

Guía para la Evaluación Integral de Proyectos de Ciclovías e Impacto en Emisiones de GEI

Juan de Dios Ortúzar

Escuela de Ingeniería, Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI)
Pontificia Universidad Católica de Chile

Santiago, Mayo de 2026

*Este trabajo se desarrolló en el marco de la Comunidad de Práctica SoMos LAC de Movilidad Sostenible, del programa Euroclima, implementada por la GIZ.
Se agradece el valioso apoyo de Francisco Frésard en la elaboración de las planillas de cálculo diseñadas para ilustrar los ejemplos de aplicación y en la revisión de la información correspondiente a emisiones de GEI.*

Implementado por

Tabla de Contenidos

1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE MÉTODOS PARA ESTIMAR DEMANDA CICLISTA Y VARIACIÓN DE EMISIONES DE GEI.....	2
2.1 INTRODUCCIÓN.....	2
2.2 MÉTODOS PARA ESTIMAR LA DEMANDA CICLISTA	2
2.2.1 Modelos de demanda directa	2
2.2.2 Modelos de elección discreta.....	3
2.2.3 Modelos integrados de transporte urbano.....	3
2.2.4 Modelos de accesibilidad y potencial ciclista.....	4
2.2.5 Herramientas de evaluación desarrolladas por gobiernos.....	4
2.3 MÉTODOS PARA ESTIMAR VARIACIÓN DE EMISIONES DE GEI.....	4
2.3.1 Enfoque basado en cambio modal y vehículos-kilómetro evitados.....	4
2.3.2 Factores de emisión y metodologías de inventarios	5
2.3.3 Herramientas complementarias para evaluación de beneficios	5
2.4 MARCO METODOLÓGICO ADOPTADO PARA ESTA GUÍA.....	6
2.5 VACÍOS METODOLÓGICOS IDENTIFICADOS EN LA LITERATURA.....	6
3. MÉTODOS PARA ESTIMAR DEMANDA EN PROYECTOS DE CICLOVÍAS	8
3.1 INTRODUCCIÓN.....	8
3.1.1 Alcance y contexto de aplicación.....	8
3.1.2 Principios metodológicos generales	9
3.2 DEMANDA ASOCIADA A PROYECTOS DE CICLOVÍAS.....	9
3.2.1 Area de influencia del proyecto	9
3.2.2 Variables necesarias para estimar la demanda.....	10
3.3 MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE DEMANDA CICLISTA	10
3.3.1 Método 1: Estimación de demanda para proyectos de ciclovías en ciudades sin red ciclista significativa	10
3.3.2 Método 2: Estimación de Demanda para Proyectos de Ciclovías Mediante Modelos de Elección Modal.....	15
3.3.3 Método 3: Estimación de Demanda de Ciclovías usando Modelos Estratégicos de Transporte..	29
4. ESTIMACIÓN DE LA VARIACIÓN DE EMISIONES DE GEI ASOCIADAS A PROYECTOS DE CICLOVÍAS.....	35
4.1 INTRODUCCIÓN.....	35
4.2 PRINCIPIO GENERAL DE ESTIMACIÓN	35
4.3 DEFINICIÓN DEL SISTEMA PARA CUANTIFICAR EMISIONES.....	36
4.3.1 Emisiones operacionales del transporte	36
4.3.2 Justificación del uso de CO ₂ e	37
4.4 FACTORES DE EMISIÓN DE REFERENCIA	38
4.4.1 Automóviles.....	40
4.4.2 Transporte público.....	40
4.4.3 Modos de transporte activo.....	40
4.5 ESTIMACIÓN DE LA REDUCCIÓN DE EMISIONES	41
4.6 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	42
4.7 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	43
4.7.1 Escenarios determinísticos	43
4.7.2 Recomendaciones operativas para el análisis de sensibilidad	43
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

1. Introducción

El transporte urbano es uno de los principales determinantes de la calidad de vida en ciudades contemporáneas. En América Latina, el crecimiento acelerado del parque automotriz y la expansión urbana han generado desafíos significativos en términos de congestión, contaminación atmosférica y emisiones contaminantes, en particular, gases de efecto invernadero (GEI). Frente a estos desafíos, diversos gobiernos y organismos internacionales han comenzado a promover estrategias de movilidad urbana sostenible que buscan reducir la dependencia del automóvil y fomentar modos de transporte más eficientes y menos contaminantes. Dentro de estas estrategias, la bicicleta ha adquirido creciente relevancia como modo de transporte urbano. La movilidad ciclista ofrece múltiples beneficios sociales, incluyendo: mejoras en la salud, reducción de emisiones contaminantes y ampliación del acceso a oportunidades urbanas para distintos grupos de la población.

En los últimos años, numerosas ciudades del mundo han desarrollado políticas ambiciosas para promover el uso de la bicicleta, incluyendo la expansión de redes de ciclovías, la implementación de sistemas de bicicletas compartidas y la integración de la bicicleta con el sistema de transporte público. El desarrollo de nueva infraestructura ciclista requiere herramientas analíticas que permitan evaluar adecuadamente la demanda potencial, los beneficios y la rentabilidad social de las inversiones propuestas.

Esta Guía ha sido desarrollada con el propósito de contribuir al fortalecimiento de las capacidades técnicas necesarias para planificar y evaluar proyectos de infraestructura ciclista en el contexto de América Latina. El documento integra enfoques provenientes de la economía de transporte, la planificación urbana y la evaluación de proyectos de inversión pública. La Guía está dirigido principalmente a autoridades públicas responsables del diseño e implementación de políticas de transporte, organismos multilaterales de financiamiento y consultores técnicos involucrados en la formulación y evaluación de proyectos. Se espera que las herramientas metodológicas presentadas contribuyan a mejorar la calidad de las decisiones de inversión en movilidad urbana y a promover sistemas de transporte más sostenibles y equitativos en la región.

2. Revisión de Métodos para Estimar Demanda Ciclista y Variación de Emisiones de GEI

2.1 Introducción

El desarrollo de infraestructura ciclista se ha consolidado en las últimas décadas como una estrategia relevante para promover sistemas de transporte urbano más sostenibles. Diversos organismos internacionales han destacado el papel de la movilidad activa en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la mejora de la salud pública y el aumento de la accesibilidad urbana (IPCC, 2022; UNEP, 2016). En particular, se ha destacado que el reemplazo de viajes motorizados por viajes en bicicleta puede contribuir, en forma muy efectiva, a reducir las emisiones del sector transporte, que es una de las principales fuentes de emisiones en áreas urbanas (EC, 2023).

La estimación rigurosa de los beneficios ambientales asociados a proyectos de infraestructura ciclista requiere cuantificar dos elementos fundamentales. En primer lugar, es necesario estimar la demanda por viajes en bicicleta inducida o captada por el proyecto analizado. En segundo lugar, se requiere identificar el modo de transporte previamente utilizado por los usuarios que adoptan la bicicleta. Este segundo aspecto es particularmente relevante, dado que las reducciones de emisiones dependen directamente del volumen de viajes motorizados sustituidos (Litman, 2023).

La literatura internacional muestra que los métodos utilizados para estimar la demanda por viajes en bicicleta y sus beneficios ambientales asociados, se han desarrollado en distintos contextos analíticos y con diferentes objetivos. En muchos casos, los enfoques usados para estimar la demanda generada por la introducción de nueva infraestructura ciclista y los métodos aplicados para estimar las emisiones evitadas que produciría el proyecto se han efectuado de manera relativamente independiente. En consecuencia, uno de los desafíos principales en la preparación de esta Guía consiste en integrar ambos enfoques en un marco metodológico coherente, que permita estimar de forma consistente el impacto ambiental de proyectos ciclistas.

Esta sección revisa brevemente las principales metodologías utilizadas internacionalmente para estimar el impacto modal de proyectos de infraestructura ciclista y la variación de emisiones de GEI asociadas a dichos proyectos. El objetivo de la revisión no es realizar un inventario exhaustivo de la literatura existente, sino identificar los enfoques metodológicos más relevantes y extraer de ellos elementos útiles para el desarrollo de la Guía.

2.2 Métodos para Estimar la Demanda Ciclista

2.2.1 Modelos de demanda directa

Una primera familia de métodos ampliamente utilizada en la planificación de infraestructura ciclista son los denominados *modelos de demanda directa*. Estos modelos estiman el volumen futuro de viajes en bicicleta en un corredor o área específica, como función de variables urbanas observables, tales como densidad poblacional, conectividad de la red vial, uso del suelo, características socioeconómicas y atributos de la infraestructura ciclista (Aoun *et al.*, 2015). Estos métodos han sido incorporados en diversas herramientas de planificación

desarrolladas en Estados Unidos y Europa, diseñadas para estimar el uso potencial de infraestructura ciclista en función de características del entorno construido.

Una ventaja importante de los modelos de demanda directa es que pueden aplicarse incluso en contextos donde no existe buena información ni modelos de transporte urbano disponibles. Además, suelen requerir cantidades relativamente moderadas de datos, lo que facilita su aplicación en procesos de planificación preliminar o en ciudades con capacidades analíticas limitadas. Sin embargo, presentan limitaciones importantes desde el punto de vista del análisis ambiental. En particular, aunque permiten estimar en forma aproximada el número total de ciclistas que utilizaría una infraestructura determinada, no permiten identificar con precisión el modo de transporte desde el cual provendrían esos viajes. En consecuencia, su aplicación directa para estimar reducciones de emisiones de GEI es bastante limitada, salvo que se complementen con supuestos adicionales sobre cambio modal.

2.2.2 Modelos de elección discreta

Una segunda familia de métodos considera a los modelos de elección discreta, ampliamente utilizados en ingeniería y economía de transporte para analizar decisiones modales individuales (Ortúzar & Willumsen, 2024, Caps. 7 y 8; Train, 2009). En este enfoque, la elección del modo de transporte se modela como una función de la utilidad asociada a cada alternativa disponible. De esta forma, es posible estimar la probabilidad de que un individuo elija la bicicleta - en lugar de otros modos de transporte - considerando variables tales como tiempo de viaje, seguridad, pendiente del terreno, distancia del viaje, presencia de infraestructura ciclista y características socioeconómicas del usuario.

Un ejemplo pionero de este enfoque es el estudio desarrollado por Ortúzar *et al.* (2000), que utilizó una combinación de datos de preferencias reveladas y preferencias declaradas para estimar la demanda potencial de una red de ciclovías en Santiago de Chile. Este estudio mostró que mejoras significativas en la calidad y seguridad de la infraestructura ciclista podían aumentar sustancialmente la participación modal de la bicicleta. Otro estudio, muy reciente, utilizó este enfoque en conjunto con datos censales e información derivada de la plataforma *OpenStreetMap* (<https://www.openstreetmap.org>) para estimar un modelo binario de elección de bicicleta para toda Francia (Alimo *et al.*, 2026).

La principal ventaja de estos modelos es que permiten estimar explícitamente el cambio modal asociado a mejoras en la infraestructura ciclista. Esto los convierte en herramientas particularmente adecuadas para analizar los impactos ambientales de proyectos ciclistas, dado que permiten identificar con cierta precisión el modo de transporte desplazado por el uso de la bicicleta. Sin embargo, requieren datos relativamente detallados y capacidad analítica para su estimación, lo que puede limitar su aplicación en algunos contextos.

2.2.3 Modelos integrados de transporte urbano

Una tercera familia de métodos considera los modelos integrados de transporte urbano, que incorporan la bicicleta como un modo adicional dentro de modelos de demanda multimodal. Este tipo de modelos suele seguir el enfoque clásico de cinco etapas utilizado en planificación estratégica de transporte: generación de viajes, distribución, elección de horario, partición modal y asignación de rutas (Ortúzar & Willumsen, 2024). En ciudades donde existen modelos de transporte urbano consolidados, es posible incorporar la infraestructura ciclista

dentro de la red de transporte y simular escenarios alternativos para estimar cambios en la demanda de viajes en bicicleta y en la partición modal del sistema de transporte. Un ejemplo interesante en esta línea es el trabajo de Hurtubia *et al.* (2023), que dio lugar a la herramienta *Ciclo-P* (<https://www.ciclo-p.cl/>) utilizada para simular el efecto de cambios en la población, la superficie construida para distintos usos y la presencia de ciclovías, en el número de viajes en bicicleta.

La principal ventaja de este enfoque es que permite analizar de manera consistente los efectos de proyectos ciclistas dentro del sistema de transporte urbano en su conjunto. Además, estos modelos pueden ser más adecuados para evaluar proyectos que forman parte de redes ciclistas más amplias, donde la conectividad de la red puede desempeñar un papel importante en la generación de demanda. No obstante, la aplicación de este tipo de modelos requiere una infraestructura analítica compleja y datos detallados sobre el sistema de transporte urbano, lo que limita su aplicabilidad en muchos contextos.

2.2.4 Modelos de accesibilidad y potencial ciclista

En años recientes se han desarrollado enfoques basados en la accesibilidad, que estiman el potencial de uso de la bicicleta entre zonas urbanas considerando variables como distancia, pendiente, conectividad de la red y características socioeconómicas de la población. Un ejemplo destacado es el *Propensity to Cycle Tool*, desarrollado en el Reino Unido para estimar escenarios de crecimiento del ciclismo a partir de matrices de viajes y variables territoriales (Lovelace *et al.*, 2017). Este tipo de enfoque permite identificar corredores con alto potencial ciclista y analizar escenarios de desarrollo de redes de ciclovías, lo que resulta particularmente útil para planificación estratégica. Sin embargo, los modelos utilizados están orientados principalmente a identificar el potencial de demanda y no necesariamente a estimar con precisión el cambio modal asociado a proyectos específicos.

2.2.5 Herramientas de evaluación desarrolladas por gobiernos

Además de los enfoques descritos anteriormente, diversos gobiernos han desarrollado herramientas operativas para evaluar proyectos de movilidad activa. Un ejemplo relevante es el conjunto de metodologías desarrolladas por el *Department for Transport* del Reino Unido, incluyendo el *Active Mode Appraisal Toolkit (AMAT)* y las guías metodológicas incluidas en el *Transport Analysis Guidance - TAG* (DfT, 2022a; 2022b).

Estas herramientas fueron diseñadas para apoyar la evaluación de proyectos de caminata y ciclismo dentro de los procesos de análisis costo-beneficio utilizados en planificación de transporte. Una característica importante de estas metodologías es recomendar que el nivel de complejidad analítica utilizado en la evaluación de un proyecto determinado sea proporcional a su escala y relevancia.

2.3 Métodos para Estimar Variación de Emisiones de GEI

2.3.1 Enfoque basado en cambio modal y vehículos-kilómetro evitados

El enfoque más comúnmente utilizado para estimar reducciones de emisiones de GEI asociadas a proyectos de movilidad activa, consiste en estimar los vehículos-kilómetro

recorridos (VKT) que son evitados como resultado de cambios en la distribución modal del sistema de transporte (UNFCCC, 2016).

En este enfoque, el cálculo de emisiones evitadas se basa en una secuencia lógica que incluye:

1. Estimación del número de viajes en bicicleta inducidos o captados por el proyecto;
2. Identificación del modo de transporte previamente utilizado por los usuarios que ahora adoptan la bicicleta;
3. Estimación de la distancia media de los viajes sustituidos y determinación de cuántos ocurren en condiciones de alta o baja congestión;
4. Cálculo de los vehículos-kilómetro evitados para los modos desplazados;
5. Aplicación de los factores de emisión correspondientes para estimar la variación de emisiones de GEI.
6. Distinción entre corto plazo (uno o dos años), en que se supone que no hay ajuste de flota y largo plazo (por ejemplo, un horizonte de 10 años); en el primer caso la reducción en el número de buses-km es cero (ya que estos siguen operando aunque algunos pasajeros se cambien a transporte activo) y la reducción en el número de autos-km depende de la tasa de ocupación de estos en la ciudad analizada. En el largo plazo puede haber una reducción efectiva de buses-km debido a que los operadores debieran disminuir frecuencias o incluso cambiar recorridos si el impacto del cambio modal es importante.

Este enfoque es consistente con metodologías utilizadas en inventarios nacionales de emisiones y con diversos marcos internacionales de estimación de emisiones.

2.3.2 Factores de emisión y metodologías de inventarios

La estimación de emisiones evitadas requiere utilizar factores de emisión apropiados para los distintos tipos de vehículos operando en el sistema de transporte. Las referencias más importantes incluyen las directrices del *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Calvo Buendia *et al.*, 2019; IPCC, 2022) para inventarios nacionales de gases de efecto invernadero y el *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook* (EEA, 2023; 2024).

Estas metodologías proporcionan factores de emisión que permiten estimar las emisiones asociadas a distintos tipos de vehículos, tecnologías y combustibles, permitiendo asegurar la consistencia entre estimaciones de proyectos específicos y marcos más amplios de estimación de emisiones.

