen a continuación:

Conceptualización. Etapa donde se identifican las diferentes variables con las que cuenta el sistema, analizando la relación existente entre estas con el fin de crear un diagrama conceptual y un diagrama de bloques que permitan una mejor comprensión del comportamiento del sistema a evaluar.

Formulación. A partir de los datos obtenidos en la etapa previa se definen parámetros del comportamiento de las variables mediante modelos matemáticos, los cuales se incorporan al Software Stella 9.1 con el fin de simular el sistema real.

Validación. Es necesario comprobar el modelo de simulación para ver si se comporta de acuerdo con el sistema real. Se pueden utilizar diferentes pruebas, como la de *valores extremos*, utilizada para identificar errores en la estructura del modelo y analizar políticas que lleven al modelo a operar en condiciones extremas y a comportarse de manera congruente, y la de *consistencia dimensional*, utilizada para analizar que las ecuaciones o parámetros están conectados correctamente.

Evaluación. Una vez comprobado que el modelo de simulación se comporta de acuerdo con lo esperado, este se puede utilizar para generar escenarios. En el presente

trabajo se muestra la simulación del comportamiento real y la propuesta de mejoras a implementar, con el fin de analizar los resultados. Las etapas descritas anteriormente, así como la relación entre las mismas, se muestran en el diagrama de flujo de la [Figura 1](#).

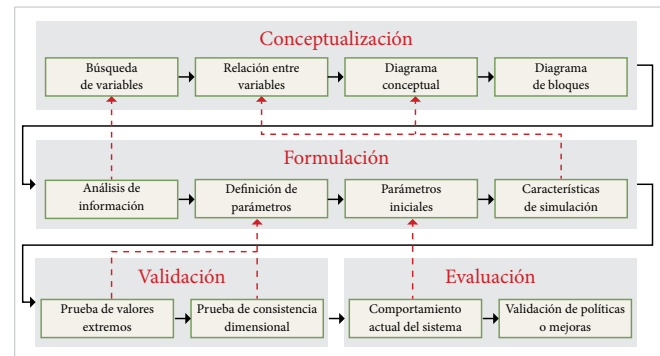


Figura 1. Metodología utilizada. Fuente: Adaptada de [27].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología descrita en la sección anterior fue aplicada a la empresa Logistics, la cual es una empresa dedicada a la elaboración de reportes; rastreo y seguimiento; muestreo y sellado; auditoría de suministro; sistema de agua de lastre; preparación para los requerimientos de la Ley de Modernización de la Inocuidad de los Alimentos de EUA (FSMA, por sus siglas en inglés); formación y desarrollo; y controles administrativos.

Esta compañía tiene como objetivo proporcionar garantías y confianza a todas las partes interesadas de que un producto, proceso, servicio u organización está certificado y cumple los requisitos de la inspección o el estándar de certificación en cuestión. Cuenta con diferentes almacenes ubicados a lo largo de la ciudad de Veracruz, Veracruz, en los cuales guarda los diferentes productos que debe de certificar para posteriormente embarcarlos en buques de los diferentes clientes.

CONCEPTUALIZACIÓN

Debido a la complejidad de los procesos logísticos que se presentan a lo largo de una cadena de suministro, el presente trabajo muestra solamente el proceso de salida de sacos de azúcar, uno de los productos que se encarga de certificar la empresa, de los cuatro almacenes de Logistics. Tomando en cuenta esto, el sistema real se comporta como el diagrama conceptual mostrado en la [Figura 2](#).

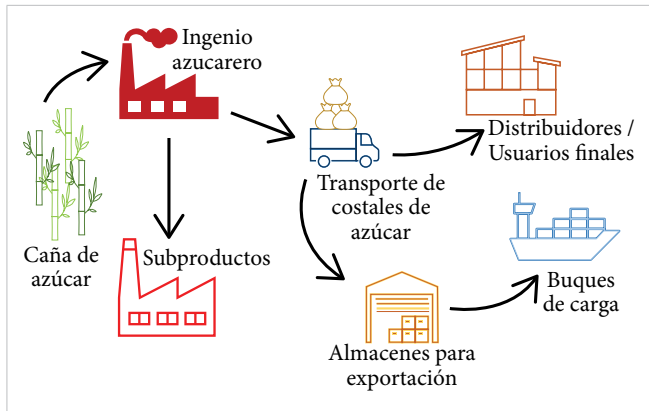


Figura 2. Modelo conceptual del comportamiento del sistema.

