

Caminos seguros escolares en entornos urbanos: un enfoque multicriterio basado en la distancia y seguridad

Sofia Plos-Cecchini¹ <https://orcid.org/0009-0008-3991-1430>
Fabio M. Miguel² <https://orcid.org/0000-0002-4810-8008>
Mariano Frutos^{3,4} <https://orcid.org/0000-0003-2585-4195>

¹ Sede Alto Valle y Valle Medio, Universidad Nacional de Río Negro, Argentina (correo-e: sploscecchini@gmail.com)

² Sede Alto Valle y Valle Medio, Universidad Nacional de Río Negro, CONICET, Argentina
(correo-e: fmiguel@unrn.edu.ar)

³ Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Argentina.

⁴ Instituto de Investigaciones Económicas y Sociales del Sur UNS CONICET, Argentina. (correo-e: mfrutos@uns.edu.ar)

Recibido May. 8, 2024; Aceptado Jun. 13, 2024; Versión final Ago. 9, 2024, Publicado Feb. 2025

Resumen

Este estudio preliminar presenta los resultados de la aplicación de un método de decisión basado en la agregación lineal de criterios, para identificar redes de caminos seguros hacia centros educativos en el Alto Valle Este (Argentina), enfocado en estudiantes que utilizan movilidad activa. Se examinan factores clave como la distancia, la seguridad vial y la calidad de la infraestructura peatonal, georreferenciados mediante GIS. Estos factores son analizados para determinar las prioridades en los criterios e identificar las redes de recorridos óptimos, utilizando el algoritmo de Dijkstra. Además, se incorpora como restricciones en el método de decisión multicriterio, información adicional sobre corredores seguros propuestos por el consejo de seguridad de las instituciones educativas. En conclusión, la metodología aplicada es una herramienta robusta para la identificación de redes de recorridos seguros, ofreciendo una mayor cobertura para estudiantes que dependen de medios activos de transporte para acceder a la educación.

Palabras clave: métodos de decisión multicriterio; seguridad escolar; ruta escolar; camino más corto; movilidad urbana; ambientes urbanos

Safe school routes in urban environments: a multicriteria approach based on distance and safety

Abstract

This preliminary study presents the results of applying a decision method based on linear aggregation of criteria to identify safe route networks to educational centers in Alto Valle Este (Argentina), focusing on students using active mobility. Key factors such as distance, road safety, and the quality of pedestrian infrastructure are examined and georeferenced using GIS. These factors are analyzed to prioritize criteria and identify optimal route networks using Dijkstra's algorithm. Additionally, information on safe corridors proposed by the safety council for educational institutions is incorporated as constraints in the multicriteria decision method. In conclusion, the applied methodology is a robust tool for identifying safe route networks, offering greater coverage for students who rely on active transport modes to access education.

Keywords: multicriteria decision methods; school safety; school routes; shortest path; urban mobility; urban environments

INTRODUCCIÓN

La Agenda 2030 para el desarrollo sostenible propuesta por la Organización de Naciones Unidas, plantea 169 metas en un marco de 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible. El objetivo número once abarca las metas de movilidad, seguridad vial y accesibilidad a los servicios básicos. En este contexto, el concepto de movilidad hace referencia a cómo las personas hacen uso del espacio, a *cómo toman decisiones* sobre sus desplazamientos para acceder a servicios de educación. Por ejemplo, de acuerdo a sus preferencias, necesidades y accesibilidad a los medios de transporte, condicionadas por la seguridad vial y la infraestructura entre otros factores que influyen en la decisión de moverse (Courgeau, 1990; Stülpnagel et al., 2024). En este marco, la movilidad activa se refiere a los desplazamientos no motorizados, ya sea mediante el uso directo de la fuerza humana, como caminar, o indirecto, como el uso de bicicletas (Larouche, 2018). El estudio de su contribución a la sostenibilidad en las ciudades está vinculado a la accesibilidad a los servicios básicos, las políticas de planificación urbana y la promoción de hábitos saludables.

En los últimos años, la movilidad para acceder a la educación ha experimentado cambios significativos, impulsados por profundas transformaciones socioeconómicas y el aumento de la desigualdad. Se ha registrado un incremento en los desplazamientos en moto, bicicleta y a pie, en un contexto urbano caracterizado por un crecimiento centrado en la planificación orientada al automóvil en detrimento de otros modos de transporte. Esta situación genera condiciones poco seguras para que los estudiantes se desplacen caminando o en bicicleta junto a vehículos de mayor tamaño, lo que resalta la importancia de estudiar herramientas que permitan identificar recorridos seguros hacia y desde los centros educativos, considerando las preferencias, necesidades y la accesibilidad a los servicios educativos. Este tipo de herramienta es fundamental para que los responsables de la planificación y gestión urbana tomen decisiones informadas y basadas en evidencia, con el fin de mejorar la seguridad en los desplazamientos escolares, prestando especial atención a los grupos más vulnerables que dependen de la movilidad activa para acceder a los centros educativos (Raffo et al., 2013; Peden et al., 2004).

El problema de identificar recorridos seguros hacia el colegio es inherentemente multicriterio, ya que la toma de decisiones implica equilibrar distintos factores, como el tiempo y la seguridad, que suelen ser difíciles de satisfacer simultáneamente. A diferencia de los problemas con un único criterio, como aquellos basados únicamente en el costo monetario, donde la mejor alternativa se determina fácilmente según ese único factor, los problemas multicriterio reconocen la existencia de varias opciones equivalentes y viables, dependiendo de los diferentes criterios en juego. Por lo tanto, las herramientas de decisión deben tener en cuenta múltiples criterios. Incluso cuando las partes involucradas no tengan intereses en conflicto, es necesario contemplar diversas sensibilidades que pueden influir en sus evaluaciones o preferencias. En este contexto, el enfoque multicriterio permite visibilizar estas diferencias y facilita la búsqueda de un equilibrio entre los criterios o la resolución de posibles discrepancias.

Este trabajo preliminar tiene como objetivo el estudio de la aplicación de herramientas de ayuda a la decisión multicriterio para identificar redes de recorridos seguros para personas que hagan uso de medios de movilidad activa para acceder a los servicios de educación en el Alto Valle Este de Río Negro, con la ciudad de Villa Regina como epicentro de los desplazamientos. Con el fin de que esta herramienta permita visibilizar los cambios en la eficiencia relativa al modificarse las preferencias o prioridades de los distintos criterios. Las contribuciones más relevantes del trabajo son: 1) Identificación y caracterización del problema a través del análisis de los datos recabados mediante un relevamiento de información, 2) la identificación de la importancia de factores que actúan como facilitadores o como barreras a la movilidad activa de los estudiantes mediante la realización de un relevamiento de información, 3) la resolución del problema mediante software de código abierto y la identificación de recorridos seguros que surjan para los perfiles de movilidad activa, y 4) La representación y análisis de los de recorridos seguros que surjan para los perfiles de movilidad activa.