2.3.3 Herramientas complementarias para evaluación de beneficios

Además de las metodologías centradas en emisiones de GEI, se han desarrollado diversas herramientas para evaluar beneficios más amplios asociados al transporte activo. Entre ellas destaca el *Health Economic Assessment Tool* (HEAT) desarrollado por la Organización Mundial de la Salud, que permite estimar beneficios de salud derivados del aumento de la actividad física asociado al uso de la bicicleta (WHO, 2024). Aunque estas herramientas no están diseñadas específicamente para estimar emisiones de GEI, pueden proporcionar

información complementaria relevante para evaluar los beneficios totales de proyectos de movilidad activa.

2.4 Marco Metodológico Adoptado para esta Guía

La revisión de la literatura permite identificar varios elementos metodológicos relevantes para el desarrollo de esta Guía. En primer lugar, la reducción de emisiones de GEI asociadas a proyectos ciclistas, depende del modo de transporte previamente utilizado por los usuarios que adoptan la bicicleta, por lo que este debe ser identificado.

En segundo lugar, la demanda por viajes en bicicleta depende significativamente de la estructura de la red ciclista existente. En ciudades con infraestructura ciclista escasa o fragmentada, una nueva ciclovía puede funcionar principalmente como un corredor aislado. En cambio, en ciudades con redes de ciclovías, nuevas infraestructuras pueden mejorar significativamente la conectividad de la red y generar aumentos más fuertes de la demanda.

En tercer lugar, existe gran diversidad en cuanto a disponibilidad de datos y capacidades analíticas entre ciudades. Mientras algunas urbes cuentan con modelos de transporte urbano detallados y encuestas de movilidad extensivas, otras disponen únicamente de información agregada sobre flujos de tráfico o características del entorno urbano.

Considerando estos factores, esta Guía propone desarrollar una familia de métodos de estimación de demanda, que puedan aplicarse según la disponibilidad de información y la capacidad técnica de cada ciudad. Así, se consideran tres niveles metodológicos:

- métodos simplificados de estimación de demanda basados en información agregada;
- métodos econométricos o de elección modal basados en encuestas de movilidad;
- métodos basados en modelos de transporte urbano existentes.

Independientemente del método elegido para estimar la demanda ciclista, en el caso de la variación de emisiones de GEI asociada a un proyecto de ciclovía se propone una estructura general común basada en el cálculo de los vehículos-kilómetro evitados.

2.5 Vacíos Metodológicos Identificados en la Literatura

La revisión de la literatura y de las metodologías utilizadas internacionalmente, ha permitido identificar diversos vacíos metodológicos relevantes para el desarrollo de esta Guía. En primer lugar, gran parte de los métodos utilizados en la planificación de infraestructura ciclista se concentran solo en estimar el volumen de viajes en bicicleta que podría generar una infraestructura específica en un corredor urbano (o en toda la ciudad) y no buscan estimar explícitamente el modo de transporte utilizado previamente por los usuarios que adoptan la bicicleta debido al proyecto.

En segundo lugar, la mayor parte de los métodos disponibles ha sido desarrollada con objetivos distintos que la estimación de impactos ambientales. Muchos se orientan a apoyar procesos de planificación urbana o priorización de infraestructura, más que a estimar beneficios ambientales específicos. Esto ha hecho que los métodos usados para estimar la demanda ciclista y los procedimientos utilizados para estimar emisiones evitadas se apliquen en forma separada y no formen parte de un marco metodológico integrado.

Un tercer aspecto relevante es que muchas herramientas existentes han sido desarrolladas para contextos urbanos específicos, principalmente en Europa, en que la infraestructura ciclista suele ser relativamente extensa y el uso de la bicicleta es significativo. En contraste, en muchas ciudades de América Latina la infraestructura ciclista es más reciente y la partición modal de la bicicleta suele ser relativamente baja. Estas diferencias pueden afectar tanto los mecanismos de generación de demanda como el potencial de sustitución de viajes motorizados. Asimismo, diversos métodos utilizados en la planificación ciclista tienden a concentrarse en estimar flujos en corredores específicos, sin considerar la interacción entre diferentes segmentos de infraestructura dentro de una red urbana. Pero el efecto de una nueva ciclovía es muy distinto si se trata de un corredor aislado o si mejora en forma significativa la conectividad de una red de infraestructura ciclista.

Finalmente, existe considerable diversidad en la disponibilidad de información y capacidades técnicas entre ciudades. Mientras algunas urbes cuentan con modelos de transporte urbano multimodales y encuestas detalladas de movilidad, otras disponen únicamente de información agregada sobre flujos de tráfico y algunas características del entorno urbano. En consecuencia, los métodos propuestos para estimar la demanda por proyectos ciclistas deben ser lo suficientemente flexibles como para adaptarse a distintos niveles de disponibilidad de información.

Considerando estos vacíos metodológicos, la Guía propone desarrollar un conjunto de métodos que permitan:

- estimar de manera explícita el modo de origen de los viajes captados por proyectos de ciclovías;
- integrar en un mismo marco metodológico la estimación de demanda ciclista y la estimación de emisiones de GEI;
- distinguir entre proyectos de ciclovías aisladas y proyectos que formen parte de una red de ciclovías;
- adaptar el nivel de complejidad metodológica a la disponibilidad de información y a las capacidades técnicas de cada ciudad.

A partir de estos principios, las secciones siguientes de la Guía presentan los métodos propuestos para estimar la demanda de proyectos de ciclovías y la variación de emisiones de GEI asociada a dichos proyectos.

3. Métodos para Estimar Demanda en Proyectos de Ciclovías

3.1 Introducción

Estimar en forma apropiada los cambios en la demanda debidos a un proyecto de infraestructura ciclista, constituye un paso clave para evaluar su impacto en el sistema de transporte urbano y, en particular, para estimar la variación en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociada al proyecto. La estimación de la demanda tiene como objetivo principal determinar el número de viajes en bicicleta que serán inducidos o captados por un proyecto de ciclovía, así como identificar el modo de transporte previamente utilizado por los usuarios que adopten la bicicleta. Como ya se ha señalado, esta información es esencial para estimar la reducción de emisiones asociada al reemplazo de viajes motorizados por viajes en bicicleta.

La literatura internacional presenta una amplia variedad de métodos para estimar la demanda ciclista. Estos difieren en términos de su complejidad analítica, requerimientos de información y contexto de aplicación. Algunos se basan en modelos estadísticos relativamente simples, mientras que otros utilizan modelos de transporte urbano bastante más complejos o modelos econométricos de elección modal (Ortúzar & Willumsen, 2024).

Como la disponibilidad de información y la capacidad técnica varían significativamente entre ciudades, esta Guía propone un conjunto de métodos que pueden aplicarse en distintos contextos urbanos. Los métodos se organizan en función del nivel de información disponible y del grado de desarrollo de la infraestructura ciclista existente.

3.1.1 Alcance y contexto de aplicación

Los métodos presentados en este capítulo están diseñados para estimar la demanda asociada a proyectos de ciclovías en ciudades que cuentan con distintos niveles de desarrollo de infraestructura ciclista y diferentes niveles de disponibilidad de información.

En particular, la Guía distingue entre tres contextos principales de aplicación:

1. Ciudades donde la infraestructura ciclista es limitada o inexistente, en las cuales un proyecto de ciclovía debería funcionar como un corredor relativamente aislado.
2. Ciudades donde existe una red de ciclovías en desarrollo, en las cuales nuevos proyectos podrían mejorar la conectividad de la red, generando mayor demanda y también cambios en las rutas utilizadas por los ciclistas originales.
3. Ciudades que cuentan con modelos de transporte urbano multimodales, donde la infraestructura ciclista podría incorporarse explícitamente en la red de transporte simulada, para estimar cambios en la partición modal del sistema, incluyendo la ruta elegida por cada viaje.

Esta clasificación permite seleccionar el método de estimación de demanda más apropiado según las características del contexto urbano analizado.

3.1.2 Principios metodológicos generales

Los métodos presentados están basados en tres principios fundamentales. En primer lugar, la estimación de la demanda debe permitir identificar explícitamente el modo de origen de los viajes captados por el proyecto. Como se ha comentado, esta información es esencial para estimar la variación de emisiones de GEI, dado que únicamente la sustitución de viajes motorizados produce reducciones de emisiones de fuentes móviles (Litman, 2023). En segundo lugar, la metodología de estimación de demanda debe considerar el área de influencia del proyecto, es decir, el conjunto de zonas urbanas desde las cuales provienen los usuarios potenciales de la ciclovía. En tercer lugar, los métodos propuestos deben ser flexibles y adaptables a distintos niveles de disponibilidad de información. En muchos casos, las ciudades no disponen de encuestas detalladas de movilidad, ni de modelos de transporte urbano; esto obliga a que los métodos utilizados se puedan aplicar utilizando información relativamente simple (Aoun *et al.*, 2015).

3.2 Demanda Asociada a Proyectos de Ciclovías

La demanda asociada a un proyecto de ciclovía se define como el número de viajes en bicicleta que utilizaría la infraestructura analizada durante un período determinado. Esta demanda puede estar compuesta por tres tipos de viajes:

1. Viajes previamente realizados en bicicleta, que cambian de ruta para utilizar la nueva infraestructura;
2. Viajes que cambian de modo de transporte hacia la bicicleta, provenientes de modos motorizados o de caminata;
3. Viajes nuevos inducidos en bicicleta, que anteriormente no se realizaban o se realizaban con menor frecuencia.

Desde el punto de vista de estimar emisiones de GEI, el componente más relevante son los viajes que cambian desde modos motorizados hacia la bicicleta, pues estos representan la potencial sustitución directa de viajes con emisiones.

3.2.1 Área de influencia del proyecto

Para estimar el cambio de demanda asociado a una ciclovía, es primero necesario definir el área geográfica de influencia de la nueva infraestructura. Diversos estudios sobre comportamiento ciclista muestran que la mayoría de los usuarios de una ciclovía proviene de zonas relativamente cercanas a su trazado (esto es similar a lo que sucede con el acceso a estaciones de Metro, o con el acceso a autopistas urbanas por parte de automovilistas). En muchos análisis de planificación se ha utilizado un radio aproximado de entre 2 y 3 km desde la infraestructura¹ (Lovelace *et al.*, 2017).

¹ No obstante, puede haber ciudades con redes viales territorialmente afectadas por cerros, ríos, quebradas, infraestructura de carreteras, etc., que afectan esta cercanía radial para bicicletas. En estos casos, puede ser más conveniente definir el área de influencia según el tiempo de viaje en bicicleta (i.e., entre 8 y 12 min, suponiendo una velocidad de 15 km/h para la bicicleta).

De esta forma, el área de influencia del proyecto puede definirse como el conjunto de zonas urbanas que estén ubicadas dentro de un cierto umbral de distancia desde la ciclovía. La delimitación de esta área puede realizarse utilizando:

- zonas de análisis de transporte;
- unidades censales o distritos administrativos;
- *buffers* espaciales definidos mediante sistemas de información geográfica.

3.2.2 Variables necesarias para estimar la demanda

La estimación de la demanda asociada a un proyecto de ciclovía requiere estimar los valores de un conjunto de variables básicas relacionadas con el sistema de transporte urbano. Entre las variables más relevantes se encuentran el número total de viajes generados en el área de influencia del proyecto, la distribución modal y la distribución de distancia de estos viajes, y las características del proyecto de infraestructura ciclista. Estas variables permiten identificar el conjunto de viajes potencialmente ciclables y estimar qué proporción de dichos viajes podría realizarse en bicicleta una vez que la infraestructura esté disponible.

3.3 Métodos de Estimación de Demanda Ciclista

Sobre la base de los principios metodológicos descritos anteriormente, esta Guía propone tres métodos principales para estimar la demanda asociada a proyectos de ciclovías:

1. **Método 1:** Estimación de demanda en ciudades sin red ciclista significativa;
2. **Método 2:** Estimación de demanda en ciudades con red ciclista existente;
3. **Método 3:** Estimación de demanda mediante modelos agregados de transporte.

Las secciones siguientes describen en detalle cada uno de estos métodos.

3.3.1 Método 1: Estimación de demanda para proyectos de ciclovías en ciudades sin red ciclista significativa

Formulación del método

En este caso se hipotetiza que la demanda asociada al proyecto puede estimarse a partir del total de viajes en el área de influencia, restringiendo ese universo a los viajes compatibles con ser realizados en bicicleta, como se describe a continuación.

Ecuación general de demanda ciclista del proyecto

$$Q_b = T \cdot P_d \cdot P_c$$

donde Q_b son los viajes diarios en bicicleta asociados al proyecto; T es el número total de viajes diarios en el área de influencia; P_d es la proporción de viajes potencialmente ciclables, y P_c la proporción de adopción ciclista inducida por la nueva infraestructura.

Estimación del total de viajes diarios

Cuando no se dispone de una encuesta origen–destino o de un modelo de transporte, el total de viajes se puede aproximar mediante la ecuación:

$$T = P \cdot r$$

donde P es la población del área de influencia, y r la tasa media de generación de viajes por persona por día. En muchas ciudades se ha encontrado que esta tasa suele ser del orden de 2 a 3 viajes por persona por día (Ortúzar & Willumsen, 2024).

Estimación de viajes potencialmente ciclables

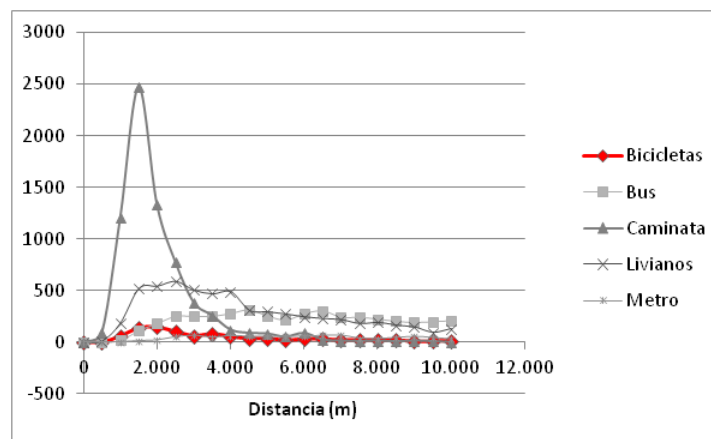
No todos los viajes son compatibles con el uso de la bicicleta. Diversos estudios han mostrado que la probabilidad de usar bicicleta disminuye significativamente cuando la distancia de viaje supera ciertos umbrales (Gutiérrez *et al.*, 2020; Hurtubia *et al.*, 2023). La cantidad de viajes asociada una distancia compatible con el uso de la bicicleta puede estimarse como:

$$T_c = T \cdot P_d$$

donde T_c es el número de viajes diarios potencialmente ciclables y P_d la proporción de viajes cuya distancia es menor o igual al umbral definido como ciclable.

Se suele considerar que los viajes menores a 5 km presentan un alto potencial de ser realizados en bicicleta (Lovelace *et al.*, 2017; Pucher & Buehler, 2012; UNEP, 2016); incluso se ha encontrado que en ciudades de gran tamaño este umbral puede llegar a los 7 km (valor que coincide con la distancia promedio de viajes en Santiago de Chile, www.cedeus.cl/blog/2024/08/21/encuesta-de-movilidad-de-santiago-2024/). La Figura 3.1 muestra que los viajes en bicicleta, el 2013 en Santiago, cubrían mayoritariamente distancias entre 1 a 5 km, con casos excepcionales de hasta 10 km. No obstante, la posibilidad de trasladar bicicletas en buses o Metro podría ampliar este rango, afectando las decisiones y motivos de los usuarios para utilizar este medio de transporte por sobre el privado, especialmente dadas las altas pendientes en algunos sectores de la ciudad (Ortúzar *et al.*, 2000, Frésard & Osses, 2001).

Figura 3.1 Efecto de la distancia en el número de viajes por modo



Fuente: SDG (2013)

Estimación de viajes diarios en bicicleta asociados al proyecto

La demanda por viajes en bicicleta debida al proyecto se puede obtener aplicando una tasa de adopción a los viajes potencialmente ciclables:

$$Q_b = T_c \cdot P_c$$

donde P_c es la tasa de adopción ciclista inducida por la nueva infraestructura.

Este parámetro usualmente depende de factores como la calidad de la infraestructura y seguridad percibida de los usuarios, la continuidad del corredor y la cultura ciclista local. En ausencia de estudios específicos, pueden aplicarse rangos observados en experiencias internacionales. Por ejemplo, diversos estudios muestran que la proporción de adopción ciclista inducida por nuevas infraestructuras se ha situado entre 5% y 20% de los viajes potencialmente ciclables (Aoun *et al.*, 2015; Litman, 2023; Pucher & Buehler, 2012).

Los valores más altos suelen observarse cuando la infraestructura ciclista es segregada del tráfico motorizado, mejora significativamente la conectividad de la red y se ubica en corredores con alta densidad urbana.

