

Quantifying Urban Barrier Effects Using Mobility Data: The Case of the Sarmiento Railway in Buenos Aires

Manuel Graña¹, Paula Mascías², Inés Caridi¹

¹Instituto de Cálculo, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,
Universidad de Buenos Aires, CONICET, Buenos Aires, Argentina

²Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO),
Buenos Aires, Argentina

manuelgrana@ic.fcen.uba.ar

Abstract. Urban infrastructures such as railways, highways, and major avenues may act as physical barriers that shape mobility patterns within cities. Quantifying their impact is important for understanding urban accessibility and spatial segregation. In this work we analyze whether the Sarmiento railway line acts as an urban barrier affecting school mobility in Buenos Aires. Using large-scale smart card data from the public transport system, we reconstruct origin–destination trajectories of primary school students and evaluate which of them cross the railway. To evaluate the barrier effect, we adapt the *Barrier Score*, inspired by the proposal of Aiello et al. (Aiello et al., 2025), which compares the observed number of crossings with those expected under a spatial null model that preserves the distribution of travel distances. The null model is implemented through simulation by randomly reallocating destinations while maintaining distance constraints. Results show that the Sarmiento railway presents a larger relative deficit of estimated crossings than the other infrastructures analyzed under the spatial null model, as well as directional asymmetries in crossing patterns. The proposed approach combines mobility data, network-based trajectory reconstruction, and simulation-based null models to provide a quantitative framework for measuring the impact of urban infrastructures on mobility.

Keywords: urban mobility; spatial barriers; smart card data; urban barriers; urban networks.

Cuantificando el efecto barrera de infraestructuras urbanas mediante datos de movilidad: el caso del tren Sarmiento en Buenos Aires

Resumen. Las infraestructuras urbanas como vías férreas, autopistas o grandes avenidas pueden actuar como barreras físicas que condicionan los patrones de movilidad dentro de las ciudades. Cuantificar su impacto resulta fundamental para comprender problemas de accesibilidad urbana y segregación espacial. En este trabajo se analiza el efecto de la línea ferroviaria del tren Sarmiento sobre la movilidad escolar de alumnos de escuelas públicas en la Ciudad de Buenos Aires utilizando datos masivos de la tarjeta de transporte público SUBE. A partir de estos datos se reconstruyen trayectorias origen-destino de estudiantes de nivel primario que viajan en transporte público y se evalúa si el ferrocarril actúa como barrera comparando los cruces observados con aquellos esperados bajo un modelo nulo espacial que preserva la distribución de distancias de viaje. Para ello se

introduce una métrica denominada *Barrier Score*, inspirada en la propuesta de Aiello et al. (Aiello et al., 2025), que tiene en cuenta la diferencia relativa entre cruces esperados bajo el modelo nulo con los observados en la realidad. Para el conjunto de datos usado, correspondientes a un día de 2019, considerando sólo los viajes en transporte público, y en base a los supuestos del modelo nulo considerado, los resultados muestran que la línea Sarmiento presenta menos cruces relativos estimados que el de las demás infraestructuras analizadas, así como asimetrías direccionales en los patrones de cruce. La metodología propuesta combina datos de movilidad, reconstrucción de trayectorias en redes urbanas y modelos nulos basados en simulaciones.

Palabras clave: movilidad urbana; barreras espaciales; barreras urbanas; datos SUBE; redes urbanas.

1. Introducción

En las ciudades, diversas infraestructuras como vías férreas, autopistas o grandes avenidas pueden actuar como barreras físicas que afectan la movilidad de las personas y condicionan el acceso a recursos fundamentales y oportunidades. En particular, estas barreras pueden contribuir a la fragmentación del espacio urbano y a la generación de desigualdades en el acceso a servicios como la educación.

En los últimos años, el creciente acceso a datos masivos de movilidad, como los provenientes de tarjetas inteligentes de transporte público, ha abierto nuevas posibilidades para estudiar de manera cuantitativa los patrones de desplazamiento en las ciudades. Estos datos permiten reconstruir trayectorias y analizar cómo las personas interactúan con la estructura urbana, proporcionando una base empírica para evaluar el impacto de las infraestructuras sobre la movilidad.

En el Área Metropolitana de Buenos Aires, la movilidad escolar constituye una dimensión relevante de la vida cotidiana de niños, niñas y adolescentes y de las estrategias familiares de cuidado. Estudios previos han analizado los recorridos escolares, los modos de transporte utilizados y las condiciones de accesibilidad a centros educativos a partir de datos de movilidad, mostrando la importancia de considerar las desigualdades territoriales y sociales (Pautassi, 2017; Neri et al., 2020).

