






Sustentabilidad y seguridad en el transporte de mercancías en Ciudad Juárez: un análisis multicriterio con el método TOPSIS

Sustainable and Security Freight Transportation in Juarez City: A Multicriteria Analysis Using TOPSIS Method

Johana Medina Zárate¹ , Iván Juan Carlos Pérez Olguín¹  , Georgina Elizabeth Riosvelasco Monroy¹ ,
Consuelo Catalina Fernández Gaxiola² 

¹ Doctorado en Tecnología, Departamento de Ingeniería Industrial y Manufactura, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

² Ingeniería en Logística Internacional, Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, Chihuahua, México

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es evaluar ocho alternativas de transporte de mercancías en Ciudad Juárez, Chihuahua, México, considerando criterios de tiempo, distancia recorrida, seguridad y emisiones de CO₂, con un enfoque especial en la sustentabilidad ambiental y operativa. El presente trabajo identifica la opción eficaz, segura y sustentable que facilite la toma de decisiones empresariales frente a los desafíos logísticos actuales. Para ello, se aplica la metodología multicriterio (MCDM, por sus siglas en inglés), a través del método TOPSIS (Técnica de la Orden de Preferencia por Similitud de la Solución Ideal), destacado por su capacidad para seleccionar la alternativa que mejor se aproxima a la solución óptima en un escenario con múltiples criterios. El estudio se realizó bajo un enfoque cuantitativo, mediante la construcción de una matriz de decisión con datos de rutas de transporte y asignando las ponderaciones adecuadas basadas en la logística sustentable. Los resultados muestran que la Ruta 7 presenta el mejor equilibrio entre eficiencia logística, seguridad y reducción de emisiones. Adicionalmente, se realizó un análisis de sensibilidad mediante simulación de Monte Carlo, confirmando la robustez del *ranking* obtenido.

PALABRAS CLAVE: sustentabilidad; seguridad; toma de decisiones multicriterio; TOPSIS; transporte.

ABSTRACT

The objective of this research is to evaluate eight freight transportation alternatives in Juarez City, considering criteria such as travel time, distance covered, safety, and CO₂ emissions, with a particular focus on environmental and operational sustainability. This study identifies the most efficient, safe, and sustainable option to support business decision-making in the face of current logistical challenges. To achieve this, a Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) approach is applied through the TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to the Ideal Solution), recognized for its ability to select the alternative that best approximates the optimal solution in scenarios involving multiple criteria. The study is conducted under a quantitative approach, using a decision matrix constructed with transportation route data and assigning appropriate weights based on sustainable logistical principles. The results show that Route 7 offers the best balance between logistical efficiency, safety, and emissions reduction. Additionally, a sensitivity analysis was carried out using a Monte Carlo simulation, confirming the robustness of the ranking obtained.

KEYWORDS: sustainability; security; multicriteria decision-making; TOPSIS; transportation.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Iván Juan Carlos Pérez Olguín

INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez / Instituto de Ingeniería y Tecnología

DIRECCIÓN: Ave. del Charro núm. 450 norte, C. P. 32320, Ciudad Juárez, Chih., México

CORREO ELECTRÓNICO: ivan.perez@uacj.mx

Fecha de recepción: 28 de noviembre de 2025. **Fecha de aceptación:** 26 de enero de 2026. **Fecha de publicación:** 29 de abril de 2026.



I. INTRODUCCIÓN

El estado de Chihuahua se ha consolidado como un eje estratégico en el desarrollo económico de México gracias a su sólida infraestructura industrial y su posición geográfica privilegiada. Actualmente, la entidad cuenta con 55 parques industriales, de los cuales 41 se ubican en Ciudad Juárez, lo que refuerza su papel como polo de atracción para empresas nacionales e internacionales en sectores clave, como el automotriz, aeroespacial, tecnológico y logístico. También, Juárez es el municipio más poblado de Chihuahua, con 1 512 450 habitantes, condición que fortalece su relevancia como centro económico y comercial. Esta ventaja se complementa con la presencia de uno de los cruces fronterizos más importantes del mundo, que conecta directamente con El Paso, Texas, facilitando diariamente el tránsito de miles de personas y el intercambio comercial binacional [1].

La dinámica económica de la región se refleja en los flujos de comercio exterior: entre enero y abril de 2025, las importaciones alcanzaron un valor de 24 925 millones USD, mientras que las exportaciones sumaron 25 475 millones USD. Así mismo, en los primeros cinco meses del año se contabilizó el tránsito de 409 929 vehículos de carga por los cuatro cruces internacionales. Estos indicadores evidencian la relevancia estratégica de Ciudad Juárez como plataforma logística y nodo esencial de conectividad en la relación México - Estados Unidos [2].