OTROS ANTECEDENTES

El problema de la determinación de redes de caminos seguros desde la perspectiva de la teoría de la decisión multicriterio ha sido abordado por distintos autores en diferentes contextos sociales, con diferentes enfoques y diversos criterios. Respecto a los criterios que pueden afectar la equidad en el uso del espacio, particularmente en jóvenes que usan medios activos de movilidad para acceder al colegio. En distintos trabajos se ha determinado que estos factores se relacionan con aspectos ambientales, como la distancia, el tráfico o la seguridad (Prezza et al., 2001). Otros factores están orientados a aspectos sociales como el compañerismo o los hábitos de vida (Panter et al., 2008). Además de factores familiares y/o personales, como la actividad laboral, el modo de desplazamiento al trabajo de los padres, o la percepción de seguridad del entorno (Rodríguez-López et al., 2013). Dado el costo del uso y la tenencia de vehículos, en familias de nivel socioeconómico bajo aumenta la probabilidad de realizar desplazamientos a pie (Duncan et al., 2008).

Del mismo modo se asocia un transporte pasivo al colegio, a las familias con un nivel socioeconómico más alto (Chillón et al., 2009). En general, los autores coinciden en que los principales factores que influyen en un desplazamiento activo al colegio son: la distancia, el nivel socioeconómico, el temor/preocupación al tráfico y los accidentes de tránsito, la delincuencia, y factores relacionados al trabajo de los padres y madres (Stewart, 2011). Dentro de los factores ambientales, la distancia que los estudiantes están dispuestos a recorrer para ir al colegio todos los días aumenta con su edad. La distancia umbral que mejor discriminó a los desplazamientos activos de los pasivos fue de 1421 metros en niños de 10 años, 1627 metros en niños de 11 años y 3046 metros en niños de 14 años o más (Chillón et al., 2015). Del mismo modo, cuanto menor sea la distancia, mayor es la probabilidad de realizar ese desplazamiento a pie (Mandic et al., 2015).

Varios trabajos se enfocan en la aplicación de distintas variantes de método de análisis multicriterio de jerarquía analítica a partir de encuestas para evaluar las prioridades en los criterios que influyen en la movilidad activa. Ruiz-Padillo y otros, estudiaron el caso de la ciudad de Porto Alegre, Brasil, para construir una jerarquía de las principales características del entorno urbano que afectan la movilidad activa, identificando a la seguridad pública y la seguridad vial, como los dos atributos más importantes (Ruiz-Padillo et al., 2018). En este sentido, Gonzalez-Urango y otros, identificaron como más relevantes factores asociados a la seguridad peatonal en el caso de Cartagena, Colombia (Gonzalez-Urango et al., 2020). Alhajaj y Daghistani estudiaron una metodología para crear índices de accesibilidad y seguridad a partir de una encuesta de percepción de los estudiantes que calificaba los trayectos más utilizados por los estudiantes y una lista de verificación de rutas que las calificaba a través de observaciones de campo (Alhajaj y Daghistani, 2021). Concluyen que el método destaca de manera eficaz las rutas que requieren mejoras. Propusieron indicadores subjetivos, objetivos y mixtos para medir los criterios de desempeño adoptados para evaluar las alternativas

Otros estudios hacen más foco en la etapa de identificación de los recorridos óptimos en sí, considerando distancias físicas, tiempos de viaje y niveles de peligrosidad (Dessing, et al., 2016; Colina Torres, 2013). Hrnčič y otros proponen heurísticas que permiten una selección eficiente de rutas para bicicletas basadas en múltiples criterios como comodidad, seguridad y accesibilidad (Hrnčič et al., 2017). Otros enfoques agregan factores como la contaminación, el riesgo del crimen y la infraestructura disponible para determinar rutas más seguras y eficientes para diferentes tipos de usuarios urbanos (Brito et al., 2023).

Más recientemente Sonone y Balamohan han estudiado un enfoque multicriterio para evaluar redes peatonales en áreas urbanas densas, utilizando datos geoespaciales y factores como el uso del suelo y la infraestructura para garantizar trayectorias más seguras y sostenibles (Sonone et al., 2023). Otros autores proponen una metodología para la reorganización del entorno de la escuela en términos de tránsito peatonal-vehicular con el fin de que mejore la seguridad, aumente la accesibilidad y fomente métodos de transporte más sostenibles, como caminar y andar en bicicleta, tanto entre los estudiantes como entre los residentes (Kahraman et al., 2024; Zuluaga et al., 2021)

A diferencia de los trabajos presentados en la literatura, el objetivo de este trabajo preliminar, se enfoca en el estudio de una metodología para determinar redes de caminos seguros al colegio que permita visibilizar el impacto respecto al logro de cada criterio cuando se consideran diferentes perspectivas en las preferencias de los usuarios asociadas a la calidad de la infraestructura, la percepción de la seguridad o la distancia.

METODOLOGÍA

Este estudio utiliza una metodología cuantitativa basada en herramientas de decisión multicriterio (MCDM) para evaluar redes de caminos seguros en un área urbana específica. La teoría de la toma de decisiones multicriterio se refiere al uso de un conjunto de metodologías diseñadas para apoyar la toma de decisiones en situaciones en las que se deben considerar múltiples criterios o perspectivas. Simon (1983) señaló que la toma de decisiones administrativas implica la consideración de criterios diversos y, a menudo, contradictorios. Las herramientas MCDM se centran en el proceso de decisión, más que en los resultados finales, buscando hacer visibles los criterios utilizados para evaluar las opciones y facilitar el consenso entre las partes involucradas.

En este contexto, el proceso de evaluación de caminos seguros se organizó en cuatro fases clave: (1) La fase de recopilación de información, en la cual se identifican y analizan los criterios relevantes y las alternativas posibles. (2) La fase de diseño, que consiste en la construcción y evaluación de las alternativas, como los caminos seguros, considerando los criterios definidos. (3) La fase de elección, en la que se selecciona una alternativa definitiva con base en las evaluaciones previas. (4) Finalmente, la fase de análisis de resultados, donde se interpretan y validan los resultados obtenidos.