Estimación del modo de origen

Finalmente, se debe identificar el modo de transporte previamente utilizado por los usuarios que adoptan la bicicleta. En esta Guía se considerará como modos de origen de interés al automóvil, el transporte público y la caminata. En ausencia de encuestas específicas, esta distribución puede aproximarse utilizando la partición modal de los viajes potencialmente ciclables en el año base.

De esta forma, la cantidad de viajes captados desde cada modo m se puede estimar como:

$$Q_m = Q_b \cdot S_m$$

donde Q_m son los viajes diarios en bicicleta provenientes del modo m y S_m es la participación del modo m entre los viajes captados.

Parámetros recomendados

Para aplicaciones preliminares del método, se puede operar con los rangos de referencia mostrados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Parámetros de referencia para el Método 1

Parámetro	Símbolo	Rango orientativo	Observación
Radio del área de influencia	R	2–3 km	según contexto urbano
Tasa de generación de viajes	r	2–3 viajes/persona/día	depende de la ciudad
Distancia ciclable máxima	$d_{\max}$	5 km	referencia estándar
Tasa de adopción ciclista	P_c	0,05–0,20	según calidad del proyecto

La Tabla 3.2, por otra parte, presenta una síntesis de las variables necesarias para estimar la demanda en el caso de ciclovías aisladas.

Tabla 3.2 Variables utilizadas para estimar demanda de ciclovías aisladas (Método 1)

Símbolo	Variable	Unidad	Descripción	Fuente de datos típica
P	Población del área de influencia	habitantes	Población residente dentro del área de influencia del proyecto	Censo o datos administrativos
R	Radio del área de influencia	km	Distancia máxima desde la cual los usuarios acceden al corredor ciclista	Literatura / análisis espacial
T	Viajes totales diarios	viajes/día	Número total de viajes generados en el área de influencia	Encuestas OD o estimación indirecta
r	Tasa generación de viajes	viajes/persona/día	Número medio de viajes diarios por habitante	Encuestas de movilidad
P_d	Proporción de viajes ciclables	adimensional	Proporción de viajes cuya distancia es compatible con bicicleta	Encuesta OD o distribución de distancias
d_{max}	Distancia ciclable máxima	km	Umbral de distancia considerado adecuado para viajes en bicicleta	Literatura internacional
T_c	Viajes potencialmente ciclables	viajes/día	Número de viajes con distancia menor o igual a d_{max}	Cálculo
P_c	Tasa de adopción ciclista	adimensional	Proporción de viajes ciclables que se realiza en bicicleta tras la intervención	Literatura / experiencia comparada
Q_b	Demanda ciclista del proyecto	viajes/día	Número de viajes diarios en bicicleta asociados al proyecto	Resultado del modelo
S_m	Participación modal de origen	adimensional	Proporción de viajes captados provenientes de cada modo	Encuestas de movilidad
Q_m	Viajes captados desde modo m	viajes/día	Número de viajes provenientes de cada modo de transporte	Cálculo
$\bar{L}$	Distancia media del viaje	km	Distancia promedio de los viajes sustituidos	Encuesta OD

Ejemplo de aplicación²

A continuación, se presenta un ejemplo ilustrativo de este método. El propósito es mostrar cómo aplicar el procedimiento y dejar una base fácilmente transferible a una planilla Excel. Se analizará un proyecto de ciclovía aislada de 6 km de longitud en una ciudad latinoamericana de tamaño medio sin una red de ciclovías.

² Esta Guía incluye una Planilla Excel en que se desarrolla este ejemplo y se puede jugar con distintos valores de cada una de las variables y parámetros indicados.

Se considera la siguiente información:

- población en el área de influencia: 8.600 habitantes
- tasa media de generación de viajes: 2,5 viajes/persona/día
- proporción de viajes con distancia menor o igual a 5 km: 0,42
- tasa de adopción ciclista inducida por el proyecto: 0,12
- partición modal y longitud de los viajes captados tras el proyecto:
 - automóvil: 0,45 con una longitud promedio de 4 km
 - transporte público: 0,30 con una longitud promedio de 4,5 km
 - caminata: 0,25 con una longitud promedio de 2 km.

Paso 1. Estimar el total de viajes diarios en el área de influencia

$$T = P \cdot r = 8.600 \cdot 2,5 = 21.500 \text{ viajes/día}$$

Paso 2. Estimar los viajes potencialmente ciclables

$$T_c = T \cdot P_d = 21.500 \cdot 0,42 = 9.030 \text{ viajes/día}$$

Paso 3. Estimar el total de viajes diarios en bicicleta asociados al proyecto

$$Q_b = T_c \cdot P_c = 9.030 \cdot 0,12 = 1.084 \text{ viajes/día}$$

Paso 4. Estimar el modo de origen de los viajes captados

Desde el automóvil:

$$Q_{auto} = Q_b \cdot S_{auto} = 1.084 \cdot 0,45 = 488 \text{ viajes/día}$$

Desde transporte público:

$$Q_{tp} = 1.084 \cdot 0,30 = 325 \text{ viajes/día}$$

Desde la caminata:

$$Q_{cam} = 1.084 \cdot 0,25 = 271 \text{ viajes/día}$$

Paso 5. Estimar la distancia media de los viajes sustituidos

En este ejemplo se han supuesto conocidas las distancias medias de los viajes que se cambian a la bicicleta desde cada modo (esto es, 4 km para los viajes sustituidos desde el auto, 4,5 km para los provenientes del bus y 2 km para los que anteriormente se hacían caminando). En aplicaciones reales estos valores deberían obtenerse a partir de la distribución de distancias observada en el área de influencia. También se debiera considerar en el cálculo la proporción de esas distancias en que se viajó en condiciones de congestión, ya que tiene un mayor efecto en el cálculo de la emisión de GEI.

De esta forma se puede concluir, que el proyecto analizado (una nueva ciclovía de 6 km de longitud) generaría – dadas las hipótesis planteadas – aproximadamente 1.084 nuevos viajes diarios en bicicleta. De ellos, se estima que 488 viajes/día provendrían del automóvil, 325 viajes/día del transporte público y 271 viajes/día desde la caminata.

Desde el punto de vista de la estimación de GEI, el componente más relevante de este resultado es, obviamente, el volumen de viajes provenientes de automóvil y, en menor medida, del transporte público motorizado. En la planilla Excel asociada a este ejemplo se hace el cálculo de los GEI (ver Sección 4) y se permite la posibilidad de experimentar con distintos valores de todas las variables de interés. También se da la posibilidad de comparar los efectos del proyecto en el corto plazo (uno o dos años) versus largo plazo (horizonte de 10 años), en que ajustes a la oferta de buses (frecuencia y longitud de recorridos) en el área de influencia del proyecto implican un mayor impacto en términos de GEI (ver Sección 4.2).

Ventajas y limitaciones del método

El método propuesto presenta algunas ventajas. En primer lugar, puede aplicarse incluso en ciudades donde la disponibilidad de información es limitada o nula. En segundo lugar, permite estimar, aunque de forma muy aproximada, explícitamente el modo de origen de los viajes captados por el proyecto, lo que es clave para estimar emisiones evitadas. En tercer lugar, puede implementarse muy fácilmente en una planilla de cálculo.

Sin embargo, el método presenta severas limitaciones. Al basarse en supuestos agregados sobre distancias de viaje y tasas de adopción ciclista, los resultados son sólo aproximaciones gruesas. En contextos donde se disponga de información más detallada, es recomendable utilizar métodos más avanzados de estimación de demanda.

Aun así, el método puede mejorarse en forma importante haciendo uso de elementos del segundo método, a continuación. En efecto, es muy sencillo estimar – con información de preferencias – un modelo de partición modal que permita determinar en forma mucho más precisa de donde provienen los viajes captados por el proyecto. También, haciendo encuestas simples o basándose en métodos bastante sencillos, como estimar matrices de viajes a partir de conteos (Ortúzar & Willumsen, 2024, Cap. 14), es posible tener una mejor idea del número total de viajes y de su modo de origen, distancias de viaje, etc.

3.3.2 Método 2: Estimación de Demanda para Proyectos de Ciclovías Mediante Modelos de Elección Modal

Contexto de aplicación

Este método es más apropiado para ciudades que cuenten con una red ciclista existente o con la capacidad técnica suficiente para estimar modelos de elección modal utilizando encuestas de movilidad. En estos casos, la demanda de proyectos de ciclovías puede estimarse mediante modelos econométricos basados en la teoría de la utilidad aleatoria (McFadden, 1974) que permiten analizar cómo los atributos asociados a los distintos modos de transporte, junto a las características de los usuarios, influyen en su elección modal.

Un enfoque particularmente interesante en esta línea fue desarrollado por Ortúzar *et al.* (2000) para analizar el potencial efecto de construir una red de ciclovías en Santiago de Chile. En general, esta clase de modelos permite estimar directamente el cambio en la probabilidad

de elegir bicicleta cuando cambian atributos del viaje tales como el tiempo de viaje, la seguridad percibida o la presencia de infraestructura ciclista.

La principal ventaja de este método es que permite estimar de manera consistente:

- el cambio modal inducido por la infraestructura ciclista;
- el número de nuevos viajes en bicicleta generados por el proyecto;
- el modo de transporte desde el cual provienen esos viajes;

que son insumos fundamentales para la estimación posterior de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero asociada al proyecto.

Fundamentos teóricos del enfoque de modelación

Los modelos de elección discreta se basan en la teoría de la utilidad aleatoria, según la cual un individuo elige la alternativa (modo de transporte) que le proporciona la mayor utilidad para realizar un viaje entre un origen i y un destino j (Ortúzar & Willumsen, 2024, Cap. 7). La utilidad total U_{ij}^m asociada a cada modo m , se expresa normalmente como la suma de una utilidad representativa o medible (V_{ij}^m), que es la componente observable por parte del analista, y una componente de error (ε_{ij}^m) que tiene una cierta distribución de probabilidad:

$$U_{ij}^m = V_{ij}^m + \varepsilon_{ij}^m$$

Dependiendo de la función de probabilidad que se asuma para los errores ε_{ij}^m , se pueden obtener distintas formas funcionales (Ortúzar & Willumsen, 2024, Cap. 7). A su vez, la utilidad representativa se suele especificar como una función lineal de los atributos del viaje y características de los individuos:

$$V_{ij}^m = \beta_m + \beta_T t_{ij}^m + \beta_C c_{ij}^m + \beta_X x_{ij}^m$$

donde t_{ij}^m es el tiempo de viaje en la alternativa m ; c_{ij}^m su costo monetario; x_{ij}^m un vector de atributos adicionales (como seguridad, o calidad de la ciclovía en el caso de la bicicleta) y β_T, β_C y β_X son parámetros (utilidades marginales) que deben estimarse; β_m es el coeficiente de una constante específica (vale uno para la alternativa m y cero en otro caso) y es necesario señalar que si hay M alternativas, una de ellas se elige como “de referencia” (típicamente aquella que esté más universalmente disponible), y los coeficientes de las restantes $M - 1$ alternativas se calculan suponiendo que el de la alternativa de referencia es cero.

Los signos esperados de estos parámetros debieran reflejar las preferencias típicas de los usuarios. Por ejemplo, β_T y β_C debieran tener signo negativo (aumentos en los atributos tiempo y costo harían menos atractiva la bicicleta). Su estimación permite cuantificar la sensibilidad de los usuarios frente a cambios en las condiciones del sistema de transporte.

Es interesante notar que los parámetros no tienen por qué ser fijos para todos los individuos y alternativas. En efecto, aún en el modelo más sencillo - el Logit Multinomial (MNL) - los parámetros pueden variar entre alternativas, pero son fijos para todos los individuos. También es posible considerar heterogeneidad en este caso, permitiendo *variaciones sistemáticas de gustos* (Ortúzar y Willumsen, 2024, pag. 290), haciendo que los parámetros interactúan con

variables socioeconómicas de los individuos, generando valores que sólo son fijos para determinadas *clases* (ej: ingreso, sexo, edad) en la población.

En modelos más complejos y realistas, como el Logit Mixto (Train, 2009) o los modelos Híbridos (HCM) que permiten incorporar variables latentes (Bahamonde-Birke *et al.*, 2017; Bahamonde-Birke & Ortúzar, 2020), los parámetros pueden incluso ser variables aleatorias con una distribución de probabilidad (típicamente Normal) en la población (Train, 2009).

El Modelo Logit Multinomial

Una de las especificaciones más utilizadas en modelación de elecciones discretas es el modelo Logit Multinomial (MNL). Se deriva suponiendo que los términos de error ε siguen una distribución Valor Extremo Tipo I (también conocida como Gumbel) independiente e idénticamente distribuida - IID (McFadden, 1974). Bajo este supuesto, la probabilidad de elegir la alternativa m se expresa como:

$$P_m = \frac{\exp(\lambda \cdot V_m)}{\sum_{j \in M} \exp(\lambda \cdot V_j)}$$

donde M representa el conjunto de alternativas disponibles y λ es un factor de escala inversamente proporcional a la desconocida desviación estándar de los errores ε_m . En gran parte de las aplicaciones del MNL este factor se normaliza a uno sin pérdida de generalidad (Ortúzar y Willumsen, 2024, Cap. 7).

El modelo MNL presenta algunas ventajas interesantes, como su gran facilidad de estimación, la interpretación directa de sus parámetros y una implementación computacional sencilla. Por estas razones, ha sido ampliamente utilizado en planificación de transporte desde la década de 1970. Sin embargo, el modelo tiene desventajas que provienen de los supuestos necesarios para su formulación (i.e., errores ε que distribuyen IID); en particular, una propiedad importante es su característica de *independencia de alternativas irrelevantes* (IIA). Esta propiedad implica que la relación entre las probabilidades de elegir dos alternativas cualquiera depende únicamente de las características de esas alternativas, y no de la presencia o atributos de otras alternativas.

Formalmente:

$$\frac{P_i}{P_j} = \frac{\exp(V_i)}{\exp(V_j)}$$

Esta propiedad, que fue considerada interesante cuando inicialmente se postuló este modelo (ya que permitía tratar en forma sencilla el problema de predecir la probabilidad de elección de una alternativa totalmente nueva), es restrictiva en ciertos contextos, particularmente si algunas alternativas están correlacionadas. Por ejemplo, distintos modos de transporte público suelen presentar atributos similares que los hacen más cercanos entre sí que el auto.

Modelos de Elección Discreta Avanzados

La estimación de la demanda de transporte requiere modelos que permitan representar de manera realista el proceso de elección entre las distintas alternativas de viaje. El modelo

MNL tiene limitaciones importantes cuando se aplica en contextos en que algunas alternativas comparten características similares o cuando existe heterogeneidad significativa en las preferencias de los individuos. Para superar estas limitaciones, se han desarrollado una serie de modelos más flexibles que permiten capturar relaciones más complejas entre las alternativas y heterogeneidad en las preferencias individuales. Entre estos modelos destacan el modelo Logit Jerárquico (HL) y, más recientemente, el modelo Logit Mixto (ML), entre otras extensiones de la familia de modelos de elección discreta.

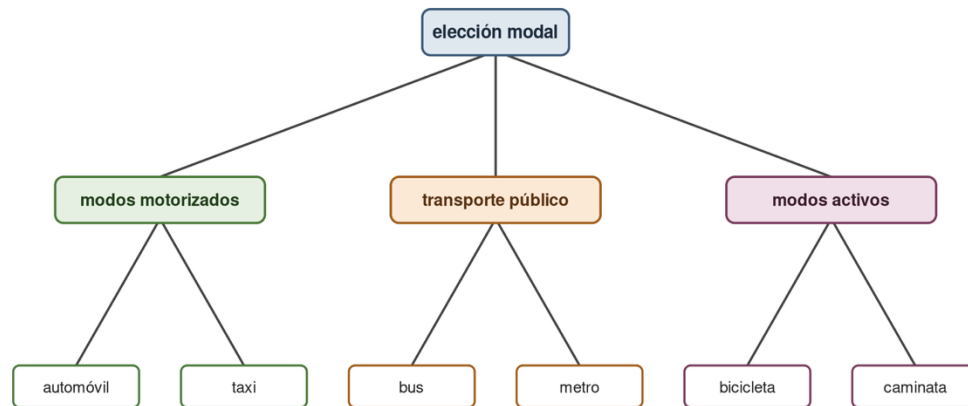
En el caso de la movilidad ciclista, también pueden existir correlaciones entre alternativas relacionadas con diferentes tipos de infraestructura o con combinaciones de modos, como bicicleta + transporte público. Cuando estas correlaciones no se capturan adecuadamente, el MNL puede producir estimaciones sesgadas de las probabilidades de elección.