Asimismo, diferentes trabajos centrados en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires han mostrado que la distribución territorial de la oferta educativa, las características socioeconómicas de la población y la segmentación entre establecimientos contribuyen a construir escenarios educativos diferentes dentro de la ciudad (Di Pietro et al., 2014; Abelenda et al., 2016; Susini et al., 2021). Estos antecedentes permiten pensar la movilidad escolar en un contexto más amplio de desigualdades socioespaciales, en el que las infraestructuras urbanas son uno más de los elementos que pueden incidir sobre los patrones de acceso a la educación.

En este contexto, surge la necesidad de contar con métricas que permitan cuantificar el efecto de una infraestructura como barrera. Si bien existen estudios que analizan la segregación urbana y la accesibilidad a servicios y oportunidades de la ciudad, aún es limitado el desarrollo de herramientas que evalúen de manera explícita el efecto de barreras físicas específicas sobre los flujos de movilidad (Sousa & Nicosia, 2022; Neira et

al., 2024; Aiello et al., 2025). Y aún menos explorado el desarrollo de estas herramientas sobre los flujos cotidianos de movilidad escolar en ciudades latinoamericanas.

En este trabajo se analiza el caso del ferrocarril Sarmiento en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires como posible barrera urbana que afecta la movilidad escolar. Para ello, se utilizan datos de la tarjeta SUBE (Banco Interamericano de Desarrollo, 2025; Gonzalez & Anapolsky, 2025) y se reconstruyen trayectorias origen-destino de estudiantes de nivel primario en transporte público, en base a los datos disponibles de un día del año 2019. Se propone una métrica denominada *Barrier Score*, basada en el trabajo de Aiello et al. (Aiello et al., 2025), quienes analizan cómo las autopistas urbanas de ciudades de EEUU actúan como barreras para los lazos sociales. En este trabajo, los autores estudian cómo las autopistas urbanas actúan como barreras para los vínculos sociales utilizando una red social geolocalizada de individuos que se siguen mutuamente en Twitter. En el trabajo, los autores cuentan cuántos vínculos sociales unen personas que viven a un lado y al otro de una autopista y luego lo comparan con la cantidad de cruces esperados en un modelo nulo espacial para estimar el efecto barrera de la infraestructura.

Nuestros resultados muestran que, para los datos de un día de 2019, y teniendo en cuenta los viajes en transporte público registrados ese día para los que se pudieron reconstruir las trayectorias, y considerando los supuestos del modelo nulo introducido, el ferrocarril Sarmiento presenta una diferencia relativa entre los cruces estimados y los esperados. Esta diferencia es mayor que la correspondiente a las demás infraestructuras analizadas. Asimismo, se observan marcadas asimetrías direccionales y valores aún mayores fuera de su tramo más céntrico, es decir, hacia la Provincia de Buenos Aires.

2. Datos

Los datos de movilidad utilizados en este trabajo provienen del sistema SUBE (Sistema Único de Boleto Electrónico), una plataforma de alcance nacional que registra viajes realizados en transporte público en Argentina. En este estudio no trabajamos con la totalidad de esos registros, sino con un conjunto de datos públicos ya procesado y restringido al Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA), correspondiente a un día hábil representativo de noviembre de 2019. La base empleada contiene 14.922.654 transacciones y fue publicada en el marco del proyecto de *Matriz Origen-Destino de transporte público* desarrollado por Anapolsky y Gonzalez en el marco de un proyecto del Banco Interamericano de Desarrollo (Banco Interamericano de Desarrollo, 2025; Gonzalez & Anapolsky, 2025).

Cada registro de la base representa una validación de la tarjeta SUBE en un medio de transporte público, e incluye información relevante como el identificador anonimizado del usuario de la tarjeta, el modo de transporte (colectivo, tren o subte), la hora de la transacción (sin minutos) y la ubicación geográfica asociada. En la versión pública utilizada en este trabajo, los datos ya se encuentran previamente anonimizados y agregados espacial y temporalmente, siguiendo el preprocesamiento documentado en la fuente original (Banco Interamericano de Desarrollo, 2025; Gonzalez & Anapolsky, 2025). En consecuencia, no es posible identificar individuos ni reconstruir trayectorias exactas con precisión absoluta.