El diagrama comienza con la cosecha de la caña de azúcar que se presenta solamente en seis meses del año. Luego, este producto es llevado a los ingenios azucareros donde el principal producto a obtener es el azúcar, que se puede envasar en diferentes presentaciones, una de ellas en sacos de 30 kg. De igual forma, se obtienen diferentes subproductos que pueden ser utilizados en otras empresas, como la melaza, que se utiliza para la destilación de alcohol. Los sacos de azúcar pueden trasladarse a dos partes: 1) a distribuidores o tiendas de conveniencia que llevarán el producto a usuarios finales y 2) o a los almacenes para su posterior exportación, la cual depende de la disponibilidad de los buques de carga de los diferentes distribuidores.

La empresa Logistics es la que se encarga de almacenar, verificar y mandar los costales de azúcar a los distintos buques de carga y para esto se genera un contrato en el cual se pacta el tiempo de entrega de la carga solicitada (usualmente expresado en horas). En este proceso, durante los últimos meses no se ha cumplido con la meta establecida de satisfacción debido a que las entregas pactadas se han retrasado por horas e incluso días.

Debido a lo anterior, y tomando en cuenta el modelo conceptual de la Figura 2, es necesario mencionar que actualmente el sistema de gestión de entradas y salidas de los almacenes está basado en la experiencia de los administradores, por lo cual, con la presente investigación se busca apoyar a este sistema mediante un modelo de simulación que permita evaluar los tiempos reales de operación de los trabajadores, así como de carga y descarga de producto, con el fin de pactar entregas más realistas que eleven la satisfacción de la demanda, tal como se muestra en el diagrama a bloques de la Figura 3.

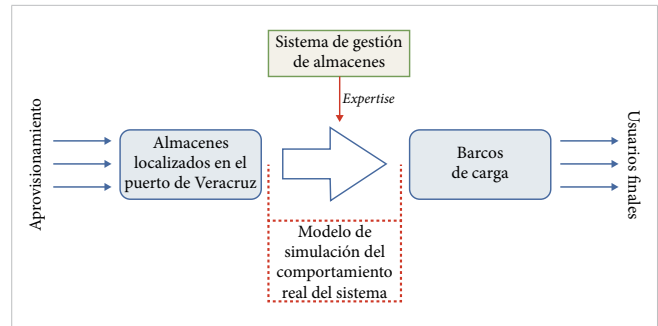


Figura 3. Diagrama a bloques de la propuesta de mejora.

FORMULACIÓN

Los cuatro almacenes que se tomaron en cuenta en el presente artículo se nombrarán A, B, C y D debido a cuestiones de confidencialidad y se encuentran situados en Veracruz, Veracruz. Los almacenes A y B están ubicados dentro de la aduana, con una capacidad de 8000 y 6000 toneladas, respectivamente, y los almacenes C y D a las afueras de la ciudad, con una capacidad de 10 000 toneladas ambos. El azúcar que se encuentra en los almacenes es llevado a través de cargas hacia los buques, siguiendo un comportamiento establecido mediante distribuciones empíricas que se derivan del análisis estadístico realizado a los datos históricos reales obtenidos a lo largo de tres meses.

En las Ecuaciones 1, 2, 3 y 4 se muestran las distribuciones empíricas basadas en la probabilidad de ocurrencia, donde si se tiene un valor aleatorio entre dos valores (de 0 a 1) que representa la probabilidad, entonces, el simulador generará un dato aleatorio del intervalo indicado, por ejemplo, si la probabilidad se encuentra entre 0 y 0.02, entonces el número generado puede estar entre 0 y 6100 kilogramos de carga.