Es importante señalar que este proceso no necesariamente sigue un flujo lineal, ya que las fases pueden superponerse o ajustarse conforme avanza el análisis, dependiendo de la complejidad del problema y la retroalimentación obtenida. A los fines de poder caracterizar el problema de determinar los recorridos óptimos a los establecimientos educativos es necesario determinar las características de los desplazamientos hacia los establecimientos educativos y su distribución espacial considerando aspectos como longitud, duración, horarios, seguridad, medios de transporte disponibles, etc. El relevamiento de información respecto a los principales atractores de viajes escolares, implica un análisis detallado de la oferta educativa del área objeto de estudio, así como la identificación de factores climáticos y demográficos que pudieran influir en los desplazamientos por motivos escolares, así como la recopilación de información relevante sobre políticas e intervenciones previas relacionadas con el tema, junto con la localización de incidentes de seguridad que involucraran a estudiantes en los horarios de entrada y salida escolar.

Para ello, se realizó un relevamiento de datos de movilidad para determinar la distribución espacial de los viajes y caracterizar los factores con mayor impacto sobre la movilidad activa en el Alto Valle Este con centros educativos de la ciudad de Villa Regina como destinos de los viajes. Para calcular el tamaño muestral requerido se usó un margen de error del 5%, un nivel de confianza del 95%, siguiendo las premisas planteadas para la encuesta de movilidad ENMODO (2011). La implementación fue mediante un instrumento estructurado online. Los desplazamientos consultados fueron los realizados en los últimos días y mayores a 4 cuadras desde su hogar, para identificar las direcciones concurridas habitualmente, los modos de transporte utilizados, el tiempo de duración y los puntos donde se identifican las dificultades o riesgos a la seguridad. Los datos fueron recogidos de una muestra tomada entre octubre del 2020 y noviembre del 2022.

Se realizan entrevistas a diversos actores relevantes del ámbito de la educación, la seguridad y el gobierno local para poder caracterizar la movilidad de los estudiantes de la microrregión, los modos de transporte utilizados a la ida y la vuelta al establecimiento educativo, si va o no acompañado de un adulto, la percepción de la seguridad en los recorridos realizados habitualmente, o los puntos donde se identifican las dificultades o riesgos, cuánto tiempo le insume el viaje desde que sale de su hogar. Los datos recolectados fueron georreferenciados utilizando SIG de código abierto, relacionando los datos de acceso abierto disponibles en el proyecto OpenStreetMap con los de otras infraestructuras de datos espaciales (IDERA y otras IDE de organismos miembros de IDERA) y la información relevada para la zona.

Se construyeron una serie de medidas que reflejan los distintos atributos de cada tramo de la red de caminos, teniendo en cuenta la distancia de desplazamiento, y otros factores relevantes como eventos de inseguridad, infraestructura vial y velocidad de circulación, etc. que actúan como facilitadores o como barreras a la movilidad activa. Luego, de la representación de esta información mediante SIG se procede a identificar y evaluar las rutas escolares en función de los factores identificados.

Dado que en los problemas multicriterio no existe una solución global única, es necesario utilizar un método, una regla, que permita agregar los diferentes puntos de vista o criterios en una única función que a posteriori será minimizada (Roy, 1998). En este trabajo preliminar, se utiliza el método de *ponderación lineal de criterios* como procedimiento de agregación. El procedimiento consiste determinar la alternativa, o en nuestro caso caminos, preferidos a partir de las evaluaciones globales de todas las alternativas posibles. La evaluación global $R(a_i)$ de cada alternativa i surge de la suma ponderada de criterios, que generalmente no tienen la misma importancia o ponderación. Es decir,

$$R(a_i) = \sum_{j=1}^k w_j * a_{ij} \quad (1)$$

donde k es la cantidad de criterios, i es la alternativa evaluada, w_j es la importancia del criterio j y a_{ij} es el nivel normalizado del atributo j para la alternativa i . Los niveles de los atributos a_{ij} se normalizan de acuerdo con la ecuación (2), dado que los atributos están definidos en escalas diferentes:

$$a_{ij} = \frac{v_{ij}}{\max_i v_{ij}} \quad (2)$$

En la ecuación (2), v_{ij} es el nivel del atributo j para la alternativa i en su escala original obtenido en la fase anterior. La función de evaluación (1) agrega los diferentes criterios en una sola medida a ser minimizada. En el contexto del problema objeto de estudio, este problema de minimización se conoce como el problema del camino mínimo (SPP, por sus siglas en inglés).

La formulación de programación lineal entera del problema del *shortest path* considera un grafo G compuesto por un conjunto de vértices V y un conjunto de aristas E . Cada arista (u, v) conecta dos vértices u y v , y tiene un peso asociado r_{uv} mayor o igual que cero. El objetivo es encontrar el camino más corto desde un vértice de origen s a un vértice destino t minimizando la suma de los pesos de las aristas que forman el camino. Para cada destino el problema se expresa de la siguiente manera:

$$\text{Minimizar } \sum_{u=1}^n \sum_{v=1}^n r_{uv} \cdot x_{uv} \quad (3)$$

Donde n es el número total de vértices en el grafo, r_{uv} representa el peso de la arista entre los vértices u y v , y x_{uv} es una variable que toma el valor 1 si la arista (u, v) forma parte del camino más corto y 0 en caso contrario.

Esta minimización está sujeta a las siguientes restricciones:

1.- Restricción de conservación de flujo para nodos intermedios: Para cada nodo i diferente del origen s y del destino t :

$$\sum_{v=1}^n x_{iv} - \sum_{u=1}^n x_{ui} = 0 \quad (4)$$

Esta restricción asegura que, para cualquier vértice intermedio i , la cantidad de flujo que entra en el vértice es igual a la cantidad de flujo que sale, manteniendo así la continuidad del camino.

2.- Restricción para el nodo origen s : Para el vértice origen s :

$$\sum_{v=1}^n x_{sv} - \sum_{u=1}^n x_{us} = 1 \quad (5)$$

Esto significa que desde el vértice s debe salir una unidad de flujo neto, indicando el inicio del camino.

3.- Restricción para el nodo destino t : Para el vértice destino t :

$$\sum_{v=1}^n x_{tv} - \sum_{u=1}^n x_{ut} = -1 \quad (6)$$

Esto asegura que en el vértice t entra una unidad de flujo neto, indicando el final del camino.

4.- No negatividad de las variables: Para todas las posibles aristas (u, v) :

$$x_{uv} \geq 0 \quad (7)$$

Esto asegura que los flujos considerados en las aristas son no negativos, es decir, se consideran caminos reales en el grafo. La ecuación (3) representa el costo total, los conjuntos de restricciones (4, 5 y 6) representa las ecuaciones de conservación de flujo y el conjunto de restricciones (7) indican que las variables de decisión sólo pueden asumir los valores 0 y 1 (Bazaraa et al., 2009). Luego, el camino más corto para cada estudiante, implica no visitar más de una vez ningún nodo de la red de caminos y que no se dan tramos de costo negativo.

