

Optimización sostenible de rutas para la gestión de desechos urbanos mediante la implementación del algoritmo Floyd-Warshall y métodos MCDM

Sustainable Optimization of Routes for Urban Waste Management through the Implementation of the Floyd–Warshall Algorithm and MCDM Methods

Uriel Angel Gómez Rivera¹ , Johana Medina Zárate¹, Luis Carlos Méndez González¹ , Iván Juan Carlos Pérez Olguín¹ 

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

RESUMEN

La gestión de residuos reciclables constituye uno de los mayores desafíos urbanos en la actualidad debido al crecimiento poblacional y al incremento en el consumo de productos envasados. De esta manera, esta gestión exige decidir qué ruta conviene cuando intervienen el tiempo, el costo, el riesgo, las emisiones y la cobertura del servicio. Este artículo describe una herramienta desarrollada en C# que combina el algoritmo Floyd-Warshall, para obtener caminos mínimos entre todos los pares de nodos, con métodos de toma de decisiones multicriterio (MCDM), en particular TOPSIS y VIKOR, para ordenar alternativas mediante criterios ponderados. La propuesta se probó con un escenario piloto construido a partir de ubicaciones de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), interpretadas como posibles puntos de generación o acopio. El sistema calcula la matriz de distancias mínimas y exporta las trayectorias en formato KML para su inspección cartográfica. Los resultados corresponden a una prueba de concepto basada en la distancia; por tanto, la evaluación multicriterio con datos operativos y su validación en campo constituyen la siguiente etapa del estudio. La contribución principal es una arquitectura modular que vincula optimización de rutas, análisis multicriterio y visualización geográfica para apoyar la planeación de la recolección de reciclables.

PALABRAS CLAVE: residuos reciclables; Floyd-Warshall; TOPSIS; VIKOR; sistemas de información geográfica.

ABSTRACT

Recyclable waste management represents one of today's major urban challenges due to population growth and the increasing consumption of packaged products. In this context, managing these materials requires determining the most suitable route when factors such as travel time, cost, risk, emissions, and service coverage are considered. This article describes a tool developed in C# that combines the Floyd–Warshall algorithm, used to calculate shortest paths between all pairs of nodes, with multiple-criteria decision-making (MCDM) methods, particularly TOPSIS and VIKOR, to rank alternatives based on weighted criteria. The proposal was tested in a pilot scenario constructed using locations from the Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ), which were interpreted as potential waste generation or collection points. The system calculates the shortest-distance matrix and exports the resulting routes in KML format for cartographic inspection. The results represent a distance-based proof of concept; therefore, multicriteria evaluation using operational data and subsequent field validation constitute the next stage of the study. The main contribution is a modular architecture that integrates route optimization, multicriteria analysis, and geographic visualization to support recyclable waste collection planning.

KEYWORDS: recyclable waste; Floyd-Warshall; TOPSIS; VIKOR; geographic information systems.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Uriel Angel Gómez Rivera
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez /
Instituto de Ingeniería y Tecnología
DIRECCIÓN: Av. del Charro núm. 450 norte, C. P. 23320, Ciudad Juárez, Chihuahua, México
CORREO ELECTRÓNICO: uriel.gomez@uacj.mx

Fecha de recepción: 9 de agosto de 2026. **Fecha de aceptación:** 23 de agosto de 2026. **Fecha de publicación:** 31 de agosto de 2026.



Licencia Creative Commons



I. INTRODUCCIÓN

La recolección y gestión de residuos reciclables ha adquirido un papel estratégico en las políticas de sostenibilidad de las ciudades modernas. Sin embargo, los sistemas tradicionales de logística de residuos suelen presentar limitaciones relacionadas con rutas poco optimizadas, escasa integración tecnológica en la toma de decisiones y cuando las rutas se definen por costumbre o con información incompleta, aumentan los recorridos, el consumo de combustible y los tiempos de servicio [1], [2].

El crecimiento urbano y el consumo de productos envasados incrementan la presión sobre los sistemas municipales de residuos [3]. Esta situación se relaciona con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 11, orientado a ciudades sostenibles, y con el ODS 12, relativo a la producción y el consumo responsables [4].

