



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

**ACCESIBILIDAD Y EQUIDAD:
HERRAMIENTAS PARA AMPLIAR LA
EVALUACIÓN SOCIAL DE PROYECTOS
DE TRANSPORTE**

MARKUS NIEHAUS DEL SOLAR

Tesis para optar al grado de

Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesores Supervisores:

PATRICIA GALILEA ARANDA

RICARDO HURTUBIA GONZÁLEZ

Santiago de Chile, julio, 2016

© 2016, Markus Niehaus Del Solar

© 2016, Markus Niehaus Del Solar

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento que acredita a su autor.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERÍA

**ACCESIBILIDAD Y EQUIDAD:
HERRAMIENTAS PARA AMPLIAR LA
EVALUACIÓN SOCIAL DE PROYECTOS
DE TRANSPORTE**

MARKUS NIEHAUS DEL SOLAR

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

JOSÉ LUIS ALMAZÁN

SEBASTIÁN RAVEAU FELIÚ

ALAN THOMAS TORRES

PATRICIA GALILEA ARANDA

RICARDO HURTUBIA GONZÁLEZ

Para completar las exigencias del grado de

Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, julio, 2016

Al que viaja anónimamente desde la
periferia de nuestras ciudades, que
sortea grandes obstáculos para poder
vivir con dignidad

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias a una gran cantidad de personas, quienes me guiaron, aconsejaron y apoyaron a lo largo de todas sus etapas. En primer lugar me gustaría agradecer el tiempo invertido de manera desinteresada, el apoyo con datos y valiosísimos consejos a personas de SECTRA: Alan Thomas Torres, Carlos Melo y Felipe Pereira. También participaron Patricia Ortega, Carlos Mella, Verónica Álvarez y Graciela Keyer. De igual manera, agradezco de corazón a quienes contribuyeron activa- y generosamente: Felipe González, Alexandra Soto, Jonathan Orrego y Tomás Cox.

Durante el trabajo de la tesis tuve la oportunidad de presentar en diferentes conferencias, donde recibí importantes sugerencias e ideas de Anson Stewart (MIT), Luis Ignacio Rizzi (U. Católica de Chile) y Glen Weisbrod (EDRS), además del revisor anónimo de la revista *Research in Transportation Economics*. También quiero mencionar los comentarios de Corinne Mulley (U. Sydney), Marcela Munizaga (U. de Chile), Juan Antonio Carrasco (U. de Concepción) y Javier Boncompte (MTT).

El apoyo incondicional de mis profesores guía Patricia Galilea y Ricardo Hurtubia sin duda fue una pieza vital. Sabiamente mezclaron tanto correcciones a tiempo y contribución de piezas clave, como acompañamiento con la confianza y el espacio necesarios para crear. Adicionalmente, me gustaría honrar a Juan Enrique Coeymans y Juan Carlos Muñoz por la inspiración de ingresar a la especialidad de transporte, motivaciones que siguen vivas hasta el día de hoy, en parte alimentadas por los abundantes “urbanistas caviar”. También agradezco los buenos momentos y los consejos de mis ex-compañeros del magíster, principalmente a Natan Waintrub, Tomás Rossetti.

Por último, esta tesis realmente no hubiese sido posible sin Cristina y Guillermo, mis progenitores, formadores y despachadores de toneladas de cariño y ayuda constante. También refleja ideas conversadas con diversos amigos, a quienes se las dedico con cariño. Valoro también el apoyo durante mi carrera del Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CONICYT/FONDAP/15110020) y el BRT Centre of Excellence de VREF.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1. Contexto de planificación de transporte urbano	5
2.1.1. Impactos económicos más amplios	5
2.1.2. Análisis multi-criterio.....	7
2.2. Accesibilidad a oportunidades: definición y aplicaciones	9
2.3. Enfoques de equidad en el transporte	14
2.3.1. Sesgos de equidad en la metodología tradicional	14
2.3.2. Desigualdad y segregación en Chile y el rol del transporte.....	16
2.3.3. Conceptos para un análisis de accesibilidad y ejemplos	19
3. METODOLOGÍA.....	23
3.1. Discusión respecto a sesgos de equidad adicionales.....	23
3.1.1. Beneficios de usuario en vista de economías de aglomeración	24
3.1.2. Patrones de viaje actuales y cambios urbanos	26
3.1.3. Contexto de desigualdad de ingresos y segregación espacial.....	27

3.2.	Medidas de accesibilidad	28
3.2.1.	Modelos estratégicos y accesibilidad simulada	29
3.2.2.	Medidas basadas en factores de balance.....	31
3.2.3.	Medidas de accesibilidad potencial	36
3.2.4.	Selección de la medida de accesibilidad.....	40
3.2.5.	Datos y propiedades de la formulación final de accesibilidad	41
3.3.	Síntesis de poblaciones con métodos bayesianos	45
3.3.1.	Ajuste de distribuciones.....	46
3.3.2.	Modelo de inferencia bayesiana	47
3.4.	Medición de la equidad de acceso.....	49
3.4.1.	Coeficiente de Gini	49
3.4.2.	Indicadores de aporte a la equidad de acceso	51
4.	INSTRUMENTOS Y CASOS DE ESTUDIO	55
4.1.	Antecedentes urbanos de Santiago.....	55
4.1.1.	Actividades y selección de empleo como variable	55
4.1.2.	Desigualdad y segregación	59
4.2.	Procesamiento de datos	63
4.2.1.	Oportunidades de empleo	64
4.2.2.	Deciles de ingreso per cápita	66
4.2.3.	Modelo de simulación ESTRAUS y manejo de datos.....	69
4.3.	Herramienta: EquiAccess.....	71
4.4.	Proyectos considerados	73

4.4.1.	Descripción y rentabilidad.....	74
4.4.2.	Análisis de proyectos según sus tiempos de viajes.....	76
5.	APLICACIÓN DE METODOLOGÍAS Y RESULTADOS	83
5.1.	Accesibilidad al empleo	83
5.1.1.	Estimación de parámetros.....	83
5.1.2.	Mediciones de accesibilidad en situaciones base	86
5.2.	Efectos de los proyectos como cambio de accesibilidad	91
5.2.1.	Análisis de la distribución territorial de impactos	91
5.2.2.	Análisis del resultado cuantitativo de cada proyecto.....	98
5.3.	Poblaciones sintéticas	101
5.3.1.	Distribuciones de ingreso de las comunas	101
5.3.2.	Acomodo bayesiano a zonas y resultado en el territorio	104
5.4.	Accesibilidad equitativa e impactos de los proyectos.....	108
5.4.1.	Herramientas de diagnóstico: Inequidad de acceso	108
5.4.2.	Impacto de proyectos según decil de ingreso per cápita.....	113
5.4.3.	Aporte a la Equidad de Acceso de proyectos	118
6.	CONCLUSIONES.....	123
6.1.	Contribuciones en el contexto de la evaluación social de proyectos	124
6.2.	Otras aplicaciones que derivan de la propuesta	127
6.3.	Caminos de investigación	129
	BIBLIOGRAFÍA.....	131
	A N E X O S	139

A. Accesibilidad utilitaria según factores de balance	140
B. Anualización de los viajes y propósitos de la Encuesta	143
C. Propósito al trabajo y rezonificación	145
D. Comparación según fuentes de datos de empleo	146
E. Equiaccess	148
F. Distribuciones de Probabilidad de las comunas	158
G. Resultados de la población sintética generada	163

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4-1. Definición de los deciles de ingreso	69
Tabla 4-2. Estructura de programas de EquiAccess en Python	72
Tabla 4-3. Proyectos considerados para cálculo de accesibilidad.....	74
Tabla 4-4. Resumen de resultados de los proyectos y su rentabilidad.....	75
Tabla 5-1. Valores sociales del tiempo de las respectivas evaluaciones.....	85
Tabla 5-2. Resultados agregados de accesibilidad al empleo en situaciones base.....	86
Tabla 5-3. Resultados agregados de cambio de accesibilidad y comparación.....	99
Tabla 5-4: Características de comunas, parámetros y bondad de ajuste	102
Tabla 5-5. Gini zonal de la accesibilidad al trabajo y del ingreso per cápita.....	109
Tabla 5-6. Gini zonal de la inequidad de acceso al trabajo.....	113
Tabla 5-7. Cambio en el Gini de cada proyecto según modo y formulación.....	119
Tabla 5-8. Resultados por proyecto en indicadores Aporte a la Equidad de Acceso....	120
Tabla B-1. Temporadas y periodos en la Encuesta, factores anuales calculados	143
Tabla B-2. Viajes según propósitos en la Encuesta de Movilidad.....	143
Tabla C-1. Información sobre el propósito al trabajo de la Encuesta de Movilidad.....	145
Tabla D-1. Comparación fuentes de datos según resultado accesibilidad al empleo....	146
Tabla D-2. Comparación fuentes de datos según diez zonas de mejor accesibilidad ...	147
Tabla D-3. Comparación fuentes de datos según diez zonas de peor accesibilidad	147
Tabla F-1. Características de comunas, parámetros y bondad de ajuste	158

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Componentes de la accesibilidad según Geurs y van Wee (2004).....	10
Figura 2-2. Componentes de la accesibilidad según Stewart y Zegras (2015)	11
Figura 2-3. Práctica convencional versus aplicando Maximax (Martens et al. 2012)	20
Figura 3-1. Esquema de accesibilidad potencial desde un origen i a destinos j	37
Figura 3-2. Propiedades de la medida de accesibilidad inversa p. descartada.....	40
Figuras 3-3. Propiedades de la medida de accesibilidad exponencial negativa.....	42
Figura 3-4. Ejemplo la curva de Lorenz junto a explicación gráfica del Gini.	50
Figura 4-1. Distribución de actividades seleccionadas en Gran Santiago	57
Figura 4-2. Ingreso per cápita en Gran Santiago, promedio zonal en miles de pesos	61
Figura 4-3. Densidad poblacional por hectárea y tamaño medio del hogar	62
Figura 4-4. Distribución de oportunidades de empleo según cantidad.	64
Figura 4-5. Superficie destinada a trabajo según hectáreas desde datos SII (2013)	65
Figura 4-6. Histograma y distribución del ingreso per cápita en el Gran Santiago.	68
Figura 4-7. Estructura de la base de datos operada por EquiAccess en PostgreSQL	73
Figura 4-8. Tiempo de viaje medio potencial al empleo en ev. 1 – Punta mañana.....	78
Figura 4-9. Tiempo de viaje medio potencial al empleo en ev. 2 – Punta mañana.....	79
Figura 4-10. Tiempo de viaje medio potencial al empleo en ev. 3 – Punta mañana 1....	80
Figura 4-11. Tiempo de viaje medio potencial al empleo en ev. 4 – Punta mañana.....	81
Figura 5-1. Función exponencial negativa calibrada y costos medios en la Base 1.	84
Figura 5-2. Accesibilidad al empleo en la situación Base 1, punta mañana.	88
Figura 5-3. Accesibilidad al empleo en la situación Base 2, punta mañana.	89

Figura 5-4. Accesibilidad al empleo en la situación Base 3, punta mañana 1.	90
Figura 5-5. Impacto en accesibilidad al empleo proyecto e. de Línea 1 de Metro	92
Figura 5-6. Impacto en accesibilidad al empleo proyecto e. de Línea 5 de Metro	94
Figura 5-7. Impacto en accesibilidad al empleo proyecto de Corredores de buses	95
Figura 5-8. Impacto en accesibilidad al empleo proyecto de Tarificación Vial.	96
Figura 5-9: Distribución ajustada e histograma del ingreso per cápita por comuna.....	103
Figura 5-10. Distribución del ingreso per cápita según proporciones de deciles.....	105
Figura 5-11. Distribución del ingreso per cápita según la población de cada decil.....	107
Figura 5-12. Curvas de Lorenz de la accesibilidad zonal	109
Figura 5-13. Inequidad de acceso al empleo en el Gran Santiago de acuerdo a los resultados de la Base 3 (Tarificación).....	112
Figura 5-14. Cambio de accesibilidad para cada decil, modo transporte público $r=1$.	114
Figura 5-15. Cambio de accesibilidad para cada decil, modo transporte público $r=2$.	114
Figura 5-16. Cambio de accesibilidad para cada decil, modo auto.....	115
Figura 5-17. Relevancia del cambio de accesibilidad para cada decil, modo transporte público $r=1$	116
Figura 5-18. Relevancia del cambio de accesibilidad para cada decil, modo transporte público $r=2$	116
Figura 5-19. Relevancia del cambio de accesibilidad para cada decil, modo auto.....	117
Figura 6-1. Posibles contribuciones de las metodologías de análisis propuestas en la planificación urbana	125
Figura A-1. Accesibilidad según factores de balance, categoría ingreso 1 sin auto	140
Figura A-2. Accesibilidad según factores de balance, categoría ingreso 3 sin auto	141

Figura A-3. Accesibilidad según factores de balance, categoría ingreso 5 con auto ...	142
Figura F-1. Distribución ajustada e histograma ingreso per cápita por comuna (I).....	159
Figura F-2. Distribución ajustada e histograma ingreso per cápita por comuna (II)	160
Figura F-3. Distribución ajustada e histograma ingreso per cápita por comuna (III) ...	161
Figura F-4. Distribución ajustada e histograma ingreso per cápita por comuna (IV)...	162
Figura G-1. Distribución del ingreso según la encuesta versus la simulación.....	163

RESUMEN

En Chile, la infraestructura y los servicios de transporte presentan falencias y una calidad dispar, los cuales están exigidos a responder además a una inequitativa distribución espacial tanto de oportunidades como de ingresos en la ciudad. En términos de evaluación de proyectos, la metodología tradicional cuenta con limitaciones para poder considerar efectos distributivos. Por definición, el método utilitario busca cancelar transferencias entre grupos y apuntar al bienestar general. Existe consenso respecto a abrir la metodología tradicional a impactos económicos más amplios en el análisis de proyectos y políticas.

Como respuesta a lo anterior, esta investigación genera formas de medir la accesibilidad y construir indicadores de aporte a la equidad que permitan mejorar el análisis de proyectos de movilidad urbana en Chile. Primero se deriva y selecciona una metodología desarrollada con medidas de accesibilidad potencial, a base de cambios en tiempos de viaje, espera, caminata y tarifa de simulaciones con y sin proyectos de transporte. Asimismo, se emplean poblaciones generadas sintéticamente e indicadores de impacto en la equidad para poder contar con un análisis desagregado de cómo se distribuirían los impactos.

El análisis de las herramientas propuestas se basa en casos de estudio, un conjunto de modelaciones de proyectos evaluados oficialmente en Santiago, entre ellos proyectos de Metro o uno de tarificación vial por congestión. El resultado son visualizaciones para facilitar el análisis territorial, distribuciones de impactos y el valor cuantitativo de indicadores de aporte a la equidad de acceso. En conjunto facilitan un mejor análisis y modelación de los proyectos en etapas preliminares y de diseño, junto a un mayor respaldo de una planificación urbana con una mirada de equidad. Las conclusiones remarcan recomendaciones metodológicas y de política pública.

Entre los caminos de investigación, por un lado, se identifican los elementos que se podrían mejorar, ampliar o profundizar en las metodologías desarrolladas. Por otro lado,

se levantan temáticas alternativas que derivan de la medición de accesibilidad, entre ellos el fenómeno de gentrificación, las de economías de aglomeración, un valor social de la accesibilidad y el uso de mediciones ex-post.

Palabras Clave: Medidas de accesibilidad; Accesibilidad potencial; Poblaciones sintéticas; Impactos de proyectos de transporte; Análisis territorial; Indicadores de equidad; Evaluación social; Chile.

ABSTRACT

There is increasing consent about the importance of incorporating wider impacts to analyse transport projects and plans. Recent research reports the need to assess equity impacts of urban projects to better allocate resources. This has an even larger meaning in countries like Chile, because of great inequalities present in their cities both regarding income and opportunities segregation. Additionally, literature about accessibility measures highlights their readiness for assessment.

The aim of this research is to develop ways to measure both accessibility and equity impacts, aimed for improving methodologies for transport project assessment. The methodology starts by deriving and selecting accessibility measures compatible with four-step transport models, one of which is further developed and later implemented. The potential accessibility measure builds from simulation forecasts – including fares, access, waiting and travel times of main modes – and opportunities spatial distribution. In order to assess project impacts fairness in more detail, the analysis is disaggregated into income groups using a population synthesis approach.

Chile represents an opportunity to develop this approach. Using Santiago as example, the evolution of income inequality and employment localisation is examined. Case studies are composed by official simulations of projects implemented or under evaluation. They include a congestion charge scheme and different transit investments, like subway and bus corridors. Their results are examined in the light of territorial analysis, the distribution of impacts and quantitative indicators to measure the contribution to equitable access.

The tools developed facilitate a deeper analysis and better modelling, both regarding project design and urban planning aimed towards equity. Results consist in visualisations for territorial analysis, distributive impact figures and the quantitative indicators of the contribution to an equitable accessibility. Conclusion remarks methodology and policy recommendations.

Methodological implications for assessment are discussed, both related to the accessibility measures and how to calculate their effects in the population. Further research includes the identification of elements of the developed methodology that could be improved or expanded. Also new topics in the context of Chilean planning framework arise from this discussion, like the gentrification phenomenon, agglomeration economies, a social value of accessibility and the comparison with ex-post measures.

Keywords: Accessibility measures; Potential accessibility; Synthetic populations; Transport project impacts; Territorial analysis; Equity indicators; Social evaluation; Chile

1. INTRODUCCIÓN

La evaluación social de proyectos de transporte está en revisión en diversos países, en parte por el desafío de una movilidad más sostenible y una planificación mejor coordinada. En un contexto de grandes desigualdades en las ciudades chilenas, tanto en términos de ingreso como de provisión de infraestructura, la planificación de transporte requiere de una mirada más amplia. Desde aquí nace la inquietud y motivación de esta tesis. Por ello se avanza en adaptar a Chile elementos de un enfoque más contemporáneo de la planificación y también en proponer nuevos elementos para contribuir a su literatura.

En la última década se ha mostrado cierta evolución en el análisis de proyectos en Chile, como la generación de metodologías para nuevos casos (i.e. planes maestros de ciclorutas) y la incorporación de nuevos elementos a valorizar (i.e. accidentes y valor social del tiempo diferente para la caminata y la espera). No obstante, aún no se ha actualizado la evaluación social de proyectos en una serie de ámbitos de relevancia, lo cual se refleja en el interés de diferentes instituciones de ampliar las metodologías que supervisa el Ministerio de Desarrollo Social.

Existen dos desafíos de evaluación que si bien también están en desarrollo en la literatura, están particularmente pendientes en Chile, ya que constan de cierta urgencia por su contexto. Por un lado, falta una mejor compatibilidad y mayor relevancia de los análisis multi-criterio (Bruun y Givoni, 2015). Por otro lado, existen falencias en la incorporación de los impactos de los proyectos en términos de equidad (Mackie et al., 2014).

Como respuesta, existe la oportunidad de lograr una visión más amplia en la planificación de transporte por medio de la medición de accesibilidad. Definida por primera vez por Hansen (1959), la accesibilidad representa el potencial de oportunidades de interacción en una localización determinada. Las medidas de accesibilidad se destacan en su facilidad para el análisis territorial y en poner énfasis en la distribución de

servicios urbanos. Además, como se muestra en este trabajo, es una herramienta adecuada para incorporar análisis de equidad y evitar sesgos socio-económicos de las metodologías tradicionales.