Modelo Logit Jerárquico

El HL (Williams, 1977; Daly & Zachary, 1979; Carrasco & Ortúzar, 2002) permite relajar parcialmente el supuesto de independencia de alternativas irrelevantes mediante la agrupación de alternativas en estructuras jerárquicas denominadas *nidos*. En este modelo, las alternativas que comparten características similares se agrupan dentro de un mismo *nido*, permitiendo que exista correlación entre sus términos de error.

Por ejemplo, un modelo de elección modal podría estructurarse de la forma que se ejemplifica en la Figura 3.2. En este caso, se asume que las alternativas dentro de cada nido comparten componentes no observados que reflejan características comunes.

Figura 3.2 Ejemplo de estructura jerárquica con tres nidos en paralelo



En el modelo HL, la probabilidad de elegir una alternativa se calcula como el producto de dos componentes: la probabilidad de elegir el nido (P_i) y la probabilidad condicional de elegir la alternativa m dentro del nido ($P_{m|i}$). Formalmente:

$$P_m = P_i \cdot P_{m|i}$$

El HL incluye un conjunto de parámetros estructurales, asociados a cada nido, que sirven para diagnosticar si la estructura jerárquica propuesta es adecuada (Ortúzar & Willumsen, 2024, Cap. 7). La estimación de este modelo, así como la interpretación de sus resultados, es sencilla; sin embargo, mantiene un problema del MNL, este es, que no puede tratar en forma totalmente adecuada la heterogeneidad de gustos en la población.

Modelo Logit Mixto

Este modelo es, nuevamente, una generalización del modelo MNL que permite capturar heterogeneidad en las preferencias individuales. En su versión de modelo de *parámetros aleatorios*³ (Train, 2009), los parámetros de la función de utilidad se consideran variables aleatorias en lugar de constantes. Esto permite representar en forma general la heterogeneidad en preferencias entre individuos q . Así, la función de utilidad puede expresarse como:

$$U_{mq} = \beta_q X_{mq} + \varepsilon_{mq}$$

donde el vector de parámetros β_q varía entre individuos q según una distribución estadística (típicamente Normal), y los errores ε_{mq} tienen la misma distribución que en el MNL.

El modelo ML permite representar fenómenos importantes como diferencias en la sensibilidad al costo o al tiempo de viaje; variaciones en la percepción de seguridad o preferencias heterogéneas por infraestructura ciclista. Sin embargo, su estimación es mucho más compleja que en los casos anteriores, pues requiere técnicas de simulación debido a que las probabilidades de elección no tienen una forma cerrada simple. Además, la interpretación de los resultados es más difícil y requiere mucha experiencia por parte del analista.

Modelos Híbridos con Variables Latentes (HCM)

Los modelos de elección discreta presentados en las secciones anteriores permiten estimar la influencia de atributos observables del viaje (como tiempo de viaje, costo o la presencia de infraestructura ciclista) sobre la probabilidad de elegir bicicleta. Sin embargo, numerosos estudios han mostrado que las decisiones de movilidad también están influenciadas por factores psicológicos y actitudinales que no pueden observarse directamente (Bahamonde-Birke *et al.*, 2017), tales como la percepción de inseguridad en el tráfico o la preocupación de los individuos con el medio ambiente.

Para capturar este tipo de factores, recientemente se han desarrollado los modelos híbridos de elección discreta (*Hybrid Choice Models*, HCM), que combinan modelos de elección modal con modelos estructurales de variables latentes (Ben-Akiva *et al.*, 2002; Ortúzar & Willumsen, 2024, Caps. 7 y 8). Este tipo de modelos ha sido aplicado recientemente al análisis de la disposición de los individuos a cambiar viajes obligatorios desde un modo habitual hacia la bicicleta, incorporando variables como el *hábito*, la *percepción de seguridad* y las características del *entorno construido* (Gutiérrez *et al.*, 2025).

Estructura general del modelo híbrido: En un modelo HCM, la utilidad del modo de transporte m se expresa igual que en los casos anteriores, esto es:

$$U_{ij}^m = V_{ij}^m + \varepsilon_{ij}^m$$

pero ahora, la utilidad representativa incluye variables observables y variables latentes:

$$V_{ij}^m = \beta_X x_{ij}^m + \beta_L L_q$$

³ Notar que hay una segunda versión del modelo, la de *componentes de error*, en que los parámetros son fijos, pero se introducen componentes de error adicionales que permiten tratar prácticamente cualquier situación que interese, como correlación o heteroscedasticidad (ver Ortúzar & Willumsen, 2024, Caps. 7 y 8).

donde x_{ij}^m son atributos observables del viaje en el modo m y L_q representa variables latentes asociadas al individuo q .

Ejemplos de variables latentes relevantes en el contexto de la movilidad ciclista incluyen:

- hábito asociado al uso del automóvil o el transporte público
- percepción de inseguridad del tráfico
- actitudes proambientales

A diferencia de los modelos anteriores, en modelos HCM, es necesario agregar un modelo MIMIC (*Multiple Indicator Multiple Causes*, Bollen, 1989) que involucra dos tipos de modelos adicionales que actúan en forma conjunta.

a) Ecuaciones estructurales: cada variable latente se expresa como una función de características socioeconómicas del individuo o del contexto de elección:

$$L_q = \gamma Z_q + \eta_q$$

donde Z_q es un vector de características individuales (edad, ingreso, género, etc.), γ son parámetros del modelo y η_q es un término aleatorio con una cierta distribución de probabilidad (típicamente Normal).

b) Ecuaciones de medición: las variables latentes no se observan directamente; su valor se infiere a partir de respuestas a preguntas sobre percepciones o actitudes⁴ incluidas en las encuestas (indicadores, medidos típicamente a través de una escala Likert de 5 puntos, ver el ejemplo en la Tabla 3.3).

$$I_{qk} = \alpha_k + \lambda_k L_q + v_{qk}$$

donde I_{qk} es la respuesta del individuo q al indicador k ; λ_k son parámetros a ser estimados, y v_{qk} un término aleatorio con una cierta distribución de probabilidad (típicamente Normal).

Tabla 3.3 Ejemplo de Indicadores Utilizados para Variables Latentes

Indicador	Escala Likert de Respuesta				
	Muy de acuerdo	De acuerdo	Me da igual	En desacuerdo	Muy en desacuerdo
Me siento seguro usando bicicleta en el tráfico urbano					
Preferiría usar bicicleta si existieran ciclovías protegidas					
Me preocupa el impacto ambiental del transporte					
Usar automóvil es parte de mi rutina diaria					

⁴ Ver una interesante discusión sobre las diferencias entre ambas en Bahamonde-Birke *et al.* (2017).

Los modelos híbridos permiten estimar de manera más realista el potencial de cambio modal asociado a proyectos de infraestructura ciclista, ya que posibilitan capturar la influencia de factores psicológicos y actitudinales sobre la decisión de utilizar bicicleta. Por ejemplo, los resultados pueden mostrar que:

- individuos con hábitos fuertes de uso del automóvil tienen menor probabilidad de cambiar de modo;
- individuos con actitudes proambientales positivas tienen mayor disposición a utilizar bicicleta;
- la percepción de inseguridad puede reducir significativamente el atractivo de la bicicleta.

Este tipo de resultados puede ayudar a diseñar políticas complementarias a la infraestructura, tales como programas de promoción del uso de la bicicleta o campañas de seguridad vial y medidas de reducción de velocidad del tráfico.

A continuación veremos en algún detalle cómo se aplica este tipo de modelos (considerando el caso más sencillo, el MNL,) para estimar la partición modal de la bicicleta.

Especificación de la utilidad del modo bicicleta

Para el modo bicicleta, la utilidad sistemática suele incorporar variables relacionadas con las condiciones del trayecto y la infraestructura ciclista. Una especificación típica podría ser:

$$V_{ij}^{bici} = \beta_T t_{ij}^{bici} + \beta_S S_{ij} + \beta_G p_{ij} + \beta_I I_{ij}$$

donde t_{ij}^{bici} es el tiempo de viaje en bicicleta; S_{ij} es un indicador de la seguridad en relación al tráfico (en algunos casos puede incluir inseguridad respecto al crimen e, incluso, con respecto a la habilidad del usuario para resolver problemas mecánicos de la bicicleta – Gutiérrez *et al.*, 2025; pero también podrían ser dos o más variables separadas); p_{ij} está relacionado con la pendiente del trayecto, e I_{ij} es un indicador de la calidad y/o presencia de infraestructura ciclista (por ejemplo, ciclovías segregadas del tráfico motorizado).

En particular, se esperaría que un proyecto de ciclovía modificara fuertemente el atributo I_{ij} (también debería afectar al tiempo y percepción de seguridad), permitiendo estimar sus impactos en la elección modal. Diversos estudios han mostrado que la presencia de ciclovías segregadas o de infraestructura de alta calidad puede aumentar significativamente la probabilidad de elegir bicicleta (Dell’Olio *et al.*, 2014; Litman, 2023; Pucher & Buehler, 2012; Rossetti *et al.*, 2019).

Probabilidad de elegir bicicleta

Si se utiliza un modelo MNL, la probabilidad de elegir bicicleta se expresa como:

$$P_{ij}^{bici} = \frac{e^{V_{ij}^{bici}}}{\sum_m e^{V_{ij}^m}}$$

Como el proyecto típicamente modifica algunos atributos del modo bicicleta, se genera una nueva probabilidad modal:

$$P_{ij,proy}^{bici}$$

Y el cambio inducido por el proyecto es:

$$\Delta P_{ij}^{bici} = P_{ij,proy}^{bici} - P_{ij,base}^{bici}$$

Los modelos econométricos descritos en esta sección pueden utilizarse para estimar de qué forma cambios en la infraestructura ciclista afectan la demanda por viajes en bicicleta. Por ejemplo, el modelo estimado puede usarse para simular escenarios donde se introduce infraestructura ciclista segregada del tráfico vehicular en determinados corredores. No obstante, como en muchas ciudades latinoamericanas la participación modal de la bicicleta es relativamente baja, los datos observados pueden no reflejar adecuadamente la demanda potencial bajo escenarios de infraestructura mejorada.

En estos casos, puede resultar útil complementar los datos observados (de preferencias reveladas) con datos de preferencias declaradas, obtenidos mediante encuestas que presentan a los individuos escenarios hipotéticos de infraestructura ciclista. Este enfoque permite estimar la sensibilidad de los usuarios frente a atributos como segregación física de las ciclovías, reducción del tráfico motorizado y mejoras en intersecciones, disponibilidad de estacionamiento para bicicletas, e incluso disponibilidad de duchas o sitios de cambio de vestimenta en destino.

El enfoque de elección discreta permite estimar cómo cambios en los atributos del sistema de transporte afectan la probabilidad de elección modal. En el caso de proyectos ciclistas, es posible estimar:

- cuál es el aumento esperado en el número de viajes en bicicleta;
- qué cambios se producen en la partición modal;
- qué beneficios van asociados a mejoras en el bienestar de los consumidores.

Estos son insumos fundamentales para la evaluación económica de proyectos.

Recolección de información

Para estimar modelos de elección discreta se requiere información sobre las decisiones de viaje de los usuarios. Esta información puede obtenerse mediante dos tipos de datos:

- preferencias reveladas (*Revealed Preferences*, RP)
- preferencias declaradas (*Stated Preferences*, SP)

Datos de preferencias reveladas: Los datos de RP se obtienen a partir de la observación de decisiones reales de los individuos en el sistema de transporte existente. Por ejemplo, una encuesta de movilidad puede registrar el modo de transporte utilizado para cada viaje, así como los atributos asociados a cada modo en competencia, como tiempo de viaje o costo monetario. La principal ventaja de los datos de RP es que reflejan el comportamiento real observado, lo que permite estimar modelos basados en decisiones efectivamente tomadas por los usuarios. Sin embargo, los datos de RP presentan limitaciones potencialmente

importantes, sobre todo si interesa evaluar una intervención que aún no existe en el sistema de transporte. Por ejemplo, si una ciudad carece de infraestructura ciclista adecuada, es posible que la participación modal de la bicicleta sea muy baja, incluso si existiere una demanda potencial significativa. En estos casos, los datos de RP pueden subestimar la sensibilidad de los usuarios frente a mejoras en la infraestructura.

La información de RP suele obtenerse mediante encuestas origen–destino, encuestas de movilidad urbana o encuestas específicas sobre viajes en bicicleta. Este tipo de encuestas proporciona información sobre:

- origen, destino, propósito, y tiempos y costos del viaje
- horario del viaje y modo de transporte utilizado
- características socioeconómicas del usuario.

Datos de preferencias declaradas: Los datos de SP se obtienen mediante encuestas en las cuales se presenta a los individuos un conjunto de escenarios hipotéticos de elección (Caussade *et al.*, 2005). En estos escenarios, los participantes deben indicar cuál alternativa preferirían bajo diferentes condiciones.

Por ejemplo, un experimento de SP podría presentar a un individuo dos alternativas de viaje entre el mismo origen y destino:

- viajar en automóvil con ciertos tiempos de viaje y costos que podrían diferir dependiendo de la hora y la ruta, y
- viajar en bicicleta en ausencia de infraestructura ciclista, o por una ciclovía protegida con un tiempo de viaje y nivel de seguridad diferentes.

Al variar sistemáticamente los atributos de las alternativas en los distintos escenarios planteados, es posible estimar la sensibilidad de los individuos frente a cambios en estos atributos.

Los experimentos de SP permiten, en principio, analizar situaciones que aún no existen en el sistema de transporte, lo cual es particularmente útil para evaluar proyectos de infraestructura ciclista. Los encuestados deben elegir entre diferentes alternativas de viaje, posibilitando estimar cómo reaccionarían ante cambios en las condiciones del sistema de transporte. Este enfoque fue utilizado en el estudio pionero de Ortúzar *et al.* (2000) para analizar la adopción de ciclovías en Santiago. También ha sido utilizado en gran número de estudios en América Latina (para una buena revisión, ver Sagaris *et al.*, 2025).

Selección de atributos en experimentos de SP: El diseño experimental en SP requiere seleccionar cuidadosamente los atributos que caracterizan las alternativas de transporte. En el caso de la movilidad ciclista, algunos de los atributos más relevantes que se han encontrado en la literatura incluyen:

- distancia y tiempo de viaje;
- calidad de la infraestructura ciclista (nivel de segregación del tráfico motorizado);
- volumen de tráfico vehicular y condiciones de seguridad en intersecciones;
- disponibilidad de estacionamiento para bicicletas.

La selección de los atributos debe basarse tanto en la literatura existente como en el conocimiento del contexto local.

Diseño experimental: Una vez seleccionados los atributos, es necesario definir los niveles de variación que cada atributo puede tener en los escenarios experimentales. Por ejemplo, el atributo *tiempo de viaje* podría adoptar valores de 10, 15 o 20 min (dependiendo, entre otras cosas de la longitud del viaje), mientras que el atributo *infraestructura ciclista* podría adoptar niveles como:

- ciclovía protegida (segregada físicamente del tráfico motorizado);
- ciclovía pintada (comparte la calzada vehicular);
- ausencia de infraestructura.

La combinación de diferentes niveles de los atributos genera un conjunto de escenarios experimentales. En la práctica, el número de combinaciones posibles puede ser muy grande, por lo que se utilizan técnicas de *diseño experimental eficiente* (ver Rose & Bliemer, 2009) para seleccionar un subconjunto de escenarios que maximicen la información obtenida.

Tamaño de muestra: El tamaño de muestra necesario para un estudio de SP depende de diversos factores, incluyendo:

- número de atributos considerados;
- número de niveles por atributo;
- número de alternativas en cada escenario;
- variabilidad esperada en las respuestas.

En el caso de estudios específicos sobre movilidad ciclista, muestras de 500 encuestados debieran ser suficientes para estimar modelos econométricos robustos (Ortúzar & Willumsen, 2024, Cap. 2).

Estructura de la encuesta: Una encuesta de movilidad que incluya experimentos de SP suele tener varias secciones (Gutiérrez *et al.*, 2020a; 2025).

1. Información socioeconómica del encuestado, como edad, género, ingreso y ocupación.
2. Patrones actuales de movilidad, esto es, propósito del viaje y modo de transporte habitual, frecuencia de viajes.
3. Percepción de seguridad y actitudes hacia la bicicleta, consultadas a través de indicadores con respuesta en una escala Likert (típicamente de cinco puntos).
4. Experimento de preferencias declaradas, esto es, una serie de situaciones de elección basada en un diseño experimental eficiente (Rose & Bliemer, 2009).

La estructura del cuestionario debe diseñarse cuidadosamente para evitar, por ejemplo, la fatiga del encuestado y asegurar la calidad de las respuestas. Mayores detalles sobre el diseño y estructura de este tipo de encuestas se pueden ver en Ortúzar & Willumsen (2024, Cap. 2).