Para la resolución del Problema del Camino más Corto (SPP, por sus siglas en inglés), se pueden aplicar diversos métodos, que se diferencian principalmente en el tiempo de procesamiento y en la capacidad para manejar distintos tipos de grafos, lo que hace que cada uno sea adecuado para escenarios específicos. El Algoritmo de Dijkstra, resuelve el problema del camino mínimo desde un único origen hacia todos los demás nodos en un grafo con pesos no negativos (Dijkstra, 1959). Los algoritmos de Bellman-Ford (Bellman, 1958) y de Floyd-Warshall (Floyd, 1962) tienen la capacidad de operar sobre grafos con pesos negativos y detectar ciclos negativos, pero no pueden obtener caminos mínimos en presencia de ciclos negativos. Ambos tienen mayor complejidad que el algoritmo de Dijkstra. El algoritmo de Johnson, es eficiente para hallar los caminos mínimos entre todos los pares de nodos en grafos dispersos con pesos que pueden ser negativos, siempre y cuando no existan ciclos negativos (Johnson, 1977). Pero tiene un orden de complejidad superior a los anteriores.

En el caso de los caminos seguros desde o hacia el colegio los pesos de las aristas no son negativos, por lo que el algoritmo de Dijkstra se presenta como la opción más adecuada para determinar los caminos óptimos en el contexto del problema planteado. Este algoritmo es un procedimiento exacto y determinista que emplea una estrategia de búsqueda codiciosa (greedy) para encontrar los caminos óptimos entre un vértice origen dado y el resto de los vértices en un grafo con pesos no negativos en cada arista.

Dada una combinación específica de prioridades, el resultado de este proceso será una red de caminos con los menores pesos ponderados acumulados. Esta red representará la alternativa óptima o preferida según los criterios evaluados. Posteriormente, en la fase de análisis de resultados, y con base en la configuración de prioridades derivada del análisis de la información relevada, se evaluará cómo varían las soluciones en relación con cada uno de los atributos. Esto permitirá comparar el impacto de diferentes configuraciones de prioridades sobre los distintos criterios, considerando múltiples perspectivas o enfoques de evaluación.

RESULTADOS

El relevamiento de datos de movilidad proporcionó información respecto a los patrones de desplazamiento de las personas en el área geográfica objeto de estudio. Se observó que los desplazamientos relacionados con el trabajo, las compras y la educación constituyen aproximadamente el 63% del total de viajes realizados (Figura 1).

Según los resultados los hogares con niveles de ingresos más bajos deben recorrer una mayor distancia promedio por viaje para acceder a los servicios básicos y demás actividades, la diferencia se acentúa en educación (Figura 2). En el estrato socioeconómico bajo, se observa un uso notable de medios de movilidad activa, siendo que más del 50% de los desplazamientos se efectúan a pie o en bicicleta. No obstante, al discriminar por los motivos los viajes, se observa la dependencia del taxi para acceder a servicios educativos (Figura 3).

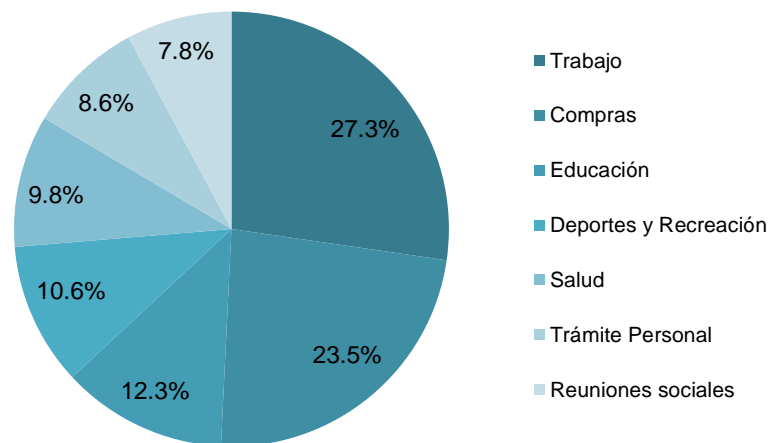


Fig. 1: Motivos de los viajes

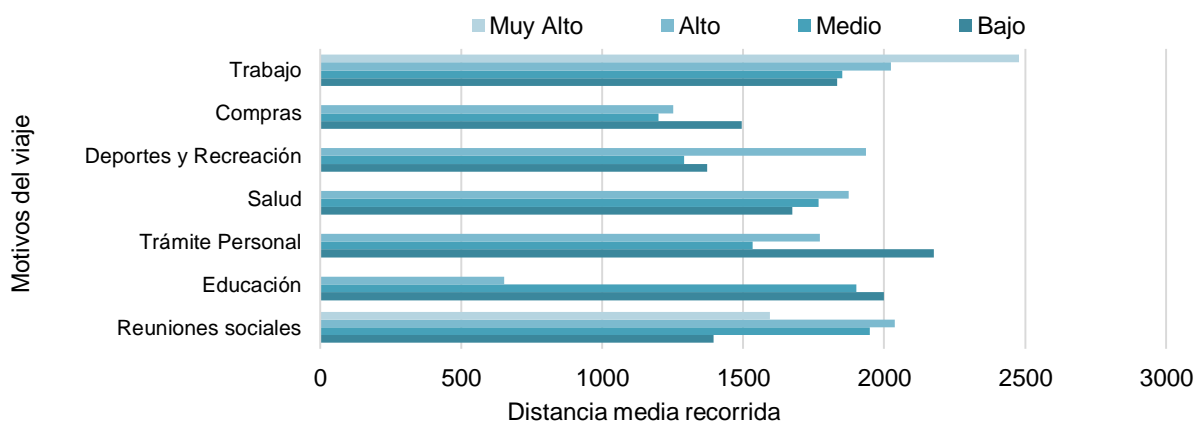


Fig. 2: Distancia media recorrida para acceder a las actividades según el nivel de ingresos