En línea con lo anterior, el principal objetivo de esta investigación es proponer metodologías de accesibilidad para un análisis territorial y proponer indicadores de equidad de acceso que permitan complementar la evaluación social de proyectos. Se basa en la implementación de mediciones de accesibilidad simulada al empleo construidas desde las salidas de modelos de transporte actualmente en uso. Por lo mismo, en el contexto chileno de la ingeniería de transporte, este trabajo es innovador en cuatro dimensiones:

- Introducir y argumentar la preocupación por la equidad.
- Ocupar medidas de accesibilidad modeladas para escenarios *ex-ante*, junto a aportes metodológicos específicos para estos fines.
- Coincidir lo anterior con el uso de poblaciones sintéticas, con lo cual se introduce el enfoque bayesiano en una aplicación de planificación de transporte.
- También en proponer y aplicar análisis territorial e indicadores de aporte a la equidad.

Respecto al documento, el segundo Capítulo comienza con una revisión de literatura concentrada en tres áreas temáticas: planificación, accesibilidad y equidad. El tercer apartado comienza con traducir la mirada de equidad en consideraciones metodológicas relevantes para la planificación de transporte, con atención a algunos sesgos adicionales en que se podría estar incurriendo. Posteriormente, el capítulo consiste principalmente en una exploración de metodologías para medir accesibilidad, entre las disponibles y adecuadas para la evaluación de proyectos en Chile. Se fundamenta y profundiza respecto a la formulación elegida, fundamentando su superioridad frente a las alternativas analizadas. Luego de describir metodologías complementarias para generar

poblaciones sintéticas, se desarrollan y comparan indicadores para medir aportes a la equidad.

El Capítulo 4 describe y analiza los instrumentos y casos de estudios con los que se emplearán las metodologías desarrolladas. La aplicación es en Santiago de Chile, por ello se comienza recalando su importancia en vista de inequidades presentes en dicha ciudad, tanto en cuanto a la localización de oportunidades de empleo como segregación residencial. Tras describir las fuentes de datos y su procesamiento, se presenta la herramienta *EquiAccess* creada para medir accesibilidad y calcular indicadores de equidad. Por último se muestran diferentes características de los proyectos de transporte como casos de estudios a los cuales se aplicarán las metodologías.

El quinto Capítulo es el más extenso y relevante, ya que se implementan los conceptos desarrollados en el tercero y preparados en el cuarto para analizar los diferentes casos de estudio. Es aquí donde se aplican las innovaciones metodológicas, como un ejemplo de cómo podrían aportar a la práctica de la disciplina. Consiste principalmente en la medición del cambio de accesibilidad según la modelación de diversos proyectos de planificación estratégica.

Entre los proyectos se incluyen alternativas oficiales de inversión en transporte público como Metro o corredores de buses, junto a una política de Tarificación Vial por Congestión que se orienta a la racionalización del transporte privado. Los resultados fundamentales son dos. Por un lado, el análisis de la distribución territorial de los impactos de cada proyecto según como fueron simulados. Por otro lado, un análisis de la distribución en términos de equidad de forma desagregada y también como valor cuantitativo según indicadores de aporte a la equidad.

Por último, el Capítulo 6 resume y pone en valor los elementos anteriores. Tanto el caso de las innovaciones metodológicas como el de los resultados aplicados, ambos son conectados con una mirada de política pública. También se resaltan otras aplicaciones

que podrían emanar directamente desde las herramientas construidas como también las líneas de investigación que quedan abiertas a partir de este desarrollo.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Contexto de planificación de transporte urbano

Las metodologías formales de evaluación de proyectos de transporte tienen una larga tradición que remonta al menos a 1844, cuando el ingeniero francés Jules Deputit quiso probar la rentabilidad de un proyecto ferroviario antes de construirlo. De acuerdo a Thomopoulos et al. (2009), el análisis costo beneficio (CBA por sus siglas en inglés) ha sido y es por lejos el principal enfoque de evaluación, seguido de manera complementaria por el análisis multi-criterio (MCA). Mackie et al. (2014) destaca que el CBA – como metodología y la institucionalidad que se ha construido entorno a este – tiene importantes ventajas de tipo cognitivo, técnico y también político.

No obstante lo anterior, también existen desafíos que enfrenta el CBA, entre ellos la consideración de beneficios no monetarios (Browne y Ryan, 2011; Mackie et al. 2014) y la dificultad para contabilizar efectos distributivos en lo socio-económico, más allá de efectos de primer orden en el corto plazo (Thomopoulos et al. 2009; Mackie et al. 2014).

Ambas razones explican parcialmente el porqué la evaluación social de proyectos de transporte está en revisión en diversos países, lo que se suma a la presión por una movilidad más sostenible y una planificación mejor coordinada. En la literatura se detectan dos grandes tendencias no excluyentes para abordar los desafíos anteriores: modelar e incorporar impactos económicos más amplios (*Wider Economic Impacts* o WEI) o fortalecer el complemento del MCA en la institucionalidad.

2.1.1. Impactos económicos más amplios

Respecto al primer camino, uno de los principales argumentos para incorporar WEI en general es que los incrementos en accesibilidad causan beneficios externos a viajeros, muchos de los cuales no son capturados en el excedente del consumidor de la metodología tradicional de ahorro de costos (Lakshmanan, 2011; Mackie et al. 2014).

Existe un consenso creciente respecto a la importancia de WEI para poder analizar mejor proyectos y planes de transporte (Lakshmanan, 2011; Mulley y Walters, 2014). Las razones son múltiples. En un sentido práctico, los WEI han sido catalizadores para implementar planes de desarrollo sostenible en ciudades de países desarrollados, apoyando proyectos de transporte público y no-motorizados. De otra forma, resulta muy difícil sostener la rentabilidad social de este tipo de proyectos, porque parte importante de sus beneficios no serían monetarizables, en contraposición a proyectos de transporte privado en cuyos modelos los usuarios reaccionan directamente a sus beneficios. Esto se ejemplifica en que una porción importante de los beneficios del megaproyecto Crossrail impulsado por Transport for London fue cuantificado con WEI más allá de la metodología tradicional de eficiencia (Graham, 2007; Dix, 2015).

En su estudio comparativo de metodologías en siete países desarrollados, Mackie et. al (2014) encuentra que el principal tema emergente son los WEI. Lakshmanan (2011) les proporciona una base de causalidad donde profundiza respecto a cada uno de los enfoques principales: modelos macroeconómicos de valor agregado al producto interno bruto; o modelos de equilibrio general que incorporan modelos económicos de escala y aglomeración.

En Chile aún se está lejos de adaptar e incorporar estos tipos de modelos a la práctica de la disciplina. No obstante, en ambos casos, la variable clave que los conecta a la inversión en transporte es la accesibilidad, principalmente vía economías de aglomeración (Graham, 2007; Macário et al. 2014; Stewart y Zegras, 2015). La accesibilidad destaca por resaltar el contexto espacial dentro de mediciones cuantitativas y permitir el análisis territorial, elemento clave cuando se analizan e implementan las políticas de movilidad de manera más amplia. Incluso existen autores que por lo mismo abogan por abandonar la perspectiva de ahorro de tiempos de viaje (Metz, 2008; Macário, 2014), o al menos aumentar la preponderancia del enfoque de accesibilidad a oportunidades frente a esta (Cervero et al. 1999; Van Wee y Geurs, 2011; Stewart y Zegras, 2015).

El estudio de la accesibilidad es por lo tanto un primer paso para ampliar la mirada. Por lo mismo es que la accesibilidad se transformó en protagonista de esta tesis, mediante el desarrollo de metodologías y la exploración de potenciales aplicaciones. Una revisión de literatura específica se retoma en la Sección 2.2.

2.1.2. Análisis multi-criterio

En cuanto al segundo camino, Bruun y Givoni (2015) consideran entre las 6 prioridades clave de la disciplina del transporte dos desafíos que se abordan en esta tesis. Los autores destacan como primordial una mayor relevancia del MCA en su vinculación con el CBA, junto a métodos de modelación más transparentes y comprensivos. Esta idea la respaldan varios trabajos, entre ellos Browne y Ryan (2011) o algunos chilenos como el de Tudela et al (2006). Aparte de no contabilizar varios impactos, el CBA requiere muchos supuestos que se esconden tras la cifra final de rentabilidad, lo cual ocasiona críticas de transparencia. No obstante la subjetividad es parcialmente resuelta porque los pesos entre los impactos son dirimidos por los precios, lo cual da legitimidad a decisiones reñidas (Browne y Ryan, 2011; Mackie et al. 2014). Inversamente, los mismos autores describen características opuestas del MCA: los pesos entre diferentes tipos de impactos son definidos externamente y esto se presta para subjetividad, pero proporciona transparencia porque el resultado explicita pesos y otros criterios.

El balance entre las características anteriores es sólo una dimensión de los potenciales beneficios de complementar ambas metodologías. Adicionalmente, una principal es que MCA se hace cargo de mejor manera de impactos ambientales y sociales de los proyectos, junto a las expectativas de la ciudadanía de abrirse a procesos participativos (Browne y Ryan, 2011; Tudela et al. 2006).

Chile destaca dentro de Latinoamérica por tener de las más antiguas y robustas institucionalidades para llevar a cabo una evaluación social sistemática de proyectos (Tanzi, 2005). Sin embargo, no existen instructivos oficiales respecto a la necesidad o forma de las metodologías tipo MCA en el transporte. Aún cuando algunas ocasiones,

aplicaciones de MCA han demostrado su valor en dirimir alternativas de proyecto con resultados de CBA similares, ampliando la consideración de impactos y dando consistencia a la decisión de las autoridades (Tudela et al. 2006).

El ejemplo de aplicación reportado por Tudela et al. (2006) – en dos alternativas de un proyecto vial en Concepción – muestra las potencialidades del MCA. Utilizando el proceso de jerarquía analítica, el resultado del MCA fue el mismo en los dos métodos utilizados para la estimación de los pesos de cada criterio. Asimismo, la alternativa priorizada por el MCA era igual a la del CBA cuando el primero consideraba sólo criterios económicos. Sin embargo, al incorporar impactos ambientales y accesibilidad el MCA recomendó la alternativa contraria, la misma que también decidieron las autoridades.

A partir de la experiencia anterior, la otra cara de la moneda es la existencia de un riesgo. El MCA se podría transformar en un problema si no se realiza de manera estable y sistemática a base de una metodología formal, ya que podría prestarse su uso del recurso a la conveniencia. En línea con lo anterior, Tudela et al. (2006) concluye recomendando incorporar formalmente los impactos más amplios en las metodologías.

El trabajo de Pacheco y Contreras (2008) concuerda con lo anterior luego de una revisión teórica y metodológica que incluyó algunas aplicaciones del MCA en diversos sectores. No es el objetivo de esta tesis ahondar en estos detalles, más bien rescatar la capacidad del MCA de complementar las decisiones. De hecho, lo que requiere la institucionalidad vigente es que los proyectos sólo tengan VAN de valor positivo, la autoridad puede elegir cualquiera de sus alternativas y no necesariamente la con VAN mayor. Entre las alternativas socialmente rentables se acepta dirimir con alguna forma de MCA, no obstante no existen guías respecto a cómo este se estructura o de formas de estimar los ponderadores de relevancia entre las diferentes dimensiones de análisis.

En particular, en diversos trabajos se destacó el potencial del MCA en complementar las decisiones, mediante la incorporación de valores intangibles y temáticas sociales y de

equidad (Pacheco y Contreras, 2008; Browne y Ryan, 2011). En ese sentido, la incorporación de análisis de equidad es relevante dado el contexto de segregación urbana presente en nuestras ciudades, tema que se aborda en 2.3 además del Capítulo 4. Como se demuestra a lo largo de la tesis y se concluye en el Capítulo 6, existe una oportunidad de fomentar análisis de equidad en el mediano plazo en el marco de un MCA, el cual incorpore principalmente variables cuantitativas de impactos de equidad.

En definitiva, ambos caminos de largo y mediano plazo – el de incorporar WEI y aumentar la preponderancia del MCA – se cruzan en cuanto a la importancia del análisis de la accesibilidad y de la equidad.

2.2. Accesibilidad a oportunidades: definición y aplicaciones

El concepto de accesibilidad como una forma de entender las ciudades ha sido discutido al menos desde los años '50. Si bien no es usado ampliamente en los procesos de decisión en la planificación urbana, ha adquirido renovada atención recientemente (Stewart, 2014). Definida por primera vez por Hansen (1959) como “el potencial de oportunidades de interacción” en una localización determinada, las medidas de accesibilidad que le siguieron presentan el potencial de contribuir social y económicamente a la evaluación en un sentido más amplio.

La literatura en accesibilidad presenta una variedad tanto en lo conceptual como metodológico (Geurs y van Wee, 2004). Respecto al marco teórico, la Figura 2-1 resume uno de los aportes de Geurs y van Wee (2004), en el sentido de que cualquier definición apropiada de accesibilidad debe cubrir cuatro componentes: transporte, uso de suelo, individual y temporal.

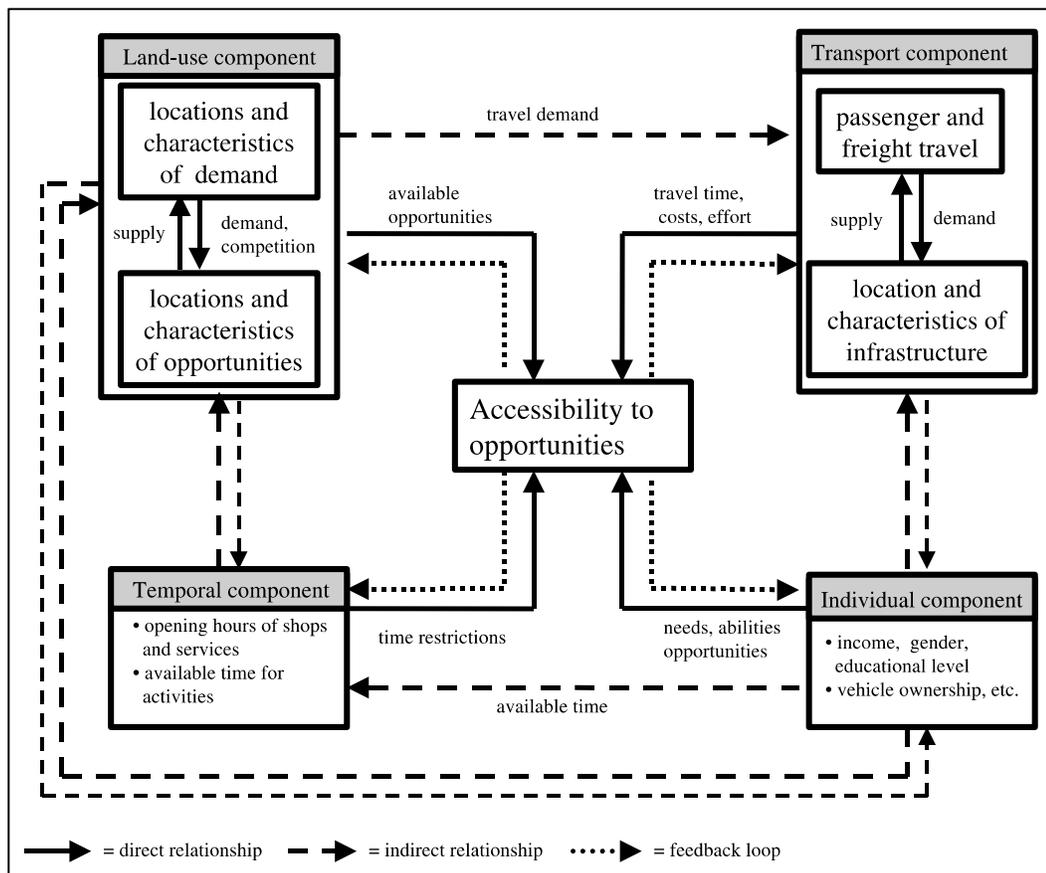


Figura 2-1. Componentes de la accesibilidad. Fuente: Geurs y van Wee (2004)

De acuerdo a lo anterior, la modelación de transporte en que se basa el CBA profundiza en el componente de transporte tomando en consideración indirectamente el de uso de suelo (vía demanda de viajes) y el componente individual. El cambio de enfoque a la accesibilidad propone ampliar lo anterior a relaciones más directas. Además de que sus mediciones han sido aprovechadas cada vez más en el cálculo de WEI, también se le interpreta valor en sí mismo (Stewart y Zegras, 2015).

La Figura 2-2 muestra la revisión propuesta por Stewart y Zegras (2015), la que rescatan los tres primeros componentes pero que se desarrollan simultáneamente en las dimensiones espacial y temporal. Asimismo reproducen la nomenclatura de Geurs y van Wee (2004) respecto a acceso (desde el punto vista del individuo) y accesibilidad (desde

el uso de suelo), junto a explicitar conectividad (desde el transporte). La palabra accesibilidad también se refiere al concepto que engloba el conjunto de los tres.

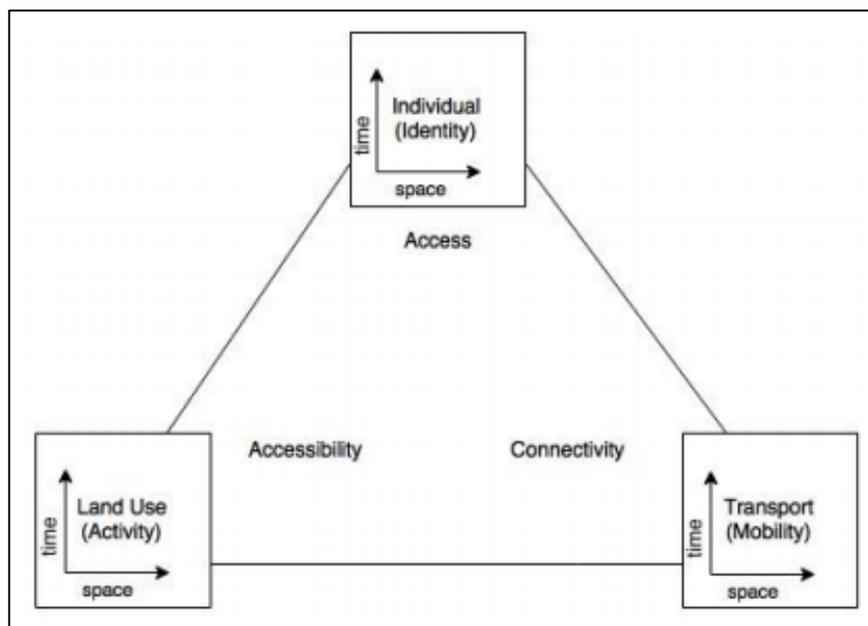


Figura 2-2. Componentes de la accesibilidad. Fuente: Stewart y Zegras (2015)

Existen aportes chilenos también en la teoría de accesibilidad. Martínez (1995) define el acceso como el beneficio económico derivado de la interacción (contacto) entre dos actividades, el cual es el beneficio neto de hacer contacto con otras actividades menos el costo de interacción (transporte). La definición anterior responde al enfoque de medidas de accesibilidad utilitarias, unas de las más antiguas por su vinculación con modelos de cuatro etapas de transporte, la cual se abordará en la Sección 3.2.2.

En cuanto a las formas de medir la accesibilidad, Geurs y van Wee (2004) las clasifican en nueve categorías, entre las que resaltan medidas basadas en localización como las medidas de contorno o las potenciales por su amplio uso, junto a las medidas basadas en utilidad por su desarrollo teórico. En su trabajo proponen cinco criterios para verificar una medida de accesibilidad: componentes teóricos, operacionalización, interpretación y usabilidad tanto para evaluar impactos económicos como sociales.

En cuanto al primer grupo, las medidas de contorno – también conocidas como isocronas o integrales – tienen dos versiones: fijas en costos o en oportunidades. Las primeras cuentan el número de oportunidades (localidades específicas o infraestructura de transporte) que pueden ser alcanzadas dentro de un determinado tiempo, distancia o costo, mientras que la segunda suma o promedia el costo requerido para acceder a un número determinado de oportunidades (Geurs y van Wee, 2004).