Integración de datos RP y SP: En muchos estudios contemporáneos se utilizan modelos combinados RP–SP, que permiten aprovechar las ventajas de ambos tipos de datos (Ortúzar y Willumsen, 2024, Cap. 8), esto es:

- los datos de RP reflejan el comportamiento real observado;
- los datos de SP permiten analizar escenarios hipotéticos, que incluyan no sólo alternativas no existentes en la actualidad, sino que variables (atributos) que no pueden ser medidos con facilidad en la práctica.

Existen diversas técnicas econométricas para estimar modelos combinados RP–SP, que permiten obtener estimaciones más robustas de los parámetros de comportamiento. Para mayores detalles respecto de estas, consultar Ortúzar y Willumsen (2024, sección 8.7.3).

Estimación de parámetros en modelación de elecciones discretas

Para estimar modelos de elección discreta se utiliza normalmente el método de máxima verosimilitud. Este consiste en encontrar los valores de los parámetros del modelo que maximizan la probabilidad de observar los datos de elección registrados en la muestra. La función de verosimilitud ($L(\beta)$), puede expresarse como:

$$L(\beta) = \prod_{q=1}^Q \prod_{i=1}^M p_{iq}^{y_{iq}}$$

donde y_{iq} es una variable ficticia que toma valor 1 si el individuo q elige la alternativa i ; Q es el tamaño de la muestra y M el número total de alternativas disponibles.

En la práctica, se trabaja con la función de log-verosimilitud ya que al tomar logaritmo se obtiene el mismo máximo, pero es más cómodo trabajar con sumas que con productos. Notar que, en el caso de modelos avanzados, como el ML o el HCM, el procedimiento es mucho más complejo ya que requiere la utilización de máxima verosimilitud simulada (Train, 2009), debido que la forma funcional del modelo es una integral múltiple. Afortunadamente, hoy en día el procedimiento de estimación de cualquier modelo de elección discreta puede realizarse utilizando una variedad de software especializado gratuito como: *Apollo* (Hess & Palma, 2019) y *Python Biogeme* (Bierlaire, 2016).

Una vez estimados los modelos de demanda es importante evaluar la calidad de los resultados obtenidos. Entre los criterios de validación más utilizados se encuentran (Ortúzar & Willumsen, 2024, sección 8.4).

- coherencia de los signos de los parámetros con la teoría o intuición;
- significancia estadística de los parámetros;
- capacidad predictiva del modelo;
- comparación con patrones de movilidad observados.

La validación de modelos es un paso fundamental antes de utilizar sus resultados para evaluar proyectos de infraestructura ciclista.

Uso de modelos de elección discreta para evaluar proyectos de ciclovías

Una vez estimados los parámetros del modelo, el impacto de un proyecto de ciclovía puede evaluarse modificando los atributos relevantes del modo bicicleta (por ejemplo, tiempo de viaje o calidad de infraestructura) y recalculando las probabilidades modales.

El número de nuevos viajes en bicicleta inducidos por el proyecto entre un par origen-destino cualquiera, se estima como:

$$Q_{ij,nuevo}^{bici} = T_{ij} \cdot \Delta P_{ij}^{bici}$$

donde T_{ij} representa el número total de viajes entre el origen i y el destino j y ΔP_{ij}^{bici} la variación en la probabilidad de usar bicicleta en ese par origen-destino debido al proyecto.

Finalmente, la demanda total inducida por el proyecto se obtiene simplemente sumando el valor anterior sobre todos los pares origen-destino involucrados en el proyecto:

$$Q_{nuevo}^{bici} = \sum_i \sum_j Q_{ij,nuevo}^{bici}$$

Identificación del modo de origen

El modo de origen de los nuevos viajes en bicicleta puede estimarse a partir del cambio en la participación modal de los otros modos en el sistema. Así, si S_m representa la proporción de viajes captados desde el modo m (esto es, la diferencia entre la probabilidad de elegir ese modo tras la aplicación del proyecto⁵), entonces:

$$Q^{m \rightarrow bici} = Q_{nuevo}^{bici} \cdot S_m$$

Esto permite diferenciar los viajes captados desde el automóvil de los viajes captados desde transporte público y caminata. Esta información, como en el caso anterior, constituye el insumo principal para el cálculo de la reducción de emisiones de GEI.

Ejemplo de aplicación

Consideremos el área urbana dividida en cinco zonas que se muestra en la Figura 3.3. El diagrama muestra los centroides cada zona (Centro, Norte, Este, Sur y Oeste) y los arcos bidireccionales que los unen (en que se indica su longitud y la pendiente existente). Además, supongamos que el total de viajes en el área es igual a 21.400, y la matriz de distribución de estos viajes es la que se muestra en la Tabla 3.4 (notar que incluye viajes intrazonales).

Seguiremos considerando cuatro modos disponibles (bicicleta, auto, bus y caminata) pero agregaremos el supuesto que existen umbrales de disponibilidad para algunos modos; en particular, los viajes en bicicleta no pueden ser de más de 5 km, y los viajes de caminata deben ser menores a 3 km. Finalmente, consideraremos que las funciones de utilidad incluyen los atributos tiempo de viaje, tiempo de acceso, costo de viaje, percepción de seguridad, impacto de infraestructura segregada ciclista e impacto de la pendiente.

⁵ Suponiendo que sólo hubo cambios en los atributos de la alternativa bicicleta.

Figura 3.3 Red ejemplo para ilustrar el Método 2

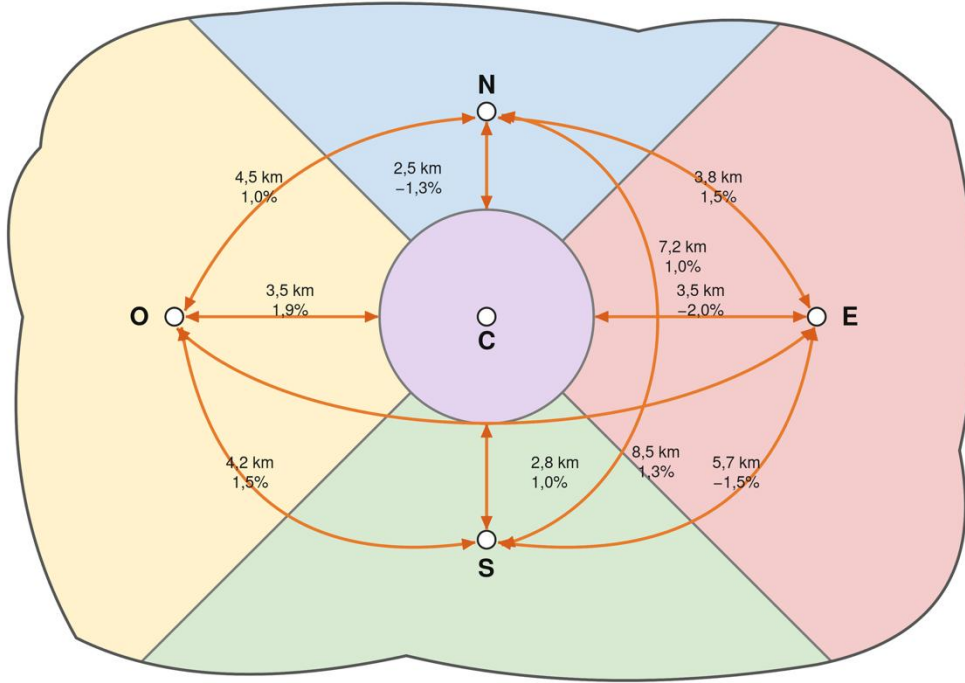


Tabla 3.4 Matriz O-D ejemplo del Método 2

Zonas	C	N	E	S	O	Total
C	2500	750	1000	850	900	6000
N	750	1000	350	300	700	3100
E	1000	350	1700	1000	450	4500
S	850	350	950	1500	450	4100
O	850	700	450	400	1300	3700
Total	5950	3150	4450	4050	3800	21400

En concreto, supongamos que se han formulado las siguientes funciones de utilidad para un modelo MNL:

$$V_{ij}^{bici} = \beta_{bici} + \beta_t^{bici} \cdot t_{ij}^{bici} + \beta_{seg}^{bici} \cdot Seg_{ij}^{bici} + \beta_{Inf}^{bici} \cdot Inf_{ij}^{bici} + \beta_{pend}^{bici} \cdot Pend_{ij}^{bici}$$

$$V_{ij}^{auto} = \beta_t^{auto} \cdot t_{ij}^{auto} + \beta_c^{auto} \cdot C_{ij}^{auto}$$

$$V_{ij}^{bus} = \beta_{bus} + \beta_t^{bus} \cdot t_{ij}^{bus} + \beta_{acc}^{bus} \cdot Acc_{ij}^{bus} + \beta_c^{bus} \cdot C_{ij}^{bus}$$

$$V_{ij}^{cam} = \beta_{cam} + \beta_t^{cam} \cdot t_{ij}^{cam}$$

y que sus parámetros se han logrado estimar, a partir de observaciones de preferencias reveladas y declaradas, obteniéndose los siguientes valores:

$$\begin{aligned}\beta_{bici} &= -1,5; \beta_{bus} = -0,5 \text{ y } \beta_{cam} = 2,0 \text{ y la alternativa de referencia es el auto.} \\ \beta_t^{bici} &= 0,080; \beta_t^{auto} = -0,040; \beta_t^{bus} = -0,060; \beta_t^{cam} = -0,150; \beta_c^{auto} = \beta_c^{bus} = -0,001 \\ \beta_{seg}^{bici} &= -0,10; \beta_{Inf}^{bici} = 0,10; \beta_{pend}^{bici} = -0,02; \beta_{acc}^{bus} = -0,12\end{aligned}$$

También vamos a suponer que la tarifa del bus es uniforme e igual a \$ 400, y que el costo de operación del auto es 350 \$/km. Por otro lado, el tiempo de acceso al bus (caminata y espera) depende de la zona de origen del viaje. En este ejemplo supondremos que estos tiempos son iguales a 2 min para la zona C, 3 min para la zona N y 4 min para las restantes tres zonas. Finalmente, supondremos que, en la situación con proyecto, el valor de la variable Seg_{ij}^{bici} pasa de 1 a 0 (con lo cual desaparece el efecto negativo de este atributo), que el valor de la variable Inf_{ij}^{bici} pasa de 0 a 1 (implicando la presencia de una ciclovía segregada) y que la constante específica de la bicicleta puede mejorar (de acuerdo a un factor variable, que depende de la calidad y cantidad de kilómetros de ciclovía implementados en el proyecto).

Cálculo de probabilidades

Para cada par de zonas, se aplica un modelo MNL con la siguiente expresión para el modo bicicleta (las expresiones para los otros modos son equivalentes):

$$p_{ij}^{bici} = \frac{\exp(V_{ij}^{bici})}{\exp(V_{ij}^{bici}) + \exp(V_{ij}^{auto}) + \exp(\exp(V_{ij}^{bus}) + \exp(V_{ij}^{cam}))}$$

Notar que entre aquellos pares O-D cuya distancia es superior a 3 km, el modo caminata no está disponible (en ese caso, el denominador de la expresión anterior tendría sólo tres términos), y cuando la distancia es mayor a 5 km el modo bicicleta tampoco está disponible.

En la Planilla Excel complementaria a esta Guía, se ha implementado este ejemplo, considerando varios elementos adicionales. En primer lugar, se entrega la posibilidad de computar los viajes en bicicleta, con y sin proyecto en dos períodos del año (verano e invierno), con la posibilidad de afectar el número de viajes en bicicleta debido a condiciones climáticas y porque en cada período cambian los coeficientes de emisión de los GEI. Segundo, se ofrece la posibilidad de tener proyectos de ciclovías pintadas (comparten la calzada vehicular) o físicamente segregadas; en el primer caso se supone que, aunque el riesgo disminuye, el efecto positivo de la nueva infraestructura es sólo la mitad que cuando la ciclovía es segregada (en cuyo caso el riesgo de accidentes con vehículos motorizados tiende a cero). Tercero, se puede simular la posibilidad de cambiar ciclovías pintadas a segregadas como parte del proyecto. Cuarto, para el cálculo del tiempo de viaje se consideran variaciones inducidas por la pendiente en la velocidad de los modos bicicleta y caminata para tres situaciones (pendiente adversa, sin pendiente y pendiente a favor).

El ejemplo de la Planilla Excel también entrega un cálculo detallado de la evitación de contaminantes de efecto invernadero debidos al proyecto, considerando tasas de ocupación para autos y buses, que permiten estimar el efecto a corto y largo plazo en la reducción de GEI como se explica en el Capítulo 4 de esta Guía.

3.3.3 Método 3: Estimación de Demanda de Ciclovías usando Modelos Estratégicos de Transporte

Contexto de aplicación

Este método se puede aplicar en ciudades que cuenten con un modelo estratégico de transporte urbano, desarrollado para apoyar la planificación del sistema de transporte y la evaluación de proyectos de infraestructura en general. Estos modelos intentan representar el funcionamiento del sistema de transporte mediante la interacción entre matrices origen–destino de viajes, redes de transporte multimodales, modelos de elección modal y modelos de asignación de tráfico.

En este contexto, la infraestructura ciclista puede incorporarse explícitamente dentro de la red de transporte, y el modo bicicleta como un modo adicional del modelo de partición modal. Sin embargo, esto no es sencillo normalmente debido a que las zonas utilizadas en este tipo de aplicaciones suelen ser de gran tamaño y los datos se manejan a un nivel de agregación que hace difícil distinguir el efecto de proyectos de menor escala relativa como las ciclovías.

Por esto, en algunas aplicaciones se ha intentado aprovechar la estructura del modelo, pero trabajar con zonas más pequeñas, o definiendo corredores en el caso de ciclovías aisladas, restringiendo el uso del modelo estratégico a sólo algunas de sus componentes; por ejemplo, mantener fija la generación y distribución de viajes y sólo analizar proyectos mediante modelos de partición modal más ricos – incorporando al transporte activo – y modelos de asignación sencillos, que sólo indican las rutas que podrían seguir los nuevos viajes en bicicleta, sin afectar mayormente al resto de los modos.

Marco conceptual

Los modelos estratégicos de transporte urbano suelen estructurarse según el esquema conocido actualmente como *modelo de cinco etapas* (Ortúzar & Willumsen, 2024), esto es: 1. generación de viajes; 2. distribución de viajes; 3. elección de la hora de partida del viaje; 4. elección modal y 5. asignación de viajes a la red.

La bicicleta puede incorporarse como un modo adicional en las etapas de elección modal y asignación en la red. Un ejemplo interesante de este enfoque es la herramienta *Ciclo-P* (<https://www.ciclo-p.cl/>) desarrollada por un equipo dirigido por el Prof. Ricardo Hurtubia en Chile (Hurtubia *et al.*, 2023), que tiene una serie de funcionalidades interesantes:

Modificar los datos existentes

- cambiar la población del área de estudio, aumentando o disminuyendo el total de habitantes o la densidad en cada una de las zonas de modelación;
- cambiar la localización de actividades, modificando el total de metros cuadrados o la densidad de cada uso específico en cada una de las zonas de modelación;
- crear nuevos ejes de ciclovías sobre la red de transporte existente.

Simular la demanda de viajes en bicicleta mediante un modelo estratégico

- establecer cuántos viajes saldrán desde cada una de las zonas (generación);
- determinar los destinos de los viajes generados, es decir, cuántos viajes se dirigen desde cada zona hacia todas las demás; también se determina la atracción de viajes, esto es, cuántos viajes llegarán a cada zona (distribución);

- establecer la cantidad de viajes que se realizarán en bicicleta, desde y hacia cada zona (partición modal), incluyendo los viajes intrazonales;
- asignar los viajes en bicicleta a la red vial, buscando una ruta eficiente para cada par origen destino, tomando en consideración los atributos de la red que afectan el uso de la bicicleta (i.e., tipo de calle, presencia de ciclovías, presencia de buses y pendiente).

La herramienta puede ser transferida a otras ciudades y podría interesar a quienes deseen probar este enfoque.

Representación de la red ciclista

El primer paso consiste en incorporar la infraestructura ciclista dentro de la red de transporte utilizada por el modelo. Cada enlace de la red ciclista debe incluir atributos tales como:

- longitud del tramo
- velocidad promedio de viaje
- pendiente del recorrido
- tipo de infraestructura (ciclovía segregada, ciclovía pintada, calzada compartida, etc.)
- nivel de seguridad percibida

Estos atributos determinan el tiempo de viaje y el nivel de utilidad asociado al modo bicicleta.

Modelo de elección modal

La elección modal se puede llevar a cabo utilizando un modelo de elección discreta como los mencionados en la sección anterior. Dependiendo de la preparación técnica de los profesionales disponibles, y de la disponibilidad de datos, este modelo – clave – puede ser tan sofisticado como se desee. No obstante, la mayoría de las aplicaciones reportadas consideran la versión más sencilla (MNL).