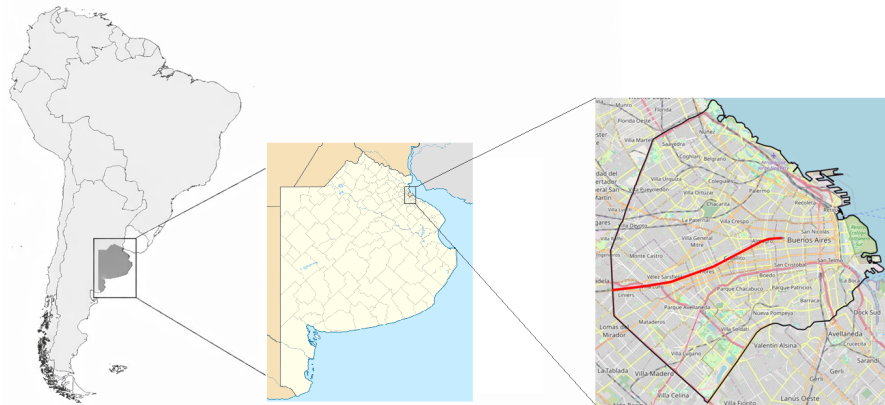


Figura 1: Área de estudio. A la izquierda, ubicación de Argentina en América Latina; en el centro, localización de la Provincia de Buenos Aires y de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA); a la derecha, detalle de la CABA. La línea roja indica la traza del ferrocarril Sarmiento dentro del área analizada.

3. Reconstrucción de trayectorias

El análisis del efecto barrera de una infraestructura requiere identificar de manera precisa qué trayectorias la cruzan. Para ello, es necesario reconstruir los desplazamientos origen-destino de los individuos a partir de los datos de transacciones disponibles.

A partir de la base de datos descripta, realizamos un preprocesamiento orientado a reconstruir trayectorias escolares en transporte público. En primer lugar, filtramos las transacciones correspondientes a estudiantes de nivel primario, la base de datos cuenta con una columna que permite identificar distintos viajes subsidiados, entre ellos, los de estos estudiantes. Luego, agrupamos los viajes por tarjeta anonimizada y los ordenamos cronológicamente para inferir pares origen-destino. Para inferir el destino escolar, analizamos la secuencia inicial de viajes de cada tarjeta y consideramos que varios viajes consecutivos forman parte de un mismo desplazamiento de ida si ocurren en la misma hora o, como máximo, una hora después del viaje anterior. Esta regla busca capturar posibles combinaciones y transbordos dentro del trayecto hacia la escuela, teniendo en cuenta que la base pública no incluye minutos exactos, sino únicamente la hora de cada validación. Por ejemplo, si una tarjeta registra validaciones a las 7, 8 y 12 horas, interpretamos que las dos primeras forman parte del desplazamiento de ida y que la validación de las 12 horas representa el inicio del viaje de vuelta por lo que aproxima la localización de la escuela. Identificamos este origen/destino como una localización aproximada de la vivienda/escuela de cada estudiante, y a partir de esos pares reconstruimos las trayectorias utilizadas en el análisis. Mediante este procedimiento obtuvimos 5.425 trayectorias reconstruidas, que asumimos se parecen a trayectorias casa-escuela y constituyen la base del análisis posterior.

Es importante destacar que los datos usados implica ciertas limitaciones. En particular, la base registra validaciones realizadas en el sistema de transporte público, pero no

contiene los recorridos efectivos seguidos por cada línea de colectivo, tren o subte, ni los tiempos exactos de viaje o de transbordo. Asimismo, quedan excluidos de este análisis los viajes realizados a pie, en bicicleta o en transporte privado, como automóviles particulares, combis o micros escolares.

Por otro lado, la reconstrucción de los pares origen-destino se basa en supuestos sobre los patrones de movilidad diaria. En particular, se asume que la ubicación de la primera validación registrada para cada tarjeta aproxima el lugar de residencia del estudiante. Luego, las validaciones consecutivas que ocurren en la misma hora o, como máximo, una hora después de la anterior se consideran parte del mismo desplazamiento de ida, incluyendo posibles combinaciones o transbordos. La primera validación que ocurre luego de una interrupción mayor se interpreta como el inicio del viaje de regreso y su ubicación aproxima la localización de la escuela.