No obstante, este dinamismo económico ha traído consigo importantes desafíos en materia de movilidad y sustentabilidad. El padrón vehicular de Ciudad Juárez asciende a 752 696 unidades, de las cuales el 96.4 % corresponden a vehículos particulares y el 1.6 % a camiones de carga, experimentando un aumento del 9.5 % entre 2023 y 2024 [3]. Este crecimiento, sumado al tránsito internacional, se traduce en congestión vial, mayores tiempos de traslado y un incremento en las emisiones contaminantes, reflejado en episodios frecuentes de mala calidad del aire. A ello se añade la complejidad de las condiciones de seguridad en la ciudad, donde la incidencia delictiva en algunas zonas y rutas de transporte representa un factor de riesgo adicional que influye en la eficiencia operativa y en los costos logísticos.

Ante este panorama, surge la necesidad de contar con herramientas de análisis que permitan evaluar alternativas de transporte bajo una perspectiva integral. El desafío es aún mayor ante las proyecciones de crecimiento

del comercio transfronterizo: se estima que el volumen de mercancías que cruza la frontera México-Texas se duplicará entre 2019 y 2050, con el autotransporte como modo predominante. De no gestionarse bajo un enfoque sostenible, este incremento podría comprometer las metas nacionales de descarbonización y desarrollo sostenible. En este escenario, resulta indispensable optimizar las rutas actuales de transporte de carga mediante criterios integrados de seguridad, eficiencia logística y sustentabilidad ambiental [4].

A pesar del avance en políticas de sustentabilidad, su aplicación en América Latina y el norte de México enfrenta importantes desafíos. En Carchi, Ecuador, se ha identificado una alta conciencia ambiental entre transportistas, pero una parte significativa de las empresas carece de planes claros para iniciar acciones de mitigación [5]. De manera similar, en el sur de Sonora, una empresa transportista mostró una correlación débil entre las prácticas ambientales y la competitividad empresarial, lo que indica que la sustentabilidad aún no se integra como factor estratégico en las actividades productivas [6].

En este marco, el transporte urbano se ha consolidado como un tema de investigación prioritario, reflejado en el creciente número de publicaciones que abordan aspectos como la eficiencia, la sustentabilidad, la gestión ambiental y la planificación de ciudades de bajas emisiones de carbono [6], [8].

Por consiguiente, la metodología de toma de decisiones multicriterio (Multi-Criteria Decision-Making, MCDM) es un marco adecuado para abordar problemas complejos en ámbitos sociales, ambientales y logísticos, ya que permiten ponderar simultáneamente diversos criterios que pueden presentar conflictos entre sí [7], [8], [9]. Además, es reconocida como una rama actual de la investigación de operaciones, vinculada con la optimización de múltiples objetivos [10].

Dentro de este ámbito, el proceso de jerarquía (AHP, por sus siglas en inglés) ha sido ampliamente aplicado debido a su flexibilidad y adaptabilidad en distintos sectores. De acuerdo con [12], este método resulta útil en áreas tan diversas como el transporte público, la logística, el transporte marítimo y la operación del transporte terrestre. Asimismo, en [13] se muestra su aplicación en el caso de Madrid, donde se evaluó la viabilidad de diferentes tecnologías de motores en autobuses de

transporte público, considerando criterios económicos y ambientales para determinar la alternativa sustentable. Por su parte, en [14] se propone una integración metodológica difusa AHP-DEMATEL-VIKOR, con la finalidad de evaluar la cadena de suministro social sustentable mediante el análisis del lenguaje natural y la clasificación holística de los criterios en función de las opiniones de expertos y partes interesadas.

Finalmente, el método TOPSIS también ha cobrado relevancia en el campo de la MCDM. En [15] se documenta su aplicación en la optimización de rutas turísticas en Nong Khai, Tailandia, a través de un modelo matemático que integra múltiples criterios relevantes para los turistas. Este enfoque constituye una propuesta metodológica innovadora que contribuye a la planificación turística sustentable, destacando la versatilidad del método en escenarios más allá del transporte urbano.

La sustentabilidad no se limita a conservar las condiciones existentes, sino que busca generar mejoras continuas en los aspectos económicos, sociales y ambientales de una región [16]. Esta perspectiva no solo fortalece la toma de decisiones estratégicas, sino que también contribuye a la construcción de sistemas más resilientes y responsables frente a los desafíos actuales.