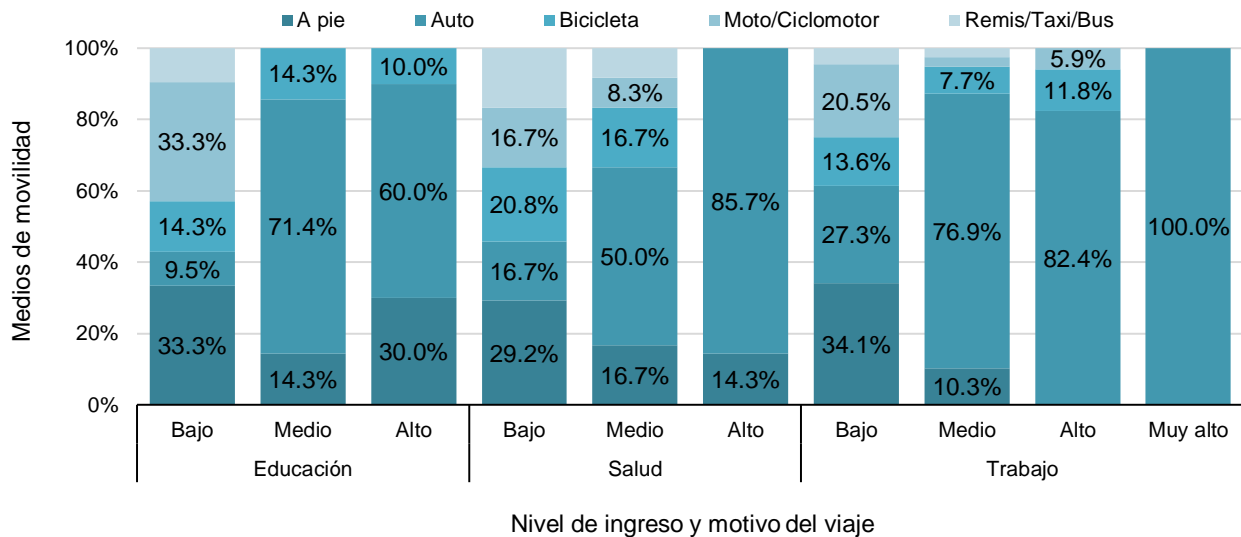


Fig. 3: Perfiles de movilidad según nivel de ingresos y tipo de actividad

El relevamiento permitió identificar las prioridades en los criterios de quienes tienen perfiles de movilidad activa, entre las que incluyeron en primer lugar la distancia, la percepción de inseguridad, la infraestructura y las condiciones climáticas. Se destaca que el 92% de los participantes de la encuesta expresaron su acuerdo en la ampliación de los espacios peatonales para ciclistas, aunque esto reduzca el espacio de estacionamiento o circulación de transporte motorizado.

Respecto a la distribución espacial de los desplazamientos con motivos de educación los datos recopilados, revelan que la mayoría de los estudiantes optan por la movilidad activa para desplazarse hacia sus centros educativos. Aproximadamente el 40% de los alumnos reside a más de 1 km pero a menos de 3 km de distancia con un tiempo de viaje de 25 minutos aproximadamente. Y más del 30% de los estudiantes que viven a 3 km o más, lo que requiere entre 45 minutos y una hora de viaje para llegar a sus destinos escolares (Figura 4).

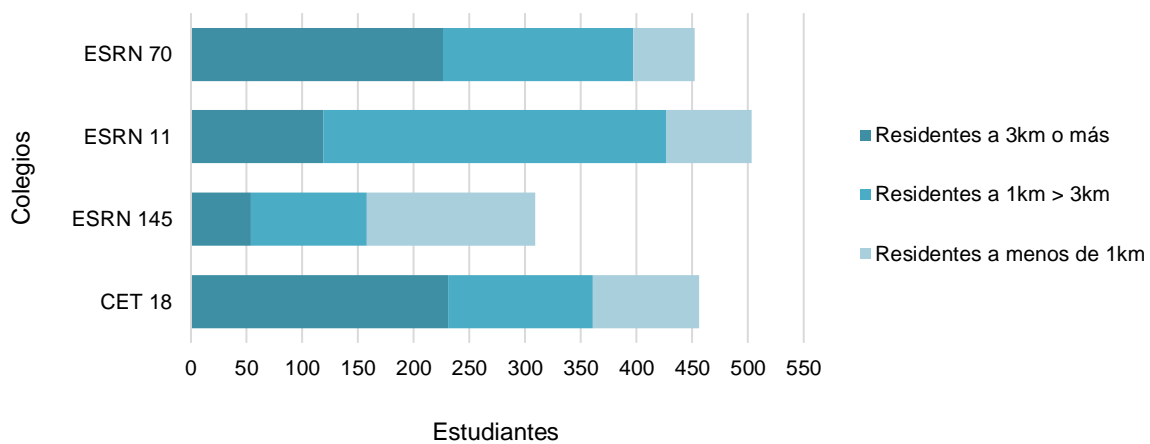


Fig. 4: Residencia de los estudiantes por colegio y distancia

Con los datos georreferenciados del relevamiento y de la red vial que incluye calles, ciclovías y caminos peatonales obtenidas de las infraestructuras de datos geoespaciales de acceso libre mencionadas en la metodología. Se construyó representación del problema mediante un grafo no dirigido cuyos nodos y arcos representan cada trayecto factible de la red en el contexto del problema objeto de estudio. Y se determinaron los niveles de los atributos correspondientes a los factores identificados para cada arco. A partir de este grafo, se aplicó el método de decisión multicriterio propuesto y se obtuvieron las redes de recorridos óptimas para cada nodo origen hasta cada destino considerando las prioridades en los criterios de los perfiles de movilidad activa. En la figura 5 puede observarse las redes de caminos seguros propuestos por la MCDM para cuatro atractores de viajes (colegios de nivel medio) de la zona estudiada, sin considerar como restricciones los corredores seguros propuestos por los referentes de seguridad.



Fig. 5: Corredores Seguros propuestos por MCDM

Al introducir información adicional del problema respecto a corredores seguros propuestos por el consejo de seguridad para cada establecimiento (referentes entrevistados en la primera fase del proceso). Y analizar los resultados de las redes de corredores seguros propuestos por la herramienta para el primer atractor de viajes (Figura 6 b. AV1), introduciendo esta información como restricciones del problema (Figura 6 a). Puede observarse que el camino seguro obtenido para este establecimiento comparte los trayectos sugeridos por los referentes de seguridad. Y amplía la cobertura de la red de caminos seguros para considerar los estudiantes deben recorrer mayores distancias para llegar a la escuela.