Por este motivo, las localizaciones inferidas son aproximaciones de la vivienda y de la escuela de cada estudiante, y no registros exactos de trayectorias individuales. Las trayectorias empleadas posteriormente en el análisis corresponden a caminos mínimos sobre la red vial entre esos orígenes y destinos inferidos; por lo que no representan necesariamente los recorridos realizados realmente por las líneas de transporte público. Para reconstruir estas trayectorias utilizamos la biblioteca OSMnx (Boeing, 2017), que permite descargar y modelar la red vial urbana a partir de datos de OpenStreetMap. En esta representación, la red se construye como un grafo dirigido en el que los nodos corresponden a intersecciones o puntos de conexión, y las aristas representan segmentos de calle con pesos asociados a la distancia recorrida. El objetivo de esta reconstrucción no es reproducir el itinerario real de cada vehículo, sino obtener una representación espacial aproximada de los pares origen-destino observados que permita evaluar, si la trayectoria estimada, aproximada al camino mínimo entre dos puntos considerados origen y destino, atraviesa una infraestructura determinada.

Esta simplificación es particularmente relevante en el caso de la traza ferroviaria. Los recorridos reales del transporte público están condicionados por la disponibilidad de pasos a nivel, puentes, túneles, frecuencias y trazados específicos de las líneas, mientras que los caminos mínimos se calculan sobre una red vial idealizada. En consecuencia, los cruces identificados en este trabajo son cruces estimados para trayectorias reconstruidas a partir de pares origen-destino observados, y no registros directos de cruces físicos realizados. Es importante mencionar que se usó el mismo procedimiento de reconstrucción tanto para las trayectorias observadas como para las simuladas en el modelo nulo, para que la comparación de ambos escenarios sea consistente.

Una vez reconstruidas las trayectorias, se identifican aquellas cuya geometría estimada atraviesa la infraestructura de interés. En este caso, se considera la traza del ferrocarril Sarmiento como una línea geográfica que divide el espacio urbano. Una trayectoria se clasifica como transversal cuando el camino mínimo estimado entre su origen y destino inferidos atraviesa dicha traza. Este procedimiento permite contabilizar los cruces estimados de la infraestructura para los pares origen-destino observados y constituye la base para el cálculo del efecto barrera en las secciones posteriores.

$$BS = \frac{E - O}{O}, \quad (1)$$

donde O representa el número de cruces estimados para los pares origen–destino observados y E corresponde al número medio de cruces esperados bajo el modelo nulo.

El *Barrier Score* puede interpretarse como el déficit relativo de cruces observados con respecto a los que se esperarían al reasignar los destinos bajo las restricciones espaciales definidas en el modelo. Valores positivos indican que se observan menos cruces que los esperados bajo ese escenario de referencia, mientras que valores cercanos a cero sugieren una diferencia limitada entre los patrones observados y los simulados. En este sentido, valores positivos constituyen evidencia compatible con un efecto barrera, pero deben interpretarse junto con otros factores que también estructuran la movilidad escolar.

4.2. Modelo nulo espacial

El cálculo del número esperado de cruces E requiere definir un modelo nulo que funcione como escenario de referencia para comparar los patrones observados. En este trabajo se utiliza un modelo nulo espacialmente restringido que preserva la distribución de distancias de viaje y conserva los conjuntos de orígenes y destinos observados. De este modo, se mantiene la estructura espacial agregada de las localizaciones residenciales y escolares presentes en los datos.

El modelo no pretende reproducir el proceso real mediante el cual cada estudiante accedió a una escuela determinada. Aunque conserva el conjunto total de destinos observados y las restricciones de distancia, no modela los criterios administrativos de asignación, las preferencias de las familias ni otros mecanismos que intervienen en la movilidad escolar. Por ello, la reasignación aleatoria de destinos debe interpretarse como un escenario de referencia para comparar patrones de cruce, y no como una representación completa del sistema de elección y asignación escolar.

El modelo se implementa mediante simulaciones computacionales a través de las siguientes etapas:

- Para cada trayectoria observada, se mantiene fijo el origen.
- Los destinos posibles corresponden al mismo conjunto de destinos observados en los datos, de modo que el modelo nulo conserva la distribución espacial de los destinos escolares observados.
- Para cada origen, identificamos primero el bin de distancia al que pertenece su destino observado. Luego, consideramos como destinos candidatos aquellos cuya distancia desde el origen cae en ese mismo bin o en uno inmediatamente adyacente, y seleccionamos aleatoriamente uno de ellos.
- Se reconstruye la trayectoria entre el origen y el nuevo destino utilizando el camino más corto sobre la red vial. Una vez asignado, ese destino se elimina del conjunto de candidatos disponibles para los demás orígenes, de modo que cada destino pueda ser seleccionado a lo sumo una vez en cada realización del modelo nulo.
- Se evalúa si la nueva trayectoria cruza o no la infraestructura.