En este sentido, la digitalización permite registrar el nivel de llenado de los contenedores, ubicar los puntos o nodos de recolección y actualizar las condiciones de operación. Sensores, Sistemas de Información Geográfica (GIS), Internet de las Cosas (IoT) y herramientas de análisis convierten esos datos en insumos para programar recorridos [5], [6].

En una red urbana, los nodos representan puntos de recolección, centros de acopio o plantas de reciclaje, mientras que las aristas representan los tramos que los conectan. El algoritmo Floyd-Warshall calcula los caminos mínimos entre todos los pares de nodos, por lo que resulta útil cuando deben consultarse múltiples orígenes y destinos dentro de una misma red [7].

La distancia, sin embargo, no describe por sí sola la conveniencia de una ruta. El tiempo de viaje, el costo operativo, el riesgo, el impacto ambiental y la cobertura pueden conducir a una decisión distinta. Por ello, el problema requiere separar dos tareas: calcular trayectorias factibles y comparar las alternativas resultantes [8].

Los métodos MCDM permiten efectuar esa comparación mediante criterios con unidades diferentes. TOPSIS ordena las alternativas según su cercanía a una solución ideal, mientras que VIKOR identifica soluciones de compromiso cuando existen criterios en conflicto [9], [10].

La literatura reciente confirma que la optimización de la recolección se apoya principalmente en herramientas

de ruteo, GIS, sensores y modelos matemáticos. Una revisión sistemática publicada en 2024 advierte, además, que muchos trabajos priorizan la distancia y el costo, mientras que las dimensiones ambientales todavía se incorporan con menor frecuencia [8].

En aplicaciones recientes, Das *et al.* [11] combinaron datos GPS, trabajo de campo y análisis de redes en GIS para contrastar recorridos existentes con rutas optimizadas. Por su parte, Idrissi *et al.* [6] integraron contenedores inteligentes y un problema de ruteo vehicular con ventanas de tiempo, nivel de llenado y capacidad del vehículo.

Estos antecedentes muestran el avance hacia sistemas dinámicos apoyados en datos operativos. A diferencia de esas aplicaciones, la propuesta de este artículo se concentra en una arquitectura modular en C# que integra caminos mínimos entre todos los pares de nodos, evaluación MCDM y exportación KML. Su validación operativa con mediciones de campo se plantea como una etapa posterior.

Para la prueba de concepto se utilizaron ubicaciones de la UACJ. Rectoría, el Instituto de Ciencias Sociales y Administración (ICSA), el Instituto de Ingeniería y Tecnología (IIT) y el Instituto de Ciencias Biomédicas (ICB) se interpretaron como posibles puntos de generación o acopio de reciclables, no como destinos independientes del problema ambiental. En una aplicación operativa, esos nodos formarían parte de un recorrido que inicia en la base de recolección y termina en un centro de acopio o una recicladora.

El objetivo general del presente trabajo fue integrar Floyd-Warshall y métodos MCDM en una herramienta computacional para apoyar la planeación de rutas de recolección de residuos reciclables.

Los objetivos específicos fueron:

1. Implementar Floyd-Warshall para calcular los caminos mínimos entre todos los nodos de una red de recolección.
2. Definir un conjunto consistente de criterios para comparar rutas mediante TOPSIS y VIKOR.
3. Incorporar la captura de la red, la consulta de resultados y la exportación cartográfica en una interfaz desarrollada en C#.

- Realizar una prueba de concepto con ubicaciones institucionales y delimitar los datos necesarios para una validación operativa posterior.

II. METODOLOGÍA

La metodología integra Floyd-Warshall con TOPSIS y VIKOR. El flujo de trabajo comprende la definición de criterios, el modelado de la red, el cálculo de caminos mínimos, la evaluación multicriterio y la visualización geográfica.

2.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y CRITERIOS DE DECISIÓN

Se adoptó el siguiente conjunto de criterios: distancia, tiempo de viaje, costo operativo, impacto ambiental, riesgo y cobertura del servicio. Los cinco primeros se minimizan; la cobertura se maximiza [12], [8].