De la suma de las cargas de cada almacén (A, B, C y D) se obtienen las cargas que se realizan por cada momento a los buques Ecuación 5. Por lo general, se tienen entre 2 o 3 cargas cada hora.

$$CargaA_i = \begin{cases} \text{Si } 0 > pro \geq 0.02 \text{ entonces } (0 - 6100]; & (1) \\ \text{Si } 0.02 > pro \geq 0.03 \text{ entonces } (6100 - 12200]; \\ \text{Si } 0.03 > pro \geq 0.06 \text{ entonces } (12200 - 18300]; \\ \text{Si } 0.06 > pro \geq 0.16 \text{ entonces } (18300 - 24400]; \\ \text{Si } 0.16 > pro \geq 0.33 \text{ entonces } (24400 - 30500]; \\ \text{Si } 0.33 > pro \geq 0.38 \text{ entonces } (30500 - 36600]; \\ \text{Si } 0.38 > pro \geq 0.77 \text{ entonces } (36600 - 42700]; \\ \text{Si } 0.77 > pro \geq 0.99 \text{ entonces } (42700 - 48800]; \\ \text{sino entonces } (48800 - 54900]; \end{cases}$$

$$CargaB_t = \begin{cases} \text{Si } 0 > pro \geq 0.02 \text{ entonces } (0 - 16520]; & (2) \\ \text{Si } 0.02 > pro \geq 0.11 \text{ entonces } (16520 - 33040]; \\ \text{sino entonces } (33040 - 49560]; \end{cases}$$

$$CargaC_t = \begin{cases} \text{Si } 0 > pro \geq 0.011 \text{ entonces } (2600 - 7902]; & (3) \\ \text{Si } 0.011 > pro \geq 0.015 \text{ entonces } (7902 - 13204]; \\ \text{Si } 0.015 > pro \geq 0.021 \text{ entonces } (13204 - 18506]; \\ \text{Si } 0.021 > pro \geq 0.028 \text{ entonces } (18506 - 23808]; \\ \text{Si } 0.028 > pro \geq 0.035 \text{ entonces } (23808 - 29110]; \\ \text{Si } 0.035 > pro \geq 0.041 \text{ entonces } (29110 - 34412]; \\ \text{Si } 0.041 > pro \geq 0.083 \text{ entonces } (34412 - 39714]; \\ \text{Si } 0.083 > pro \geq 0.476 \text{ entonces } (39714 - 45016]; \\ \text{Si } 0.476 > pro \geq 0.882 \text{ entonces } (45016 - 50318]; \\ \text{sino entonces } (50318 - 55620]; \end{cases}$$

$$CargaD_t = \begin{cases} \text{Si } 0 > pro \geq 0.005 \text{ entonces } (450 - 6103]; & (4) \\ \text{Si } 0.005 > pro \geq 0.007 \text{ entonces } (6103 - 11756]; \\ \text{Si } 0.007 > pro \geq 0.018 \text{ entonces } (11756 - 17409]; \\ \text{Si } 0.018 > pro \geq 0.025 \text{ entonces } (17409 - 23062]; \\ \text{Si } 0.025 > pro \geq 0.031 \text{ entonces } (23062 - 28715]; \\ \text{Si } 0.031 > pro \geq 0.041 \text{ entonces } (28715 - 34368]; \\ \text{Si } 0.041 > pro \geq 0.103 \text{ entonces } (34368 - 40021]; \\ \text{Si } 0.103 > pro \geq 0.452 \text{ entonces } (40021 - 45674]; \\ \text{Si } 0.452 > pro \geq 0.865 \text{ entonces } (45674 - 51327]; \\ \text{sino entonces } (51327 - 56980]; \end{cases}$$

$$Cargas_t = CargaA_t + CargaB_t + CargaC_t + CargaD_t \quad (5)$$

Las Ecuaciones (6), (7), (8) y (9) presentan el comportamiento de los almacenes de la empresa Logistics, donde el nivel depende del valor inicial en toneladas del almacén menos la carga correspondiente al momento indicado.

$$A_t = A|_{t=0} - \int_1^n CargaA dt \quad (6)$$

$$B_t = B|_{t=0} - \int_1^n CargaB dt \quad (7)$$

$$C_t = C|_{t=0} - \int_1^n CargaC dt \quad (8)$$

$$D_t = D|_{t=0} - \int_1^n CargaD dt \quad (9)$$

El comportamiento del almacén del barco está representado en la Ecuación 10, donde el nivel del almacén depende del valor inicial y de la suma de las cargas derivadas de cada uno de los almacenes.

$$Barco_t = Barco|_{t=0} + \int_1^n Cargas dt \quad (10)$$

Por otra parte, el sistema fue evaluado mediante el indicador de desempeño mostrado en la Ecuación 11, donde la satisfacción del cliente (SC) depende de la canti-

dad de producto almacenado en el barco con respecto al producto demandando al momento de cumplirse las horas prometidas.

$$SC = \frac{\text{Producto demandado}}{\text{Producto almacenado en barco}} * 100 \quad (11)$$

Una vez realizadas las ecuaciones correspondientes al comportamiento del sistema, fue necesario identificar los parámetros iniciales con los cuales se programó el modelo de simulación. Estos parámetros se muestran en la [Tabla 1](#), así como su explicación.