En cambio, las medidas potenciales – antiguamente llamadas tipo Hansen – evitan fijar oportunidades o costos y suman la accesibilidad parcial a cada punto o zona disponible mediante una fórmula de impedancia. Es decir, la medida potencial estima la accesibilidad a todas las oportunidades, ponderando con mayor influencia tanto un mayor tamaño o intensidad de cada oportunidad, como cuando estas están a un menor tiempo, distancia o costo (Geurs y van Wee, 2004). Existen distintas fórmulas de impedancia de los costos, siendo la exponencial negativa la más utilizada y también la más cercana a la teoría del comportamiento de viaje (Handy y Niemeier, 1997). Es de hecho la que se selecciona en esta tesis en la Sección 3.2.3, donde se aporta a la teoría recordando su derivación y desarrollándola comparativamente, en términos de equidad y operacionalización.

En tercer lugar están las medidas utilitarias que también presentan buen rendimiento en los cinco criterios de Geurs y van Wee (2004). Estas interpretan la accesibilidad como el resultado de un conjunto de decisiones de transporte, basadas en la teoría de utilidad. Entre las medidas de accesibilidad utilitarias destaca la basada en el beneficio medido por factores de balance por su desarrollo y aplicación en Chile por Martínez (1995). En particular, esta se aborda en profundidad en la Sección 3.2.2, donde se aportan argumentos a lo notado por Geurs y van Wee (2004) respecto a la baja utilización empírica de los factores de balance.

Además del anterior, no existen muchos más ejemplos aplicados de medición cuantitativa de la accesibilidad en Chile. Recientemente, desde la ONG llamada Techo, Shirahige y Correa (2015) introdujeron en Santiago el PTAL (nivel de accesibilidad al

transporte público, por sus siglas en inglés) formulado y aplicado por Transport for London para medir la cobertura de su red. Esta representa una medida mixta de contorno y potencial que incluye frecuencia y distancias para acceder a cada estación o paradero del transporte público. Es muy útil para la planificación de este modo, aunque no representa una accesibilidad a oportunidades. También Hurtubia (2014) propuso una medida potencial para mejorar la metodología de localización de viviendas sociales, que cuenta con una sobre-simplificada accesibilidad de distancia a una oportunidad.

No obstante los grandes aportes anteriores, en términos de los objetivos de esta tesis – aplicar medidas de accesibilidad que sirvan para la evaluación de proyectos de transporte – ambos ejemplos anteriores presentan un problema. Estas se basan en distancias y/o velocidades respecto a redes fijas (como itinerarios GTFS), lo cual provee una desagregación interesante pero cuya modificación es difícil y compleja frente a un proyecto de transporte. Sin una herramienta de diseño de red apropiada, como la online OpenTripPlanner en Estados Unidos en que se basa CoAX (Stewart, 2014), aquellos tipos de medidas de accesibilidad – que ocupan una modelación no tradicional – requieren duplicar la demandante tarea de diseño del proyecto también en su propio modelo. También hay riesgo de subjetividad – además de inconsistencia con los resultados del CBA – por las usuales complejidades de la tarea de simulación en un entorno diferente.

Por lo mismo, un elemento importante de esta investigación es que se basa en los datos que resultan en modelos tradicionales de transporte, en particular el modelo de cuatro etapas explicado en 3.2.1. Esto no sólo constituye un demarcación al trabajo de la tesis. Más relevante es que permite hacer más interesante y útil sus conclusiones para planificadores de transporte, ya que las metodologías actuales ya consideran que se deben realizar estas simulaciones para futuros escenarios por parte agencias públicas o consultoras. De hecho, Karner y Niemaier (2013) lo sugieren para sus futuros trabajos.

También existen desafíos para las medidas de accesibilidad. Uno de ellos, planteado por Macário (2014), es que aún no existe un valor de mercado de la accesibilidad, a pesar de

su desarrollo y amplitud conceptual y de que podría aportar ventajas adicionales en términos de consideración de WEI y en particular de la equidad. Si bien una evaluación económica de la accesibilidad actuaría simultáneamente como un factor de mercado y como factor social (Macário, 2014), estimar su valor podría tomar años o décadas, tal como tomó la consolidación del valor del tiempo en el pasado. Por lo mismo la autora argumenta en favor de planificar entorno a garantizar niveles mínimos de accesibilidad a oportunidades dentro de las ciudades, similar a como se realiza en el acceso a salud o educación.

Por el contrario, el uso de medidas de accesibilidad también cuentan con importantes oportunidades en el futuro, razón por la cual se emplean en este trabajo. Ellas se destacan en su facilidad para el análisis territorial, además de su capacidad de evitar sesgos socio-económicos (van Wee y Geurs, 2011) y poner énfasis en la distribución de servicios urbanos (Stewart y Zegras, 2015). En este sentido, algunas ventajas propias de los indicadores a base de accesibilidad son que se pueden desacoplar de la demanda de viajes y que se encuentran localizados (Geurs y van Wee, 2004). Estos temas se abordan en los Capítulos 3, 5 y 5.

2.3. Enfoques de equidad en el transporte

2.3.1. Sesgos de equidad en la metodología tradicional

Enfoques como el de accesibilidad también representan una oportunidad para mejorar las condiciones de equidad en las ciudades (Macário, 2014), lo cual es especialmente importante en países en desarrollo. En este sentido, la metodología tradicional de CBA en sí misma tiene serias limitaciones para poder considerar efectos distributivos. Por definición, el método utilitario busca cancelar transferencias entre grupos y apuntar al bienestar general (van Wee y Geurs, 2011; Weisbrod et al. 2015).

Los modelos estratégicos y tácticos de transporte buscan principalmente la eficiencia de los recursos económicos – como tiempo de espera o de viaje – de sus usuarios a través

de obtener un equilibrio en el corto plazo (Vasconcellos, 2011). De esta manera, el enfoque de evaluación social de proyectos de transporte mediante el ahorro de costos basa sus variables en las predicciones de estos modelos (objetivo para el cual fueron diseñados). Por lo mismo, los modelos no buscan ni están restringidos a la promoción de la equidad, elementos que deben ser considerados de otra manera en la evaluación social. En ese sentido, sí existen desarrollos (Gálvez y Jara-Díaz, 1998; Mackie et al., 2001; Rizzi y Steimetz, 2014) que aportan una discusión sobre las distintas formas de valorizar el valor social del tiempo para evitar sesgos de equidad, calculadas a partir de utilidades marginales del ingreso y del tiempo.

A pesar de lo anterior, aún quedan elementos de equidad sin abordar en la práctica de la disciplina. La Ecuación (2.1) muestra la Regla de la Mitad para el cálculo de beneficios de usuarios de manera parcial (BU_{ij}) en un par origen i y destino j (Tressider et al. 1968), con V_{ij} viajes y C_{ij} costos generalizados entre estas zonas según los modelos. La Regla de la Mitad es ampliamente utilizada en la disciplina, por ejemplo se recomienda en Jara-Díaz (2001), ya que simplifica linealmente la compleja maximización de utilidades ante cambios interdependientes de costos y demanda.

$$BU_{ij} = \frac{1}{2} (V_{ij}^{con\ proyecto} + V_{ij}^{sin\ proyecto}) (C_{ij}^{con\ proyecto} - C_{ij}^{sin\ proyecto}) \quad (2.1)$$

$$BU = \sum_i \sum_j BU_{ij} = \sum_i BU_j = \sum_j BU_i \quad (2.2)$$

En esa simplificación, uno de los supuestos para interpretar de manera lineal las curvas de oferta y demanda es que los efecto de ingreso son despreciables (Neuberger, 1971; Williams, 1976). Como explica Laird (2010), la Regla de la Mitad es una estimación al excedente del consumidor, que a su vez es una aproximación de la variación compensatoria – la verdadera medida de beneficio de bienestar. Especialmente la primera aproximación puede llevar a errores mayores cuando el efecto de ingreso es relevante, lo que sucede cuando los cambios de costos son importantes (Laird, 2010). Si bien una mirada agregada del sistema indicaría que aquello sucede pocas veces, en

realidad la mirada desagregada en el Capítulo 5 sugiere que para en el área de impacto directo de un proyecto este supuesto de marginalidad podría no cumplirse.

Asimismo, el beneficio de usuarios total del sistema (BU) se puede calcular sumando como en el segundo término de la Ecuación 2.2, o también se puede calcular separado territorialmente en orígenes y destinos, tercer y cuarto términos, respectivamente. Estos componentes son simétricos también en los modelos, en particular en el doblemente acotado de la Sección 3.2.1 Por ello, la interpretación de la distribución geográfica de los beneficios es poco clara y determinar a quién se beneficia requiere de supuestos (Neuberger, 1971; Williams y Senior, 1978), lo cual es una limitación en términos de análisis de equidad.

Los argumentos anteriores ilustran parte de la discusión más madura encontrada en la literatura de manera respecto a sesgos de equidad en la metodología tradicional. Sin embargo, esta tesis se enfoca y aporta en la discusión de posibles sesgos adicionales en otros elementos de la metodología, lo cual se realiza a lo largo de la Sección 3.1. Aquellos argumentos se resumen en Niehaus et al. (en imprenta): si bien las herramientas de modelación predicen adecuadamente los viajes futuros de acuerdo a los patrones de viaje actuales, se genera un sesgo inherente por omitir externalidades de localización y fijar los patrones de viaje en el corto plazo.

2.3.2. Desigualdad y segregación en Chile y el rol del transporte

Los países Latinoamericanos padecen del problema no resuelto de importantes desigualdades de ingreso y de oportunidades, las cuales debieran ser abordados con políticas multisectoriales. En el caso del transporte en Chile, existen tanto falencias como disparidad de calidad en cuanto a la infraestructura y sus sistemas, dependiendo del área que se compare dentro de sus ciudades. Al mismo tiempo, existe gran potencial y un sentido de urgencia de realizar inversiones rápidamente. Por ello, asignar recursos adecuadamente entre diferentes proyectos y como estos son diseñados tiene un doble significado (Niehaus et al., en imprenta).

No sólo la desigualdad de ingresos es alta (tema que se verifica en la Sección 4.1.2), también importa su distribución espacial en el territorio (Sabatini et al. 2009). Por ejemplo, la segregación residencial en Santiago entre distintos grupos socio-económicos es muy alta. Sabatini et al. (2009) muestra que los más vulnerables son los más aislados espacialmente. El desarrollo urbano y políticas específicas del pasado los desplazaron a la periferia, lejos de los grupos de ingreso alto concentrados casi exclusivamente al nororiente.

Sin embargo, el problema se agrava al considerar que sus causas y efectos se retroalimentan. Sabatini et al. (2009) argumentó que a pesar de que la segregación residencial podía estar disminuyendo, sus efectos negativos se estarían haciendo más perjudiciales. La cantidad y calidad de infraestructura, perspectivas de empleo, educación, entre otros, parecen seguir a los grupos de alto ingreso (Muñoz, 2014). De esta manera, las principales herramientas para superar la vulnerabilidad y lograr progreso estarían siendo cada vez más difíciles de acceder para grupos de bajo ingreso. Esto se estudia en la Sección 4.1.1.

Lo anterior podría convertirse en un serio problema para el desarrollo de ciudades chilenas en el largo plazo, y la ingeniería de transporte no está al margen de esto (Muñoz, 2014). En el caso de Santiago, no sólo es la inversión privada siguiendo a grupos de alto ingreso, esta compleja situación también ha sido producto de falencia de planificación, en lo institucional una inadecuada repartición de atribuciones y una débil regulación del suelo urbano, lo cual además se por una importante inversión pública en el sector oriente.

De acuerdo a la literatura, es mucho lo que podría aportar una adecuada incorporación de la equidad en el análisis de políticas y proyectos de transporte (Thomopoulos et al., 2009; Stanley et al. 2011; Vasconcellos, 2011). En particular existe consenso creciente de abordarla en términos de accesibilidad a oportunidades, que ha demostrado ser una mejor forma de medir sus impactos sociales (Cervero et al. 1999; Van Wee y Geurs, 2011; Martens et al. 2012; Karner y Niemeier, 2013; Macário, 2014).

Uno de ellos es la relación del transporte con la exclusión o inclusión social, cuya conexión tiene base teórica como la proporcionada por Stanley et al. (2011). Una falencia en acceso o movilidad perjudica las capacidades económicas y sociales de las personas, aumentando su riesgo de exclusión social. Macário respalda lo anterior y agrega que la exclusión social también disminuye la competitividad de las ciudades (Macário, 2014). La literatura a veces se enfoca en las barreras físicas, económicas o de conocimiento para utilizar el transporte, no obstante esta tesis se enfoca más en la importancia de la distribución de la infraestructura y servicios, piezas fundamentales en el desarrollo estructurante de la ciudad (Stanley et al. 2011; Van Wee y Geurs, 2011).

En ese sentido, el estudio las diferencias en accesibilidad según las características de la red dentro de la ciudad, y como esto impacta en la equidad, tiene un efecto más estructural en términos de acceso a oportunidades para toda la población. Cervero et al. (1999) analizan en detalle la accesibilidad al empleo y sus efectos en la empleabilidad población, desagregado de acuerdo a sus características como ingresos, educación y raza. Tanto su conclusión respecto a las bondades de calcular accesibilidad, como el énfasis de aplicación en el empleo coinciden con los objetivos y conclusiones de esta investigación. No obstante lo anterior, la incorporación de la calidad del empleo y múltiples características de la población (Cervero et al. 1999) escapan de los límites de la tesis.

No es posible responder adecuadamente al desafío anterior con la metodología de evaluación social de proyectos de transporte utilizada actualmente en Chile. El supuesto de que la evaluación de transporte es “apolítica” se basa en un análisis técnico limitado con efectos negativos en la ciudad, además ha sido reiteradamente desmentido en la literatura (Vasconcellos, 2011). Respecto a la teoría, van Wee y Geurs (2011) también concluyen que el enfoque utilitario inmerso en el CBA no es el apropiado para realizar análisis de equidad o de exclusión social, por ello el desafío es construir metodologías alternativas que complementen lo primero.

Respecto a la práctica¹ la situación es peor: en Chile no se realizan análisis de equidad de tipo alguno, ya que estos no son obligatorios ni tampoco existen guías para desempeñarlos. En el ámbito público existe buena voluntad para inclinarse por proyectos que parecen mejorar la situación de los grupos de menor ingreso, pero ello no es sistemático en todas las agencias ni es posible de rescatar en diferentes contextos. Por lo mismo existe intención en desarrollar metodologías que apunten a este objetivo, cuyos instructivos para la aplicación son destacados en la literatura como fundamentales para una planificación más equitativa (Karner y Niemeier, 2013), en particular en países en desarrollo (Vasconcellos, 2011).

2.3.3. Conceptos para un análisis de accesibilidad y ejemplos

A continuación se resumen algunos conceptos que son relevantes para la aplicación posterior del enfoque de equidad en el análisis de proyectos. Una base teórica importante para proyectos de transporte es propuesta y analizada por Martens et al. (2012): el principio *Maximax* (Rawls, 1971). Este enfoque *rawlsiano* de justicia significa maximizar el promedio mientras se observa o limita una brecha máxima. En transporte implica el desafío de definir y buscar una brecha máxima de accesibilidad entre los grupos más aventajados y los más vulnerables de la sociedad.

Por ende cuando se evalúa un proyecto y se busca maximizar la accesibilidad media (como maximizar el VAN en el CBA), en estricto rigor esto debiera limitarse a cumplir con una brecha máxima entre el mínimo y máximo accesibilidad en la ciudad (Martens et al. 2012). Es decir, si se definiera la brecha máxima como la situación actual, un proyecto no sería deseable si su distribución de beneficios aumenta esa brecha de

¹ Lo que sigue emerge de acuerdo a lo conversado en reuniones con Planificación y Desarrollo del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones de Chile.

accesibilidad. En la práctica, el principio Maximax no se contrapone a maximizar el VAN, sólo agrega una restricción a esta búsqueda.

Martens et al. 2012 admiten que la aplicación de este concepto tendría ciertas limitantes en la práctica, donde analizan posibles complicaciones además de las falencias en las instancias de planificación. Sin embargo, destacan que independiente de la forma de implementarlo lo importante es conseguir en el tiempo la disminución de la brecha que inspira el principio Maximax, lo cual se ilustra en la Figura 2-3.

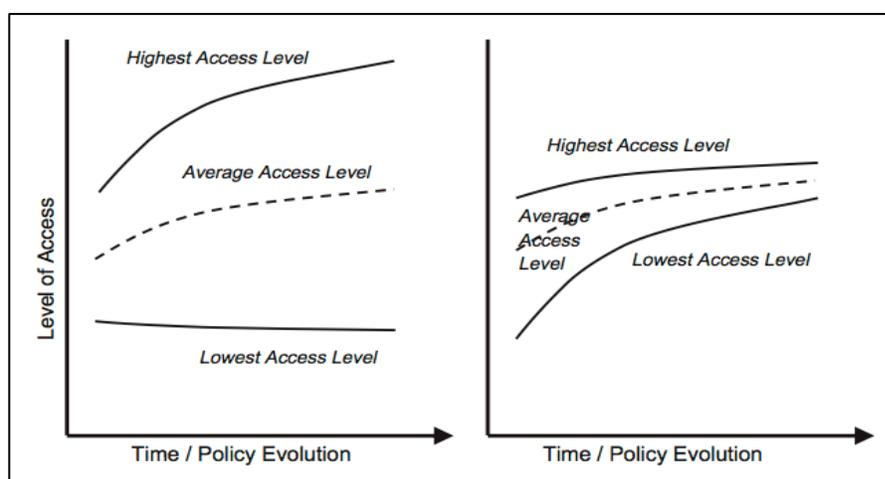


Figura 2-3. Práctica convencional versus aplicando Maximax. Fuente: Martens et al. (2012).

Diversos autores han adoptado recientemente el enfoque *rawlsiano* en sus estudios sobre la equidad en el transporte. Thomoupulus et al. (2009) hacen hincapié en que algunos grupos de individuos deben ser compensados para tomar en consideración las desigualdades pre-existentes. En lo anterior concuerdan también Karner y Niemeier (2013), recomendando explícitamente aplicar el principio Maximax según lo interpreta Martens et al. (2012). También Stewart (2014) recoge el principio de Maximax y destaca el vínculo que tiene con las metodologías emergentes de accesibilidad y una institucionalidad normativa para aplicarlas.

Un segundo pero más sencillo orden conceptual es el que recomienda Litman (2007) respecto a dos tipos de equidad: horizontal y vertical. La desigualdad horizontal se refiere a cómo se distribuyen los recursos a lo largo de una población o subgrupo de esta, si esta es igualitaria, se concentra o es dispersa. El renombrado indicador Gini (1912) mide justamente esto (a explicar en la Sección 3.4.1), lo cual se ejemplifica en la aplicación de Delbosc y Currie (2011) respecto a la equidad del transporte público. En cambio la desigualdad vertical se refiere a la distancia entre diferentes subgrupos de la población, como por ejemplo la brecha de ingreso entre diferentes cuantiles. La equidad horizontal entonces implica buscar proveer recursos iguales a individuos o grupos considerados iguales; mientras la equidad vertical busca distribuir una compensación entre grupos no considerados iguales (Litman, 2007). Además de Delbosc y Currie (2011), también Thomoupulus (2009) y van Wee y Geurs (2011) incorporan estos conceptos.