Los pesos deben sumar 1. Como ejemplo de captura, se utilizaron los valores 0.25 para distancia, 0.20 para tiempo, 0.20 para costo, 0.15 para impacto ambiental, 0.10 para riesgo y 0.10 para cobertura. El usuario puede modificarlos según el contexto, siempre que documente su procedencia.

2.2. MODELADO DE LA RED DE RECOLECCIÓN

El área urbana se representa como un grafo dirigido y ponderado, donde los *nod*os son base de recolección, puntos de generación o acopio, estaciones de transferencia y planta de reciclaje, y *aristas* son tramos de la red caracterizados por distancia y, cuando se dispone de datos, por tiempo, costo, emisiones o riesgo.

El modelado considera una red dirigida y ponderada. Floyd-Warshall evalúa los nodos intermedios y genera una matriz completa de distancias mínimas entre todos los pares de nodos. La matriz permite consultar trayectorias desde distintos orígenes y facilita la comparación posterior de alternativas de recorrido [7].

2.3. IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL

La herramienta se desarrolló en C# con Windows Forms. La interfaz permite capturar nodos y conexiones, ejecutar Floyd-Warshall, consultar matrices y rutas, definir los valores de los criterios MCDM y exportar trayectorias en formato KML.

2.4. ESTRUCTURACIÓN DE LOS DATOS

Los datos de entrada corresponden a lo siguiente:

- Nodos: puntos de generación o acopio, base de recolección y destino final.
- Aristas: conexiones entre nodos con pesos definidos por el usuario; la distancia es obligatoria y los demás atributos dependen de la disponibilidad de datos.
- Matriz de adyacencia: representación inicial del grafo, donde cada celda $[i, j]$ contiene el peso asignado entre los nodos i y j .

La interfaz utiliza cuadros de texto y tablas DataGridView para registrar los datos y revisar los resultados antes de ejecutar la evaluación.

2.5. ALGORITMO IMPLEMENTADO

El algoritmo Floyd-Warshall calculará todas las distancias mínimas entre pares de nodos.

Pseudocódigo de Floyd-Warshall en C#:

```
for (k = 0; k < n; k++)  
    for (i = 0; i < n; i++)  
        for (j = 0; j < n; j++)  
            if (matriz[i,j] > matriz[i,k] + matriz[k,j])  
                matriz[i,j] = matriz[i,k] + matriz[k,j];  
for (k = 0; k < n; k++)
```

Se recorre cada nodo intermedio posible en el grafo.

La idea de Floyd-Warshall es pasar por cada nodo k y analizar la posibilidad de llegar de i a j con un camino más corto que el que ya se tiene registrado.

```
for (i = 0; i < n; i++)
```

Ahora se fija un nodo origen (i).

```
for (j = 0; j < n; j++)
```

Y también un nodo destino (j).

En este punto se tienen tres componentes: origen (i) a intermedio (k) a destino (j).

```
if (matriz[i,j] > matriz[i,k] + matriz[k,j])
```

Aquí se compara:

- $matriz[i,j]$: la distancia actual conocida de i a j .
- $matriz[i,k] + matriz[k,j]$: la distancia si se pasa por el nodo intermedio k .

Si usar el nodo intermedio da un camino más corto, entonces se actualiza.

```
matriz[i,j] = matriz[i,k] + matriz[k,j];
```

Se guarda la nueva distancia mínima entre i y j .

Ejemplo:

Se tienen 3 nodos iniciales: A, B y C:

A a B = 5

B a C = 2

A a C = 10

La matriz inicial es:

TABLA 1
MATRIZ INICIAL

	A	B	C
A	0	5	10
B	∞	0	2
C	∞	∞	0

Cuando $k = B$, el algoritmo prueba:

¿Si el punto A a C es más corto pasando por B?

A a B + B a C = 5 + 2 = 7

Como $7 < 10$, se actualiza A a C = 7.

Resultado final: la ruta más corta A a C no es 10, sino 7 pasando por B.

Tres ciclos for anidados recorren, respectivamente, el nodo intermedio k , el origen i y el destino j . La condi-

ción actualiza la distancia cuando el trayecto que pasa por k es menor que el valor almacenado. Esta estructura calcula los caminos mínimos entre todos los pares de nodos [7].