En tal contexto, este artículo tiene como objetivo facilitar la toma de decisiones en la selección de rutas, integrando criterios complejos y sus interrelaciones como tiempo, distancia, seguridad e impacto ambiental, mediante la aplicación del método TOPSIS. Este enfoque permite identificar las alternativas más cercanas a la solución ideal, aportando una herramienta eficaz para promover la logística sustentable en Ciudad Juárez.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, descriptivo y aplicado, ya que se utilizan datos reales de rutas de transporte de mercancías en Ciudad Juárez, con el propósito de identificar la alternativa que sea segura y sustentable. Para ello, se empleó el método TOPSIS, ampliamente utilizado en la MCDM por su capacidad de evaluar de manera simultánea diversos criterios de carácter conflictivo y establecer un *ranking* objetivo de alternativas [17].

Las alternativas que se evalúan corresponden a ocho rutas de transporte de mercancía de una empresa lo-

calizada en Ciudad Juárez, dedicada a la proveeduría de partes automotrices. Para cada ruta se consideraron cuatro criterios:

- Tiempo de traslado (minutos): refleja la eficiencia operativa.
- Distancia recorrida (km): asociada al consumo de combustible y desgaste vehicular.
- Emisiones de CO₂ (kg): indicador del impacto ambiental y de la sustentabilidad de la operación.
- Seguridad: asociada a los sectores con mayor índice de inseguridad en la ciudad.

Los criterios tiempo, distancia y CO₂ se evalúan como criterios indirectos, ya que los valores menores representan mejor desempeño, y la seguridad como directo, a niveles más altos, mayor ventaja. En la [Figura 1](#) se muestra el mapa de Ciudad Juárez, en el cual se distinguen mediante códigos de color los diferentes niveles de seguridad por zona. Asimismo, se señalan los recorridos correspondientes a las Rutas 1 a la 4, mientras que en la [Figura 2](#) se presentan los trayectos de las Rutas 5 a la 8.

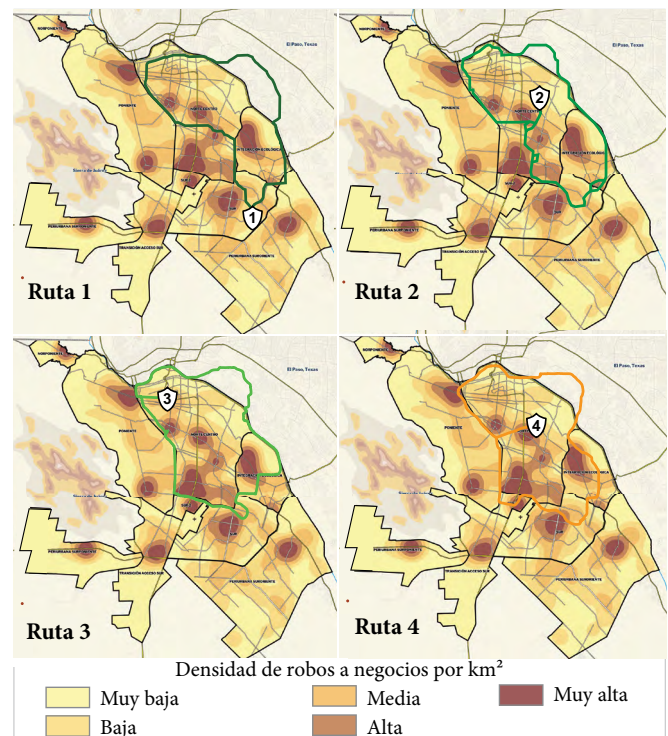


Figura 1. Mapa de Ciudad Juárez con código de colores y rutas identificadas de la 1 a la 4. Adaptado de [3].

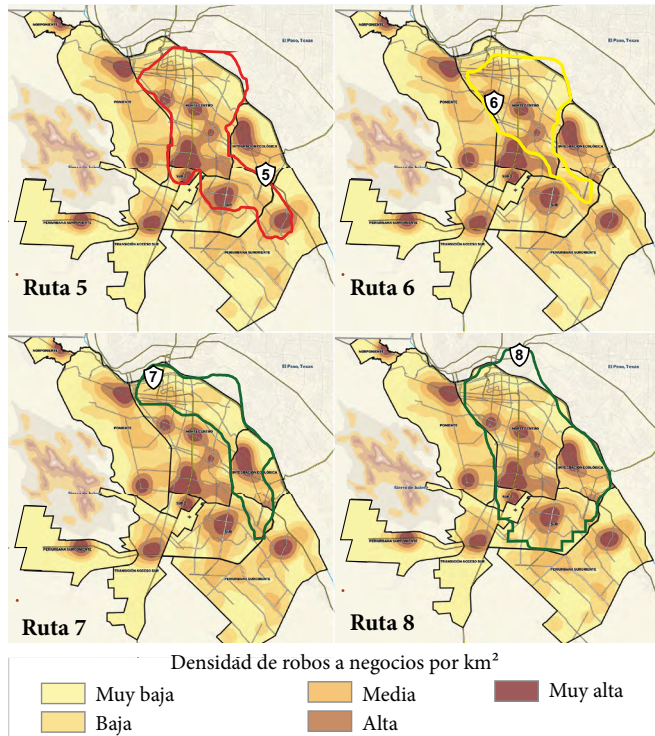


Figura 2. Mapa de Ciudad Juárez con código de colores y rutas identificadas de la 5 a la 8. Adaptado de [3].