Asignación de viajes en la red

Una vez estimada la partición modal de los viajes, los desplazamientos en bicicleta se asignan a la red ciclista utilizando algoritmos sencillos de rutas mínimas (Ortúzar & Willumsen, 2024, Cap. 10). Este procedimiento permite estimar:

- flujos en cada segmento de la red ciclista
- utilización del corredor ciclista analizado
- redistribución de rutas de los ciclistas.

Evaluación de escenarios

El impacto del proyecto se estima, como es usual, comparando dos escenarios. En primer lugar, un escenario base (sin proyecto) que sólo considera la red ciclista existente. Después, un escenario con proyecto, que considera la red ciclista modificada. Como en los casos anteriormente descritos, el cambio en la demanda ciclista se calcula como:

$$\Delta Q^{bici} = Q_{proy}^{bici} - Q_{base}^{bici}$$

Identificación del modo de origen

Tal como en el caso anterior, el modo de origen de los viajes captados por la bicicleta puede estimarse directamente a partir de los cambios en la partición modal del modelo. Por ejemplo:

$$Q^{auto \rightarrow bici} = Q_{base}^{auto} - Q_{proy}^{auto}$$

Este procedimiento permite estimar cuántos viajes provienen de automóvil, bus y caminata según el caso en análisis.

Estimación de distancias sustituidas

Para el cálculo posterior de emisiones de GEI, es necesario – como en todos los casos analizados – estimar la distancia promedio de los viajes captados por la bicicleta. Como se está trabajando con un modelo relativamente sofisticado y se tiene buena información sobre la red de transporte del área, esta tarea es más sencilla que en los casos anteriores.

Ejemplo de aplicación

Consideremos, nuevamente, el área urbana dividida en cinco zonas de la Figura 3.3. Además, agreguemos la existencia de una mínima red (dos rutas alternativas entre cada par de zonas, una larga, menos congestionada, y una corta) para ilustrar el procedimiento cuando se dispone de un modelo estratégico de transporte; esto es, a partir de información general, se estima el total de viajes generados en cada zona, la distribución de estos entre las distintas zonas, la proporción que elige cada modo y la ruta elegida en cada caso.

La Tabla 3.5 muestra la información general disponible para cada zona, que es bastante típica en estudios de transporte: número de hogares en la zona, tasa de motorización (autos/hogar), porcentaje promedio de trabajadores por hogar e ingreso medio de los hogares.

Tabla 3.5: Información general del área de estudio

Zonas	C	N	E	S	O
Número de hogares	8000	5150	5000	6720	5000
Tasa de motorización	0,28	0,30	0,50	0,33	0,40
Porcentaje de trabajadores	0,77	0,60	0,60	0,60	0,90
Ingreso medio (MM\$)	1,70	0,75	1,40	0,60	0,70

Supongamos que con estos datos se ha estimado el siguiente modelo agregado de *Generación de Viajes*:

$$O_i = Hog_i \cdot (0,1 + 1,0 \cdot TM_i + 0,15 \cdot Trab_i + 0,15 \cdot IM_i)$$

en que O_i es el número de viajes con origen en la zona i , Hog_i el total de hogares en la zona, TM_i la tasa de motorización (autos/hogar) promedio en la zona, $Trab_i$ el porcentaje de trabajadores promedio por hogar en la zona e IM_i el ingreso medio en MM\$. Los coeficientes se basan en valores conservadores de este tipo de modelos para los efectos de este ejemplo.

Aplicando el modelo, se obtiene que los viajes generados por cada zona son 6.004, 3.103, 4.500, 4.099 y 3.700 respectivamente (es decir, prácticamente idénticos a los valores asumidos como datos en la Tabla 3.4 del ejemplo anterior).

Para el resto del ejemplo vamos a suponer la existencia de un modelo de demanda directa, de estructura Logit Jerárquico (ver Ortúzar & Willumsen, 2024, sección 6.6.3), en que el nido inferior corresponde a la elección de ruta, el nido intermedio a la elección de modo y el nido superior a la elección de destino. Para concatenar estos tres nidos en la estructura jerárquica se requiere estimar dos parámetros estructurales, $\emptyset_1$ y $\emptyset_2$, que deben cumplir con la condición $0 < \emptyset_2 \leq \emptyset_1 \leq 1$ para que la estructura jerárquica postulada sea teóricamente consistente; estos parámetros afectan las utilidades máximas esperadas (*logsumas*) provenientes del nido inferior en cada caso.

Modelo de elección de ruta: Cada modo, con excepción de la caminata (pues suponemos que siempre se elegirá la ruta más corta), tiene la posibilidad de utilizar las dos rutas alternativas entre cada par de zonas, cuyas longitudes (y podríamos incluir otras características, como capacidad, número de semáforos, presencia o no de pista sólo bus, etc.) se muestran en la Tabla 3.6. Supondremos que las funciones de utilidad de cada modo son las mismas utilizadas en el ejemplo del Método 2.

Tabla 3.6 Longitud de rutas alternativas entre pares de zonas

Zonas	Rutas	C	N	E	S	O
C	Corta	1,1	3,7	2,8	3,3	3,2
	Larga	1,3	4,2	3,2	3,7	3,3
N	Corta	3,7	1,8	3,6	7	4,1
	Larga	4,2	2,0	4,0	7,4	4,9
E	Corta	2,8	3,6	3,0	5,5	8,3
	Larga	3,2	4,0	3,5	5,9	8,7
S	Corta	3,3	7	5,5	2,5	4,0
	Larga	3,7	7,4	5,9	2,9	4,4
O	Corta	3,2	4,1	8,3	4,0	2,0
	Larga	3,3	4,9	8,7	4,4	2,7

La longitud de cada ruta permite calcular el tiempo de cada modo (dadas velocidades promedio de operación que varían con la pendiente) y el costo de los modos motorizados. Supondremos que en el caso de la bicicleta también influye la presencia de infraestructura ciclista, que consideraremos de la misma forma como se hizo en el ejemplo del Método 2.

A continuación se especifican las ecuaciones de los modelos de elección ruta (Logit binario) en base a los elementos de sus funciones de utilidad que efectivamente varían a este nivel (elegir ruta); por ejemplo, a este nivel no entran las constantes modales. Supondremos que el parámetro estructural asociado a este nido fue estimado como $\emptyset_2=0,70$.

$$\text{Auto: } P_{ruta\ corta} = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{0,04}{0,7}(t_{rlarga}-t_{rcorta}) - \frac{0,001}{0,7}(c_{rlarga}-c_{rcorta})\right)}$$

$$\text{Bus: } P_{ruta\ corta} = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{0,06}{0,7}(t_{rlarga}-t_{rcorta})\right)}$$

Notar que – a este nivel – tampoco entran el tiempo de acceso ni la tarifa de bus, ya que estos atributos tienen el mismo valor en ambas alternativas.

Bici:
$$P_{ruta\ corta} = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{0,08}{0,7} \cdot (t_{rl} - t_{rc}) - \frac{0,1}{0,7} \cdot (S_{rl} - S_{rc}) + \frac{0,1}{0,7} \cdot (I_{rl} - I_{rc})\right)}$$

Como ambas rutas tienen igual pendiente, esta variable no entra en la ecuación a este nivel.

Modelo de Elección de Modo: Con las ecuaciones anteriores podemos calcular las utilidades máximas esperadas (EMU) de cada modo⁶, que son parte importante de sus funciones de utilidad al elegir el modo de viaje entre cada par i - j .

$$EMU_{r-auto-ij} = \ln \left(\exp \left(-\frac{0,04}{0,7} \cdot t_{rcorta} - \frac{0,001}{0,7} \cdot c_{rcorta} \right) + \exp \left(-\frac{0,04}{0,7} \cdot t_{rlarga} - \frac{0,001}{0,7} \cdot c_{rlarga} \right) \right)$$

$$EMU_{r-bus-ij} = \ln \left(\exp \left(-\frac{0,06}{0,7} \cdot t_{rcorta} \right) + \exp \left(-\frac{0,06}{0,7} \cdot t_{rlarga} \right) \right)$$

$$EMU_{r-bici-ij} = \ln \left(\exp \left(-\frac{0,08}{0,7} \cdot t_{rc} - \frac{0,1}{0,7} \cdot S_{rc} + \frac{0,1}{0,7} \cdot I_{rc} \right) + \exp \left(-\frac{0,08}{0,7} \cdot t_{rl} - \frac{0,1}{0,7} \cdot S_{rl} + \frac{0,1}{0,7} \cdot I_{rl} \right) \right)$$

Ahora podemos escribir las probabilidades de elegir cada modo. Dados los umbrales de uso de la caminata y bicicleta supuestos anteriormente (3 y 5 km respectivamente), hay pares origen-destino con sólo tres y dos modos en competencia en lugar de los cuatro habituales. Notar que a este nivel se deben ingresar las variables que no afectaban la elección de ruta (porque eran comunes), pero que **sí** afectan la elección de modo. Además, se debe considerar el parámetro estructural del segundo conjunto de nidos, estimado como $\emptyset_1 = 0,94$:

a) Casos con cuatro modos: El denominador del modelo MNL a este nivel es:

$$D_{4-ij} = \exp \left(-\frac{1,5}{0,94} + \frac{0,7}{0,94} \cdot EMU_{r-bici-ij} - \frac{0,02}{0,94} \cdot Pend_{ij} \right) + \exp \left(\frac{0,7}{0,94} \cdot EMU_{r-auto-ij} \right) + \exp \left(-\frac{1,0}{0,94} + \frac{0,7}{0,94} \cdot EMU_{r-bus-ij} - \frac{0,12}{0,94} \cdot Acc_{ij} - \frac{0,001}{0,94} \cdot c_{ij} \right) + \exp \left(\frac{2}{0,94} - \frac{0,15}{0,94} \cdot t_{ij} \right)$$

Y la probabilidad de elegir bicicleta, por ejemplo, está dada por:

$$P_{bici-ij} = \frac{\exp \left(-\frac{1,5}{0,94} + \frac{0,7}{0,94} \cdot EMU_{r-bici-ij} - \frac{0,02}{0,94} \cdot Pend_{ij} \right)}{D_{4-ij}}$$

Las ecuaciones para los restantes modos son análogas.

b) Casos con tres modos. El denominador es más sencillo, pues desaparece la utilidad del modo caminata, pero la expresión de la probabilidad de elegir bicicleta es la misma.

$$D_{3-ij} = \exp \left(-\frac{1,5}{0,94} + \frac{0,7}{0,94} \cdot EMU_{r-bici-ij} - \frac{0,02}{0,94} \cdot Pend_{ij} \right) + \exp \left(\frac{0,7}{0,94} \cdot EMU_{r-auto-ij} \right) + \exp \left(-\frac{1,0}{0,94} + \frac{0,7}{0,94} \cdot EMU_{r-bus-ij} - \frac{0,12}{0,94} \cdot Acc_{ij} - \frac{0,001}{0,94} \cdot c_{ij} \right)$$

⁶ Notar que como el modo caminata no tuvo elección de ruta, su función de utilidad es exactamente igual que en el ejemplo correspondiente al Método 2.

$$P_{bici-ij} = \frac{\exp(-\frac{1,5}{0,94} + \frac{0,7}{0,94} \cdot EMU_{r-bici-ij} - \frac{0,02}{0,94} \cdot Pend_{ij})}{D_{3-ij}}$$

c) Casos con dos modos. Acá también desaparece la utilidad de la bicicleta, por lo que el denominador incluye solamente las utilidades de auto y bus:

$$D_{2-ij} = \exp\left(\frac{0,7}{0,94} \cdot EMU_{r-auto-ij}\right) + \exp\left(-\frac{1,0}{0,94} + \frac{0,7}{0,94} \cdot EMU_{r-bus-ij} - \frac{0,12}{0,94} \cdot Acc_{ij} - \frac{0,001}{0,94} \cdot c_{ij}\right)$$

Acá, por supuesto, no se calcula la probabilidad de elegir bicicleta, así que el Logit Binario (por ejemplo, para la probabilidad de elegir auto) tiene la forma:

$$P_{auto-ij} = \frac{\exp(\frac{0,7}{0,94} \cdot EMU_{r-auto-ij})}{D_{2-ij}}$$

Modelo de Elección de Destino (Distribución de Viajes): Para cada zona de origen (C a O), las ecuaciones anteriores permiten calcular las utilidades máximas esperadas que entran al modelo MNL a este nivel. Estos valores dependen del tipo de par O-D que se trate, puesto que las expresiones varían para los pares que tienen asociados dos, tres y cuatro modos:

Pares i-j con cuatro modos disponibles

$$EMU_{ij} = \ln(D_{4-ij})$$

Pares i-j con tres modos disponibles

$$EMU_{ij} = \ln(D_{3-ij})$$

Pares i-j con dos modos disponibles

$$EMU_{ij} = \ln(D_{2-ij})$$

Y con esto, la probabilidad de viajar desde el Origen C al destino j , por ejemplo, se calcula sencillamente como sigue (igual que antes, la utilidad máxima esperada entra multiplicada por el factor estructural, en este caso, el correspondiente al nido superior $\emptyset_1 = 0,94$):

$$P_{Cj} = \frac{\exp(0,94 \cdot EMU_{Cj})}{\sum_{k=1}^{k=5} \exp(0,94 \cdot EMU_{Ck})}$$

Finalmente, para saber cuántos viajes van de la zona C a la j , se debe multiplicar esta probabilidad por el número de viajes generados en C, esto es:

$$V_{Cj} = O_C \cdot P_{Cj}$$

La Planilla Excel asociada a este ejemplo permita cambiar los valores de prácticamente todos los parámetros y datos del ejemplo. La idea es que los usuarios de la Guía puedan examinar el efecto no sólo de cambios en la infraestructura ciclista, sino que en las características de las rutas alternativas para los restantes modos. La planilla también entrega los cálculos relacionados con el efecto de cada proyecto analizado, en la reducción de GEI.

4. Estimación de la Variación de Emisiones de GEI Asociadas a Proyectos de Ciclovías

4.1 Introducción

La cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero⁷ (GEI) evitadas por proyectos de infraestructura ciclista constituye un componente esencial en la evaluación integral de intervenciones de movilidad urbana sostenible. El cambio modal desde modos motorizados hacia modos activos, como caminata o bicicleta, no solo contribuye a la reducción de emisiones contaminantes, sino que también genera co-beneficios significativos en términos de salud pública, calidad del aire local y reducción de la congestión vehicular (Calvo Buendia *et al.*, 2019; EEA, 2023; 2024; IPCC, 2021; Pucher & Buehler, 2012).

Esta sección describe el procedimiento para convertir los vehículos-kilómetro (VKT) evitados, estimados mediante los métodos descritos anteriormente, en la estimación de emisiones evitadas de CO₂, CH₄ y N₂O (que se resumen en CO₂ equivalente, CO_{2e}, debido a la preponderancia de este contaminante). El enfoque presentado permite valorar el impacto ambiental de la intervención y compararla con otras medidas de mitigación urbana.

4.2 Principio General de Estimación

La reducción de emisiones asociada a un proyecto ciclista se calcula como la suma, sobre todos los modos motorizados considerados, del producto entre los km de viaje evitados, un factor de emisión y un factor de ajuste que refleja la efectividad real de esa reducción en el sistema de transporte. La formulación general para un contaminante cualquiera es:

$$\Delta E = \sum_m E F_m \cdot \Delta VKT_m \cdot FA_m$$

donde ΔE es la variación en el total de emisiones (kg); $E F_m$ el factor de emisión del modo m (kg/km), ΔVKT_m la reducción de km recorridos por vehículos del modo m (estimada a partir del cambio modal) y FA_m un factor de ajuste del modo m (adimensional, entre 0 y 1), que representa la fracción de los VKT evitados que efectivamente se traduce en una reducción de emisiones a nivel del sistema de transporte.

Este enfoque es consistente con las metodologías utilizadas en inventarios de emisiones del transporte (Calvo Buendia *et al.*, 2019). Los factores de emisión representan la cantidad de un gas determinado emitido por kilómetro recorrido y varían según la tecnología vehicular, el tipo de combustible, las condiciones de operación, la pendiente de las vías (Frésard & Osses, 2001) y el alcance de la contabilización (EEA, 2023; 2024; IPCC, 2019).

El factor de ajuste (FA_m) es necesario porque no todos los kilómetros de viaje que un usuario deja de recorrer, al cambiarse a la bicicleta, implican una reducción neta e inmediata de vehículos operando en la ciudad. En el corto plazo (0 a 2 años), un cambio de pasajeros de

⁷ Los gases de efecto invernadero (GEI) más importantes emitidos por fuentes móviles (vehículos motorizados) son el dióxido de carbono (CO₂), principal producto de la combustión, el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O).

bus a la bicicleta no reduce la cantidad de buses en circulación si el operador mantiene su frecuencia y recorrido. De forma similar, si quien se cambia a la bicicleta es un acompañante en un automóvil y no el conductor, ese automóvil seguirá realizando viajes.