2.6. ALGORITMO MATEMÁTICO

Sea un grafo $G = (V, E, w)$ con matriz de pesos $W[n][n]$.

El algoritmo Floyd-Warshall calcula la matriz $D[n][n]$ de distancias mínimas entre todos los nodos:

Inicialización:

$D^{(0)}[i,j] = W[i,j]$, para todo $i, j \in V$

Iteración:

Para $k = 1$ hasta n :

Para todo $i, j \in V$:

$D^{(k)}[i,j] = \min(D^{(k-1)}[i,j], D^{(k-1)}[i,k] + D^{(k-1)}[k,j])$

Resultado:

$D^{(n)}$ contiene las distancias mínimas entre todos los pares de nodos [7].

2.7. INTEGRACIÓN CON MÉTODOS MCDM

El módulo MCDM compara las rutas obtenidas mediante los seis criterios definidos en la sección 2.1. Primero se verifica que los pesos sumen 1 y después se normalizan los valores para hacer comparables las unidades de medida.

TOPSIS y VIKOR generan una clasificación de las alternativas. La herramienta conserva, junto con el resultado, los pesos y valores utilizados para que la recomendación pueda interpretarse y reproducirse.

El método TOPSIS propone seleccionar alternativas con base en la cercanía al ideal positivo y la lejanía del ideal negativo [9].

Los pasos por seguir son los siguientes:

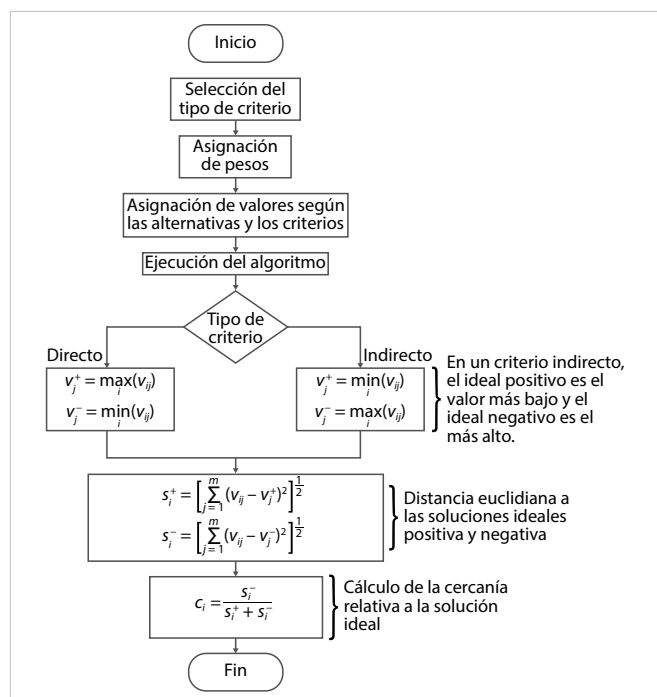


Figura 1. Diagrama de metodología TOPSIS.

La Figura 1 resume el procedimiento de TOPSIS, desde la construcción de la matriz de decisión hasta el ordenamiento de las alternativas por su cercanía a la solución ideal.

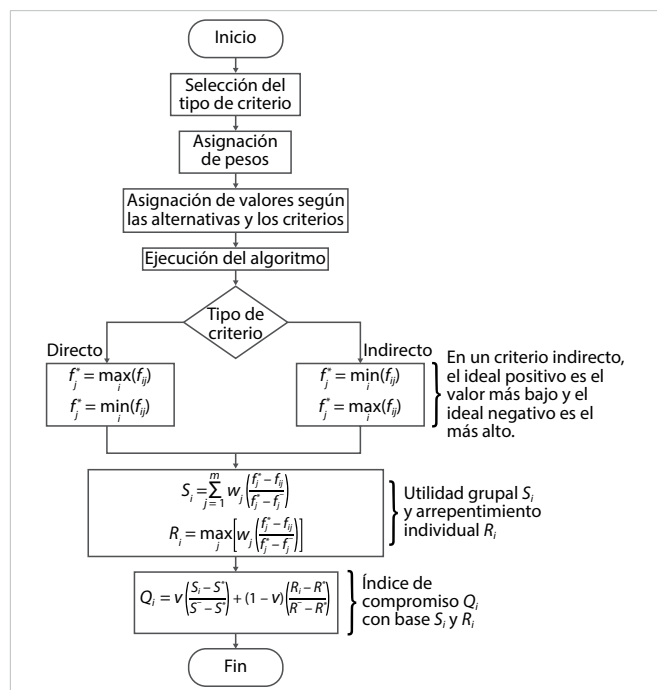


Figura 1. Diagrama de metodología VIKOR.