A. ASIGNACIÓN DE PESOS

Los pesos se asignaron mediante ponderación directa para evitar el sesgo operativo que suele presentarse cuando los transportistas otorgan poca relevancia a criterios ambientales y de seguridad.

Se seleccionaron valores que reflejan equilibrio entre eficiencia logística y principios de sustentabilidad, garantizando una evaluación más alineada con los objetivos de movilidad responsable, considerando que el transporte en México constituye uno de los principales generadores de emisiones de gases con efecto invernadero (GEI) a nivel nacional [18]. Asimismo, la seguridad, ya que se encuentra entre los tres problemas principales de la ciudad [19]. Se otorgaron pesos más significativos, seguido por el tiempo de traslado y, finalmente, la distancia:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 &= 0.30 & \text{Seguridad} &= 0.30 \\ \text{Tiempo} &= 0.20 & \text{Distancia} &= 0.20 \end{aligned}$$

Esta distribución corresponde al objetivo de darle prioridad a las rutas seguras y que reduzcan la huella ambiental, sin descuidar la eficiencia logística.

B. CONSTRUCCIÓN DE MATRIZ DE DECISIÓN

La matriz de decisión se elaboró con los valores correspondientes a cada ruta y criterio. Los datos provienen de registros de operación y mediciones realizadas en los recorridos de transporte. Para el cálculo de emisiones de CO₂, se consideró un consumo de 0.4 litros de diésel por cada kilómetro recorrido [20]. Asimismo, se utilizó el factor de emisión de 2.69 de kg de CO₂ por litro de diésel consumido [21].

Para el criterio de seguridad se definió una escala del 3 al 10, asignando 3 a la zona con mayor inseguridad y 10 a la más segura, con base en la información proporcionada por el Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMIP) sobre las áreas con mayor incidencia delictiva en la ciudad. El IMIP es un organismo público descentralizado del municipio de Juárez, con autonomía técnica y jurídica, y es responsable de la generación de estudios y proyectos de planeación urbana. Su labor se orienta a promover el desarrollo ordenado y sustentable de la ciudad bajo una visión de corto, mediano y largo plazo [3], [22]. La [Tabla 1](#) muestra la información relacionada a las 8 rutas de transporte de mercancías.

TABLA 1
INFORMACIÓN CORRESPONDIENTE A CADA RUTA

RECORRIDO	TIEMPO	CO ₂	DISTANCIA	SEGURIDAD
Ruta 1	150	106.63	99.1	8
Ruta 2	104	56.65	52.65	7
Ruta 3	93	63.38	58.9	6
Ruta 4	90	55.25	51.0	4
Ruta 5	121	88.98	83.0	3
Ruta 6	108	61.55	57.	5
Ruta 7	102	72.84	67.7	9
Ruta 8	257	185.39	172.3	10

C. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL MÉTODO TOPSIS

El procedimiento TOPSIS se fundamenta en una serie de operaciones matemáticas que permiten evaluar el grado de cercanía de cada alternativa de solución ideal [23]. A continuación, se presentan las ecuaciones empleadas en cada etapa del análisis [23], [24].

- a) Normalización de la matriz de decisión. Para eliminar la influencia de las unidades de medida, la ma-

triz de decisión $X = x_{ij}$ se transforma en una matriz normalizada $R = [x_{ij}]$ mediante la Ecuación (1):

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (1)$$

- b) Matriz ponderada. La matriz normalizada se multiplica por los pesos de los criterios, generando la matriz ponderada $V = [v_{ij}]$ con el uso de la Ecuación (2).

$$v_{ij} = w_j * n_j \quad (2)$$

- c) Determinación de las soluciones de referencia. Ideal positiva, compuesta por los valores mínimos de cada criterio, calculada con la Ecuación (3), e ideal negativa, integrada por los valores máximos, calculada con la Ecuación (4).

$$S_i^+ = [\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^+)^2]^{1/2} \quad (3)$$

$$S_i^- = [\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2]^{1/2} \quad (4)$$

- d) Coeficiente de cercanía. Se obtiene el coeficiente de cada alternativa a la solución ideal mediante el uso de la Ecuación (5).

$$P_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (5)$$

A continuación, se muestran las tablas que dieron como resultado después de dar seguimiento al método TOPSIS. La [Tabla 2](#) muestra los valores normalizados.