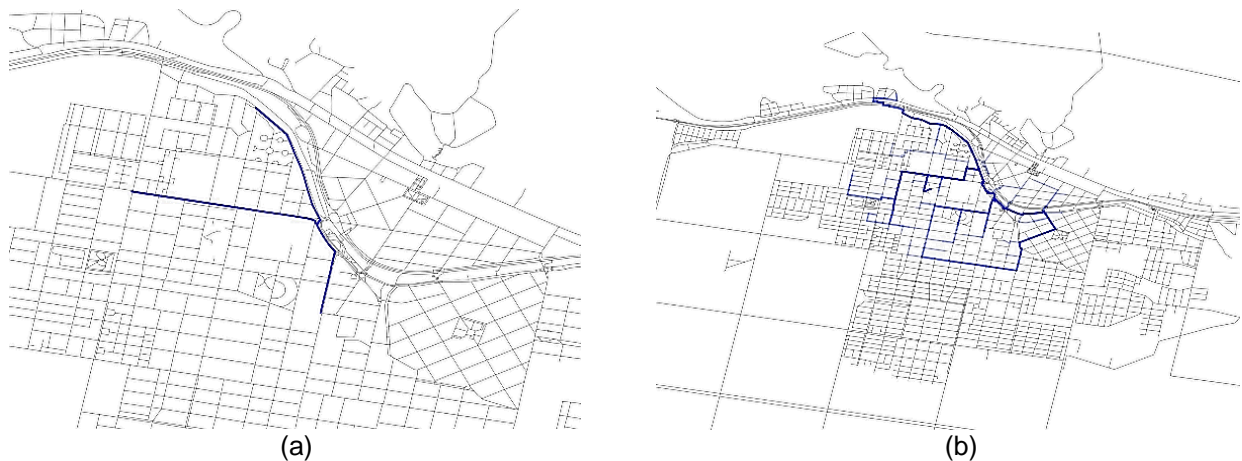


Fig. 6: Corredor Seguro de MCDM restringido para el AV1

En el caso del segundo atractor de viajes (AV2), el corredor seguro propuesto por el consejo (Figura 7 a) es de un reducido alcance en comparación de la realidad de los estudiantes que recorren distancias prolongadas para acceder a la institución, siendo uno de los establecimientos con mayor cantidad de estudiantes de distintos barrios. El MCDM permite visibilizar esta situación, y proporciona redes de caminos seguros con mayor cobertura, y en la mayoría de los casos compartidos con los de otras instituciones (Figura 7 b).

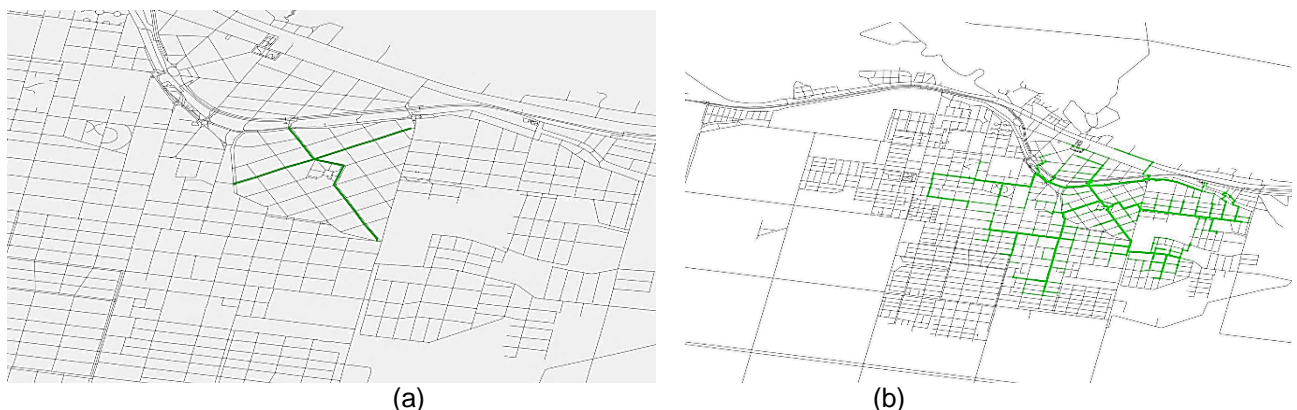


Fig. 7: Corredor Seguro de MCDM restringido para el AV2

Las últimas instituciones AV3 y AV4, no disponen actualmente de corredores seguros establecidos por el consejo de seguridad, porque se crearon provisoriamente para los dos colegios con mayor matrícula de nivel medio en la región. Para el caso de la institución AV4, se han identificado una red de caminos seguros, marcados en amarillo (Figura 8), que principalmente abarcan calles cercanas, aunque también incluyen rutas compartidas con el establecimiento AV3. De manera similar, los caminos seguros asignados al AV3, señalados en naranja (Figura 8), se concentran principalmente en calles cercanas, pero también incorporan vías compartidas con el establecimiento AV2.

Para concluir esta sección de resultados, se ofrece una visión panorámica de la ciudad que muestra los corredores seguros propuestos para las cuatro instituciones educativas (Figura 8). Estos corredores representan rutas seguras y óptimas para aquellos que dependen de medios de transporte activos para acceder a los establecimientos educativos de nivel medio en la ciudad de Villa Regina, Río Negro.