TABLA 1
PARÁMETROS INICIALES

PARÁMETRO	VALOR	DESCRIPCIÓN
Valor inicial A	8000 ton	Es el valor inicial de la cantidad de azúcar en kilogramos existente en cada uno de los almacenes
Valor inicial B	6000 ton	
Valor inicial C	10 000 ton	
Valor inicial D	10 000 ton	
Valor inicial almacén barco	0	Azúcar dentro del almacén para satisfacer la demanda de producto requerida por el cliente
Kilogramos por carga conjunta	150 000 kg	Cantidad de kilogramos ingresada al almacén del barco cada hora. Suma de las cargas ingresadas de los 4 almacenes.

Una vez que fueron identificados los modelos matemáticos y los parámetros iniciales que representan al sistema real, se validó el modelo de simulación para analizar si este se comporta como lo esperado.

VALIDACIÓN

Forrester y Senge ^[28] proponen 17 pruebas, entre las que se puede elegir varias para validar los modelos de simulación desarrollados bajo la dinámica de sistemas. Para el caso del presente artículo, se escogieron las siguientes: la prueba de consistencia dimensional y la prueba de condiciones extremas. Ambas fueron seleccionadas porque son consideradas las pruebas base de la DS, ya que analizan estructuralmente el modelo e indican si se comporta de forma plausible y genera modos de comportamiento conformes al sistema real ^{[29]. [30]}.

Consistencia dimensional. Como se mencionó anteriormente, esta prueba se utiliza para analizar que las ecuaciones o parámetros estén conectados correctamente. En este caso, el modelo utiliza solamente dos

EVALUACIÓN

diferentes unidades: tonelada y kilogramo. La tonelada, unidad principal en los elementos de carga, es cambiada en algunos parámetros del modelo de simulación a kilogramo, tomando en cuenta la conversión de que 1 tonelada es igual a 1000 kilogramos.

Condiciones extremas. El modelo de simulación del presente trabajo cuenta con restricciones que caracterizan el proceso de carga y descarga de la materia prima, por lo cual se validaron cuatro escenarios, variando el tiempo que se tarda en realizarse la carga. Estos se nombrarán de manera cualitativa para su mejor entendimiento: 1) tiempo de carga muy lento; 2) tiempo de carga lento; 3) tiempo de carga real; y 4) tiempo de carga rápido.

Con lo anterior, se corrió el modelo de simulación y se validó si de forma estructural se comporta como lo esperado, es decir, que mientras más lento sea el tiempo de carga, la satisfacción del cliente decae. La Figura 4 muestra el resultado de esta simulación, donde se puede observar que para el escenario de tiempo de carga muy lento, la satisfacción de la demanda queda en 63 %, caso contrario cuando el tiempo de carga es rápido, donde la satisfacción es de 99 %, por lo tanto, el modelo se comporta como lo esperado de manera estructural.

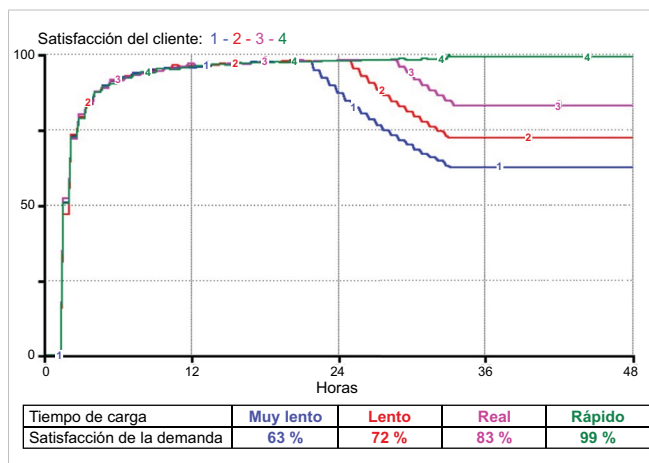


Figura 4. Comportamiento en condiciones extremas.