En cuanto a algunas precisiones, Karner y Niemaier (2013) realizan diferentes recomendaciones metodológicas que se incluyen a lo largo de la tesis. Estas emergen a partir de una revisión crítica de los incipientes métodos de análisis de equidad adoptados por agencias planificadoras en Estados Unidos. Para efectos de esta tesis, lo principal es una definición correcta de indicadores equidad a base de características de los hogares o individuos más que umbrales agregados. Asimismo, destacan la desagregación de la información socio-demográfica basada en poblaciones para hacer viable este tipo de indicadores, donde mencionan el método de generación sintética de poblaciones.

Una aplicación tan interesante como fundamental es la del Reino Unido (U.K.) donde su *Green Book* con la metodología oficial del CBA obliga y regula la aplicación de ponderadores de equidad a los costos y beneficios de los proyectos (HM Treasury, 2011). Siguiendo tanto el concepto *rawlsiano* como de equidad vertical, estos se traducen en multiplicadores de los impactos, relativos de acuerdo al cuantil de población afectada, que alteran el valor neto de los proyectos. Es decir, se amplifican los impactos para la población de menores ingresos y disminuye la influencia de los que afectan a los

de mayores ingresos. De acuerdo al nivel de consumo de los quintiles en el Reino Unido, el Green Book recomienda valores que ponderan más de cuatro veces los beneficios para el quintil de menor ingreso respecto a los impactos del quintil de mayor ingreso (HM Treasury, 2011). Elementos de este enfoque son incorporados en la investigación al proponer los indicadores de aporte a la equidad de acceso (Sección 3.4.2).

Cabe notar que aplicar los ponderadores de equidad serían un gran aporte a una planificación de transporte más equitativa. Sin embargo, la magnitud del paso tiene poca probabilidad de suceder en el corto plazo, implica una reestructura fundamental a la metodología de evaluación social que repercutiría no sólo en el transporte sino en más sectores. Además, si bien sería posible compensar con equidad dentro del CBA, en el caso del transporte algunos sesgos seguirían presentes dentro de sus supuestos y en la forma de uso que se les da a las herramientas de modelación. Este tema se retoma inmediatamente en el siguiente Capítulo.

3. METODOLOGÍA

En este capítulo se analizarán y propondrán diferentes metodologías para lograr medir un aporte a la equidad de acceso de los proyectos urbanos. En primer lugar, se discuten problemas de equidad presentes en la metodología tradicional de transporte que deben ser considerados en las propuestas. Luego, el grueso del capítulo se dedica a la revisión de medidas de acceso, la cual termina con la selección y examinación teórica de un tipo de medición de accesibilidad. Posteriormente, el capítulo resume metodologías complementarias que son necesarias para concentrar los análisis en poblaciones. Finalmente, se indagan y formulan diferentes indicadores de equidad que serán posteriormente aplicados en capítulos siguientes.

3.1. Discusión respecto a sesgos de equidad adicionales

En este apartado se aportarán dos elementos adicionales para argumentar que la relación entre la medida de beneficio de la Sección 2.3 (Ecuación (3.1)) junto con la forma de modelación de sus variables carece de una mirada de equidad. Como se argumentó en la Sección 2.3 las consideraciones de equidad debieran ser agregadas por diferentes razones (Cervero et al. 1999; Thomopoulos et al. 2009; Stanley et al. 2011; Vasconcellos, 2011; Van Wee y Geurs, 2011; Martens et al. 2012; Karner y Niemeier, 2013; Macário, 2014), aunque en muchos casos – como en el chileno – estas son simplemente ignoradas.

Sin embargo, lo anterior no quiere decir que la equidad deba ser forzada dentro de un modelo como, por ejemplo, el de cuatro etapas. La multiplicidad de objetivos y la complejidad en la consideración de la equidad podrían desvirtuar e inutilizar este tipo de modelación. Por esto, la propuesta de este trabajo es la incorporación de una metodología complementaria a la tradicional. Esta sección presentará tres consideraciones metodológicas para contribuir a la relevancia, pertinencia y análisis de

las formulaciones de medición de accesibilidad e indicadores equidad que se propondrán respectivamente en las Secciones 3.2 y 3.4.

3.1.1. Beneficios de usuario en vista de economías de aglomeración

En primer lugar, entre los WEI omitidos en los modelos se encuentra el efecto de aglomeración (Mackie et al. 2014). Este se produce cuando existen reducciones de costos mediante economías de escala de los productores a nivel territorial, gracias a incrementos de su demanda que suelen ser ocasionados por proyectos de transporte. Un efecto análogo ocurre también en los hogares mediante externalidades de localización. Martínez y Araya (2000) las atribuyen a la interacción entre uso de suelo y transporte, cuyos efectos directos invalidan simplificaciones clásicas respecto a su captura en el sistema de transporte.

Las economías de aglomeración producidas por disminuciones de tiempos de viajes a ciertas zonas impactan tanto a usuarios como no usuarios del transporte. Las reacciones en el mercado local afectan al total de personas que habitan zonas aglomeradas (o desaglomeradas), son externos a los viajeros y de mayor plazo debido a relocalizaciones. Este efecto se refleja en los precios de los productos y servicios, en su variedad y calidad de servicios urbanos y en las plusvalías de las propiedades locales. Se trata de incrementos más allá de los beneficios filtrados desde el sistema de transporte por mejor tiempo de viaje, la parte que sí es posible capturar en modelos de transporte. En una aplicación empírica Martínez y Araya (2000) encontraron que estos efectos representan hasta un 21% de beneficios adicionales no observados en el sistema de transporte.

Si bien la omisión de la aglomeración sesga el total de beneficios desde una perspectiva de eficiencia (neto de costos y beneficios), lo interesante es que además altera la distribución de beneficios en términos de equidad. Martínez y Araya (2000) intuyen que podría haber un sesgo sistemático contra ciertos modos de transporte o categorías de usuario, este último caso el foco de esta tesis. En este sentido, cabe recordar que los beneficios por ahorro de costos (expresados en ΔC_{ij} anterior) son proporcionales al

número de viajes en cada zona (V_{ij}). Como es sabido, las áreas de mayores ingresos tienen una mayor tasa de viajes por persona que las de bajos ingresos.

En la Ecuación (3.3) se muestra un ejemplo comparando entre dos zonas hipotéticas con la misma cantidad de habitantes, i de ingreso alto y j bajo. Luego en (3.4) se supone la implementación de un proyecto de transporte que disminuye de igual forma los costos de viaje a ambos sectores. Si se asume que el beneficio de aglomeración (BA) es proporcional a la cantidad de habitantes en i y j , este resulta constante y solamente el beneficio de usuario (BU) sería superior en i de altos ingresos por su tasa de viajes.

$$\frac{\text{viajes}_i^{\text{alto}}}{\text{habitantes}_i^{\text{alto}}} > \frac{\text{viajes}_j^{\text{bajo}}}{\text{habitantes}_j^{\text{bajo}}} \quad (3.3)$$

$$\frac{\text{BU}_i^{\text{alto}}}{\text{BA}_i^{\text{alto}}} > \frac{\text{BU}_j^{\text{bajo}}}{\text{BA}_j^{\text{bajo}}} \quad (3.4)$$

En consecuencia, en presencia de mercados que reaccionan a proyectos urbanos con economías de aglomeración que afectan a toda la población, en *ceteris paribus* la omisión del efecto sería más fuerte en sectores de bajos recursos. Este razonamiento da luces de un primer sesgo de equidad por la proporción de viajeros versus habitantes en un caso de alto versus bajo ingreso. Esto es consistente con las recomendaciones metodológicas de Karner y Niemeier (2013) revisadas en la Sección 2.3.3. Cabe preguntarse para otra investigación, cuál sería el resultado si los efectos de aglomeración ocurren a diferente escala según el nivel de ingresos de los sectores afectados. Intuitivamente, se esperaría que sí: un mayor sesgo si se considera que un sector de bajos ingresos tendría un potencial de aglomeración mayor por su menor consumo. Pero estas diferencias dependerían de las circunstancias de los proyectos de transporte, el mercado inmobiliario y las características de los barrios.

3.1.2. Patrones de viaje actuales y cambios urbanos

En segundo lugar, las reducciones de costos dependen de los patrones de viaje existentes de los usuarios que son modelados según preferencias reveladas o declaradas. Como en todo modelo, existe dificultad para predecir el efecto de elementos nuevos que producen saltos cualitativos respecto a patrones actuales. Por ejemplo, si se conectan dos áreas aisladas por primera vez con un puente, sería difícil predecir el nuevo comportamiento tomando sólo el patrón actual en cada una de las etapas de modelación. De hecho un supuesto básico en la aproximación de modelos y la medida de beneficio es que los proyectos realizan cambios marginales en el sistema (Neuberger, 1971; Williams, 1976).

Asimismo, la relación positiva entre cambios en la generación de viajes por cambios de accesibilidad es de consenso en la literatura pero es raramente aplicada debido a problemas de modelación (Ortúzar y Willumsen, 2011; Stanley et al. 2011), a explicar en la Sección 3.2.2. Por su alta utilidad marginal de ingresos, la población de bajos ingresos es la que en términos de patrones de viaje tiene mayor potencialidad de cambio en el mediano plazo. También porque las comunidades de bajos ingresos se encuentran recurrentemente más marginados de la infraestructura de transporte y perciben el efecto de esta desconexión (Karner y Niemeier, 2013).

Un cambio a la situación anterior ocurre tanto cuando los proyectos proveen nuevas alternativas de viaje antes inexistentes (demanda latente) como cuando permiten alcanzar nuevas oportunidades de empleo, generan plusvalía u otros (cambio de ingresos). De esta manera, sectores de bajo ingreso tienen una mayor sensibilidad a incrementar su tasa de viajes o incluso su valor subjetivo del tiempo, junto a cambiar de modo o de ruta a alternativas más veloces. El resultado del trabajo de Stanley et al. (2011) es ilustrativo: estimaron que el valor en términos de inclusión social de viajes adicionales de grupos de menores ingresos eran cuatro veces mayores que los beneficios derivados por enfoques convencionales de tráfico agregado.

De hecho, ni si quiera es necesario la implementación de un nuevo proyecto para encontrar este sesgo. Si existen problemas de información en las matrices, se introducen desventajas respecto a ciertos grupos incluso en los escenarios base². La omisión o dificultad de considerar los elementos anteriores en cualquier modelo desemboca en un segundo conjunto de sesgos de equidad. Los proyectos modelados en el corto plazo omiten cambios en el mediano o largo plazo que son más fuertes en niveles de ingreso bajos. Esto es parte de lo que resume Mackie et al. (2014) como efectos distributivos de segundo orden.

3.1.3. Contexto de desigualdad de ingresos y segregación espacial

Los sesgos descritos anteriormente se diluirían parcialmente si es que las desigualdades de ingreso en la ciudad estuviesen repartidas homogéneamente en el territorio. Si una metodología privilegia proyectos que benefician más a usuarios de niveles altos de ingreso, al menos los proyectos también afectarían similarmente a los de bajos ingresos. En cierta medida igual existirá un sesgo relacionado con la elección del proyecto y cuán asequible es, por ejemplo, proyectos orientados a facilitar el automóvil son más excluyentes que los de transporte público o facilidades peatonales.

Sin embargo, cuando se trata de ciudades con alta segregación residencial de los diferentes grupos de ingreso, los sesgos de equidad descritos se agrandan a su máxima expresión. Si bien los proyectos de transporte tienen efectos sistémicos, sus beneficios se tienden a concentrar donde se realizan, lo cual se mostrará en el Capítulo 5. La ubicación de las inversiones y en qué áreas concentran sus beneficios se hace clave en términos de un desarrollo equitativo de la ciudad. Estas decisiones se transforman tanto en causa

² Detectado con matrices de viaje de diferentes cortes temporales en ESTRAUS, donde su no completitud (celdas con 0) hace que el ascenso de grupo socio-económico por el crecimiento de ingreso en el tiempo no se materialice en zonas que concentran poblaciones de bajos ingresos. De hecho lo contrario, la cantidad de viajes en esas zonas decrecen ya que estos “se mudan” a zonas de mayor ingreso, lo cual es errado.

como efecto de un problema mayor. Como se verá en el Capítulo 4, la inversión y la provisión de servicios públicos y privados también tienden a seguir el patrón espacial de la segregación residencial, en favor de las áreas con grupos de mayor ingreso. Esto sucede por dos razones: por un lado, los organismos locales cuentan con mayores recursos para iniciativas. Por otro lado, sin consideraciones de equidad los proyectos de organismos centrales también tenderán a perpetuar dicha situación, como se ejemplificó con las zonas i y j en la Ecuación (3.4) y se comprueba empíricamente.

Por lo mismo, la consideración de la equidad en la evaluación social de proyectos requiere mayor análisis territorial a base de características socio-demográficas en sus diferentes niveles metodológicos. Tanto si se trata de la ubicación de la inversión como su enfoque modal o el diseño del proyecto, las herramientas de análisis debieran rescatar a qué poblaciones beneficiará más allá del corto plazo. Esto representa una oportunidad para aportar herramientas estratégicas que contribuyan a disminuir la brecha social en movilidad y accesibilidad urbana.

3.2. Medidas de accesibilidad

La revisión de literatura esbozó posibles caminos para responder a los problemas anteriormente detallados. Como fue mencionado en la Sección 2.2, el concepto de accesibilidad tiene su origen en la búsqueda del “potencial de oportunidades para interactuar” (Hansen, 1959). El enfoque anterior genera que las medidas de accesibilidad tengan características distintivas al método de ahorro de costos, algunas ya descritas de manera general. En particular, algunas de sus formas de medición tienen ventajas para potencialmente incorporar la equidad en el análisis de proyectos (Cervero et al. 1999, Van Wee y Geurs, 2011).

A continuación, primero se introduce un esquema de medición de accesibilidad simulada desde la modelación de sistemas de transporte. En segundo lugar se presenta el desarrollo de dos metodologías con diferentes tipos de mediciones de accesibilidad. Luego se selecciona solamente la segunda metodología – de *accesibilidad potencial* – y

se continúa con su análisis detallado, para en capítulos posteriores aplicarla en casos de estudio.

3.2.1. Modelos estratégicos y accesibilidad simulada

La planificación de transporte requiere de una estimación de la demanda futura de movilidad y su comportamiento en la red de infraestructura y servicios de la ciudad. A nivel estratégico esto se realiza con modelos de interacción espacial, tradicionalmente mediante modelos de equilibrio iterativo o simultáneo. Estos son de uso generalizado en distintas ciudades de gran tamaño en el mundo y en Chile también se ocupan desde hace décadas. También son conocidos como modelos de “cuatro etapas” y se llaman así porque modelan el fenómeno de transporte de manera sucesiva, donde las principales etapas son:

- (i) Generación y atracción: cuántos viajes en cada punto de origen y destino
- (ii) Distribución: conectar viajes entre los puntos según maximización de entropía
- (iii) Partición modal: en qué modo se realiza cada viaje
- (iv) Asignación: los viajes se cargan en la red para buscar un equilibrio de tráfico

El conjunto de etapas se itera hasta alcanzar un equilibrio de oferta-demanda, el cual entregaría el patrón de viajes y el comportamiento de la red en el corte temporal deseado. A lo anterior es posible agregar etapas como de partición horaria o de cambio en el uso de suelo. Cada etapa anterior tiene sus complejidades y diferentes formas de resolución por separado o en conjunto, cuya discusión y mejoramiento es parte del estado del arte en la disciplina de transporte. Por ejemplo, un modelo robusto y ampliamente utilizado en Chile en la etapa de distribución (ii) es el gravitacional de tipo doblemente acotado.

Los modelos de interacción espacial operan la información de la movilidad en el territorio, cuyas proyecciones normalmente son desagregadas en zonas de análisis. Los

resultados de modelación sirven a la metodología de ahorro de costos porque para cada escenario se entregan los consumos de recursos a nivel global. Estos luego se utilizan en el cálculo del valor presente neto social de proyectos.

El aspecto clave para esta investigación sobre el esquema anterior es que cuando se simula una situación con o sin proyecto, los resultados de su modelación también pueden ser ocupados para calcular mediciones de accesibilidad. Sería una accesibilidad simulada para escenarios futuros. Para los datos de entrada de las mediciones existen diferentes resultados de modelación de transporte que podrían ser útiles, dependiendo de la etapa que se trate. Notar que no sólo estos modelos reúnen las características de interacción espacial necesarias para calcular accesibilidad, también podrían ser utilizados modelos como los tácticos o aplicaciones de ruteo según información en línea, que no fueron considerados en este trabajo.

La discusión sobre los datos de entrada se retomará más adelante, lo importante ahora es entender que la accesibilidad puede ser simulada para distintos escenarios futuros. Por lo tanto puede ser comparada entre situaciones con y sin proyecto. Se explicita aquí el concepto de cambio de accesibilidad producto de un proyecto, ΔAcc en la Ecuación (3.5).

$$\Delta Acc_i = Acc_i^{con\ proyecto} - Acc_i^{sin\ proyecto} \quad (3.5)$$

Como se vio en la revisión de literatura, las medidas de accesibilidad tienen la ventaja de ser localizadas espacialmente, de ahí el indicador i que representa la zona del territorio al que se está calculando la accesibilidad. Lo anterior permite asociar los cambios de accesibilidad en el territorio a la diversidad de sus habitantes o a beneficios externos a los viajeros como economías de aglomeración. Este sencillo esquema de incremento o decrecimiento de accesibilidad es el que se ocupará más adelante en los casos de estudio. Lo que viene a continuación tiene relación justamente al significado de cada Acc , cuál es su formulación.

3.2.2. Medidas basadas en factores de balance

El modelo gravitacional doblemente acotado de Wilson (1967) resulta como solución al aplicar restricción de viajes generados y atraídos al problema de maximización de entropía para la etapa de distribución (ii) del modelo de cuatro etapas. Como muestra la Ecuación (3.6), el modelo doblemente acotado busca predecir la cantidad de viajes entre cada par origen destino (O-D), V_{ij} , que compone cada espacio de la matriz de viajes. Esto lo realiza a partir de la cantidad de viajes generados (O_i) y atraídos (D_j) informados en cada zona i o j y los costos generalizados interzonales (C_{ij}) calculados tras la etapa de asignación a la red (iv).

$$V_{ij} = A_i O_i B_j D_j \exp(-\beta C_{ij}) \quad (3.6)$$

El parámetro β representa la sensibilidad de los usuarios a los costos y es calibrado, mientras que A_i y B_j son los factores de balance que acompañan a los orígenes y destinos respectivamente. Los factores son en realidad un cambio de variable tras la solución al problema dual de la maximización de entropía, son multiplicadores de Lagrange que luego se resuelven interdependientemente. No obstante, se denominan así porque sirven como variables auxiliares que permiten converger el modelo gravitacional, balanceando iterativamente las cantidades de viaje según una doble compensación (Ecuaciones (3.7) y (3.8)). Más aún, los factores de balance sirven como medidas de accesibilidad (Wilson, 1967), específicamente sus inversas como se muestra en la Ecuación (3.9).

$$A_i = \frac{1}{\sum_j B_j D_j \exp(-\beta C_{ij})} \quad (3.7)$$

$$B_j = \frac{1}{\sum_i A_i O_i \exp(-\beta C_{ij})} \quad (3.8)$$

$$Acc_i = \frac{1}{A_i} \quad y \quad Acc_j = \frac{1}{B_j} \quad (3.9)$$

¿Por qué se pueden relacionar los factores de balance a información de accesibilidad? Cabe recordar que el concepto de accesibilidad depende de las oportunidades como también de la facilidad de llegar a ellas (el inverso de los costos). Luego, la explicación intuitiva es que los factores de balance sirven para enmendar la existencia de un “exceso” o “falta” de viajes desde o hacia las zonas, permitiendo en cada iteración una conversación entre la variable de costos y la de viajes generados o atraídos respectivamente.