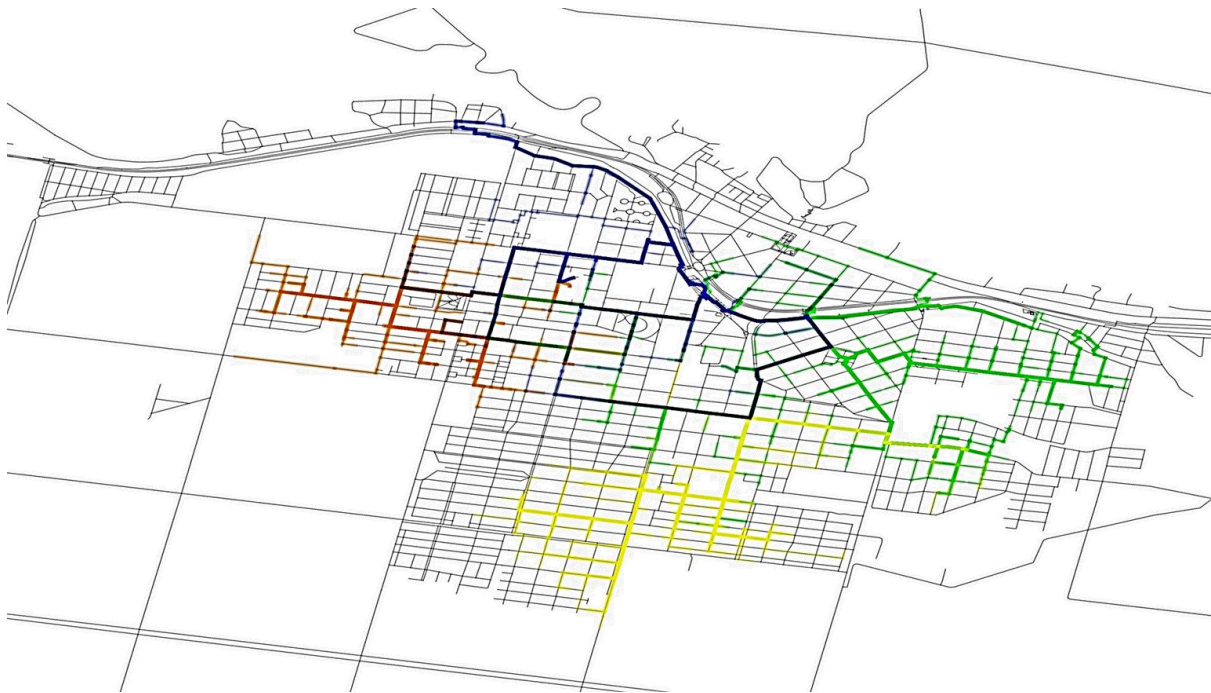


Fig. 8: Caminos seguros del MCDM restringido propuesto

A continuación, se presentan los resultados de la comparación de los cambios en los niveles de los atributos de las soluciones frente a cambios en las importancias relativas o percepciones de los diferentes criterios Δw_j . Siendo los criterios priorizados por la información que surgió del relevamiento: la distancia (D); la infraestructura (JSP); los incidentes de seguridad (IS); y la Cantidad de estudiantes en el trayecto (NE).

Al comparar los cambios en los atributos acumulados en las soluciones con los cambios en las importancias relativas se observa: (i) Variaciones significativas de los niveles de los atributos frente a los cambios en la prioridad del atributo *incidentes de seguridad* (IS). Dada la distribución espacial de incidentes de inseguridad, si se prioriza la percepción de seguridad en la construcción de redes óptimas, empeora significativamente el aprovechamiento de la infraestructura peatonal disponible y principalmente las distancias; (ii) La ponderación de la *infraestructura peatonal* tiene un impacto considerable sobre los demás atributos, en particular sobre la distancia. Es decir que, dada la infraestructura peatonal y la distribución espacial de requerimientos, las redes optimizadas para aprovecharla son significativamente menos eficientes para minimizar el criterio de distancia; y (iii) al aumentar la priorización de la *distancia* empeoran los niveles de los atributos JSP e IS. Los caminos más cortos tienden a ser menos seguros.

CONCLUSIONES

El estudio realizado demuestra la importancia de abordar la problemática de la movilidad urbana desde el enfoque de las herramientas multicriterio, especialmente en el contexto de la comunidad educativa y su desplazamiento desde el hogar a la escuela. Permitted visibilizar esta problemática y se presentaron herramientas para proporcionar las bases técnicas y operativas para fortalecer las capacidades de formulación y gestión de políticas relacionadas con el transporte y la movilidad.

El análisis de la movilidad escolar realizado en este estudio ha evidenciado cómo la ubicación espacial y las condiciones socioeconómicas impactan en los tiempos de desplazamiento de los estudiantes hacia la escuela.

La muestra recopilada indica que un porcentaje significativo de estudiantes debe anticipar su salida de casa para llegar a tiempo al establecimiento educativo, y esta anticipación varía dependiendo tanto de la distancia a la escuela como del medio de transporte utilizado.

Los datos revelan que aproximadamente el 41% de los estudiantes debe salir más de 20 minutos antes de su hogar para llegar puntualmente a la escuela, mientras que un 37% debe anticiparse entre 45 minutos y una hora. Con el 78% de los estudiantes residiendo a 1 km o más de su centro educativo, surge la necesidad de explorar alternativas de movilidad que garanticen la puntualidad en el ingreso a clase, especialmente considerando que los horarios de ingreso son similares en las distintas instituciones educativas. Respecto a la comparación de los recorridos óptimos obtenidos mediante las herramientas propuestas con la información de los corredores seguros provisorios propuestos por el consejo de seguridad para cada colegio, se logró identificar una mayor cobertura en la red de caminos seguros, información que es relevante para fortalecer la seguridad y mejorar la movilidad de una mayor cantidad de estudiantes que dependen de medios activos para acceder a la educación. Los resultados obtenidos de las variaciones de prioridades son consistentes con los desafíos percibidos por los usuarios durante el relevamiento: la distancia es el criterio más importante, seguido por la exposición a incidentes de seguridad, la infraestructura, y finalmente, la cantidad de compañeros en el trayecto. Esto confirma que las percepciones iniciales están alineadas con los resultados obtenidos del análisis multicriterio.

Como conclusión general, se puede afirmar que el MCDM propuesto es una herramienta robusta para determinar redes de corredores seguros, y para visibilizar diferentes prioridades y sus impactos en términos de los criterios en conflicto. Ya que permite identificar la magnitud del compromiso entre seguridad y eficiencia, en el sentido de que priorizar la percepción de seguridad en la determinación de redes peatonales tiende a empeorar la eficiencia en términos de distancia recorrida y aprovechamiento de la infraestructura peatonal. Facilita la cuantificación del impacto de la distribución de la infraestructura peatonal. Al optimizar la red para maximizar el uso de la infraestructura disponible resulta en rutas que no son eficientes en términos de distancia. Y finalmente, dada la distribución espacial de los incidentes de seguridad, al priorizar la distancia en las redes optimizadas, se observa un empeoramiento en los niveles de exposición a incidentes potenciales de seguridad.

DECLARACIÓN DE INTERESES Y FUENTES DE FINANCIACIÓN

Los autores declaran no tener relación comercial con otras personas u organizaciones que pudiera ser declarada como conflicto de intereses. Igualmente, no existen fuentes de financiación que comprometan la veracidad de los resultados o que puedan influir de manera inapropiada en ellos.

LIMITACIÓN DE RESPONSABILIDADES Y USO DE IA

Se declara que todas las afirmaciones, opiniones y datos contenidos en este artículo son responsabilidad exclusiva de sus autores, y no del CIT ni de sus editores. En particular declaran que, en el texto, figuras, tablas y todas las secciones del artículo no se ha hecho uso de herramientas de inteligencia artificial (IA) por lo que los textos se consideran propios de los autores, para efectos de propiedad intelectual. Por ello liberan de toda responsabilidad ética y legal a los editores y al CIT.