Por otro lado, en el largo plazo (horizonte típico de 10 años), es plausible que una reducción sostenida de la demanda de buses lleve al operador a disminuir frecuencias o acortar recorridos. Del mismo modo, una reducción consistente de viajes en automóvil podría llevar a una menor tenencia o uso agregado de vehículos particulares.

Para dar cuenta de esta dinámica, se definen los siguientes factores de ajuste, que se aplican directamente en la fórmula anterior:

- *Factor de ajuste para automóvil (FA_auto)*: Se estima en un rango de 0,7 a 0,8, basado en la tasa de ocupación típica de automóviles urbanos que es cercana a 1,25 pasajeros/vehículo (Ortúzar, 2019). En promedio, por cada 1,25 personas que dejan el automóvil, solo una es el conductor. Por lo tanto, la fracción máxima de viajes que se eliminan es 1 conductor/1,25 ocupantes = 0,8. El extremo inferior del rango (0,7) permite reflejar situaciones con tasas de ocupación mayores o incertidumbre en la estimación (DfT, 2022b; Litman, 2023).
- *Factor de ajuste para bus (FA_bus)*: Este factor es igual a cero en el corto plazo, reflejando que los servicios de bus rara vez se ajustan de inmediato. Para un horizonte de largo plazo (10 años), se recomienda un rango de 0,6 a 0,8, que refleja la posible adaptación del operador a la menor demanda (Litman, 2023; UNFCCC, 2016). La elección del valor dentro de este rango dependerá de la rigidez del sistema de transporte público local y de los contratos de operación.

4.3 Definición del Sistema para Cuantificar Emisiones

Esta sección describe la metodología para transformar los vehículos-kilómetro evitados en reducciones de emisiones, abordando los límites del sistema, tipos de emisiones, gases considerados y el mecanismo de conversión a una métrica común de impacto ambiental. Su objetivo es proporcionar un marco conceptual que permita definir los alcances de la contabilización de emisiones, identificar los gases relevantes en el transporte urbano y establecer un método de conversión a CO₂ equivalentes (CO₂e).

Este marco se basa en los principios utilizados en inventarios de emisiones del sector transporte y en evaluaciones de políticas de mitigación, incluyendo las metodologías del IPCC (Calvo Buendia *et al.*, 2019; IPCC, 2021), EEA (2023; 2024) y la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, 2016).

4.3.1 Emisiones operacionales del transporte

El sistema de contabilización de emisiones considera dos enfoques. Primero, el enfoque *Tank-to-Wheel* (TTW), que utiliza únicamente las emisiones directas generadas durante la operación del vehículo (combustión en el motor, emisiones de escape). El segundo enfoque, *Well-to-Wheel* (WTW), incluye además las emisiones asociadas a la cadena de suministro del combustible, desde la extracción del recurso energético primario, su refinación, transporte y distribución hasta el tanque del vehículo (EEA, 2023; IPCC, 2019).

Ambos enfoques son relevantes, ya que TTW refleja el impacto operativo directo y es el más utilizado en inventarios de emisiones urbanas y nacionales. Por otro lado, WTW proporciona una perspectiva de ciclo de vida, importante cuando se comparan alternativas energéticas (por ejemplo, combustibles fósiles versus biocombustibles o electricidad), pues el impacto aguas arriba puede variar sustancialmente según la fuente de energía. En esta Guía se adopta exclusivamente el primer enfoque (TTW). Esta elección se alinea con la práctica estándar en inventarios urbanos y facilita el uso de factores de emisión publicados por fuentes oficiales.

Emisiones Tank-to-Wheel

Estas consideran los GEI y contaminantes atmosféricos liberados directamente por el vehículo durante su operación. En el caso de vehículos de combustión interna, incluyen CO₂, CH₄ y N₂O generados en el proceso de combustión y liberados por el escape. Para vehículos eléctricos, las emisiones TTW son nulas (no hay combustión local). El uso de factores TTW es apropiado cuando el objetivo del análisis es evaluar el impacto directo sobre la calidad del aire local y las emisiones operativas del sector transporte (DfT, 2022b).

Gases considerados: CO₂, CH₄ y N₂O

Aunque el dióxido de carbono (CO₂) representa la mayor parte de las emisiones de GEI del transporte en términos de masa, el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) también se emiten en cantidades menores durante la combustión y tienen potenciales de calentamiento global significativamente superiores al CO₂ (IPCC, 2021). Por esto, omitir ambos gases subestimaría el impacto climático real de las emisiones vehiculares. La inclusión de los tres gases principales es coherente con las directrices del *Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático* (IPCC) para inventarios nacionales de GEI y con las metodologías de evaluación de proyectos de transporte recomendadas internacionalmente (IPCC, 2019; UNFCCC, 2016). En contextos urbanos, las emisiones de N₂O pueden ser particularmente relevantes en vehículos equipados con catalizadores de tres vías, donde se genera como subproducto del proceso de reducción catalítica.

4.3.2 Justificación del uso de CO₂e

Los tres gases considerados poseen diferentes capacidades de forzamiento radiativo⁸ y tiempos de permanencia en la atmósfera; por esto es conveniente convertirlos a una métrica común que permita su agregación y comparación. El concepto de CO₂-equivalente (CO₂e) expresa el impacto climático de cada gas en términos de la cantidad de CO₂ que produciría el mismo efecto de calentamiento en un horizonte temporal determinado. Esta conversión se hace utilizando los factores de *potencial de calentamiento global* (GWP), definidos y actualizados periódicamente por el IPCC. El uso de CO₂e como unidad común es la práctica estándar en inventarios nacionales de GEI, en el marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (UNFCCC) y en la evaluación de políticas de mitigación (IPCC, 2013; UNFCCC, 2016).

⁸ El forzamiento radiativo es la diferencia entre la energía solar que absorbe la Tierra y la energía que irradia de vuelta al espacio, medida en W/m². Un valor positivo indica calentamiento (más energía entra que sale), impulsado principalmente por el aumento de GEI antropogénicos.

Potencial de calentamiento global y conversión a CO₂ equivalente

El potencial de calentamiento global a 100 años (GWP₁₀₀) representa la relación entre el forzamiento radiativo causado por la emisión de 1 kg de un gas determinado, integrado a lo largo de 100 años, y el forzamiento causado por 1 kg de CO₂. La elección del horizonte de 100 años es convencional y responde a la necesidad de equilibrar los efectos a corto plazo (donde gases como el CH₄, con vida atmosférica corta, tienen mayor relevancia relativa) con los efectos a largo plazo (dominados por el CO₂, cuya permanencia atmosférica es mucho mayor). El GWP₁₀₀ es el indicador más utilizado en acuerdos internacionales, inventarios nacionales y evaluación de proyectos, lo que facilita la comparabilidad entre estudios bajo marcos estandarizados (IPCC, 2013; 2021), apoyando la toma de decisiones y la comparación con metas de reducción establecidas en políticas públicas.

La conversión de gases a CO₂-equivalente se realiza multiplicando la masa emitida de cada gas por su respectivo GWP₁₀₀. Por ejemplo, si se emite 1 kg de CH₄ y su GWP₁₀₀ es 28, esto equivale a 28 kg de CO₂e; y si se emite 1 kg de N₂O con GWP₁₀₀ de 265, esto equivale a 265 kg de CO₂e. De esta manera, las emisiones totales de CO₂e se calculan sumando las emisiones directas de CO₂ a las emisiones de CH₄ y N₂O multiplicadas por sus respectivos factores GWP. Este procedimiento permite agregar en una sola cifra el impacto climático total de las emisiones vehiculares.

Valores de GWP₁₀₀ adoptados en esta Guía

El quinto informe de evaluación del IPCC (2013) proporcionó valores de GWP₁₀₀ que han sido ampliamente adoptados como referencia en inventarios y evaluaciones de proyectos. Estos no incluyen ciertos efectos de retroalimentación climática indirecta y representan una estimación conservadora del impacto relativo de estos gases. Se decidió utilizar estos valores por defecto debido a su amplia adopción en la literatura previa, en inventarios nacionales reportados a la UNFCCC y en metodologías de evaluación de transporte sostenible, lo que facilita la comparabilidad con estudios y políticas existentes.

El sexto informe de evaluación del IPCC (2021) actualizó los valores de GWP incorporando avances en la comprensión científica del forzamiento radiativo y la dinámica atmosférica de los GEI. Así, presentan ligeras variaciones respecto a los anteriores y además ofrecen opciones que incluyen retroalimentaciones climáticas⁹. Aunque las diferencias numéricas son pequeñas, la elección entre ambas puede influir en los resultados finales de emisiones evitadas, especialmente en proyectos de gran escala o en evaluaciones de largo plazo.

4.4 Factores de Emisión de Referencia

Los factores de emisión (FE) son esenciales para convertir VKT en emisiones evitadas. Dada la variabilidad inherente a las flotas vehiculares, las condiciones operativas y las fuentes de datos disponibles, se recomienda trabajar con rangos de valores que reflejen escenarios de emisión mínima, recomendada y máxima para cada modo de transporte. Para obtener factores de emisión por vehículo-km, se recomienda consultar:

⁹ La retroalimentación climática implica que un cambio inicial en el sistema climático desencadena procesos que amplifican o reducen el calentamiento global original, creando un ciclo de realimentación.

- Inventarios nacionales de emisiones: Muchos países publican factores específicos por tipo de vehículo, tecnología y combustible (por ejemplo, buses urbanos diésel Euro III, IV, V y VI) expresados en gramos de contaminante por vehículo-km.
- Bases de datos internacionales: La Agencia Europea para el Medio Ambiente proporciona factores detallados por categoría vehicular y tecnología de control de emisiones (EEA, 2023; 2024); la herramienta COPERT (*Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport*) ofrece factores parametrizados por país, año del vehículo y condiciones de circulación.
- Guías de evaluación de transporte: El *Department for Transport* del Reino Unido (DfT, 2022b) y el *Victoria Transport Policy Institute* (Litman, 2023) ofrecen rangos de referencia para buses urbanos en contextos diversos.

La Tabla 4.1 presenta los factores de emisión detallados por modo, gas y temporada, expresados por vehículo-kilómetro para automóviles y buses.

Tabla 4.1 Factores de emisión por modo, gas y temporada

Modo	Temporada	Gas	Unidad	Mínimo	Recomendado	Máximo
Automóvil	Invierno	CH ₄	g/km	0,0011	0,0055	0,0220
		CO ₂	kg/km	0,1300	0,2200	0,3300
		N ₂ O	g/km	0,0050	0,0220	0,0660
	Verano	CH ₄	g/km	0,0010	0,0050	0,0200
		CO ₂	kg/km	0,1200	0,2000	0,3000
		N ₂ O	g/km	0,0050	0,0200	0,0600
Bus_km	Invierno	CH ₄	g/km	0,0550	0,1650	0,3300
		CO ₂	kg/km	0,9500	1,2500	1,6000
		N ₂ O	g/km	0,0220	0,0660	0,1320
	Verano	CH ₄	g/km	0,0500	0,1500	0,3000
		CO ₂	kg/km	0,9000	1,2000	1,5000
		N ₂ O	g/km	0,0200	0,0600	0,1200
Bus_paxkm	Invierno	CH ₄	g/pax-km	0,0020	0,0060	0,0110
		CO ₂	kg/pax-km	0,0320	0,0420	0,0530
		N ₂ O	g/pax-km	0,0007	0,0022	0,0044
	Verano	CH ₄	g/pax-km	0,0020	0,0050	0,0100
		CO ₂	kg/pax-km	0,0300	0,0400	0,0500
		N ₂ O	g/pax-km	0,0007	0,0020	0,0040

Nota: Los factores para Bus_paxkm se incluyen como referencia para análisis complementarios, bajo el supuesto de una tasa de ocupación promedio de 30 pasajeros/bus. Su uso directo es incompatible con el método principal (ver Sección 4.4.2).

4.4.1 Automóviles

Los factores de emisión para automóviles deben obtenerse preferentemente de inventarios nacionales actualizados o, en su defecto, de bases de datos internacionales (como los de la EEA o COPERT), ajustados a la composición local de la flota vehicular; varían significativamente en función de la edad promedio de la flota, la tecnología de motorización (gasolina, diésel, híbridos, eléctricos), el tipo de combustible utilizado y las condiciones de circulación. En particular, las emisiones por kilómetro aumentan notablemente en condiciones de congestión debido a la reducción de eficiencia del motor y al incremento de tiempo en ralentí (EEA, 2024). En contextos urbanos típicos, los inventarios de emisiones recomiendan distinguir entre condiciones de tráfico libre y congestionado, aplicando factores diferenciados cuando se dispone de información sobre la fracción de VKT que circula en cada régimen (DfT, 2022b; IPCC, 2019).

Nota sobre otros modos motorizados: Esta Guía se centra en la sustitución de viajes en automóvil particular y bus urbano, que constituyen la mayoría de los viajes motorizados sustituibles en entornos urbanos típicos. El cambio modal desde vehículos comerciales ligeros o de reparto (camionetas, furgones, motocicletas de mensajería) no se considera en esta versión de la Guía, dada su baja elasticidad de sustitución documentada en la literatura. Si una política pública o un proyecto específico presenta evidencia local de un cambio modal significativo desde estos modos, se recomienda incorporarlos al cálculo utilizando factores de emisión específicos de la EEA (2024) y un factor de ajuste $FA = 1.0$ (asumiendo que cada viaje evitado de un vehículo comercial elimina efectivamente ese vehículo de la vía).

4.4.2 Transporte público

En el caso de buses urbanos, los factores de emisión dependen de la tecnología de propulsión (diésel convencional, gas natural comprimido, biodiesel, híbrido, eléctrico), la antigüedad y estado de mantenimiento de la flota, el régimen de conducción urbano (con frecuentes arranques, frenadas y ralentí) y el nivel de ocupación promedio del vehículo. A diferencia de los automóviles, los buses diésel urbanos tienen mayor peso y potencia, y sus emisiones absolutas por vehículo-km son considerablemente más altas. Sin embargo, como transportan múltiples pasajeros, el impacto ambiental por pasajero-km es típicamente menor que el del automóvil particular (Rizzi & de la Maza, 2017). Se recomienda utilizar factores específicos de inventarios locales cuando estén disponibles, o en su defecto, valores de referencia, por ejemplo de EEA (2024), ajustados por tecnología y antigüedad de la flota.

4.4.3 Modos de transporte activo

Caminata

Las emisiones operacionales directas de la caminata (TTW) son esencialmente nulas, dado que no existe consumo de combustibles fósiles ni operación de maquinaria motorizada. No obstante, algunos análisis de ciclo de vida extendido incluyen una estimación de emisiones indirectas asociadas al incremento del gasto calórico del caminante, pero es una práctica controvertida debido a la alta incertidumbre de los supuestos sobre dieta, origen de los alimentos, y la asignación de emisiones del sistema alimentario al transporte (Litman, 2023). En esta Guía, las emisiones de la caminata se consideran nulas para todos los efectos.

Bicicleta

Las emisiones operacionales directas de la bicicleta (TTW) también son nulas. La inclusión opcional de un factor WTW dietario reflejaría el incremento en el consumo de alimentos asociado al esfuerzo físico del ciclista. Los rangos de referencia para este factor varían ampliamente en la literatura debido a diferencias en los supuestos sobre intensidad del ejercicio, eficiencia metabólica, composición de la dieta y huella de carbono de los alimentos consumidos (Litman, 2023; Pucher & Buehler, 2012). Dada esta alta incertidumbre y la complejidad de su estimación, esta Guía no incorpora un factor de emisión para la bicicleta, adoptando un valor de cero para las emisiones TTW del modo ciclista.

4.5 Estimación de la Reducción de Emisiones

El procedimiento operativo para estimar las emisiones evitadas consta de los siguientes cinco pasos secuenciales:

Paso 1: Partida. Se toman los vehículos-km (VKT) que dejan de recorrerse como consecuencia del cambio modal hacia la bicicleta por modo de transporte (automóvil, transporte público en bus) y por temporada (verano e invierno en esta Guía), tal como fueron calculados en las etapas previas del análisis de demanda.

Paso 2: Aplicación de los factores de ajuste para efectividad (FA_m). Los VKT evitados para cada modo se multiplican por el factor de ajuste correspondiente (FA_{auto} y FA_{bus}), especificado en la Sección 4.1, para obtener los VKT efectivamente eliminados del sistema de transporte. Este paso asegura no sobrestimar el impacto, especialmente en el caso del transporte público en el corto plazo ($FA_{bus} = 0$). Como ya se especificó, se recomienda hacer una diferencia entre una evaluación a corto plazo (uno o dos años) y una de largo plazo.