Con las pruebas descritas anteriormente, se puede concluir que el modelo de simulación es representativo de la realidad, además de ser adecuado de forma estructural en cuanto a las dimensiones y comportamiento. Debido a esto, se pueden empezar a realizar escenarios de simulación con el fin de evaluar el sistema actual y futuras modificaciones en el mismo.

Para poder realizar la evaluación de diferentes escenarios que permitan mejorar la satisfacción del cliente, es necesario mencionar que la empresa Logistics acuerda con sus clientes el tiempo de entrega, basado en el valor ideal de que se pueden juntar las cargas de los almacenes A, B, C y D, ingresando un total de 150 000 kg al almacén del barco cada hora.

Con base en lo anterior, el primer escenario generado es la representación del sistema real con una demanda hipotética de 25 000 toneladas y los tiempos de carga y descarga reales. En la Figura 5 se observa el comportamiento del almacén del barco (línea azul), el cual llega a las 25 000 toneladas, sin embargo, este nivel se alcanza hasta las 51 horas transcurridas, por lo que se analiza la cantidad de producto almacenado cuando se alcanzan las 42 horas acordadas, representado por la línea comparativa (línea roja), indicando que se ingresaron 20 966 toneladas al almacén del barco al momento del cumplimiento del plazo pactado.

Debido a esto, se muestra de igual forma el nivel de satisfacción de la demanda (línea verde). Este indicador es elevado en las primeras horas, sin embargo, cuando se alcanza el plazo y no se ha terminado la carga de producto, entonces la satisfacción empieza a decaer de manera gradual llegando al 83.79 %. Cabe mencionar que dicho valor no es aceptado por la empresa, ya que como política interna se establece tener una satisfacción de la demanda de por lo menos el 85 %, el 80 % de las veces.

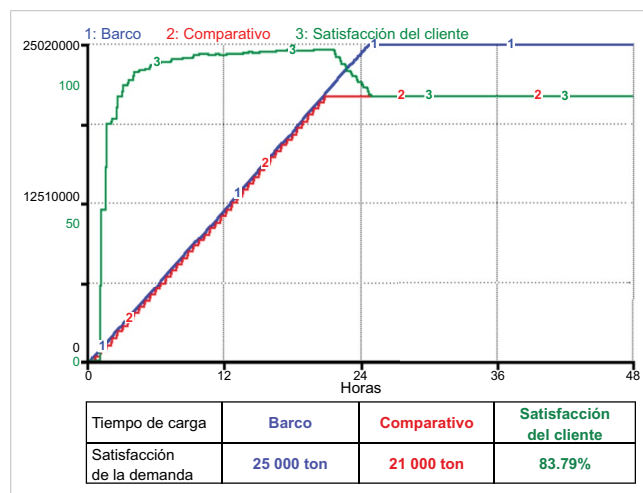


Figura 5. Comportamiento de parámetros actuales.

Por esto, es importante evaluar la cantidad de veces que se cumple con la política interna utilizando los valores reales del sistema, es decir, cantidad de carga y descarga por almacén y el tiempo de carga de cada barco. Sin embargo, experimentar con el sistema real sería demasiado tardado y costoso, por lo cual se utiliza el modelo de simulación que, como se dijo anteriormente, es representativo del sistema y se corre 100 veces para el mismo valor de 25 000 toneladas de demanda, y a partir de esto, concluir el porcentaje promedio de cada año para el indicador de satisfacción de la demanda. Dicha información se muestra en la [Tabla 2](#), y en la [Figura 6](#), de acuerdo con el comportamiento de estos datos se puede observar que son muy pocas las veces que el valor mínimo aceptable de 85 % es alcanzado o rebasado.

Con el previo análisis, la empresa Logistics decidió implementar el modelo de simulación para pactar la siguiente entrega con su cliente, además de realizar de nueva cuenta el análisis de 100 corridas.

En el caso de la aplicación del modelo, se evaluó el siguiente cargamento que corresponde a una demanda de 30 000 toneladas y los resultados de la simulación indican que el tiempo total será de 65 horas, por lo tanto, decidió pactar este tiempo con el cliente. La [Figura 7](#) muestra el resultado de haber pactado con el cliente el tiempo correspondiente al sistema real, siendo de 99.13 % (línea rosa) la satisfacción de la demanda, ya que la cantidad total de producto solicitado (35 000 toneladas en línea azul) se cubrió en 66 horas, por esto el Comparativo (línea roja) se ve cercano al valor real del Barco.