TABLA 2
VALORES NORMALIZADOS

RECORRIDO	TIEMPO	CO ₂	DISTANCIA	SEGURIDAD
Ruta 1	0.3837	0.3946	0.3946	0.4104
Ruta 2	0.2660	0.2096	0.2096	0.3591
Ruta 3	0.2379	0.2345	0.2345	0.3078
Ruta 4	0.2302	0.2044	0.2045	0.2052
Ruta 5	0.3095	0.3293	0.3293	0.1539
Ruta 6	0.2763	0.2278	0.2277	0.2565
Ruta 7	0.2609	0.2695	0.2696	0.4617
Ruta 8	0.6574	0.6860	0.6860	0.5130

La [Tabla 3](#) muestra los resultados obtenidos mediante la aplicación del método TOPSIS para las ocho rutas analizadas. En la primera parte se observan los valores normalizados de los criterios considerados: tiempo de traslado, emisiones de CO₂, seguridad y distancia recorrida. Posteriormente, se calculan las distancias de cada alternativa respecto a la solución ideal positiva S_i^+ y a la solución ideal negativa S_i^- .

El valor S_i^+ indica qué tan lejos se encuentra cada ruta de la mejor alternativa posible, mientras que S_i^- indica la cercanía con respecto a la peor alternativa. La suma ($S_i^+ + S_i^-$) se utiliza como denominador en el cálculo del coeficiente de cercanía.

Finalmente, en la parte inferior de la tabla se incluyen los vectores de referencia V_i^+ y V_i^- que corresponden a los valores ideales positivos y negativos para cada criterio.

TABLA 3
RESULTADOS DEL MÉTODO TOPSIS

RECORRIDO	TIEMPO	CO ₂	DISTANCIA	SEGURIDAD	S_i^+	S_i^-	$S_i^+ + S_i^-$
Ruta 1	0.0767	0.1184	0.0789	0.1231	0.0812	0.1413	0.2225
Ruta 2	0.0532	0.0629	0.0419	0.1077	0.0468	0.1985	0.2453
Ruta 3	0.0476	0.0704	0.0469	0.0923	0.0625	0.1889	0.2514
Ruta 4	0.0460	0.0613	0.0409	0.0616	0.0923	0.1941	0.2865
Ruta 5	0.0619	0.0988	0.0659	0.0462	0.1178	0.1462	0.2641
Ruta 6	0.0553	0.0683	0.0455	0.0769	0.0780	0.1846	0.2625
Ruta 7	0.0522	0.0809	0.0539	0.1385	0.0287	0.1933	0.2220
Ruta 8	0.1315	0.2058	0.1372	0.1536	0.1935	0.1077	0.3012
V_i^+	0.0460	0.0613	0.0409	0.1539			
V_i^-	0.1315	0.2058	0.1372	0.0462			

Con el fin de comprobar la robustez y estabilidad de los resultados obtenidos se realizó un análisis de sensibilidad mediante la técnica de simulación de Monte Carlo. Esta simulación es una herramienta complementaria que permite examinar la robustez del *ranking* de alternativas ante una amplia variación en la ponderación de los criterios [25]. El procedimiento se ejecutó en Google Colab mediante código en Python y para el análisis se generaron 1000 escenarios aleatorios.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La aplicación del método TOPSIS permitió ordenar las ocho rutas de transporte en función del tiempo de traslado, seguridad, distancia recorrida y emisiones de CO₂, dando prioridad a aquellos recorridos más cercanos a la solución ideal. Los resultados muestran que la Ruta 7 obtuvo un coeficiente de cercanía C_i de 0.8706, indicando que es la mejor alternativa en cuestión de sustentabilidad.

Esta ruta combina un tiempo de 102 minutos, un nivel de seguridad alto con escala establecida de 9 y emisiones de CO₂ de 72.84 kg.

Estos resultados refuerzan que la eficiencia logística contribuye directamente a la reducción de emisiones en contextos urbanos. En México, el CO₂ representa el 71 % de los gases de efecto invernadero (GEI), y el sector del transporte es uno de los principales emisores, aportando el 17.9 % de las emisiones totales de CO₂ a nivel nacional. Específicamente, el autotransporte de carga por sí solo es responsable de casi el 30 % de las emisiones del sector terrestre [26].