REFERENCIAS

- Alhajaj, N., y Daghistani, F., Hybrid method for measuring the accessibility and safety of students walking routes in car-dominated campuses, <https://doi.org/10.1057/s41289-020-00149-z>, *Urban Design International*, 26, 53-66 (2021)
- Bazaraa, M.S., Jarvis, J.J., y Sherali, H.D., *Linear Programming and Network Flows*, 4a edición, John Wiley y Sons, ISBN: 978-0-4717-0376-1 (2011)
- Bellman, R., On a routing problem, <https://doi.org/10.1090/qam/102435>, *Quarterly of Applied Mathematics*, ISSN 0033-569X, 16(1), 87-90 (1958)
- Chillón, P., Ortega, F., y otros diez autores, Socio-economic factors and active commuting to school in urban Spanish adolescents: the AVENA study, <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckp048>, *European Journal of Public Health*, 19(5), 470-476, (2009)
- Chillón, P., Panter, J., y otros tres autores, A longitudinal study of the distance that young people walk to school, <https://doi.org/10.1016/j.healthplace.2014.10.013>, *Health & Place*, 31, 133-137 (2015)
- Colina-Torres, R., Optimización de rutas en 'Camino Seguro al Cole'. Construcción y evaluación de rutas seguras, Tesis de Grado, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España (2013)
- Courgeau, D., Nuevos enfoques para medir la movilidad espacial interna de la población, *Notas de Población*, ISSN: 0303-1829, 18(50), 55-74 (1990)

- Dessing, D., de Vries, S.I., y otros cuatro autores, Children's route choice during active transportation to school: difference between shortest and actual route, <https://doi.org/10.1186/s12966-016-0373-y>, *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 13(48), 1-11 (2016)
- Dijkstra, E.W., A note on two problems in connection with graphs, <https://doi.org/10.1007/BF01386390>, *Numerische Mathematik*, 1(1), 269-271 (1959)
- Duncan, E.K., Scott-Duncan, J., y Schofield, G., Pedometer-determined physical activity and active transport in girls, <https://doi.org/10.1186/1479-5868-5-2>, *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 5(2), (2008)
- Floyd, R.W., Algorithm 97: Shortest Path, <https://doi.org/10.1145/367766.368168>, *Communications of the ACM*, 5(6), 345 (1962)
- Gonzalez-Urango, H., Le Pira, M., y otros tres autores, Designing walkable streets in congested touristic cities: the case of Cartagena de Indias, Colombia, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.021>, *Transportation Research Procedia*, 45, 309-316 (2020)
- Hrnčíř, J., Sulecki, P., Song, Q., y Jakob, M., Practical multicriteria urban bicycle routing, <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2577047>, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 18(3), 493-504 (2016)
- Johnson, D.B., Efficient algorithms for shortest paths in sparse networks, <https://doi.org/10.1145/321992.321993>, *Journal of the ACM (JACM)*, 24(1), 1-13 (1977)
- Kahraman, E.D., y Seyhan, Ç., Pedestrianization for safer school streets, *International Multi-Disciplinary Children's Studies Congress-VI*, 73-82, Istanbul, Turquía (2024)
- Larouche, R., (editor), *Children's active transportation*, 1ª Ed., Elsevier, ISBN 978-0-12-811931-0, Amsterdam, Holanda (2018)
- Mandic, S., Leon de la Barra, S., y otros siete autores, Personal, social and environmental correlates of active transport to school among adolescents in Otago, New Zealand, <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2014.06.012>, *Journal of Science and Medicine in Sport*, 18(4), 432-437 (2015)
- Panther, J.R., Jones, A.P., y van Sluijs, E. M., Environmental determinants of active travel in youth: A review and framework for future research, <https://doi.org/10.1186/1479-5868-5-34>, *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*, 5(34), (2008)
- Peden, M., Scurfield, R., y otros cinco editores, *World report on road traffic injury prevention*, World Health Organization, ISBN 92-4-156260-9, 244, Geneva, Switzerland (2004)
- Prezza, M., Pilloni, S., y otros cuatro autores, The influence of psychosocial and environmental factors on children's independent mobility and relationship to peer frequentation, <https://doi.org/10.1002/casp.643>, *Journal of Community y Applied Social Psychology*, 11(6), 435-450 (2001)
- Raffo, V., Bliss, T., y otros tres autores, Case study: The Argentina Road Safety Project: lessons learned for the decade of action for road safety, 2011–2020, <https://doi.org/10.1177/1757975913502690>, *Global Health Promotion*, 20(4_suppl), 20-36 (2013)
- Rodríguez-López, C., Villa-González, E., y otros cuatro autores, Los factores familiares influyen en el desplazamiento activo al colegio de los niños españoles, <https://doi.org/10.3305/nh.2013.28.3.6399>, *Nutrición Hospitalaria*, 28(3), 756-763 (2013)
- Roy, B., *Multicriteria methodology for decision aiding*, 1a Ed., Springer Science & Business Media, ISBN 978-1-4419-4761-1, Boston, USA (1996)
- Ruiz-Padillo, A., Pasqual, F.M., Uriarte, A.M.L., y Cybis, H.B.B., Application of multi-criteria decision analysis methods for assessing walkability: A case study in Porto Alegre, Brazil, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.07.016>, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 63, 855-871 (2018)
- Secretaría de Transporte, Encuesta de Movilidad Domiciliaria (ENMODO) AMBA 2009-2010. Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Transporte, Proyecto de Transporte Urbano de Buenos Aires (PTUBA), <https://www.argentina.gob.ar/transporte/dgppse/publicaciones/encuestas> (2011)
- Simon, H.A, *Reason in Human Affairs*, 1a Ed., Stanford University Press, ISBN 978-0-8047-1848-6, California, USA (1982)
- Sonone, S., Balamohan, N., Multicriteria Approach in Developing Pedestrian Network Data for Sustainable Urban Mobility, <https://doi.org/10.29117/cic.2023.0134>, *Proceedings of the International Conference on Civil Infrastructure and Construction (CIC)*, 2023(1), 1069–1076 (2023)
- Stewart, O., Findings from Research on Active Transportation to School and Implications for Safe Routes to School Programs, <https://doi.org/10.1177/0885412210385911>, *Journal of Planning Literature*, 26(2), 127-150 (2011)
- von Stülpnagel, R., Riach, N., y otros tres autores, School route safety perceptions of primary school children and their parents: Effects of transportation mode and infrastructure, <https://doi.org/10.1080/15568318.2024.2350992>, *International Journal of Sustainable Transportation*, 18(6), 465–477 (2024)
- Zuluaga, J.D., Escobar, D.A., y Moncada, C.A., Aplicación de la predicción espacial para el mejoramiento de la cobertura del sistema de bicicletas compartidas en Manizales, Colombia, <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642021000400121>, *Información Tecnológica*, 32(4), 121-132 (2021)

Página en blanco