Esto se entiende al analizar las Ecuaciones (3.7) y (3.8) por separado: los factores capturan la información de accesibilidad (atractividad) de cada zona, en suma compensando el nivel de costos de llegar a destinos (salir de orígenes) con la cantidad de viajes que efectivamente atraen (generan). Entonces se trata de variables que miden aspectos desconocidos más allá de los costos o viajes, intrínsecos a las localizaciones, y los incorpora en la Ecuación (3.6).

Interpretación como medida de accesibilidad utilitaria

En otras palabras, los factores de balance serían la forma indirecta del modelo gravitacional de expresar la cantidad y cualidad de oportunidades localizadas en el territorio, introduciendo exógenamente el sistema de uso de suelo en el modelo (Martínez y Araya, 2000). Existe entonces una relación directa entre la accesibilidad y el dual de la maximización de entropía, por consiguiente también con la maximización de utilidad por equifinalidad (Neuberger, 1971). Tras desarrollar lo anterior en un caso con proyecto de transporte, Williams (1976) derivó un indicador de beneficio del usuario desde su forma integral usando los factores de balance, mostrado en la Ecuación (3.10). Este proviene de calcular el excedente del consumidor, restando la situación sin proyecto a la con proyecto.

$$BU = \frac{1}{\beta} \left(\sum_i O_i \ln \left(\frac{A_i^{\text{sin proyecto}}}{A_i^{\text{con proyecto}}} \right) + \sum_j D_j \ln \left(\frac{B_j^{\text{sin proyecto}}}{B_j^{\text{con proyecto}}} \right) \right) \quad (3.10)$$

Existe una interpretación similar propuesta y aplicada en Chile por Martínez (1995), la cual establece que este tipo de accesibilidad es estrictamente una entidad económica, la cual se reflejaría en el valor de suelo. Su variación es que denomina accesibilidad no a la inversa de los factores de balance sino al excedente del consumidor de Neuberger (1971), y en seguida separa las medidas en accesibilidad y pseudo-atractividad (Ecuación (3.11)).

$$\text{acc}_i = \frac{-1}{\beta} \ln(A_i) \quad \text{y} \quad \text{patt}_j = \frac{-1}{\beta} \ln(B_j) \quad (3.11)$$

Martínez argumenta que las medidas de acceso revelan la conexión económica entre el sistema de transporte y el de uso de suelo. Además enfatiza que en su interpretación es posible diferenciar el beneficio de visitar actividades (acc_i) y de ser visitado por ellas (patt_j), según las características de la interacción. Algo relevante es que independiente del propósito, sólo el primer tipo de beneficio (asociado a hogares) dejaría huella en el sistema de transporte de pasajeros, no así el segundo (a empresas).

Análisis de sus características

Una potencial ventaja de las medidas de accesibilidad anteriormente revisadas es que se relacionarían directamente a la teoría de la utilidad aleatoria. De hecho, Geurs y van Wee (2004) clasifican los casos anteriores como medidas de *accesibilidad utilitaria*. Sin embargo, sus propios proponentes encontraron diferentes problemas para su uso en evaluación. Por un lado, Williams y Senior (1978) encontraron que para las medidas derivadas del modelo gravitacional doblemente acotado, su interdependencia y la fijación de los viajes provocan que las variables duales no adquieran un valor absoluto específico, sólo uno relativo a su contraparte.

Existen importantes reveses que derivan de lo anterior. Si la etapa de generación y atracción (i) se modela de manera exógena, los factores como medida de accesibilidad dejan de considerar la ansiada competencia por la localización de empleos y hogares como propuso Wilson (1967). Como se mencionó anteriormente, en gran parte de los

modelos avanzados de cuatro etapas esto es exógeno. Es decir, la etapa (i) no interactúa con (ii), (iii) y (iv), justamente por problemas con la incorporación de la variable de accesibilidad en modelos estratégicos (Ortúzar y Willumsen, 2011).

¿Por qué ocurre esto? En parte porque en la modelación los datos de entrada de la variable de accesibilidad no entregan los resultados esperados, incluso con signo erróneo. De hecho, Martínez (1996) comenta que la relación entre el modelo de suelos MUSSA y sus variables de accesibilidad no son significativas para los modelos de localización de la mayoría de categorías de hogar, además de presentar signos opuestos a los esperados por el autor. Al ser la *accesibilidad utilitaria* basada en factores de balance el canal de comunicación fundamental entre ESTRAUS y MUSSA, argumentamos que existe un problema en esta forma de integrar la modelación de transporte con la de uso de suelo.

Adicionalmente, su operación requiere de variados procesos de normalización, agregación e imputación para superar la ausencia de pares O-D en cada categoría de usuario y propósito en la etapa de distribución (Sectra, 2008). Por último no se permitiría análisis territorial, que es relevante para incorporar la equidad (Cervero et al. 1999), ya que estas inconsistencias y la simetría del modelo no permiten interpretar si los beneficios corresponden a orígenes o destinos (Williams y Senior, 1978).

Según el análisis preliminar realizado en este trabajo, la fuente radica en el modelo gravitacional doblemente acotado. Por su fórmula de cálculo interdependiente, los factores de balance van mezclando y neteando los efectos de accesibilidad y atractividad entre ellos, llevando a su indeterminación. A esto se suma el nivel de desagregación de las matrices O-D de viajes empleadas en las iteraciones de cálculo, con la mayor parte de sus celdas vacías. Por último, en implementaciones del modelo utilizadas en Chile, los costos generalizados son expresados en des-utilidades y mezclan una gran variedad de componentes subjetivos que van más allá de los costos de viaje.

Los elementos anteriores desembocan en que los factores de balance acumulen inconsistencias como medida de accesibilidad: no parecen representar nada más que variables auxiliares afines al proceso iterativo del modelo. En esta investigación, la problemática fue descubierta durante la aplicación de la medida de accesibilidad usando ESTRAUS (se explica el modelo en la Sección 4.2.3). En el Anexo A se adjuntan mapas con los resultados de la medida de acceso en algunos escenarios de modelación, cuya visualización es contra-intuitiva. Los problemas anteriormente analizados fueron también presentados en Niehaus et al. (en imprenta) y se volverán a destacar en el Capítulo 6.

Desde ese trabajo y el análisis de la sección 3.1 se aportan la descripción de dos falencias adicionales. La primera respecto a una mirada de equidad, que emergen en el planteamiento utilitario y se reflejan en la desagregación de categorías de usuario según nivel de ingreso. Si en entre dos zonas existen más viajes que los explicados por los costos, los factores de balance informarán de una alta accesibilidad, sin embargo en realidad esto también se puede deber sólo a altas tasas de viaje de sectores de ingreso alto. Como se explicó, en este esquema existen sesgos producto de fijar la tasa de viajes como también por economías de aglomeración. Por ello, tanto la subjetividad como también las simplificaciones presentes en el enfoque utilitario hacen que las accesibilidades homónimas no sean aconsejables para indicadores de equidad, como también concluye Van Wee y Geurs (2011).

La segunda tiene que ver con la compleja interpretación fuera del modelo de las medidas de acceso, dada su unidad de des-utilidades definidas sólo dentro del mismo. Por lo mismo, las medidas de acceso no son comparables en diferentes calibraciones del modelo a lo largo del tiempo o en diferentes ciudades. Menos aún se pueden comparar resultados de proyectos evaluados con diferentes entornos de modelación.

3.2.3. Medidas de accesibilidad potencial

Los problemas anteriormente verificados obligaron a buscar su origen en la literatura y un análisis en detalle de los modelos. Como bien resaltan Williams y Senior (1978), las medidas utilitarias basadas en factores de balance anteriormente descartadas son similares en su formulación a una medida de accesibilidad tipo Hansen (1959). Neuberger (1971) fue el primero en asociarlas al beneficio espacial del excedente del consumidor, lo cual luego profundizó König (1975).

La Ecuación (3.13) muestra el excedente local del consumidor (EC_i) según la medida de accesibilidad potencial tipo Hansen, tras el despeje del factor de balance en el modelo gravitacional (Neuberger, 1971). Pero en este caso se trata de uno solamente acotado a orígenes, donde el factor de balance A_i ya no depende de su contraparte asociada a los destinos (B_j), lo cual se muestra en la Ecuación (3.12) en contraposición a (3.7). Se vuelve entonces a la definición de que $Acc_i = A_i^{-1}$ (Williams y Senior, 1978).

$$A_i = \frac{1}{\sum_j D_j \exp(-\beta C_{ij})} \quad (3.12)$$

$$EC_i = \frac{1}{\beta} \ln(Acc_i) \quad \text{donde} \quad Acc_i = \sum_j D_j \exp(-\beta C_{ij}) \quad (3.13)$$

En esta formulación la accesibilidad en una zona depende solamente de los costos C_{ij} desde esta hacia todas las zonas destino y la sensibilidad β , junto también a la cantidad de viajes a cada zona. Esta última componente se interpreta como la importancia relativa en términos monetarios de las oportunidades en cada destino según su frecuencia de uso por parte de los usuarios y los costos de acceder a ellos (en unidad de desutilidad). Sin embargo, lo anterior es su interpretación utilitaria, como vimos nos interesa un enfoque de accesibilidad más amplio y acorde a la equidad. La Figura 3-1 esquematiza niveles bajos y altos de intensidad de oportunidades en cada destino (E_j) y la facilidad o dificultad de llegar a estas según el grosor de la flecha (C_{ij}).

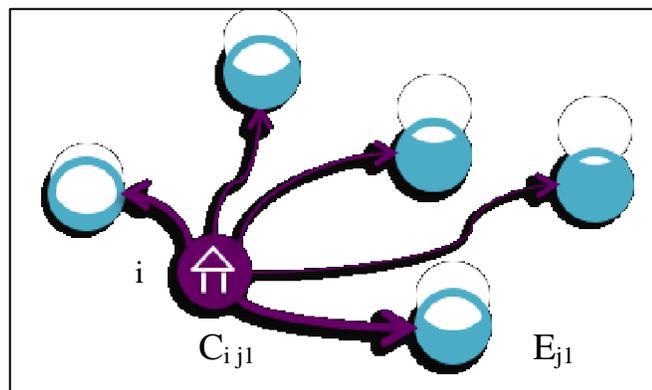


Figura 3-1. Esquema de accesibilidad potencial desde un origen i a destinos j

En ese sentido, la Ecuación (3.14) generaliza las relaciones de (3.13) dentro del esquema conceptual recién presentado. En particular, el cambio de variable de D_j a E_j es relevante conceptualmente, ya que ahora representa el nivel de oportunidades en el destino en vez de la cantidad de viajes. Este concepto es original de Hansen (1959), en su interés de medir intensidad de potenciales de interacción en un enfoque amplio del sistema urbano. En la Sección 4.2.1 se explica de manera aplicada la forma de calcular el valor de E_j .

$$\text{Acc}_i = \sum_j f(E_j, C_{ij}) \quad (3.14)$$

De hecho, Geurs y van Wee (2004) clasifican a este tipo de formulación como medidas de *accesibilidad potencial*, aunque también se las conoce como gravitacionales por la descripción de Hansen (1959) mediante una interpretación física. Stewart (2014) muestra una detallada explicación de esta noción. La idea es que las oportunidades más cercanas pesan más en el potencial de interactuar de los individuos, según la función de impedancia f que se aplique. El nombre proviene de aplicar $n = 2$ en la Ecuación (3.14) que resulta en algo similar a la gravedad newtoniana, donde la fuerza es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (en este caso los costos de transporte). Tanto (3.15) como (3.16) son ejemplos de medidas de *accesibilidad potencial*, los cuales

fueron analizados y aplicados en esta investigación: inversamente proporcional y exponencial negativa (cuya formulación coincide con lo derivado en (3.13)).

$$f = \frac{E_j}{\beta C_{ij}^n} \quad (3.15)$$

$$f = E_j \exp(-\beta C_{ij}) \quad (3.16)$$

El parámetro β es de nuevo una sensibilidad ante los costos, pero esta vez con una interpretación no utilitaria (Ortúzar y Willumsen, 2011). Tal como recomiendan Geurs y van Wee (2004), la calibración apropiada para esta sensibilidad debe ser elegida con cuidado y estar relacionada a la evidencia empírica del comportamiento de viajes en el área de estudio. Lo anterior es un enfoque común en la literatura, por ejemplo lo utilizaron Cervero et al. (1999). Tiene sentido porque en la accesibilidad potencial lo importante de la función de impedancia es intentar responder a la percepción de las personas respecto a la accesibilidad a oportunidades según el nivel de costos. De nuevo, justo por lo anterior Geurs y van Wee destacan la exponencial negativa desde la dimensión de la percepción (más adelante cabe fijarse en esto en la forma de la curva en la Figura 3-3 lado izquierdo). Algo muy interesante es que este enfoque coincide con que la misma función exponencial negativa también deriva de modelos de distribución gravitacionales (Ecuación (3.13)), validándose mutuamente.

A partir del análisis de este trabajo, se reforzó la relevancia de ajustar la escala de los costos a la porción más sensible de la función de tal manera que los resultados de accesibilidad tengan mayor relevancia (por sensibilidad). También se eligió un método que facilita la interpretación, para por ejemplo permitir comparaciones entre diferentes formulaciones, dado que independiente del valor final de β su significado respecto al comportamiento de viaje empírico es el mismo. Las Ecuaciones (3.17) y (3.18) muestran el despeje de β tal que la accesibilidad parcial (sin sumatoria) resulte con valor de un medio ($1/2$) en su componente de transporte cuando los costos correspondan al promedio de costos \bar{c} de viaje de las personas. Lo anterior se entiende en mayor profundidad

también con la aplicación de la calibración correspondiente en la Sección 5.1.1, de donde emergen recomendaciones metodológicas.

$$\beta = \frac{2}{\bar{c}} \quad (3.17)$$

$$\beta = \frac{-\ln 0,5}{\bar{c}} \quad (3.18)$$

La *accesibilidad potencial* está bastante validada en la literatura, en particular es consistente con los cuatro componentes del concepto de accesibilidad ya revisados (Geurs y van Wee, 2004). Sus medidas también cumplen de buena manera con los cinco criterios propuestos por Geurs y van Wee (2004) y además es recomendable para evaluación social. Asimismo, en esta investigación agregamos tres razones por las cuales son aconsejables de utilizar desde un punto de vista de equidad:

- (i) Es posible desacoplarlas del patrón de viajes actual de los habitantes
- (ii) No están restringidas a las definiciones internas de los costos en cada modelo
- (iii) Su interpretación es simple para análisis territorial según orígenes o destinos, lo que permite poder aplicarla a poblaciones que residen o viajan a ellos

Lo anterior fue validado en la asistencia a presentaciones en diferentes sesiones de las conferencias internacionales a las que se asistió durante el desarrollo de esta tesis – por ejemplo, Weisbrod et al. (2015) y Stewart y Zegras (2015), entre otros – además de los comentarios recibidos. En la gran variedad de aplicaciones se destacó la utilidad de las medidas de accesibilidad para complementar el enfoque tradicional de diseño y evaluación de alternativas de proyectos de transporte.

Finalmente, cabe comentar un aspecto no abarcado pero que podría ser interesante para trabajos futuros: las medidas de *accesibilidad potencial* podrían aportar en la conexión de la primera etapa de generación y atracción de viajes con el resto, o incluso modelos de uso de suelo dentro de modelos de equilibrio.

3.2.4. Selección de la medida de accesibilidad

La fórmula de impedancia tipo inversa proporcional (Ecuación (3.15)) fue la utilizada por Hansen (1959) para aplicar su propuesta metodológica (por razones de otra índole también la ocuparon Cervero et al (1999)). De acuerdo al autor, el parámetro n de la potencia corresponde a valores 0,5 a 3 según el tipo de viaje. Principalmente varía según su propósito, donde un n menor significa que los costos son menos restrictivos debido a la importancia del viaje. Por lo mismo, en la aplicación de la metodología se ocupó $n = 1$ pensando en el propósito trabajo. Sin embargo, al poco andar se verificó el problema de asintoticidad que se aprecia en la Figura 3-2.

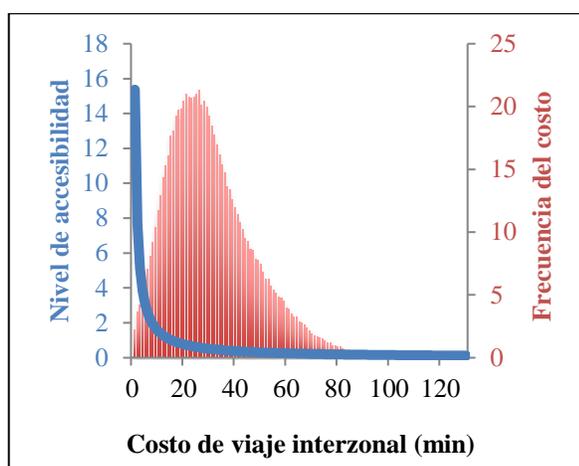


Figura 3-2. Propiedades de la medida de accesibilidad inversa proporcional descartada

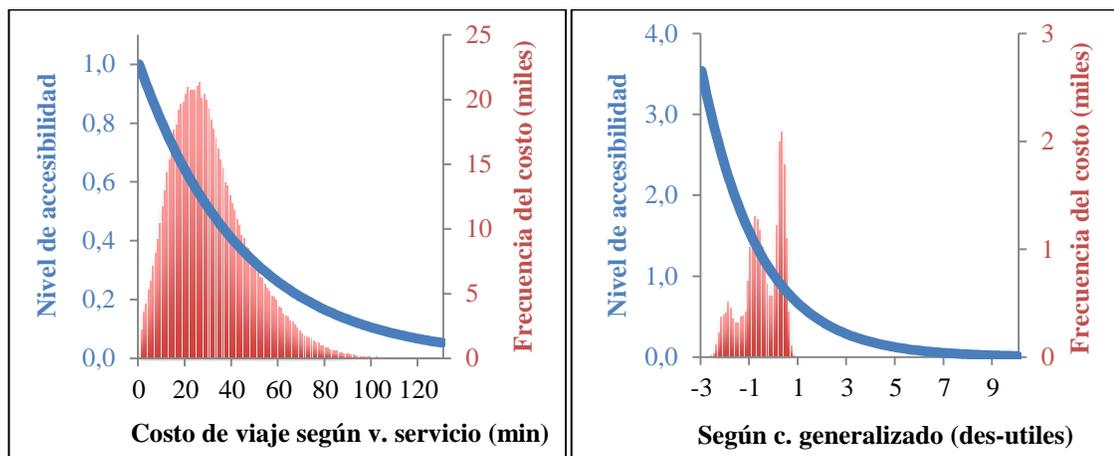
En las ordenadas se presentan niveles de tiempo de viaje entre zonas, en rojo su frecuencia en una corrida base de ESTRAUS y en azul el resultado de accesibilidad correspondiente. Cualquiera sea el valor de β (en este caso calibrado según (3.17)), de no truncar de una manera *ad-hoc*, una gran porción de los costos quedará en la zona asintótica de la función. En este ejemplo, la accesibilidad parcial resulta en valores entre 1 y 0,1 en el rango entre 15 y 90 min de tiempo de viaje. Sin embargo, toma valores superiores a 1 cuando el tiempo es menor a 15 y prácticamente explota cuando baja de 5 min. En rojo se aprecia que la frecuencia de estos tiempos de viaje no es despreciable.

Por esta razón, si bien se calcularon los escenarios del Capítulo 5 con esta medida de accesibilidad, se decidió omitir el análisis de sus resultados en mayor detalle.