Por el contrario, la Ruta 8 presentó el coeficiente más bajo, $C_i = 0.3576$, esto debido a su mayor tiempo de traslado, distancia recorrida y emisiones de CO₂, a pesar de ubicarse en la zona con mayor seguridad. Este resultado hace evidente que la seguridad, aunque prioritaria, no compensa las desventajas operativas y ambientales cuando los demás criterios se ven severamente afectados.

El *ranking* obtenido evidencia un patrón constante: las rutas más cortas y rápidas tienden a generar menores emisiones, lo que confirma la interdependencia entre criterios logísticos y ambientales. Sin embargo, se observó que algunas rutas intermedias, como la 2 ($C_i = 0.8094$) y la 3 ($C_i = 0.7513$) alcanzaron coeficientes cercanos al ideal, lo que sugiere que se tienen varias alter-

nativas competitivas que se pueden adaptar a diferentes condiciones operativas.

Los resultados mostrados en la [Tabla 4](#) son coherentes con investigaciones previas que han buscado alternativas económicas y sustentables en el transporte turístico y la cadena de suministro [10], [11]. Tal como lo señalan [10] y [15], TOPSIS constituye una herramienta robusta para equilibrar objetivos con frecuencia conflictivos, como la eficiencia logística y la reducción de emisiones contaminantes. En contexto, su aplicación en Ciudad Juárez aporta evidencia práctica sobre cómo los análisis multicriterio pueden orientar la logística hacia decisiones más responsables en seguridad y sustentabilidad.

TABLA 4
RANKING FINAL

RECORRIDO	P_i	RANKING
Ruta 1	0.8706	1
Ruta 2	0.8094	2
Ruta 3	0.7513	3
Ruta 4	0.7030	4
Ruta 5	0.6777	5
Ruta 6	0.6351	6
Ruta 7	0.5538	7
Ruta 8	0.3576	8

La [Tabla 5](#) muestra los resultados del análisis de sensibilidad, en donde se observa que la Ruta 7 se mantuvo como la mejor alternativa en un 63.6 % de los escenarios evaluados, lo que evidencia la robustez del modelo.

TABLA 5
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE MONTE CARLO

RECORRIDO	FRECUENCIA	PROBABILIDAD (%)
Ruta 7	636	63.60
Ruta 2	294	29.40
Ruta 4	52	5.20
Ruta 3	17	1.70
Ruta 8	1	0.10
Ruta 1	0	0
Ruta 6	0	0
Ruta 5	0	0

Los resultados del estudio se alinean con la evidencia reportada en el caso Aptiv, donde la dimensión tecnológica funge como eje de resiliencia operativa y susten-

tabilidad ambiental [27]. La Ruta 7, identificada como la mejor alternativa mediante TOPSIS, logró identificar eficiencia (tiempo y distancia) con la reducción de CO₂, coherente con la estrategia de la industria automotriz, que prioriza operaciones justo a tiempo para disminuir tiempos de traslado y, en consecuencia, las emisiones.

IV. CONCLUSIONES

El estudio confirmó la eficacia del método TOPSIS como herramienta para la evaluación de alternativas de transporte en escenarios con múltiples criterios.

Entre las ocho rutas, la Ruta 7 se identificó como la más sustentable, al presentar el mejor equilibrio entre tiempo, seguridad, distancia y emisiones de CO₂, y la Ruta 8 resultó ser la menos recomendable, debido a su alto consumo energético y mayor impacto ambiental.

El análisis evidenció que la reducción en tiempo y distancia de recorrido contribuye de manera directa a la disminución de emisiones, confirmando la relación entre eficiencia logística y sustentabilidad ambiental.

El enfoque metodológico aplicado puede replicarse en otros contextos urbanos e industriales, constituyendo una base sólida para la toma de decisiones estratégicas en materia de movilidad sustentable y segura. La presente investigación ofrece una herramienta metodológica efectiva para la toma de decisiones en el transporte de carga; no obstante, es importante reconocer ciertas limitaciones que delimitan el alcance del estudio y sugieren áreas de trabajo futuro.

Las limitaciones de la presente investigación radican en la muestra operativa, ya que el análisis de rutas se restringió a la información de una sola empresa, en la cual se cubren únicamente ocho rutas. Además del criterio de seguridad, se basó en una clasificación de zona preestablecida según su incidencia delictiva. Finalmente, la cuantificación de emisiones de CO₂ se realizó mediante un factor estimado y aunque esta aproximación es útil para la comparación, no incluye la variabilidad real del consumo por tipo de vehículo o antigüedad de la flota.

Finalmente, se recomienda como línea de investigación la incorporación de criterios adicionales, tales como costos operativos, escenarios dinámicos o la integración de modelos híbridos, con el objetivo de enriquecer la evaluación multicriterio y ampliar su alcance.