TABLA 2
SATISFACCIÓN DEL CLIENTE EN 100 CORRIDAS DE SIMULACIÓN

SATISFACCIÓN DEL CLIENTE (%)									
84.15	82.7	83.59	84.01	85.28	82.26	83.07	83.07	84.27	84.31
84.16	83.6	84.28	83.99	83.63	84.14	84.31	84.67	83.91	84.73
83.90	84.9	82.37	85.41	84.1	84.11	84.2	83.17	83.9	84.36
83.17	83.46	83.67	83.62	82.78	83.22	84.81	83.45	83.34	84.46
85.00	84.22	83.52	82.28	82.69	83.46	84.51	82.72	84.04	83.77
82.14	82.94	83.22	83.79	84.24	84.25	84.5	82.64	84.48	84.02
83.46	84.6	83.35	85.08	83.26	82.77	86.22	83.58	84.84	84.13
83.73	82.81	83.35	85.1	83.89	83.5	84.34	84.48	83.31	81.52
83.71	84.18	84.19	82.82	83.07	85.14	83.76	85.27	83.37	82.92
84.25	84.25	83.68	83.49	82.63	84.11	84.41	83.13	84.77	83.68

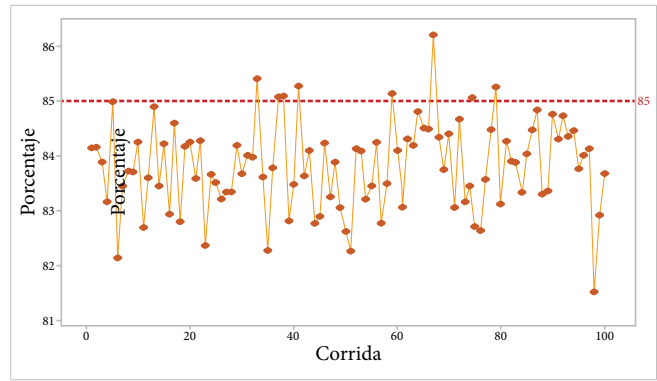


Figura 6. Corridas de simulación que cumplen con la política de 85 %.

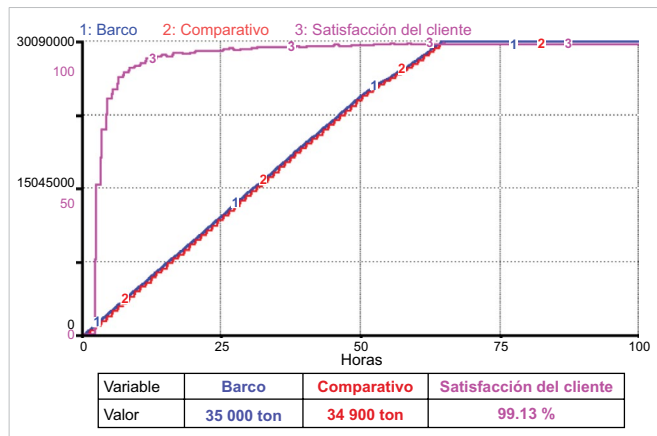


Figura 7. Comportamiento tiempo pactado basado en el modelo de simulación.

Por otra parte, el resultado de haber analizado 100 veces el mismo valor de 30 000 toneladas, de acuerdo con las horas que define el modelo de simulación, es una satisfacción del cliente por encima del 95 %, el 100 % de las veces.

Es importante mencionar que pactar las horas reales de entrega con el cliente son solo el primer paso para poder mejorar la satisfacción de la demanda, dado que el alcance del indicador de este trabajo de investigación solo evalúa la satisfacción con respecto a la fecha de entrega, tomando como supuesto que el cliente aceptará sin réplica la fecha que se le indique.

Sin embargo, no hay que dejar de lado que el comportamiento de los procesos de carga y descarga deben ser mejorados con el fin de disminuir tiempos de ocio, tanto de maquinaria como de trabajadores; disminuir la variabilidad de las cargas, ya sea por error humano o error de medición, y aumentar su eficiencia.