Este procedimiento se repite para todas las trayectorias del conjunto de datos y se generan diferentes realizaciones del modelo nulo. En este estudio se utilizaron 20 realizaciones independientes, y el valor esperado de cruces E se calcula como el promedio sobre dichas realizaciones.

El modelo nulo permite construir un escenario de comparación en el cual se mantiene fijo el origen de cada viaje, se conserva el conjunto total de destinos observados y se preserva aproximadamente la distribución de distancias de viaje, mientras que la asignación específica entre orígenes y destinos se aleatoriza dentro de esas restricciones. Al utilizar cada destino a lo sumo una vez en cada realización, también se conserva su multiplicidad dentro del conjunto de datos analizado.

En consecuencia, el modelo permite evaluar cuántos cruces se esperarían si los pares origen-destino observados se reorganizaran aleatoriamente bajo estas restricciones espaciales. La diferencia entre los cruces observados y esperados no debe interpretarse como el efecto causal aislado de la infraestructura, sino como una medida de la asociación entre la presencia de la barrera y una menor cantidad de cruces que la esperable en el escenario nulo definido.

4.3. Extensión del modelo: Barrier Score direccional

Además del *Barrier Score* global, consideramos una extensión que permite caracterizar con mayor detalle el efecto barrera diferenciando los dos posibles sentidos de los cruces. En particular, calculamos un *Barrier Score* direccional para cada una de las dos direcciones posibles de cruce de la infraestructura (por ejemplo, Norte→Sur y Sur→Norte para el caso del tren Sarmiento que en el contexto de la ciudad, separa Norte-Sur), comparando en cada caso la cantidad de cruces observados con la cantidad de cruces esperados bajo el modelo nulo.

Esta extensión permite identificar asimetrías en los patrones de movilidad y evaluar si la intensidad del efecto barrera depende de la dirección del desplazamiento, siempre bajo los mismos supuestos que consideran sólo viajes en transporte público de estudiantes de nivel primario (en base a un día de 2019).

5. Resultados

5.1. Cruces observados

A partir de las trayectorias reconstruidas se identificaron aquellas que cruzan la traza del ferrocarril Sarmiento. De las 5.425 trayectorias reconstruidas, 607 cruzan la traza del ferrocarril Sarmiento, lo que representa aproximadamente el 11.2 % del total. En términos descriptivos, esta proporción indica que una fracción relativamente baja de las trayectorias reconstruidas atraviesa la traza ferroviaria. Sin embargo, la magnitud del efecto barrera se evalúa a partir de la comparación con los cruces esperados bajo el modelo nulo espacial, presentada en la sección siguiente.

Asimismo, los cruces no se distribuyen de manera uniforme a lo largo de la traza, sino que se concentran en determinados segmentos de la traza.

5.2. Ferrocarril Sarmiento y otras infraestructuras

El cálculo del *Barrier Score* para distintas infraestructuras urbanas permite contextualizar el efecto del ferrocarril Sarmiento. En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos.

Cuadro 1: Comparación del *Barrier Score* entre distintas infraestructuras urbanas.

Infraestructura	Cruces observados	Cruces esperados	Barrier Score
Tren Sarmiento	607	926.79	0.527
Tren Sarmiento (Caballito–Once)	406	576.58	0.420
Tren Sarmiento (sin Caballito–Once)	211	374.89	0.806
Av. Juan B. Justo	936	943.11	0.008
Autopista Perito Moreno	253	288.68	0.141

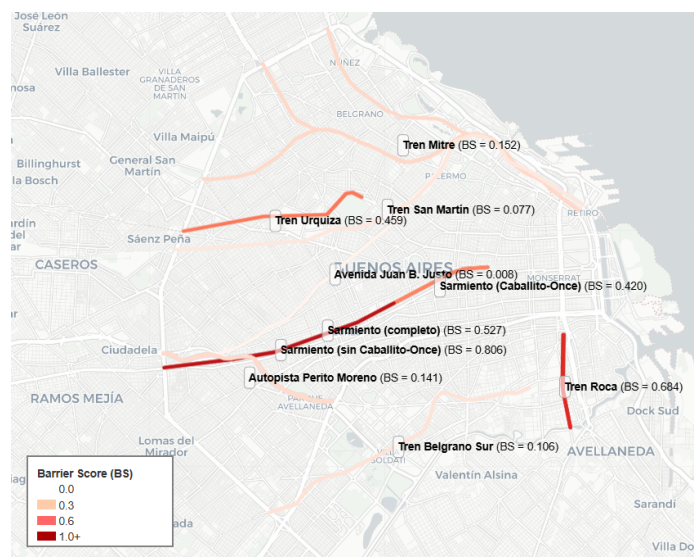


Figura 3: Comparación del Barrier Score entre distintas infraestructuras urbanas.