RECOMENDACIONES PRÁCTICAS

- Dar prioridad a rutas con mejor equilibrio de tiempo-seguridad-emisiones para envíos de alto valor y entregas con baja tolerancia de demoras.
- Diseñar programas de incentivos a los operadores por eficiencia al volante.
- Explorar el consolidar cargas y ventanas de operación fuera de horario de ventanas para reducir congestiones y emisiones.

REFERENCIAS

- [1] I. Molina, “ELAM-FAW. Ensamblando el futuro de los vehículos pesados en México”, *Mexico Industry*, año 28, n.º 333, p. 44, may. 2025.
- [2] INDEX, “Información Estadística Mensual. 9 de mayo 2025”, Asociación de Maquiladoras, A.C. Index Juárez, 2025. Accedido: abr. 29, 2026. [En línea]. Disponible: <https://indexjuarez.com/wp-content/uploads/2025/05/9-de-mayo-2025.pdf>
- [3] F. Aguilar, T. Castañeda, F. I. Montañez y A. Morales, “Radiografía Socioeconómica del Municipio de Juárez 2024. Así comenzó 2025”, Instituto Municipal de Investigación y Planeación, México, 1.ª ed., 2025. Accedido: abr. 29, 2026. [En línea]. Disponible: <https://www.imip.org.mx/imip/files/radiografia/Radiografia2024-2025.pdf>
- [4] R. Sandoval, “El futuro del transporte de mercancías en la frontera México-Texas. El requerimiento de infraestructura para el desarrollo sostenible”, *ENERLAC*, vol. VII, n.º 2, pp. 67-85, dic. 2023.
- [5] R. V. Portilla, E. S. de la Cruz y D. H. Nazate, “Impacto ambiental de la logística en el transporte internacional de mercancías”, *CT*, vol. 4, n.º 1, pp. 106-117, en. 2024.
- [6] M. P. Martínez, O. M. Castro, A. G. Ozuna y A. G. Ruiz, “El Transporte de Carga Terrestre Sustentable y Eficiente en el Sur del Estado de Sonora”, *Veritas*, vol. 6, n.º 1, pp. 1632-1648, mar. 2025, doi: [10.61616/rvdc.v6i1.475](https://doi.org/10.61616/rvdc.v6i1.475).
- [7] A. F. Momena et al., “Ranking and Challenges of Supply Chain Companies Using MCDM Methodology”, *Logistics*, vol. 8, n.º 3, sept. 2024, doi: [10.3390/logistics8030087](https://doi.org/10.3390/logistics8030087).