Paso 3: Anualizar. Los VKT diarios ajustados (ya multiplicados por FA_m) de cada temporada se multiplican por el número de días correspondiente a cada temporada (considerando la proporción del año asignada a verano e invierno) para obtener los VKT anuales efectivamente evitados por modo. La suma de todas las temporadas proporciona el total anual de VKT eliminados por modo.

Paso 4: Aplicación de factores de emisión. Para cada modo y cada gas (CO_2 , CH_4 y N_2O), se multiplican los VKT anuales efectivamente evitados por los factores de emisión correspondientes (TTW). Dado que existen rangos de incertidumbre en los factores de emisión, se recomienda calcular tres escenarios: mínimo, recomendado y máximo. Esto permite caracterizar la incertidumbre asociada a la variabilidad tecnológica, operativa y de composición de la flota.

Paso 5: Conversión a CO_2e . Las emisiones evitadas de CH_4 y N_2O (expresadas inicialmente en kg o gramos) se convierten a CO_2 -equivalente multiplicando por los factores GWP_{100} correspondientes. Las emisiones de CO_2 propias y las CO_2e provenientes de CH_4 y N_2O se suman para obtener las emisiones totales evitadas de CO_2e por modo y temporada (TTW).

Limitaciones del método de estimación

Es importante que los usuarios de esta Guía conozcan las limitaciones y alcances del método propuesto para interpretar correctamente los resultados.

- **Efecto de tráfico de relleno e inducido:** Esta Guía adopta un enfoque a nivel de proyecto. Los cálculos asumen que los VKT efectivamente eliminados no son reemplazados por nuevos viajes motorizados que podrían aprovechar la capacidad vial liberada por el cambio modal (efecto conocido como tráfico de relleno o demanda inducida a corto plazo). En corredores con alta congestión, este fenómeno puede ser significativo y los resultados obtenidos acá deben interpretarse como una cota superior de la reducción de emisiones atribuible al proyecto en ese eje específico. La estimación del efecto neto a nivel de red en ese caso requeriría un modelo de transporte que excede el alcance de esta Guía simplificada (Litman, 2023).
- **Horizontes temporales y factor de ajuste:** Los resultados son altamente sensibles a la elección del horizonte temporal (corto vs. largo plazo), que se maneja mediante los factores de ajuste FA_m . Se debe ser transparente sobre el horizonte asumido en la presentación de resultados.
- **Exclusión de otros modos y combustibles alternativos:** El análisis se limita a la sustitución de automóviles a gasolina/diésel y buses urbanos, y no incluye motocicletas, vehículos de carga ligera ni flotas de buses eléctricos. Si el contexto local presenta una alta penetración de estos modos, los resultados podrían subestimar o sobrestimar el impacto real.

4.6 Presentación de Resultados

Se sugiere presentar los resultados en tablas, agregando por modo, temporada y total anual, considerando como columnas a los VKT evitados (diarios y anuales), las emisiones evitadas de CO₂ (kg), CH₄ y N₂O (convertidas a kg CO₂e) y los totales en toneladas de CO₂e (tCO₂e) para TTW, con valores mínimo, recomendado y máximo. Se debe indicar explícitamente en las tablas los factores de ajuste (FA_m) y el horizonte temporal utilizados para el cálculo.

La presentación de resultados también debería incluir métricas normalizadas que faciliten su interpretación y comparación con los resultados de otras intervenciones:

- tCO₂e evitadas por año: métrica principal para evaluaciones de mitigación climática
- tCO₂e evitadas por viaje inducido en bicicleta: permite evaluar la eficiencia de la intervención por unidad de cambio modal.
- tCO₂e evitadas por km de ciclovía construida: facilita la comparación de costo-efectividad entre proyectos de diferente escala.

La incertidumbre inherente a los factores de emisión, los supuestos de demanda y los factores de ajuste debe reflejarse con claridad al presentar resultados usando los rangos (mínimo, recomendado y máximo) y, cuando sea posible, mediante intervalos de confianza derivados de análisis probabilísticos. La transparencia en el reporte de supuestos (composición de flota, condiciones de tráfico, temporadas, fuentes de factores de emisión, factor de ajuste y horizonte temporal asumidos) es esencial para la reproducibilidad y para permitir la actualización futura del análisis con datos locales más precisos (DfT, 2022b; Litman, 2023).

Una serie de tablas, algunas complementadas con gráficos, siguiendo esta línea de argumentación se presentan en la Planilla Excel complementaria a esta Guía.

4.7 Análisis de Sensibilidad

Dada la incertidumbre asociada a múltiples parámetros de entrada (factores de emisión, tasas de adopción de la bicicleta, partición modal original, condiciones de tráfico, tasas de ocupación, estacionalidad, y el propio factor de ajuste FA_m) es importante realizar análisis de sensibilidad para caracterizar la robustez de las estimaciones de emisiones evitadas y para identificar los parámetros que más influyen en los resultados.

4.7.1 Escenarios determinísticos

La construcción de escenarios determinísticos considera combinar valores extremos (mínimo y máximo) y valores centrales (recomendados) de ciertos parámetros clave del enfoque, para generar escenarios de emisiones evitadas bajas, base y altas. Los parámetros a considerar incluyen: factores de emisión (mínimo/recomendado/máximo por modo y gas), tasa de adopción de la bicicleta (Pc), proporción de viajes potencialmente ciclables (Pd), fracción de VKT en condiciones de congestión, factor de declinación estacional ($f_{bici_invierno}$) y factor de ajuste FA_m . La combinación de valores bajos produce un escenario conservador de emisiones evitadas; la combinación de valores recomendados produce el escenario base y la combinación de valores altos produce un escenario optimista.

Este enfoque es transparente, fácil de comunicar y permite identificar rápidamente el rango plausible de resultados (IPCC, 2019; Litman, 2023).

4.7.2 Recomendaciones operativas para el análisis de sensibilidad

Los parámetros a priorizar en el análisis de sensibilidad, dado su impacto típicamente alto en los resultados de emisiones evitadas, son:

- **Tasa de adopción de la bicicleta (Pc)** o los parámetros asociados a la función de utilidad de la bicicleta en el modelo de elección modal, ya que afectan directamente la magnitud de la demanda inducida.
- **Factor de declinación estacional ($f_{bici_invierno}$)**: determina la proporción de viajes en bicicleta que se mantiene durante el invierno y, por tanto, permite anualizar los beneficios.
- **Factor de emisión de automóviles (EF_{auto})**: dado que la mayor parte de los VKT evitados suelen provenir de la sustitución de viajes en automóvil, el factor de emisión de este modo tiene un impacto predominante.
- **Factores de ajuste (FA_{auto} y FA_{bus})**: la incertidumbre en la efectividad real de la reducción, especialmente en el largo plazo, puede alterar significativamente los resultados y debe ser explorada en el análisis de sensibilidad.
- **Fracción de VKT en condiciones de congestión**: las emisiones por kilómetro aumentan significativamente en condiciones de congestión; la incertidumbre en esta fracción se traduce directamente en incertidumbre en las emisiones.
- **Regla de asignación del modo de origen**: la distribución de los nuevos viajes en bicicleta entre los modos originales afecta qué factores de emisión se deben aplicar.

Se recomienda resumir los resultados gráficamente mediante histogramas o diagramas de violín, que muestren la distribución de emisiones evitadas, o mediante gráficos tornado que jerarquicen la contribución de cada parámetro a la varianza total. Estos gráficos facilitan la comunicación de la incertidumbre a audiencias no técnicas y apoyan la toma de decisiones informadas bajo incertidumbre (IPCC, 2019; VTPI, 2022).

Referencias Bibliográficas

Alimo, P.K., Franceschini, M., Manout, O. & Bouzouina, L. (2026). Impact of cycle lanes and public bike parking on bicycle commuting: how to achieve France's cycling mode share target? *Transport Policy* **184**, 104165. doi.org/10.1016/j.tranpol.2026.104165.

Aoun, A., Bjornstad, J., DuBose, B., Mitman, M. & Pelon, M. (2015). *Bicycle and Pedestrian Forecasting Tools: State of the Practice*. White paper Series, Pedestrian and Bicycle Information Center, www.pedbikeinfo.org/downloads/PBIC_WhitePaper_Forecasting.pdf.

Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy* **15**, 73–80.

Bahamonde-Birke, F.J., Kunert, U., Link, H. & Ortúzar, J. de D. (2017). About attitudes and perceptions – finding the proper way to consider latent variables in discrete choice models. *Transportation* **44**, 475-493.

Bahamonde-Birke, F.J. & Ortúzar, J. de D. (2020). How to categorize individuals on the basis of underlying attitudes? A discussion on latent variables, latent classes and hybrid choice models. *Transportmetrica* **17A**, 856-877.

Ben-Akiva, M., McFadden, D., Train, K., Walker, J., Bhat, C., Bierlaire, M., Bolduc, D., Boersch-Supan, A., Brownstone, D., Bunch, D., Daly, A., de Palma, A., Gopinath, D., Karlstrom, A. & Munizaga, M. (2002). Hybrid choice models: progress and challenges. *Marketing Letters* **13**, 163-175.

Bierlaire, M. (2016). Python Biogeme: a short introduction. *Report TRANSP-OR 160706, Series on Biogeme*. Ecole Polytechnique Federal de Laussane.

Bollen, K.A. (1989). *Structural Equations with Latent Variables*. John Wiley & Sons, Chichester.

Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. & Federici, S. (eds) (2019). *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Switzerland.

CAF (2018). *Encuesta de Movilidad Urbana en América Latina*. Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe, Caracas.

Carrasco, J.A. & Ortúzar, J. de D. (2002). A review and assessment of the nested logit model. *Transport Reviews* **22**, 197–218.

Caussade, S., Ortúzar, J. de D., Rizzi, L.I. & Hensher, D.A. (2005). Assessing the influence of design dimensions on stated choice experiment estimates. *Transportation Research* **39B**, 621-640.

Daly, A.J. & Zachary, S. (1978) Improved multiple choice models. En D.A. Hensher & M.Q. Dalvi (eds.), *Determinants of Travel Choice*. Saxon House, Westmead.

- Dell'Olio, L., Ibeas, A., Bordagaray, M. & Ortúzar, J. de D. (2014). Modelling the effects of pro bicycle infrastructure and policies toward sustainable urban mobility. *Journal of Urban Planning and Development of ASCE* **140**. doi:10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000190.
- DfT (2022a). *Active Mode Appraisal Toolkit: User Guide*. Department for Transport UK Government. www.gov.uk/government/publications/active-mode-appraisal-toolkit-user-guidance.
- DfT (2022b). *TAG Unit A5.1: Active Mode Appraisal*. Transport Analysis Guidance (TAG), Department for Transport UK Government. www.gov.uk/transport-analysis-guidance-tag.
- EC (2023). France plans to invest €2 billion in cycling. https://urban-mobility-observatory.transport.ec.europa.eu/newsevents/news/france-plans-invest-eu2-billion-cycling-2023-05-31_en, European Commission, Bruselas.
- EEA (2023). *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2023*. EAE Report 06/2023, European Environment Agency, Copenhagen.
- EEA (2024). *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2023*. Update 2024. Passenger cars, light commercial trucks, heavy-duty vehicles including buses and motorcycles. European Environment Agency, Copenhagen.
- Fishman, E., Washington, S. & Haworth, N. (2013). Bike share: a synthesis of the literature. *Transport Reviews* **33**, 148–165.
- Frésard, F. & Osses, M. (2001) Topographical effects on global emissions from mobile sources in urban networks. *Seventh International Conference on Urban Transport and the Environment*. Wessex Institute of Technology.
- Gutiérrez, M., Cantillo, V., Arellana, J. & Ortúzar, J. de D. (2020a). Estimating bicycle demand in an aggressive environment. *International Journal of Sustainable Transportation* **15**, 259-272.
- Gutiérrez, M., Hurtubia, R. & Ortúzar, J. de D. (2025). Willingness to change compulsory trips to bicycle: role of habit, perceptions and the built environment. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **193**, 104395. doi.org/10.1016/j.tra.2025.104395.
- Gutiérrez, M., Hurtubia, R. & Ortúzar, J. de D. (2020b). The role of habit and the built environment in the willingness to commute by bicycle. *Travel Behaviour and Society* **20**, 62-73.
- Hess, S. & Palma, D. (2019). Apollo: a flexible, powerful and customisable freeware package for choice model estimation and application. *Journal of Choice Modelling* **32**, 100170. doi.org/10.1016/j.jocm.2019.100170.
- Hurtubia, R., Billikopfa, S., Abéb, I., Schuwirtha, J., Larrain, H. & Raveau, S. (2023). Ciclo-P: una herramienta para la simulación de la demanda y la planificación de la infraestructura ciclista. *21 Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte*. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 23-25 Octubre 2023, Valparaíso.
- Hopkinson, P. & Wardman, M. (1996). Evaluating the demand for new cycle facilities. *Transport Policy* **3**, 241–249.

IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (AR5). Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Disponible en: www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/

IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (AR6). Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.

Khan, M., Kockelman, K.M. & Xiong, X. (2014). Models for anticipating non-motorized travel choices, and the role of the built environment. *Transport Policy* **35**, 117–126.

Litman, T. (2023). *Evaluating Active Transport Benefits and Costs: Guide to Valuing Walking and Cycling Improvements and Encouragement Programs*. Victoria Transport Policy Institute, Victoria.

Lovelace, R., Goodman, A., Aldred, R., Berkoff, N., Abbas, A. & Woodcock, J. (2017). The Propensity to Cycle Tool: an open source online system for sustainable transport planning. *Journal of Transport and Land Use* **10**, 505–528.

McFadden, D. (1974). Conditional logit analysis of qualitative choice behavior. En P. Zarembka (Ed.), *Frontiers in Econometrics*. Academic Press, New York.

Ortúzar, J. de D. (2019). Sustainable urban mobility: what can be done to achieve it? *Journal of the Indian Institute of Science* **99**, 683-693.

Ortúzar, J. de D., Iacobelli, A. & Valeze, C. (2000). Estimating demand for a cycleway network. *Transportation Research Part A* **34**, 353–373.

Ortúzar, J. de D. & Willumsen, L.G (2024). *Modelling Transport* (5th ed.). John Wiley & Sons, Chichester.

Pelechrinis, K., Zacharias, C., Kokkodis, M. & Lappas, T. (2017). Economic impact and policy implications from urban shared transportation: the case of Pittsburgh's shared bike system. *PLoS ONE* **12**, e0184092. doi.org/10.1371/journal.pone.0184092.

Pucher, J. & Buehler, R. (2012). *City Cycling*. MIT Press, Cambridge, Mass.

Rizzi, L.I. & de la Maza, C. (2017). The external costs of private versus public road transport in the Metropolitan Area of Santiago, Chile. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* **98**, 123-140.

Rose, J.M. & Bliemer, M.C.J. (2009). Constructing efficient stated choice experimental designs *Transport Reviews* **29**, 587-617.

- Rossetti, T., Saud, V. & Hurtubia, R. (2019). I want to ride it where I like: measuring design preferences in cycling infrastructure. *Transportation* **46**, 697–718.
- Sagaris, L., Mora, R. & Vecchio, G. (2025). Movilidad activa. En M. Greene, R. Mora y J. de D. Ortúzar (eds.), *Accesibilidad y Movilidad*, 14-35. Ediciones ARQ, Santiago.
- SDG (2013). *Análisis y Evaluación del Plan Maestro de Ciclovías del Gran Santiago*. Steer Davies and Gleave, Santiago.
- Train, K. (2009). *Discrete Choice Methods with Simulation* (2nd ed.). Cambridge University Press, Cambridge.
- UNEP (2016). *Global Outlook on Walking and Cycling: Policies & realities from around the world*. United Nations Environment Programme, Kenya.
- UNFCCC (2014). *Methodological Tool 18: Baseline Emissions for modal shift measures in urban passenger transport*. Clean Development Mechanism, United Nations Framework Convention on Climate Change, Bonn.
- UNFCCC (2016). *Methodological Approaches for Modal Shift Transport Projects*. United Nations Framework Convention on Climate Change. Bonn.
- Williams, H.C.W.L. (1977). On the formation of travel demand models and economic evaluation measures of user benefit. *Environment and Planning Part A: Economy and Space* **9**, 285–344.
- World Bank (2020). *Sustainable Mobility for All: Global Mobility Report*. World Bank, Washington, D.C.
- WHO (2014). *Health Economic Assessment Tool (HEAT) for Walking and Cycling*. World Health Organization, Geneva.
- Younkin, S.G., Fremont, H.C. & Patz, J.A. (2021). The Health-Oriented Transportation Model: estimating the health benefits of active transportation. *Journal of Transport & Health* **22**, 101103, doi.org/10.1016/j.jth.2021.101103
- VTPI (2022). *Transportation Cost and Benefit Analysis II – Vehicle Costs*. Victoria Transport Policy Institute (www.vtppi.org/tca/tca0501.pdf).