Los resultados muestran que el tren Sarmiento presenta un valor positivo de *Barrier Score* y sustancialmente mayor que el de las otras infraestructuras analizadas. Esto indica que, bajo el modelo nulo espacial utilizado, se estiman menos cruces para la traza del Sarmiento que los esperados en el escenario de referencia, y que esta diferencia relativa es mayor que la observada para los demás casos considerados. En particular, mientras que infraestructuras como la Av. Juan B. Justo presentan valores cercanos a cero y la Autopista Perito Moreno muestra un efecto moderado, el Sarmiento exhibe un comportamiento cualitativamente distinto, con una menor cantidad relativa de cruces estimados respecto de la esperada bajo el modelo nulo. Sin embargo, este valor agregado se encuentra influido por el tramo Caballito–Once, que corresponde al sector más

céntrico de la traza y concentra una gran cantidad de cruces observados. En ese segmento el *Barrier Score* es menor que en el resto de la línea. Al excluirlo y considerar únicamente los tramos no centrales, el *Barrier Score* aumenta de 0.527 a 0.806, lo que sugiere que fuera de ese tramo central la infraestructura actúa como una barrera aún más marcada para la movilidad escolar. En conjunto, estos resultados indican que no todas las infraestructuras lineales generan efectos comparables y que el ferrocarril Sarmiento constituye la barrera más intensa entre los casos aquí considerados.

5.3. Análisis direccional

Para analizar la direccionalidad de los cruces, clasificamos cada trayectoria transversal según el lado de la vía en el que se ubica su origen y el lado en el que se ubica su destino, distinguiendo así entre cruces Sur→Norte y Norte→Sur.

El análisis de la direccionalidad de los cruces revela una marcada asimetría. La mayoría de los desplazamientos que cruzan el ferrocarril Sarmiento corresponden a trayectorias desde el sur hacia el norte, mientras que los cruces en sentido contrario son considerablemente menores. En términos observados, 472 trayectorias cruzan desde el sur hacia el norte, frente a solo 135 trayectorias en la dirección norte-sur.

El cálculo del *Barrier Score* direccional confirma esta asimetría, pero además muestra que el efecto barrera no es simplemente una cuestión de volumen de cruces, sino también de cuántos cruces se observan en relación con los esperados por el modelo nulo. Para los viajes Sur→Norte se obtiene un valor de $BSD = 0,392$, a partir de 472 cruces observados y 656.95 esperados. En cambio, para los viajes Norte→Sur el valor asciende a $BSD = 0,999$, con 135 cruces observados frente a 269.84 esperados.

En particular, la mayor intensidad del efecto barrera en la dirección Norte→Sur sugiere que la infraestructura no restringe de manera simétrica los desplazamientos escolares. Aunque en términos absolutos se observan más cruces desde el sur hacia el norte, la barrera resulta mucho más intensa para los viajes en sentido norte-sur. En otras palabras, el modelo nulo esperaría casi el doble de cruces Norte→Sur que los efectivamente observados, mientras que la diferencia relativa es considerablemente menor en la dirección opuesta. Este patrón es compatible con una limitación diferencial de los cruces según el lado de origen del viaje, bajo los supuestos de reconstrucción de trayectorias y del modelo nulo considerados en este estudio. Su interpretación requiere considerar también otros factores que estructuran la movilidad escolar. Por ejemplo, otro supuesto que se hace es que la proporción de viajes en transporte público sobre los de otros medios es la misma en la dirección Norte→Sur que en Sur→Norte pero podría ser que la diferencia grande observada en la cantidad de cruces se deba a que en la dirección Norte→Sur sea mas común viajar de otra forma que no sea en transporte publico.