En consiguiente, la medida de accesibilidad seleccionada para los pasos que siguen es la potencial con una formulación de exponencial negativa, la Ecuación (3.16). Aparte de ser análoga a lo derivado desde el modelo gravitacional simplemente acotado (3.13), también es ampliamente citada en la literatura (Geurs y van Wee, 2004; Ortúzar y Willumsen, 2011). Además tiene diferentes ventajas operacionales que se detallan a continuación.

3.2.5. Datos y propiedades de la formulación final de accesibilidad

El siguiente paso consiste en un análisis según las variables de esta metodología, que desembocará en una reformulación más particular al final de la Sección: la Ecuación (3.21). El análisis de las Figuras 3-3 con la exponencial negativa es análogo al realizado en la anterior con la inversa proporcional. Sin embargo, esta vez se muestran dos gráficos según dos tipos de datos de entrada para los costos de viaje, en ambos casos obtenidos desde un modelo de cuatro etapas. A la izquierda se encuentra la medida de accesibilidad utilizando variables de servicio resultantes de la asignación de la red (en este caso tiempo de viaje, al igual que en la Figura 3-2), mientras que a la derecha según costos generalizados a ingresar en la etapa de distribución (que determinan a los factores de balance).



Figuras 3-3. Propiedades de la medida de accesibilidad exponencial negativa, dos tipos de datos de entrada

Para el ejemplo se utiliza la misma corrida base de ESTRAUS, a la izquierda se reúnen los costos para los modos transporte público y auto, mientras que a la derecha para 13 categorías de usuario existentes. El gráfico de la derecha presenta diferentes problemas asociados a sus respectivos datos de entrada, que incluyen costos generalizados negativos por su unidad de desutilidad (consistente sólo dentro del modelo). En primer lugar no está acotado (entre 0 y 1, por ejemplo) y no existe β que lo logre, ya que los costos generalizados cambian de signo, aquí sólo se utilizó el β de su respectivo modelo de distribución. Segundo, los costos generalizados tienen diferentes escalas según cómo los percibirían las categorías de usuario, en forma decreciente respecto a sus ingresos y nivel de motorización. Es decir, hacia la izquierda se concentran los costos para los niveles de ingreso alto y alta motorización, y en la derecha lo contrario. Esta subjetividad complica la posterior construcción de indicadores de equidad.

En cambio, el gráfico de la izquierda presenta las características deseables. La accesibilidad queda acotada entre 0 y 1 y es posible ajustar la función a la media de costos, donde además estos se concentran de manera normal. La inexistencia de categorías de usuario y propósitos permite una orientación objetiva y su interpretación y compatibilidad con otros modelos o ciudades es fácil por su unidad minutos. Por último,

las matrices están completas para todos los pares O-D, por ello se ve mucho mayor frecuencia en los costos. Con este segundo cambio de variable se verifican de nuevo ventajas adicionales en términos de equidad, que terminan por desvincular esta medida de accesibilidad potencial de su origen utilitario.

Propuesta final de medida de acceso

Llámesse C_{ij} al vector de costos de viaje interzonal según variables de servicio (Ecuación (3.19)), cuyos componentes corresponden a los tipos de costos como la tarifa (t_a), el tiempo de caminata (t_c), de espera (t_e) y de viaje (t_v)³. Análogamente, el vector $\vec{\alpha}$ se compone de ponderadores de la importancia relativa de cada uno de los costos. En esta investigación α^r_a dependerá del valor social del tiempo del año en que se modela el escenario con los costos, además de dos tipos de ponderadores de los tiempos: homogéneo con $\alpha^{l_{c,e,v}} = 1$ y otro de acuerdo a la definición de precios sociales en Chile. Es decir, α^2 con valor 3 para la caminata, 2 espera y 1 tiempo de viaje (MDS, 2016) en la Ecuación (3.20).

$$C_{ij} = \langle t_a \ t_c \ t_e \ t_v \rangle_{ij} \quad (3.19)$$

$$\alpha^r = \langle \alpha_a \ \alpha_c \ \alpha_e \ \alpha_v \rangle^r \text{ con } r: 1 \text{ homogéneo y } r: 2 \text{ según precios sociales} \quad (3.20)$$

Finalmente, queda volver a la sumatoria a partir de las accesibilidades parciales ya definidas en detalle. Por razones de interpretación y comparabilidad (relevantes para cualquier implementación), es deseable obtener de nuevo un rango acotado entre 0 y 1. Asimismo, sería conveniente para la práctica que su rango no dependa de la unidad del nivel de oportunidades E_j . En línea con lo anterior se decidió normalizar la sumatoria respecto al total de oportunidades E_j . En otras palabras la accesibilidad corresponde a un promedio ponderado del potencial de movilidad según el peso del nivel de cada

³ Esta nomenclatura sigue la utilizada en ESTRAUS, pero la tipología es típica de cualquier modelo.

oportunidad en el destino. Esto se expresa en la Ecuación (3.21), a continuación se explica más sobre las razones y alcances de la normalización.

$$\boxed{\text{Acc}_i^r := \frac{\sum_j E_j \exp\left(-\beta^r (\alpha^r C_{ij})\right)}{\sum_j E_j}} \quad (3.21)$$

Cervero et al (1999) también sigue este mismo enfoque y aplica una normalización, en su caso mediante el valor medio de accesibilidad, paso que replican otros autores. Como ejemplo, la normalización a la Ecuación (3.21) puede vista de la aplicación de la metodología (Capítulo 4) que se realiza en función de las oportunidades de empleo. El resultado de aplicar fórmula significa entonces un promedio ponderado de accesibilidad a todos los empleos de la ciudad, según la importancia relativa de estos.

En ese ejemplo, si en una zona en particular se obtiene $\text{Acc}_i = 0,5$, esto significa que en promedio es posible acceder a todos los empleos de la ciudad en \bar{c} (costo medio de viaje de la población), un valor inferior implica que se demora más que \bar{c} e inversamente para accesibilidad entre 0,5 y 1. Los cambios de accesibilidad quedan expresados de manera estándar en porcentajes de la accesibilidad máxima (1). Si bien la interpretación no es directa, es bastante fácil para ser una medida de accesibilidad por desembocar en un promedio ponderado. Esto es relevante porque permite a la medida ser estandarizable e interpretable por profesionales de diversas disciplinas (Geurs y van Wee, 2004; Karner y Niemeier, 2013) Cabe recalcar que al ser un valor fijo no se altera la distribución de la accesibilidad ni el valor relativo de cada zona.

En contraposición, de no realizar la normalización y basado en los resultados alternativos a los del Capítulo 5, la interpretación sería algo como lo siguiente: la accesibilidad se mueve entre 600 mil y 2,5 millones de “medios empleos” promedio a acceder en \bar{c} ; con los cambios de accesibilidad representando alguna cifra de “medios empleos” adicionales o faltantes. Si bien es interesante lo anterior como dato, como se muestra en el Capítulo 5 los objetivos de esta tesis son comparar entre modos y

escenarios de las simulaciones, por lo que el análisis se hace más complejo y menos intuitivo.

En proyectos de transporte como los evaluados (Capítulo 4) no se presenta un cambio en las oportunidades, por lo que la normalización es la misma en situación sin y con proyectos. Se debe advertir que en caso de haber cambios en las oportunidades (por ejemplo, con un proyecto de empleos en una cierta localización), la normalización se debe fijar al escenario inicial si lo que se quiere es estudiar el cambio de accesibilidad. Esto es lo mismo que no aplicar normalización, de nuevo, no influye en la distribución. En cualquier caso, en esta tesis lo que interesa es analizar esa distribución en términos de equidad, por lo que en términos internos de la accesibilidad a oportunidades una normalización relativa a cada escenario tampoco influye en las accesibilidades relativas dentro de ese escenario.

3.3. Síntesis de poblaciones con métodos bayesianos⁴

El objetivo de analizar en detalle los impactos de accesibilidad y equidad en la ciudad requiere de otro insumo relevante: la elaboración de poblaciones sintéticas. Karner y Niemeier (2013) recomiendan este tipo de desagregación, ante todo para análisis de equidad, porque permiten evitar definiciones simplistas de los indicadores y también sesgos espaciales de acuerdo a la concentración o dispersión de los grupos prioritarios. En cuanto al método, su ventaja es que permiten obtener muestras del tamaño deseado y llegar a una información continua, por sobre su versión discreta en encuestas. En este caso, modelar características particulares de la población real aportará a estimar los efectos de accesibilidad en el nivel de desagregación que se requiere. Los pasos a continuación buscan construir poblaciones sintéticas a base de una variable para responder a dos niveles de desagregación presentes en la metodología.

⁴ Se agradece especialmente a Felipe González por su ayuda para incorporar esta metodología.

- Es necesaria una descomposición territorial de las poblaciones desde las comunas a zonas que utilizan los modelos de transporte estratégicos.
- Se requiere trabajar con una desagregación en percentiles de la variable misma, lo que significa en este caso conocer cuál es la presencia de los deciles de ingreso per cápita en cada zona, cuyos tramos de ingreso serán definidos en la sección 4.4 para la ciudad completa.

3.3.1. Ajuste de distribuciones

Las encuestas de movilidad o socio-económicas se aplican tras construir una muestra aleatoria que busca representar a la población en un territorio en general amplio como, por ejemplo, una comuna. Si se verifica que la muestra en este territorio se encuentra dentro de un nivel de confianza y un error muestral aceptables, es posible estimar estadísticamente la distribución de probabilidad comunal que mejor se ajusta a cierta característica o conjunto de ellas en la población representada. Para esto un método simple y ampliamente utilizado es el ajuste de distribuciones (MathWave Technologies, 2004). En palabras sencillas, consiste en probar iterativamente diferentes distribuciones de probabilidad en comparación a la muestra hasta encontrar la que mejor le ajusta.

En este trabajo la metodología busca ajustar una distribución continua del ingreso per cápita de los hogares de una encuesta, para posteriormente analizar cuantiles de la población. Es el caso de una sola variable que es luego agrupada, por lo que se evitan los problemas detectados en la literatura para simular poblaciones completas de agentes individuales, especialmente para distribuciones conjuntas de diferentes características de los mismos (Farooq et al. 2013; Farooq et al. 2015).

Prueba estadística Anderson-Darling

Para lograr lo anterior se utilizará un *software* especializado que aplica técnicas estándar para realizar los ajustes. Una vez que se prueben diferentes parámetros estadísticos en una gran variedad de familias de distribución de probabilidad, corresponde elegir el

mejor ajuste. Para esto, se buscará minimizar la prueba Anderson-Darling (AD), que es el promedio del cuadrado de las diferencias entre las acumuladas de la distribución ajustada y la función empírica (Stephens, 1974), como se muestra en (3.22). En este caso, F es la distribución acumulada teórica y F_n la empírica observada, para una muestra n .

$$AD = n \int \frac{(F_n(x) - F(x))^2}{F(x)(1-F(x))} dF(x) \quad (3.22)$$

Si bien el *software* también calcula el test Kolmogorov-Smirnov, que cuenta con un menor peso en las colas que AD, este será en casi todos los casos redundante por sugerir las mismas distribuciones que el anterior. Cabe notar en la fórmula de AD importa el tamaño de la muestra en cuestión, por ello para diferentes territorios corresponde comparar el AD dividido en el número de observaciones en el mismo (NIST, 2012).

3.3.2. Modelo de inferencia bayesiana

El problema a resolver es que con la encuestas socio-económicas o demográficas cuentan con muestra que no es representativa estadísticamente en una desagregación territorial más detallada: la zonificación de los modelos de transporte. Para resolver esto se aplicará un modelo de inferencia bayesiana, el cual funciona estimando una distribución nueva (*posteriori*) a partir de la distribución a *priori* y un conjunto de datos. Esto se muestra esquemáticamente en la Ecuación (3.23) (Wallace, 2004). En ella, el *prior* corresponde a la distribución comunal, cuyo ajuste se explicó en la sección anterior. La función de verosimilitud es la misma que la comunal, típicamente Gamma, Weibul o Exponencial dependiendo de la *curtosis* de los datos. Finalmente la distribución *posteriori* $P(\theta_i | X)$ depende de la evidencia en datos representada por X . El modelo condiciona la distribución de probabilidad de los ingresos comunales en las observaciones de la zona. Por lo tanto, con una distribución de probabilidad subyacente se obtiene la distribución de ingresos más probable a la luz de las observaciones.

$$P(\theta_i | X) = \frac{P(X | \theta_i) P(\theta_i)}{\int P(X | \theta_i) P(\theta_i) d\theta_i} \quad (3.23)$$

Dependiendo de la forma de resolver lo anterior es que nacen distintas técnicas de actualización bayesiana, aquí en particular se usa Hamiltonian Markov Chain (HMC) implementado en el paquete para el *software* R, RStan (Stan Development Team, 2015). En el procedimiento es importante equilibrar cuánto importa la distribución comuna y cuánto los datos zonales. En particular, se dio importancia al prior para que la distribución de probabilidad dependiese solo parcialmente de los datos de la zona. De esta manera se finaliza con el acomodo bayesiano que entregará una distribución modelada para cada zona. En la Figura 3-4, se resume esta inferencia iterativa desde la distribución comunal para ajustar a un histograma de datos zonales (columnas).

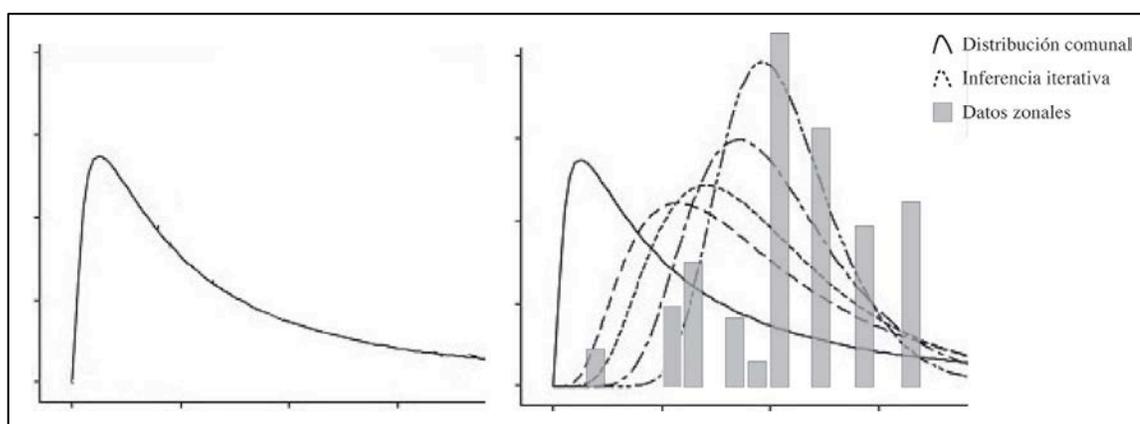


Figura 3-4. Esquema de un procedimiento de actualización bayesiana, situación inicial y final

Por último, cabe resaltar que estos métodos preliminares se aplican con el objetivo de poder determinar variables secundarias dentro de la metodología general. Futuras investigaciones podrían concentrarse en comparar y mejorar esta parte. Un avance importante sería probar ajustes y simulación de manera multivariable. En este caso hubiese sido interesante modelar conjuntamente también el tamaño de hogar, sin embargo su complejidad se extendía de los límites de la tesis. Por lo mismo el tamaño de

hogar se obtendrá simplemente de la media zonal, el cual afortunadamente no varía tanto como los niveles de ingreso.

3.4. Medición de la equidad de acceso

La última parte metodológica tiene que ver con la aplicación de los insumos anteriores para medir aportes a la equidad de acceso. El método busca disminuir las brechas de desigualdad de acceso, en concordancia con la *equidad vertical* (Litman, 2007) y el principio *Maximax* de justicia (Rawls, 1971; Martens et al. 2012) repasados en la Sección 2.3.3. Se revisarán dos metodologías que serán aplicadas en capítulos siguientes de manera paralela, lo que permitirá comparaciones.

3.4.1. Coeficiente de Gini

El coeficiente de Gini (1912) es un indicador de desigualdad numérico que se basa en la medición de desigualdad gráfica de la curva de Lorenz (1905). Consiste en ordenar acumulativamente a la población según ingresos crecientes y compararlo con el porcentaje de ingreso total acumulado, como en el ejemplo de la Figura 3-5. El coeficiente de Gini vendría a ser el área entre curvas mostrado en A dividido en el área total del triángulo bajo la igualdad (A + B). El coeficiente queda acotado entre 0 y 1 y mientras mayor su valor (más separadas las curvas), mayor la desigualdad.

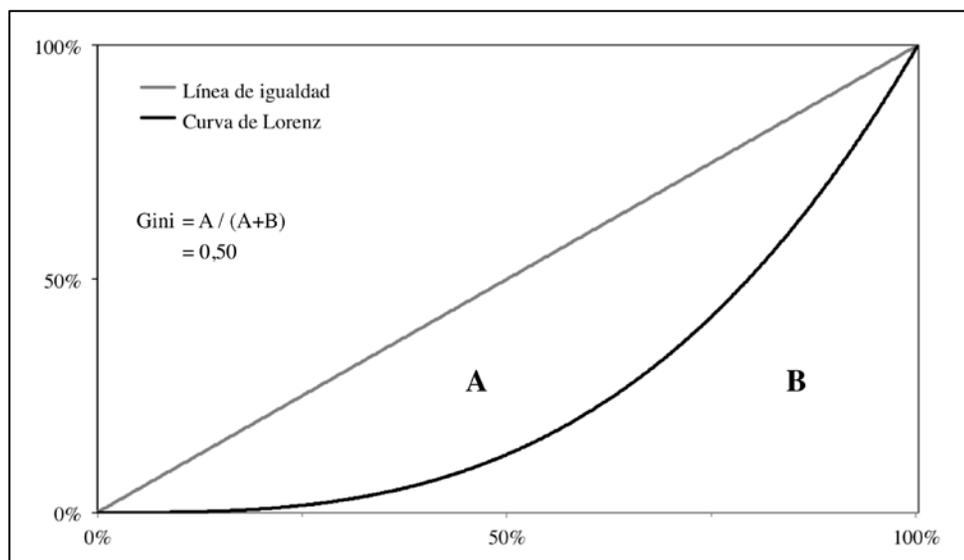


Figura 3-5. Ejemplo la curva de Lorenz junto a explicación gráfica del Gini.

La Ecuación (3.24) es una manera discreta de calcular lo anterior, con P_k la proporción acumulada de población ordenada en k crecientemente según Y_k la variable de interés a medir. En los capítulos siguientes se aplicará tanto al nivel de ingreso como acceso.

$$G_Y = 1 - \sum_k (P_k - P_{k-1})(Y_k + Y_{k-1}) \quad (3.24)$$

Delbosc y Currie (2011) realizaron un interesante análisis usando lo anterior respecto a la equidad en la provisión del transporte público en Melbourne. Es valorable la capacidad del Gini de diagnosticar la desigualdad del sistema completo en una medida estándar y conocida, lo que permite comparar entre servicios, ciudades y épocas. Por lo mismo, en la aplicación de la metodología se calculará la diferencia que producen los proyectos simulados en el Gini versus la situación inicial (Sección 5.4.3).

Por un lado, una posible innovación respecto a lo anterior es utilizar el cambio de accesibilidad (ΔAcc en la ecuación 3.5) como la variable Y_k . Es decir, medir la desigualdad en los impactos del sistema más que el estado final del mismo. Sin embargo, la existencia de poblaciones afectadas negativamente por el proyecto implica

un cambio de signo en Y_k . Ello implica resolverlo con una metodología que modifique el Gini original, lo que significa dejar la bondad de estandarización y comparación del mismo. Por esta razón no se realizó en esta investigación, pero podría ser un tema interesante para futuras iniciativas.