- [8] T. K. Bhatia, A. Kumar, S. S. Appadoo, Y. Gajpal y M. K. Sharma, “Mehtar Approach for Finding Shortest Path in Supply Chain Network”, *Sustainability*, vol. 13, n.º 7, p. 4016, abr. 2021, doi: [10.3390/su13074016](https://doi.org/10.3390/su13074016).
- [9] S. A. R. Khan, Z. Yu, H. Golpira, A. Sharif y A. Mardani, “A state-of-the-art review and meta-analysis on sustainable supply chain management: Future research directions”, *J. Clean. Prod.*, vol. 278, p. 123357, en. 2021, doi: [10.1016/j.jclepro.2020.123357](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123357).
- [10] S. Hajduk, “Multi-Criteria Analysis in the Decision-Making Approach for the Linear Ordering of Urban Transport Based on TOPSIS Technique”, *Energies*, vol. 15, n.º 1, dic. 2021, doi: [10.3390/en15010274](https://doi.org/10.3390/en15010274).
- [11] M. Hamurcu y T. Eren, “Strategic Planning Based on Sustainability for Urban Transportation: An Application to Decision-Making”, *Sustainability*, vol. 12, n.º 9, abr. 2020, doi: [10.3390/su12093589](https://doi.org/10.3390/su12093589).
- [12] S. Moslem, M. K. Saraji, A. Mardani, A. Alkharabsheh, S. Duleba and D. Esztergár-Kiss, “A Systematic Review of Analytic Hierarchy Process Applications to Solve Transportation Problems: From 2003 to 2022”, en *IEEE Access*, vol. 11, pp. 11973-11990, 2023, doi: [10.1109/ACCESS.2023.3234298](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3234298).
- [13] L. Rivero, M. A. De Vicente y A. Romero-Ania, “Managing Sustainable Urban Public Transport Systems: An AHP Multicriteria Decision Model”, *Sustainability*, vol. 13, n.º 9, p. 4614, abr. 2021, doi: [10.3390/su13094614](https://doi.org/10.3390/su13094614).
- [14] R. Guo y Z. Wu, “Social sustainable supply chain performance assessment using hybrid fuzzy-AHP-DEMATEL-VIKOR: a case study in manufacturing enterprises”, *Environ Dev Sustain*, vol. 25, n.º 11, pp. 12273-12301, nov. 2023, doi: [10.1007/s10668-022-02565-3](https://doi.org/10.1007/s10668-022-02565-3).
- [15] W. Phuangpornpitak, W. Boonchom, K. Suphan, W. Chiengkul y T. Tantipanichkul, “Application of TOPSIS-LP and New Routing Models for the Multi-Criteria Tourist Route Problem: The Case Study of Nong Khai, Thailand”, *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 14, n.º 4, ag. 2024, doi: [10.48084/etasr.7523](https://doi.org/10.48084/etasr.7523).
- [16] A. Majidi, S. M. J. Mirzapour y S. Hashemkhani, “Sustainability Ranking of the Iranian Major Ports by Using MCDM Methods”, *Mathematics*, vol. 9, n.º 19, oct. 2021, doi: [10.3390/math9192451](https://doi.org/10.3390/math9192451).
- [17] S. K. Sahoo S. S. Goswami, “A Comprehensive Review of Multiple Criteria Decision-Making (MCDM) Methods: Advancements, Applications, and Future Directions”, *Decis. Mak. Adv.*, vol. 1, n.º 1, dic. 2023, doi: [10.31181/dma1120237](https://doi.org/10.31181/dma1120237).
- [18] GIZ-ICM, *Acciones clave para detonar la transición del transporte de carga en México*, 1.ª ed. México: GIZ, 2021. [En línea]. Disponible: <https://imt.mx/descarga-archivo.html>
- [19] “Así estamos Juárez 2025”, Plan Estratégico de Juárez, 2025. Accedido: abr. 29, 2026. [En línea]. Disponible: <https://planjuarez.org/wp-content/uploads/2025/06/AEJ2025.pdf>
- [20] O. S. Serrano-Guevara, J. I. Huertas, A. E. Mogro y L. F. Quirama, “Consumo energético de vehículos pesados en México”, *Inf. Tec.*, vol. 87, n.º 1, pp. 29-30, dic. 2022, doi: [10.23850/22565035.5123](https://doi.org/10.23850/22565035.5123).
- [21] EPA. “Calculadora de equivalencias de gases de efecto invernadero - Cálculos y referencias”. EPA.gov. Accedido: abr. 29, 2026. [En línea]. Disponible: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculadora-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero-calculos>
- [22] Instituto Municipal de Investigación y Planeación, 2025, “Incidencia Delictiva 2006-2024”, Municipio de Juárez, Chih. [En línea]. Disponible: <https://www.imip.org.mx/imip/node/357>
- [23] U. A. Gómez-Rivera, I. J. C. Pérez-Olguín, A. H. Alanís-Pérez, L. A. Pérez-Domínguez y L. C. Méndez-González, “Development of A Multi-Criteria Analysis Tool with a Focus on Classical, Robust Techniques and Weighting Values”, en *Proc. of the 10th Annu. World Conf. of the Society for Industrial and Systems Engineering*, sept. 23-24, 2021, pp. 92-104. [En línea]. Disponible: <https://ieworldconference.org/content/SISE2021/Papers/G%C3%B3mez-Rivera.pdf>
- [24] S.-J. Chen y C.-L. Hwang, “Fuzzy Multiple Attribute Decision Making”, en *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, H. Dawid y A. Kleine, eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1992, vol. 375, doi: [10.1007/978-3-642-46768-4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-46768-4).

- [25] A. Velasco y R. Gerike, “Sensitivities of weighting methods in the sustainability assessment of public transport in Latin American cities”, *Transp. Res. Interdiscip. Persp.*, vol. 30, p. 101362, mar. 2025, doi: [10.1016/j.trip.2025.101362](https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101362).
- [26] K. V. V. Martínez, V. F. Fernández, M. D. H. Ripalda, y J. A. J. García, “Emisiones de CO₂ en el Autotransporte de Carga Terrestre en México: Análisis y Estrategias”, *Pistas Educativas*, vol. 46, n.º 149, 2025.
- [27] P. C. Inzunza, O. Valenzuela-Valenzuela, D. L. Castro-Cuadras, y C. C. Cuevas, “Dimensiones estratégicas de

sostenibilidad y resiliencia en la cadena de suministro de la empresa Aptiv”, *Economía y Negocios*, vol. 6, n.º 1, pp. 3-23, abr. 2024, doi: [10.33326/27086062.2024.1.1854](https://doi.org/10.33326/27086062.2024.1.1854).

RECONOCIMIENTOS

Un agradecimiento especial a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo brindado durante la realización de este documento, mediante la beca otorgada bajo el CVU 552705.