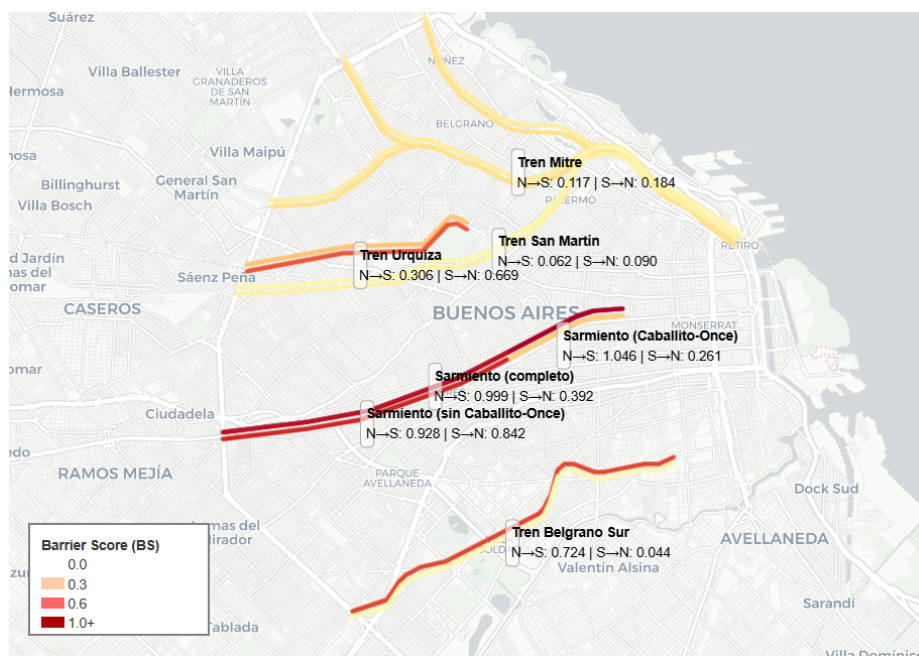


Figura 4: Barrier Score direccional para los cruces del ferrocarril Sarmiento y otras infraestructuras.

6. Discusión

Los resultados indican que, bajo el modelo nulo espacial definido en este trabajo, y en base a los supuestos considerados para reconstruir las trayectorias, el ferrocarril Sarmiento presenta una menor cantidad de cruces estimados que la esperada para los pares origen–destino de estudiantes de nivel primario que utilizaron transporte público durante el día analizado. En comparación con las demás infraestructuras consideradas (trazas de ferrocarril y avenidas de CABA), la diferencia relativa entre los cruces observados y los esperados es mayor para la traza del Sarmiento.

La asimetría observada entre los sentidos Sur→Norte y Norte→Sur en el caso del tren Sarmiento muestra, además, que el patrón de cruces no es homogéneo a ambos lados de la vía. Sin embargo, este resultado no permite atribuir esa diferencia exclusivamente al ferrocarril, ya que la movilidad escolar también se encuentra condicionada por otros factores territoriales, institucionales y sociales. En este sentido, el *Barrier Score* no representa en forma alguna una estimación del efecto aislado del ferrocarril, sino como una medida de la diferencia entre los cruces estimados para los pares origen-destino observados y los esperados bajo el escenario nulo espacialmente restringido.

También es importante mencionar la diferencia entre la información registrada por la base SUBE y las trayectorias utilizadas en el análisis. Los datos permiten inferir localizaciones aproximadas de origen y destino a partir de validaciones realizadas en el transporte público, pero no contienen los recorridos efectivos de las líneas, los tiempos

exactos de viaje, el lugar de finalización de cada viaje ni los transbordos realizados, tal como se señaló en la Sección 3. Por este motivo, los caminos mínimos calculados con OSMnx constituyen una representación espacial homogénea de los pares origen-destino inferidos y no una reconstrucción literal de los recorridos realizados por los estudiantes. Por otro lado, solo se pueden reconstruir las trayectorias cuando el estudiante viaja en transporte público tanto a la ida como a la vuelta, y lo hace mediante una tarjeta SUBE que tiene la categoría estudiante. Esta simplificación puede incidir en la estimación de los cruces, dado que los recorridos reales del transporte público están condicionados, entre otros factores, por la ubicación de los pasos habilitados sobre la vía. No obstante, como la reconstrucción para las trayectorias observadas y las simuladas sigue el mismo criterio, es posible comparar ambos escenarios.

Finalmente, los resultados corresponden a un único día hábil de noviembre de 2019, que es el único conjunto de datos de acceso público con el nivel de detalle requerido para este análisis. Esta limitación impide evaluar variaciones estacionales, climáticas, operativas o asociadas a distintos días de la semana, así como posibles cambios posteriores en la red de transporte o en la dinámica escolar. Por lo tanto, los resultados reflejan una caracterización agregada de los patrones observados en ese día y no una descripción definitiva de la movilidad escolar en la ciudad. La incorporación futura de múltiples días de registros, otros modos de transporte y fuentes complementarias sobre oferta educativa permitiría evaluar la estabilidad de los patrones identificados e incluso su evolución.