IV. CONCLUSIONES

Al aplicar la metodología de dinámica de sistemas se creó el modelo de simulación que representa los tiempos de operación reales de la empresa Logistics. Con esto se pudo visualizar la cantidad de horas que tarda la carga de los costales de azúcar a los barcos de los clientes con el fin de acordar el tiempo necesario. Al ser aplicado este modelo en una de las transacciones de la empresa, se pudo pactar con el cliente un valor de tiempo más cercano a la realidad, lo que permitió aumentar en aproximadamente 20 % la satisfacción del cliente.

Cabe mencionar que esta solución es temporal, ya que de manera ideal deben realizarse cambios en el proceso para lograr que se eviten tiempos de ocio no programados y se puedan disminuir los tiempos de entrega, así como multas que puedan ocasionarse por entrega tardía a las embarcaciones.

Como trabajo futuro se propone agregar al simulador las entradas de la materia prima, así como involucrar a todos los almacenes con los que cuenta la empresa.

REFERENCIAS

- [1] M. A. México, “Reporte de la Industria del Azúcar”, M&A México, México, jun. 2017. [En línea]. Disponible en: <http://mnamexico.com/wp-content/uploads/2017/01/Reporte-MA-Industria-Azúcar.pdf>
- [2] M. A. Rendon-Sagardi, C. Sanchez-Ramirez, G. Cortes-Robles, G. Alor-Hernandez y M. G. Cedillo-Campos, “Dynamic analysis of feasibility in ethanol supply chain for biofuel production in Mexico”, *Appl. Energy*, vol. 123, pp. 358-367, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.01.023.
- [3] SAGARPA, “Planeación agrícola nacional 2017-2030”, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, México, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/acciones-y-programas/planeacion-agricola-nacional-2017-2030-126813>
- [4] A. A. Correa-Espinal, R. A. Gómez-Montoya y J. A. Cano-Arenas, “Gestión de Almacenes y Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC)”, *Estudios Gerenciales*, vol. 26, no. 117, pp. 145-171, 2010, doi: 10.1016/S0123-5923(10)70139-X.
- [5] “La Logística Integral como fundamento de la SCM”, en *Las claves de la Supply Chain*, vol. 1. Zaragoza, España: A. Empresa Ed. , 2002, pp. 7-41.
- [6] K. Becerra-González, V. Pedroza-Barreto, J. Pinilla-Wah y M. Vargas-Lombardo, “Implementación de las TIC en la gestión de inventario dentro de la cadena de suministro”, *RIC*, vol. 3, no. 1, pp. 36-49, 2017.
- [7] L. Lapide, “MIT’s SC2020 project : the essence of excellence”, *Supply Chain Manag. Rev.*, vol. 10, abr. 2006.
- [8] P. Kotler y K. L. Keller, *Dirección de marketing*, 14.ª ed. México: Pearson Educación, 2012.
- [9] P. Cano Olivos, F. Orue Carrasco, J. L. Martínez Flores, Y. Mayett Moreno y G. López Nava, “Modelo de gestión logística para pequeñas y medianas empresas en México”, *Contaduría y administración*, vol. 60, 1, pp. 181-203, 2015.
- [10] A. Contreras, C. Atziry, J. L. Martínez y D. Sánchez, “Análisis de series de tiempo en el pronóstico de la demanda de almacenamiento de productos perecederos”, *Estudios Gerenciales*, vol. 32, no. 141, pp. 387-396, 2016, doi: 10.1016/j.estger.2016.11.002.
- [11] A. Chikán, “The new role of inventories in business: Real world changes and research consequences”, *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 108, no. 1, pp. 54-62, 2007, doi: 10.1016/j.ijpe.2006.12.002.
- [12] A. Correa, C. E. Álvarez y R. A. Gómez, “Sistemas de identificación por radiofrecuencia, código de barras y su relación con la gestión de la cadena de suministro”, *Estudios Gerenciales*, vol. 26, no. 116, pp. 115-141, 2010, doi: 10.1016/S0123-5923(10)70126-1.
- [13] D. Bello, F. Murrieta y C. A. Cortes, “Análisis de tiempos y movimientos en el proceso de producción de vapor de una empresa generadora de energías limpias”, *Ciencia Administrativa*, no. 1, 2020.
- [14] Coupa, *Smarter Supply Chain* L. Soft, ed., 2021.
- [15] J. M. García, *Teoría y Ejercicios Prácticos de Dinámica de Sistemas*. Independently Published, 2018.
- [16] J. M. García, *50 modelos de Dinámica de Sistemas: Creación de modelos de simulación con Dinámica de*