La Figura 2 presenta el flujo de VIKOR. A diferencia de TOPSIS, VIKOR calcula una solución de compromiso a

partir de la utilidad grupal y del mayor arrepentimiento individual [10]. Ambos métodos utilizan la misma matriz de alternativas, criterios y pesos. Esta equivalencia evita comparar resultados construidos con supuestos distintos.

En este estudio, la sostenibilidad no se registra como un criterio aislado: se representa mediante el impacto ambiental y la cobertura del servicio. Así se mantiene correspondencia entre la definición del problema, la captura de datos y la validación [13].

La comparación entre TOPSIS y VIKOR permite identificar si la recomendación permanece estable o cambia según la lógica de agregación [14].

2.8. MÓDULO DE VISUALIZACIÓN GIS (GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM)

El módulo GIS representa las trayectorias calculadas y exporta un archivo KML. La visualización facilita la revisión espacial de los nodos, las conexiones y el orden del recorrido antes de utilizar la ruta en un escenario operativo [11].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La versión evaluada generó la matriz de caminos mínimos y las trayectorias cartográficas a partir de la red capturada. Los resultados que se presentan corresponden al criterio de distancia y deben interpretarse como una prueba de concepto del componente de ruteo.

3.1. ESCENARIO PILOTO Y ALCANCE DE LA VALIDACIÓN

El escenario incluyó Rectoría, ICSA, IIT e ICB como nodos institucionales. Para mantener la relación con el problema estudiado, cada ubicación se interpretó como un posible punto de generación o acopio de residuos reciclables.

La prueba se realizó en cuatro pasos:

1. Registro de nodos, coordenadas y conexiones de la red.
2. Ejecución de Floyd-Warshall para obtener la matriz de distancias mínimas.
3. Reconstrucción de las trayectorias entre los nodos seleccionados.
4. Exportación del resultado en formato KML y revisión en un visor cartográfico.

Los institutos universitarios no representan rutas ajenas a la gestión de residuos: funcionan como nodos demostrativos de una red institucional de recolección. En una aplicación completa, el vehículo partiría de una base, visitaría únicamente los puntos con demanda de recolección y trasladaría el material a un centro de acopio o a una recicladora. Las Figuras 3 y 4 muestran la conectividad y las rutas mínimas entre los nodos; no constituyen todavía un programa definitivo de recolección.



Figura 3. Vista ampliada de los nodos y de la trayectoria calculada por Floyd-Warshall (elaboración propia con base en datos de Google Maps).



Figura 4. Detalle de las polilíneas exportadas a Google Earth; se identifican los nodos y se resalta la traza para facilitar su inspección. Fuente: elaboración propia con base en datos de Google Earth.

IV. CONCLUSIONES

Floyd-Warshall resultó adecuado para obtener, en una sola ejecución, las distancias mínimas entre todos los pares de nodos de la red. Esta propiedad es útil cuando una operación debe consultar diferentes orígenes, destinos y puntos intermedios.

La prueba con ubicaciones de la UACJ verificó la captura de la red, el cálculo de caminos y la exportación KML. Asimismo, permitió aclarar la función de los institutos: en el modelo representan posibles puntos de generación o acopio dentro de un recorrido de recolección de reciclables.

La evaluación presentada se limitó a la distancia. Aunque la herramienta incorpora TOPSIS y VIKOR, todavía se requieren datos operativos para comparar rutas por tiempo, costo, impacto ambiental, riesgo y cobertura. Por ello, los resultados no deben interpretarse como una validación integral del componente MCDM.

La contribución del trabajo es la integración modular del cálculo de rutas, la evaluación multicriterio y la visualización geográfica. La siguiente etapa deberá medir demanda y desempeño en campo, incluir la base y el destino final de los reciclables, y comparar la recomendación con el recorrido utilizado habitualmente.