7. Conclusiones

En este trabajo se presentó una metodología para cuantificar el efecto barrera de infraestructuras urbanas a partir de datos masivos de movilidad, reconstrucción de trayectorias y modelos nulos espaciales. Aplicada a los pares origen-destino inferidos para estudiantes de nivel primario que utilizaron transporte público durante un día hábil de noviembre de 2019, y considerando válidos los supuestos para reconstruir sus trayectorias, la metodología permite comparar la cantidad de cruces estimados de distintas infraestructuras con la cantidad esperada bajo un escenario de referencia que mantiene algunos parámetros de las trayectorias reales.

Los resultados muestran que el ferrocarril Sarmiento presenta un déficit relativo de cruces estimados mayor que el observado para las demás infraestructuras analizadas. Asimismo, el análisis direccional revela diferencias entre los cruces Sur→Norte y Norte→Sur. Estos patrones son compatibles con la existencia de un efecto barrera asociado a la traza ferroviaria, dentro de los supuestos del modelo y del conjunto de datos considerado.

Las limitaciones del trabajo en parte se deben a la utilización de registros correspondientes a un único día, a la consideración exclusiva de viajes en transporte público y por el uso de caminos mínimos sobre la red vial como aproximación a las trayectorias reales. Futuras investigaciones podrían incorporar, si fuera posible, múltiples días de observación, otros modos de transporte, información más detallada sobre recorridos efectivos y fuentes complementarias sobre la oferta educativa y los mecanismos de asignación escolar. Estas extensiones permitirían evaluar la estabilidad de los patrones

identificados y profundizar el análisis de la relación entre infraestructura, movilidad y desigualdad urbana.

Referencias

- Di Pietro, S., Tófaló, A., Medela, P., & Pitton, E. (2014). La oferta de educación primaria y la trayectoria de los estudiantes en la Ciudad de Buenos Aires: logros de la última década y persistencia de desigualdades. *Población de Buenos Aires*, 11(19), 7-27.
- Abelenda, N., Canevari, J., & Montes, N. (2016). Territorios de mayor vulnerabilidad social en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires: recorrido en perspectiva histórica sobre aspectos estructurales no resueltos. *Población de Buenos Aires*, 13(23), 7-30.
- Boeing, G. (2017). OSMnx: New methods for acquiring, constructing, analyzing, and visualizing complex street networks. *Computers, Environment and Urban Systems*, 65, 126-139. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004>
- Pautassi, L. (2017). Movilidades invisibles: recorridos escolares en la región metropolitana de Buenos Aires. En M. N. Rico & O. Segovia (Eds.), *¿Quién cuida en la ciudad? Aportes para políticas urbanas de igualdad* (pp. 433-457). Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Neri, N. V., Galeota, C., & Capelli, L. (2020). La utilización de las encuestas de movilidad domiciliaria para un análisis de accesibilidad: aplicación para el caso de acceso a centros educativos en el Área Metropolitana de Buenos Aires. *Revista Transporte y Territorio*, (23), 71-81. <https://doi.org/10.34096/rtt.i23.9657>
- Susini, S., Macció, J., & Falcone, J. (2021). Hacia la construcción de un mapa socio-educativo de la Ciudad de Buenos Aires: un ejercicio a partir del análisis territorial del ISSAP. *Población de Buenos Aires*, 18(30), 34-49. <https://repositorio.uca.edu.ar/handle/123456789/14519>
- Sousa, S., & Nicosia, V. (2022). Quantifying ethnic segregation in cities through random walks. *Nature Communications*, 13(1), 5809. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-33344-3>
- Neira, M., Molinero, C., Marshall, S., & Arcaute, E. (2024). Urban segregation on multilayered transport networks: A random walk approach. *Scientific Reports*, 14, 8370. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58932-9>
- Aiello, L. M., Vybornova, A., Juhász, S., Szell, M., & Bokányi, E. (2025). Urban highways are barriers to social ties. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 122(10), e2408937122. <https://doi.org/10.1073/pnas.2408937122>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2025). Matriz Origen-Destino Transporte Público. <https://github.com/EL-BID/Matriz-Origen-Destino-Transporte-Publico>
- Gonzalez, F., & Anapolsky, S. (2025). *Identificando la desigualdad en los patrones de movilidad en transporte público* (J. Abad & C. Moleres, Eds.) [Editorial y lugar de publicación no especificados].