Por otro lado, la aplicación al acceso (en Y_k) representa una medida afín a la *equidad horizontal*, no *vertical*, ya que se considera cada habitante como igual y en las curvas quedan indistinguibles los grupos de ingreso. Como se argumentó en el Capítulo 2, un concepto más amplio de accesibilidad debe incluir una dimensión relativa a las circunstancias de las personas. Esto significa que la aplicación solamente del Gini – en el caso de la medición de accesibilidad al empleo según variables de servicio simuladas – no es suficiente para lograr el tipo de análisis al que aspira esta investigación.

3.4.2. Indicadores de aporte a la equidad de acceso

La metodología anterior no sería útil para guiar el diseño de proyectos según un principio Maximax que considere también desigualdades de origen, más allá de la accesibilidad relativa. Para hacer esta distinción se requiere incorporar el nivel de ingreso de las personas en la desigualdad de acceso. Este corresponde a buena aproximación de la prosperidad relativa de las personas, algo validado por la metodología ya revisada de ponderación según equidad del Reino Unido (HM Treasury, 2011).

En aquella ponderación según equidad, aplicada al valor neto de los proyectos, se define una mayor relevancia a los efectos que afectan poblaciones de bajos ingresos. Establece utilizar ponderadores que derivan de la utilidad marginal del consumo, según un modelo sencillo recomendado por Cowell y Gardiner (1999), mostrado en la Ecuación (3.25). La utilidad marginal del consumo sería inversamente proporcional al nivel de consumo.

$$U = \ln(C) \quad \text{y} \quad \frac{dU}{dC} = \frac{1}{C} \quad (3.25)$$

En este caso, para proponer indicadores de *equidad vertical* consistentes con la metodología de accesibilidad descrita en 3.2.5, la ponderación de equidad se realizará en función de los ΔAcc (en vez del valor neto). Para algunas de propuestas se interpretará la relación inversa proporcional anterior explícitamente en el indicador – como en Ecuaciones (3.26) y (3.27) – o multiplicando de forma relativa en (3.28).

Lo anterior podía ser discutible, pero a nivel de prueba de concepto se verificó que la aproximación de ingreso que sigue es consistente con la base teórica de Martens et al. (2012), además del análisis de Stanley et al. (2011) y van Wee y Geurs (2011). De otra forma, para verificar o refutarlo habría que estudiar las relaciones entre la utilidad marginal del consumo y el nivel de accesibilidad potencial de las personas con respecto a su prosperidad. No se encontró ponderadores de equidad calculados en Chile como para validar lo anterior. Asimismo, por simplicidad los niveles de consumo según cuantiles se reemplazarán por sus niveles de ingreso, una aproximación razonable.

Por último, la importancia de los ΔAcc_i en una zona i territorio dependerá de la cantidad de habitantes en el mismo, en una relación multiplicativa tal como en la metodología de ahorro de costos (Ecuación 3.1). Es aquí donde se incorpora también la metodología de síntesis de poblaciones de la Sección 3.3. Como resultado, los indicadores propuestos de Aporte a la Equidad de Acceso (AEA) se explicitan en las Ecuaciones (3.26), (3.27) y (3.28).

$$\boxed{AEA_1 := \sum_q \frac{\sum_i \Delta Acc_i P_i^q}{\bar{I}^q}} \quad (3.26)$$

$$\boxed{AEA_2 := \left(\sum_q \frac{\sum_i \Delta Acc_i P_i^q}{\bar{I}^q} \right) / \left(\frac{\sum_i \Delta Acc_i P_i}{\bar{I}} \right)} \quad (3.27)$$

$$\boxed{AEA_3 := \left(\sum_q \sum_i \Delta Acc_i P_i^q \frac{\bar{I} - \bar{I}^q}{\bar{I}} \right) / \left(\sum_i \Delta Acc_i P_i \right)} \quad (3.28)$$

Donde ΔAcc_i es el cambio de accesibilidad de la situación con y sin proyecto en la zona i (Ecuación 3.5); Acc_i es nivel de accesibilidad sin proyecto, según su definición en la Ecuación 3.20; P_i^q es la población del cuantil q (del inglés *quantil*) en la zona i ; e \bar{I}^q es el promedio de ingreso del cuantil q .

La primera Ecuación (3.26) deriva de aplicar directamente los principios recién explicitados, con ponderadores de equidad según ingresos medios absolutos ($\frac{1}{I^q}$). La segunda (3.27) le agrega a lo anterior una normalización según la magnitud del cambio de accesibilidad total por el proyecto, para separar este efecto de la distribución de la accesibilidad en los grupos socio-económicos. Asimismo incluye otra normalización con el promedio de ingreso de toda la población para evitar la unidad inversa monetaria ($\frac{1}{\$}$). Ambos elementos facilita la comparación de proyectos de diverso tamaño, evaluados en distintos años o ubicados en distintas ciudades.

En tercer lugar, la Ecuación (3.28) cambia el enfoque respecto al ponderador de equidad: en vez de dividir por el ingreso medio absoluto de cada grupo, se multiplica por un ingreso relativo respecto al ingreso medio de la población ($\frac{\bar{I}-I^q}{\bar{I}}$ incluyendo normalización). Es decir, los cambios de accesibilidad que se reflejan en cuantiles cuyo promedio de ingreso es cercano al de la población se ponderan con baja importancia, mientras la importancia aumenta a medida que se afecta cada margen.

De esta forma, en cuantiles inferiores o superiores los impactos tienen efectos respectivamente positivos y negativos en el indicador. Por ejemplo, en la Sección 4.2.2 se observa que el promedio de ingreso de la población casi coincide con el del decil 7. Ello implica que los impactos a los deciles 1 al 7 son decrecientemente positivos en el indicador en el caso de beneficios (perjuicios afectan negativamente), y los beneficios del 8 al 10 son crecientemente negativos en el indicador (perjuicios afectan positivamente).

La modificación anterior se realizó luego de descubrir problemas de las otras formulaciones ante cambios de signo, producto de la existencia tanto de beneficios como perjuicios de accesibilidad a los cuantiles (Sección 5.4.3). Cabe mencionar además que este formato tiene aún más consistencia y similaridad con los ponderadores de equidad a base del nivel de consumo de HM Treasury (2011).

La consideración de poblaciones también responde a un posible sesgo espacial de los indicadores, a saber, en presencia de diferentes zonificaciones. Por ello su incorporación implica que si existe un mayor número de zonas, estas tendrán respectivamente menor cantidad de habitantes. Por ello, a cambios de accesibilidad constante, frente a diferentes zonificaciones el AEA_x se mantiene también constante porque se suman más términos pero cada uno de menor tamaño. Más propiedades se analizan en la aplicación práctica del Capítulo 5, junto a consideraciones de gentrificación que quedan pendientes para futuras investigaciones.

4. INSTRUMENTOS Y CASOS DE ESTUDIO

La investigación se centra en la ciudad de Santiago mediante la aplicación de las metodologías descritas en el Capítulo 3 en casos de estudios, correspondientes a proyectos desarrollados en esta ciudad. De esta forma, se permite complementar el análisis cuantitativo con un estudio más profundo en términos urbanos, además de mostrar cómo funcionarían las metodologías en un contexto de planificación de transporte. Con esto en mente, los instrumentos de investigación corresponden a bases de datos respecto a Santiago y proyectos de transporte, los cuales se sometieron al proceso de evaluación social oficial.

En primer lugar, se proporciona un contexto que describe y analiza Santiago en términos generales de sus actividades y distribución del ingreso. Posteriormente, se explica los procesamientos necesarios para preparar los datos sobre la ciudad para la aplicación de las metodologías. En particular, se profundizan definiciones respecto a los datos provenientes del modelo de simulación disponible. En tercer lugar, está la descripción del *software* que se creó con el fin de automatizar el procesamiento anterior: *EquiAccess*. En último lugar, se describen los proyectos estratégicos que serán evaluados en términos de accesibilidad y equidad en el siguiente capítulo.

4.1. Antecedentes urbanos de Santiago

4.1.1. Actividades y selección de empleo como variable

Santiago es una capital que reúne una gran parte de la población de Chile y, en consecuencia, también concentra buena parte de las actividades económicas y sociales que se desarrollan. A continuación se realiza un análisis territorial de las principales actividades para seleccionar una sobre la cual se medirá accesibilidad y luego equidad. Una forma interesante y precisa de abordar esta tarea desde un punto de vista de los habitantes es mediante las Encuestas de Movilidad – la última en Santiago fue realizada

durante el 2012 (SECTRA, 2015). En la Sección 4.2 se explica por qué es correcta y recomendable esta fuente de datos para medir la demanda localizada de las actividades.

Este trabajo busca considerar la distribución general de oportunidades en el largo plazo, por lo que se usará una anualización de los resultados diferentes temporadas del año según su importancia relativa. Por ejemplo, en vez de los 18,46 millones de viajes en un día laboral normal o de los 12,79 millones en fin de semana estival, se toma la distribución ajustada de 16,44 millones de viajes. Luego, mediante los destinos de los viajes de las personas es posible inferir dónde se ubican diferentes tipos de actividades según sus destinos. Para ello, se tipifican los propósitos según las actividades que describen. Ambos ejercicios se detallan en el Anexo B.

Corresponde mencionar que todos los mapas de esta tesis fueron construidos, visualizados o analizados mediante el *software* de código abierto QGIS (QGIS Development Team, 2015). La Figura 4-1 muestra un conjunto de mapas con la concentración de cuatro tipos de actividades seleccionadas, según su orden de importancia en viajes: residencial (46%), trabajo (20%), educación (7%) y salud (2%). La intensidad denota el número de viajes por hectárea al destino de cada actividad, según la zonificación de la Encuesta mencionada (SECTRA, 2015). Puede observarse que mientras los hogares se reparten bastante homogéneamente y con mayor intensidad en diferentes lugares de la ciudad, las oportunidades de empleo se concentran principalmente en el centro y el cono oriente. En comparación a las actividades anteriores, la educación y la salud apenas aparecen perceptibles debido a su menor cantidad de viajes a los mismos.

Desde un punto de vista del transporte, la localización de hogares y de puestos de empleo determina gran parte de la estructura de movilidad de las ciudades. Como es sabido, el viaje del hogar al empleo es la principal actividad diaria de la población y su dinámica afecta tanto el uso de la oferta de transporte como el desarrollo urbano. Restando lo residencial (interpretados como orígenes o destinos de retorno), la intensidad del destino trabajo es la mayor con un 36% de los viajes frente toda la gama

de actividades. A partir de lo anterior, en la aplicación de la metodología se eligió medir la accesibilidad a la actividad de trabajo.



Figura 4-1. Distribución de actividades seleccionadas en el Gran Santiago según densidad. Fuente: Elaboración propia a partir de SECTRA (2015)

Esto no significa que aplicar su cálculo a otras actividades sea insignificante. Al contrario, la literatura de exclusión social no siempre se destaca la accesibilidad al empleo como la principal en términos de equidad, así como en algunas medidas de accesibilidad se ha privilegiado medir respecto servicios básicos como la salud⁵. Existen también propuestas de medidas integrales de accesibilidad que consideran diversos tipos de actividades. No obstante, este trabajo no busca lo anterior – que tiene sus propios desafíos de agregación – sino más bien ir al detalle de aplicación en el caso de la accesibilidad al trabajo, en el contexto de la evaluación social de proyectos.

En cuanto al empleo, su localización se encuentra en continua evolución, la cual puede ser estudiada mediante la misma herramienta anterior. El punto de coordenadas medias de los destinos con propósito “al trabajo”, ponderados por su intensidad de viajes anualizada, se ubica sólo 1 km al sur del cerro Santa Lucía según la Encuesta de Movilidad 2012 (SECTRA, 2015). Si se compara con su versión 2001 (SECTRA, 2003), es posible observar que este centro se movió 450 metros hacia el norte y mantuvo su balance poniente-oriente. Es decir, dentro de la década anterior existió una tendencia de desplazamiento relevante en los destinos del conjunto de viajes al trabajo, sin embargo el resultado general no sería el esperado hacia el sector oriente. Según esta medición las cantidades localizadas de empleo mantienen una distribución bastante céntrica.

El resultado anterior no contradice ciertas alarmas de equidad respecto al desplazamiento de ciertas oportunidades de empleo hacia el cono nororiente de alta renta, que las harían más inaccesibles para gran parte de la población (Muñoz, 2014). Por un lado, la medición anterior corresponde sólo a viajes tipificados como “al trabajo”, otras clasificaciones podrían dar cuenta del alto desarrollo que ha tenido este sector en la década. Por otro lado, el incremento de nuevos edificios y empleos en el sector

⁵ De todas formas, no sería adecuado medir las oportunidades de salud según los viajes, ya que para este servicio crítico importarían más las capacidades de los establecimientos que su demanda atraída.

corresponde principalmente al trabajo de tipo ejecutivo, es decir, las mejores oportunidades en términos de ingresos. Si las coordenadas medias del total de empleos no se desplazaron en esta dirección, esto implica que al poniente también se creó similar número de empleos, eso sí probablemente de menor visibilidad, peor calidad o informales.

Lo anterior da paso a una discusión respecto a la diferencia entre cantidad y calidad de las oportunidades: en el caso de la distribución del empleo podría ser el componente de calidad el que estaría afectando su localización y evolución en términos de equidad. No obstante, en este trabajo se considerará sólo la cantidad de empleo, por simplicidad de manejo e interpretación y porque la variable será estática en la aplicación de la metodología. La discusión anterior es de interés para futuras investigaciones.

4.1.2. Desigualdad y segregación

Chile tiene altos niveles de desigualdad de ingresos y en esta situación lidera con el primer lugar de la OCDE (2014). De acuerdo a la observación de indicadores del World Bank (2016), su Gini de 50,5 posiciona a Chile como el veintavo país más desigual del mundo entre los 157 que cuentan con la medición. No obstante, se verifica que todos quienes anteceden y rodean a Chile en desigualdad cuentan con menor producto bruto y nivel de ingreso ajustado por paridad de compra per cápita. Puesto de otra forma, ningún país logra el nivel de desarrollo de Chile con tal nivel de desigualdad de ingreso. Una excepción en términos comparados, que propicia dudar sobre su capacidad de mayor desarrollo o si es siquiera sostenible. En el caso de Santiago, esta desigualdad se expresa además en términos de segregación residencial, que ubica los diferentes niveles de ingreso alejados en el territorio.

En relación con la discusión de la sección anterior, la segregación residencial es causa y efecto de un problema más amplio. No sólo esta o la distribución de las oportunidades de empleo coartan el desarrollo de una ciudad equitativa e integrada. También afectan elementos tan variados como la distribución de áreas verdes o de vertederos, por

diferentes razones desde atractividad económica o calidad de vida. En el primer caso, de nuevo el sector oriente concentra la mayor parte de áreas verdes (Reyes y Figueroa, 2010). Mientras, en el segundo, no cuenta con ninguno de los vertederos que abundan en el resto de la ciudad, principalmente la periferia sur y poniente (Seremi del Medio Ambiente, 2016). No sólo esto sucede producto de inversión privada que sigue a grupos de alto ingreso, esta compleja situación también se debe a la falencia de planificación, inadecuada institucionalidad y se potencia con inversiones públicas en el sector oriente.

Nuevamente se reiteró la mención del cono nororiente de alta renta o la periferia, como usualmente son denominados. ¿Cómo se describen estos en el marco de la ciudad de Santiago? A continuación se analiza brevemente su territorio en términos de desigualdad y segregación. Para mostrar esto se utiliza el ingreso de per cápita calculado a base de la pregunta de ingreso de la Encuesta de Movilidad (SECTRA, 2015). Una razón es que, a diferencia de otras encuestas como la CASEN (Encuesta de Caracterización Socio-Económica) u otras, la de Movilidad tiene una muestra construida para ser representativa comunalmente y su base de datos pública está georeferenciada. Esto entrega grandes ventajas para el análisis territorial ya que permite una mayor desagregación de sus valores y localizarlos dentro de la ciudad. Asimismo, la pregunta de ingreso es formulada y procesada cuidadosamente en la Encuesta, ya que es fundamental para calibrar modelos de transporte que determinan la planificación.

Según esta, en primer lugar, el nivel medio de ingreso per cápita de Gran Santiago es de \$255.000 pesos (considera el resto de comunas incluidas en la Encuesta de Movilidad). En términos de desigualdad, su Gini de 0,45 resulta inferior al país completo, lo cual tiene sentido ya que se toma un subconjunto más homogéneo que este. Los resultados anteriores se validan y son consistentes con lo encontrado en la base de datos CASEN del 2013 (MDS, 2015), donde la media de ingreso autónomo per cápita resulta \$268.000 y el Gini del ingreso total per cápita 0,47.

En segundo lugar, para dimensionar el problema en mayor profundidad cabe mirar la desigualdad en conjunto a la segregación residencial. La Figura 4-2 muestra dos cosas

en términos de ingreso per cápita en las zonas de la Encuesta. Por un lado, que la separación de ingresos entre distintos grupos socio-económicos es muy alta, por otro que cada grupo se concentra en lugares específicos.

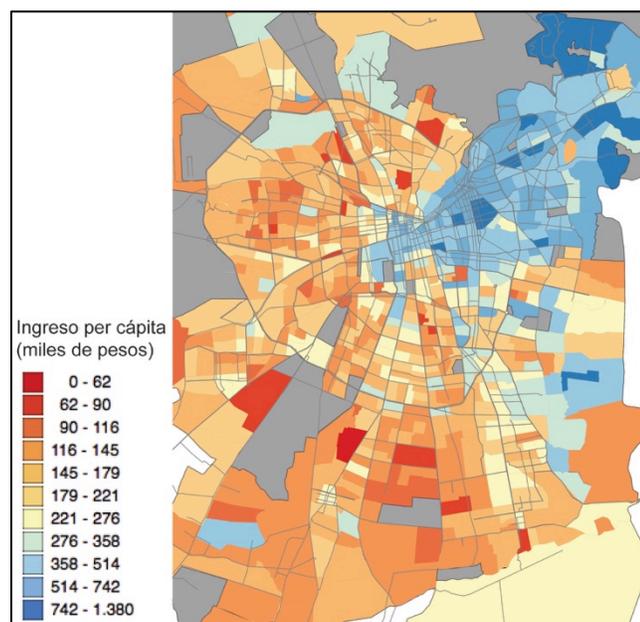


Figura 4-2. Ingreso per cápita en Gran Santiago, promedio zonal en miles de pesos.

Fuente: Elaboración propia a partir de SECTRA (2015)

La escala del mapa se hizo según los deciles de ingreso que se calculan en la sección 4.2.2, excepto el décimo que se dividió en su mediana para denotar el veinteavo veintil. En cuanto a colores, el amarillo más claro representa el séptimo decil (221 a 276 mil pesos) que incluye el promedio de ingreso per cápita de la población. Luego los tonos naranjos a rojos están debajo de la media de ingreso y los azules por encima. Cabe notar entonces que el margen azul representa un tramo que es hasta 22 veces más rico que el rojo en términos de medias zonales. En gris se encuentran zonas sin información.

La exclusión de grupos de bajo ingresos es especialmente evidente en la Figura 4-2, lo cual refleja lo calculado por Sabatini et al. (2009) en cuanto a los más vulnerables como los más aislados espacialmente. El desarrollo urbano y políticas específicas del pasado

los desplazaron a la periferia, lejos de los grupos de ingreso alto concentrados casi exclusivamente en el cono nororiente. Además, Sabatini et al. (2009) argumentó que a pesar de que la segregación residencial podía estar disminuyendo, sus efectos negativos se estarían haciendo más perjudiciales. La cantidad y calidad de infraestructura, perspectivas de empleo, educación o salud tienen a seguir a los grupos de alto ingreso. De esta manera, las principales herramientas para superar la vulnerabilidad y lograr progreso son cada vez más difíciles de acceder para grupos de bajo ingreso (Muñoz, 2014).