- Sistemas, System Thinking y Diagrama Causal*. Juan Martín García, 2018.
- [17] J. W. Forrester, *Industrial Dynamics*. Cambridge: M.I.T. Press, 1961.
- [18] N. Giedelmann-L, W. J. Guerrero y E. L. Solano-Charris, “System dynamics approach for food inventory policy assessment in a humanitarian supply chain”, *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 81, p. 103286, 2022, doi: [10.1016/j.ijdr.2022.103286](https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103286).
- [19] H. Jahani, H. Gholizadeh, Z. Hayati y H. Fazlollahtabar, “Investment risk assessment of the biomass-to-energy supply chain using system dynamics”, *Renew. Energ.*, vol. 203, pp. 554-567, 2023, doi: [10.1016/j.renene.2022.12.038](https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.12.038).
- [20] S. Ding, H. Ward, S. Cucurachi y A. Tukker, “Revealing the hidden potentials of Internet of Things (IoT) - An integrated approach using agent-based modelling and system dynamics to assess sustainable supply chain performance”, *J. Clean. Prod.*, p. 138558, 2023, doi: [10.1016/j.jclepro.2023.138558](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138558).
- [21] R. A. Gómez y A. A. Correa, “Tecnologías de la información y comunicación (TICs) en los procesos de recepción y despacho”, *Avances en Sistemas e Informática*, vol. 8, no. 2, pp. 127-133, 2011.
- [22] R. Takano, T. Higashi, H. Tamura, M. Sugi y J. Ota, “Mixed-Load Transportation Scheduling of Multiple Agents in a Warehouse Environment”, *Adv Robot*, vol. 25, no. 11-12, pp. 1557-1576, 2011, doi: [10.1163/016918611X579538](https://doi.org/10.1163/016918611X579538).
- [23] A. Merino, L. F. Acebes, R. Mazaeda y C. de Prada, “Modelado y Simulación del Proceso de Producción del Azúcar”, *RIAI*, vol. 6, no. 3, pp. 21-31, 2009, doi: [10.1016/S1697-7912\(09\)70261-4](https://doi.org/10.1016/S1697-7912(09)70261-4).
- [24] J. D. Sterman, *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World with CD-ROM*. McGraw-Hill Education, 2000.
- [25] D. R. Mota-López, C. Sánchez-Ramírez, G. Alor-Hernández, J. L. García-Alcaraz y S. I. Rodríguez-Pérez, “Evaluation of the impact of water supply disruptions in bioethanol production”, *Comput Ind Eng*, vol. 127, pp. 1068-1088, 2019, doi: [10.1016/j.cie.2018.11.041](https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.041).
- [26] H. U. Fuchs, “System Dynamics Modeling in Science and Engineering”. [En línea]. Dic. 8-16, 2006. Disponible en: http://www.hansfuchs.org/MATERIALS/PR_SDMSE_Slides.pdf
- [27] M. G. Cedillo y C. Sánchez, *Análisis Dinámico de Sistemas Industriales*. México: Trillas, 2008.
- [28] J. Forrester y P. Senge, *Test for Building Confidence in System Dynamics Models*, vol. 14. Cambridge: System Dynamics Group, 1980.
- [29] R. Ramos-Hernández, C. Sánchez-Ramírez, F. Sandoval-Salas, D. F. Manotas-Duque, L. Rivera-Cadavid y S. I. Pérez-Rodríguez, “Systemic Approach for the Design of Renewable Energy Supply Chain Generated from Biomass”, en *Techniques, Tools and Methodologies Applied to Global Supply Chain Ecosystems*, J. L. García-Alcaraz, C. Sánchez-Ramírez, L. Avelar-Sosa y G. Alor-Hernández, eds. Springer, Cham, 2020, pp. 259-283, doi: [10.1007/978-3-030-26488-8_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26488-8_12).
- [30] R. Ramos-Hernández, C. Sánchez-Ramírez, D. R. Mota-López, F. Sandoval-Salas y J. L. García-Alcaraz, “Evaluation of bioenergy potential from coffee pulp through System Dynamics”, *Renew. Energ.*, vol. 165, pp. 863-877, 2021, doi: [10.1016/j.renene.2020.11.040](https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.040).