REFERENCIAS

- [1] G. Marseglia, J. A. Mesa, F. A. Ortega y R. Piedra-de-la-Cuadra, "A heuristic for the deployment of collecting routes for urban recycle stations (eco-points)", *Socio-Econ. Plan. Sci.*, vol. 82, parte A, art. 101222, ag. 2022, doi: [10.1016/j.seps.2021.101222](https://doi.org/10.1016/j.seps.2021.101222).
- [2] J. Beliën, L. De Boeck y J. Van Ackere, "Municipal solid waste collection and management problems: A literature review", *Transp. Sci.*, vol. 48, n.º 1, pp. 78-102, 2014, doi: [10.1287/trsc.1120.0448](https://doi.org/10.1287/trsc.1120.0448).
- [3] L. Abarca, G. Maas y W. Hogland, "Solid waste management challenges for cities in developing countries", *Waste Manag.*, vol. 33, n.º 1, pp. 220-232, en. 2013, doi: [10.1016/j.wasman.2012.09.008](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.008).
- [4] United Nations. "Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development". UN.org. [En línea]. Disponible: <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- [5] T. Anagnostopoulos, K. Kolomvatsos, C. Anagnostopoulos, A. B. Zaslavsky y S. Hadjiefthymiades, "Assessing dynamic models for high priority waste collection in smart cities", *J. Syst. Softw.*, vol. 110, pp. 178-192, dic. 2015, doi: [10.1016/j.jss.2015.08.049](https://doi.org/10.1016/j.jss.2015.08.049).
- [6] A. Idrissi, R. Benabbou, J. Benhra y M. El Haji, "Smart waste collection based on vehicle routing optimization: Case of Casablanca City", *Procedia Comput. Sci.*, vol. 236, n.º C, pp. 194-201, 2024, doi: [10.1016/j.procs.2024.05.021](https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.05.021).

- [7] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest y C. Stein, *Introduction to Algorithms*, 4th ed. Cambridge, MA, EUA: MIT Press, 2022.
- [8] A. B. P. Santos, C. L. Simões y R. Simões, "Optimization of municipal solid waste collection system: systematic review with bibliometric literature analysis", *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 26, pp. 1906-1917, may. 2024, doi: [10.1007/s10163-024-01966-y](https://doi.org/10.1007/s10163-024-01966-y).
- [9] C. L. Hwang y K. Yoon, *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. Berlín, Alemania: Springer, 1981.
- [10] S. Opricovic y G.-H. Tzeng, "Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS", *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 156, n.º. 2, pp. 445-455, jul. 2004, doi: [10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1).
- [11] S. Das, A. Baral, I. M. Rafizul y S. Berner, "Efficiency enhancement in waste management through GIS-based route optimization", *Cleaner Eng. Technol.*, vol. 21, art. 100775, 2024, doi: [10.1016/j.clet.2024.100775](https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100775).
- [12] I. Mavlutova, D. Atstaja, J. Grasis, J. Kuzmina, I. Uvarova, y D. Roga, "Urban transportation concept and sustainable urban mobility in smart cities: A review", *Energies*, vol. 16, n.º 8, art. 3585, 2023, doi: [10.3390/en16083585](https://doi.org/10.3390/en16083585).
- [13] L. M. Goulart, L. C. Lange y H. M. Coelho, "Multi-criteria decision making to support waste management: A critical review of current practices and methods", *Waste Manag. Res.*, vol. 35, n.º 1, pp. 3-28, 2017, doi: [10.1177/0734242X16664024](https://doi.org/10.1177/0734242X16664024).
- [14] S. S. Sohail et al., "Multi-criteria decision making-based waste management: A bibliometric analysis", *Heliyon*, vol. 9, n.º 11, art. e21261, 2023, doi: [10.1016/j.heliyon.2023.e21261](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21261).

RECONOCIMIENTOS

Un agradecimiento a la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez por el apoyo brindado y las facilidades otorgadas durante el desarrollo de mi estancia posdoctoral, lo cual fue fundamental para la realización de este trabajo.