Para complementar la información anterior, los mapas en la Figura 4-3 muestran en cada zona por un lado la densidad poblacional y por otro el tamaño medio de los hogares. En el primero se aprecia claramente dos áreas de alta densidad, en Santiago Centro y Providencia asociada a concentración de edificios en altura, además de la periferia poniente y sur asociada a barrios densos con mala habitabilidad. En el segundo se muestra que los lugares céntricos tienen hogares más pequeños que el resto de la ciudad.

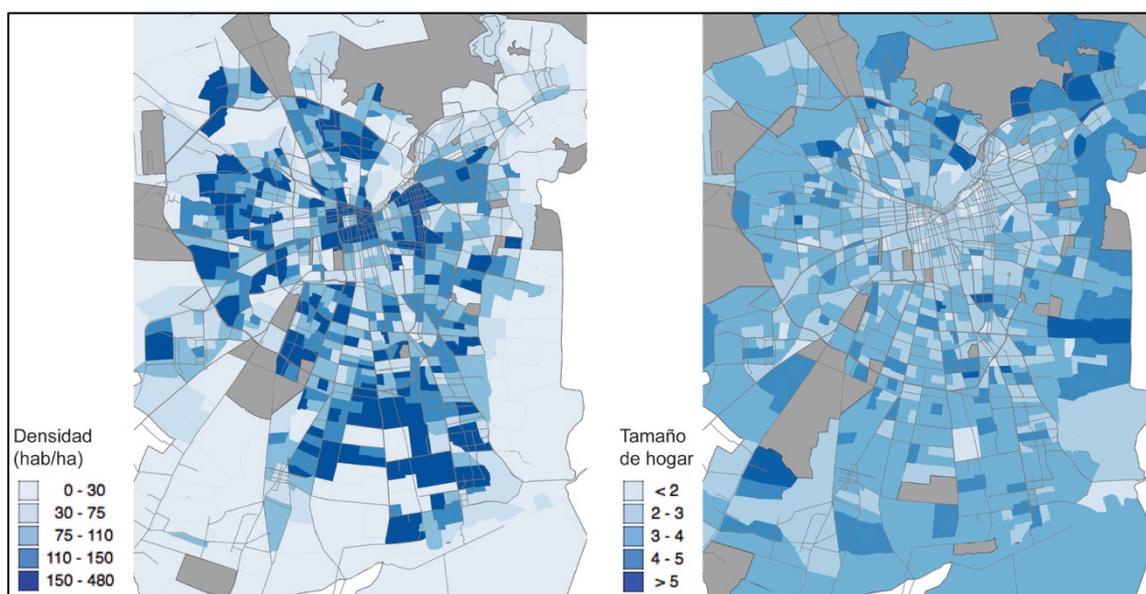


Figura 4-3. Densidad poblacional por hectárea y tamaño medio del hogar según zonas.

Fuente: Elaboración propia a partir de SECTRA (2015)

Las descripciones anteriores son interesantes y válidas en términos generales, permitiendo tener una idea más profunda respecto a la desigualdad. Sin embargo, dado que la Encuesta de Movilidad no tiene representatividad zonal, no sería correcto su uso en un análisis territorial cuantitativo a nivel detallado. Por ello, se muestra bastante heterogeneidad entre zonas vecinas, más de la buscada por la zonificación en sí, debido simplemente a los hogares que resultaron encuestados en cada una. En algunas la muestra es muy pequeña, de hecho ciertas zonas en gris sí debieran tener información de población. La complicación es que sería prácticamente imposible utilizando sólo encuestas lograr el nivel de desagregación requerido de manera representativa. Por lo mismo se utilizará a comienzos del Capítulo 5 la metodología de síntesis de poblaciones con métodos bayesianos (Sección 3.3) para lograr esto.

Finalmente, cabe recordar el propósito de los análisis anteriores y comentar su limitación. En esta investigación se utiliza el ingreso per cápita a fin de considerar la desigualdad y segregación de origen en metodologías de evaluación de proyectos. El análisis anterior da cuenta que no sólo su dimensión residencial es relevante: también la concentración de oportunidades importa. Esto porque se trata de un problema cuyas causas y efectos se retroalimentan. No obstante, la aproximación para medir la desigualdad vía ingreso per cápita se combina a la accesibilidad al trabajo. De esta manera se busca incluir una porción relevante de la inequidad del contexto territorial, como primer paso y de forma consistente. Queda más por hacer dado la multi-dimensionalidad del problema. A fin de cuentas, como se mencionó al principio, no lidiar con esta situación podría convertirse en una trampa para el desarrollo de las ciudades y su población en el largo plazo.

4.2. Procesamiento de datos

A continuación se toma en el mismo orden los dos temas descritos anteriormente, esta vez con un mirada diferente. Esta sección reporta el procesamiento de datos necesario para la aplicación de las metodologías en el Capítulo 5.

4.2.1. Oportunidades de empleo

La Ecuación (3.21) del Capítulo Metodologías ocupa las oportunidades en los destinos (E_j) como ponderador de la importancia de cada valor parcial de accesibilidad (para un par origen-destino). Tras analizar las alternativas, se seleccionó dentro de las actividades relacionadas al empleo, específicamente la cantidad de viajes anualizados en el destino por el propósito “al trabajo” de la Encuesta (SECTRA, 2015). En el Anexo B se detallan algunos aspectos prácticos del ejercicio anterior. La Figura 4-4 muestra el resultado de los que serán los ponderadores E_j de la aplicación de (3.21). Cabe notar otra diferencia con la Figura 4-1 también porque son cantidades en vez de densidades.

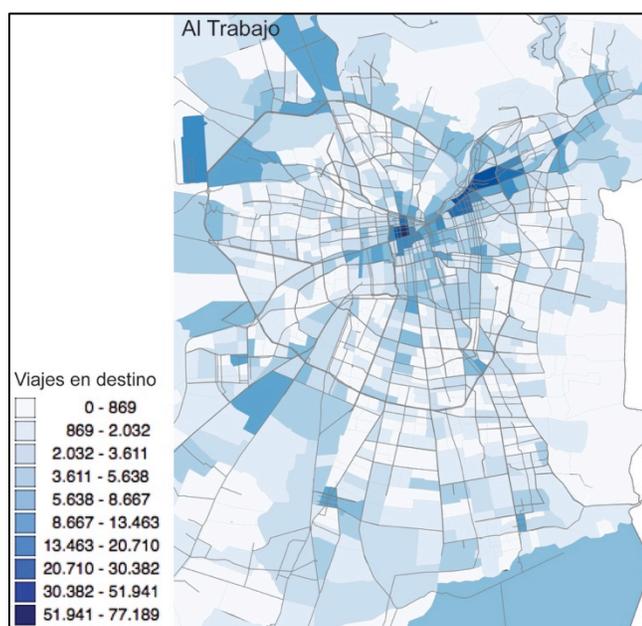


Figura 4-4. Distribución de oportunidades de empleo según cantidad.

Fuente: Elaboración propia a partir de SECTRA (2015)

Quedaba pendiente discutir la validez de esta forma de medir la cantidad de oportunidades en el destino. En particular, en el caso de puestos de empleo esto también se podría realizar desde el catastro de roles no agrícolas del Servicio de Impuestos Internos. De hecho, esta investigación en un principio utilizaba esta fuente de datos para

calcular accesibilidad (SII, 2013). Se utilizó la superficie destinada a actividades de trabajo como la intensidad de la oportunidad, lo cual se muestra en la Figura 4-5. Sin embargo, esta metodología cuenta con varias falencias que fueron analizadas. Por un lado, al ser un registro institucional y asociado a la cobranza de impuestos omite por definición el empleo informal y por incentivos buena parte del trabajo independiente. El primero tiende a ser una oportunidad relevante para la población más vulnerable.

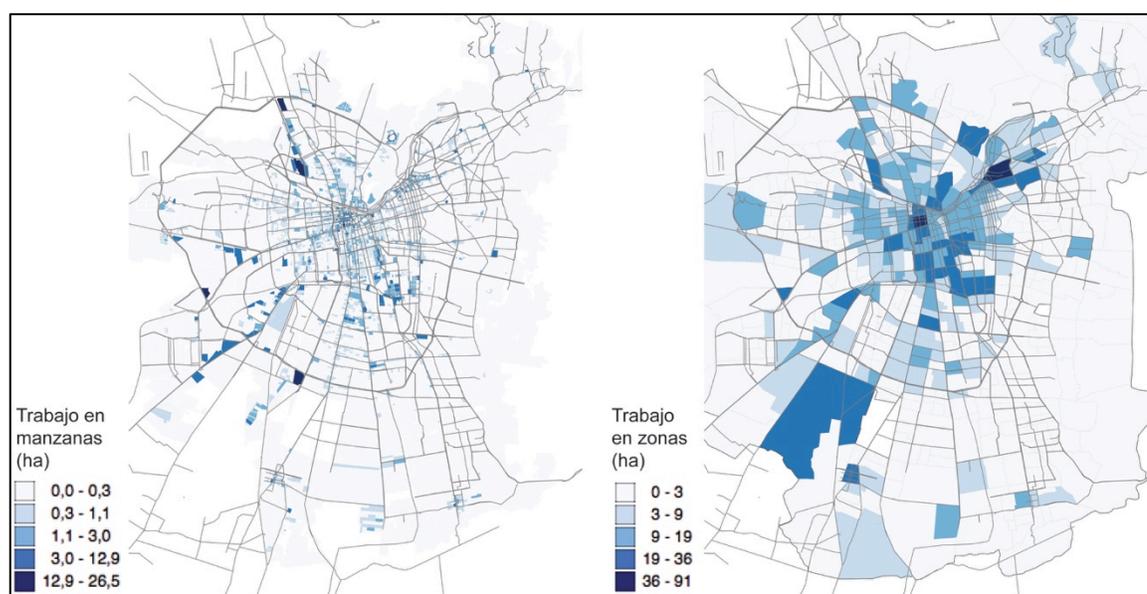


Figura 4-5. Superficie destinada a trabajo según hectáreas desde datos del SII (2013)

Por otro lado, la fuente de datos provoca complicaciones metodológicas respecto a qué significa la superficie de los roles en términos de cantidad de oportunidades. Habría que estimar para cada tipo de destino del suelo la cantidad de empleos que proveen en promedio y alguna forma de considerar la dispersión del parámetro ya sea según su localización o la calidad de la edificación. Adicionalmente a lo anterior, el Anexo D muestra un análisis mediante la aplicación de la accesibilidad que valida la similaridad de ambas fuentes pero concluye mayor coherencia al usar la Encuesta de Movilidad.

Existen otras razones pero estas son las principales para descartar esta fuente de información. En cuanto a la Encuesta de Empleo, esta tiene el problema de

desagregación territorial – mencionado ya para la CASEN – al contar sólo con representatividad regional. Si bien se podría argumentar que la Encuesta de Movilidad tampoco proporciona representatividad zonal, es la mejor información disponible. No obstante, en futuras investigaciones podrían combinarse más fuentes para mejorar la dispersión y complementar la información respecto a la calidad del empleo.

Finalmente, ya fijada la intensidad de destinos de viajes “al trabajo” como la distribución de oportunidades de empleo, queda el paso de adaptarla a las diferentes zonificaciones. Como cada proyecto descrito en la Sección 4.4 tiene su zonificación en el modelo de transporte, los datos de empleo de la Encuesta se reasignan como explica el Anexo C.

4.2.2. Deciles de ingreso per cápita

El tema de desigualdad de ingresos también requiere de definiciones y preparación de los datos de entrada para el cometido de generar poblaciones sintéticas. Las Ecuaciones (3.26), (3.27) y (3.28) ocupan información desagregada en tramos de ingresos más allá de promedios, en particular a base de cuantiles de población. Lo mostrado en la Figura 4-2, al consistir en medias zonales, en realidad suaviza la rica dispersión de la muestra. En la Encuesta de Movilidad (SECTRA, 2015) se reportan desde hogares prácticamente sin ingresos hasta hogares con hasta 8,6 millones de pesos por persona en el hogar.

En primer lugar cabe describir ciertos aspectos sobre la Encuesta de Movilidad. Tiene una muestra con 18.264 observaciones de hogares, las cuales fueron expandidas y analizadas usando *software* especializado (StataCorp, 2011). Se verifican los totales reportados en su informe: la muestra representa 2,05 millones de hogares o 6,64 millones de personas. En cuanto a la pregunta de ingresos, a pesar de que fue corregida

por los autores mediante imputación⁶, esta investigación la considera apropiada y confiable dado el uso luego de una corroboración contrastando con la CASEN del 2013 (Sección 4.1.2).

El segundo paso consiste en realizar ajuste de distribución para así conocer la dispersión de los ingresos para la posterior evaluación de equidad de acceso. Para ello se ocupa la metodología descrita en la Sección 3.3.1, a partir del ingreso per cápita de las 45 comunas consideradas en la Encuesta de Movilidad, mediante el *software* EasyFit (MathWave Technologies, 2004). La Figura 4-6 presenta tanto el histograma como la curva de probabilidad lognormal, la cual resultó como la que mejor ajusta a la muestra. El resultado del test Anderson-Darling ajustado por el número de observaciones es 5×10^{-5} , lo cual es un muy buen ajuste. La línea punteada en la densidad 0,05 y la flecha con el promedio de ingreso per cápita fueron dibujados a efectos de comparación con las distribuciones de las comunas de la Sección 5.1.1.

⁶ El 41% de los encuestados respondió un monto exacto y 46% un tramo de ingreso luego modelado a montos. El 12% restante no respondió la pregunta o dio respuesta atípica, para estos casos se recurrió a la imputación utilizando un modelo simple de regresión ponderada y con corrección a base de la CASEN.

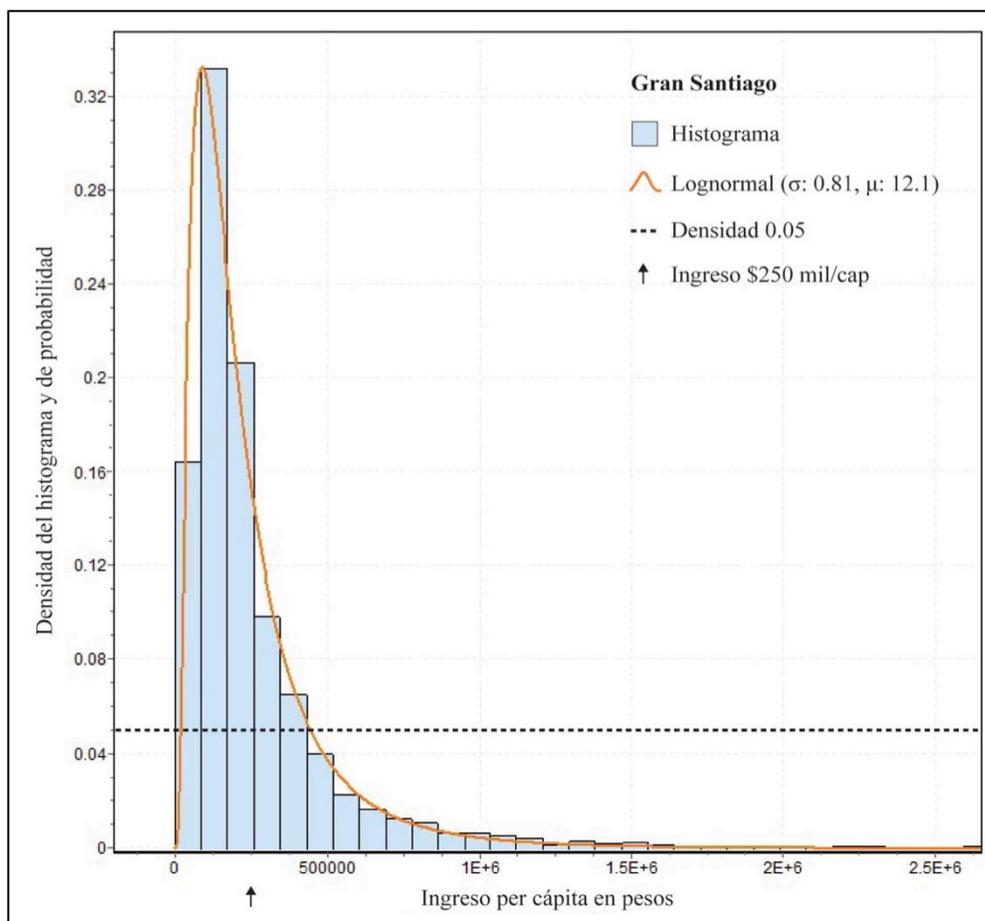


Figura 4-6. Histograma y distribución del ingreso per cápita en el Gran Santiago.

Fuente: Elaboración propia a partir de SECTRA (2015)

En tercer lugar, se utiliza la curva anterior para construir adecuadamente los tramos de ingreso que definirán los grupos socio-económicos. De esta forma, se evita la ligera descompensación de los cuantiles producto de una expansión discreta de la muestra. En este caso se decide calcular deciles de población, ya que entregan suficiente desagregación sin complejizar el posterior análisis. La Tabla 4-1 presenta la definición de los deciles que será pivotante en la aplicación de las Ecuaciones (3.26), (3.27) y (3.28), junto con sus promedios y medianas.

Tabla 4-1. Definición de los deciles de ingreso

Decil	Rango de ingreso per cápita (\$ miles de pesos de 2012)		Promedio del tramo (\$M de pesos 2012)	Mediana del tramo (\$M de pesos 2012)	Skewness
1	0	62,4	42,0	45,0	-0,79
2	62,4	89,7	76,9	77,2	-0,15
3	89,7	116,4	102,6	100,7	0,14
4	116,4	145,5	130,1	130,0	0,10
5	145,5	179,2	161,5	160,7	0,12
6	179,2	220,7	199,0	200,0	0,12
7	220,7	275,8	246,2	246,7	0,13
8	275,8	358,0	314,4	312,0	0,21
9	358,0	514,1	425,8	422,0	0,30
10	514,1	mayor (8.646)	900,6	741,6	5,31
Total			254,9	174,6	6,64

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, la Tabla 4-1 incluye el *skewness* o deformación, que en palabras simples indica que tan cargada hacia la izquierda (valor positivo) o a la derecha (negativo) está la curva con respecto a una normal. Esto se muestra también con la comparación entre el promedio y la mediana. De esta manera, la mayor parte de los deciles tiene internamente una distribución de ingreso casi simétrica. La excepción son el primer y último decil, por la relativamente menor cantidad de personas sin ingresos y por la muy alta concentración de ingresos en la punta, respectivamente.

Por último, cabe comentar que en las zonificaciones de los modelos de transporte, a revisar en la siguiente sección, se excluyen varias de las comunas abarcadas por la Encuesta de Movilidad. Por ello, la población a la cual se le asignarán los impactos es la que reside en las 38 comunas del Gran Santiago. Es decir, el área de estudios para medir la equidad de acceso está compuesta por 1,94 millones de hogares o 6,26 de habitantes.

4.2.3. Modelo de simulación ESTRAUS y manejo de datos

Finalmente, queda por explicar los procesamientos de datos relativos a los costos de transporte que se ocupan en la Ecuación (3.21) para calcular la accesibilidad, lo que

permite retomar el tema de la movilidad y evaluación por el resto de este Capítulo. Como se argumentó en la Sección 3.2.5, lo más adecuado en términos de equidad, consistencia e interpretación es aprovechar las variables de servicio que resultan de modelos de equilibrio de tráfico o sub-modelos de asignación en los de cuatro etapas. Estas corresponden a los tiempos de viaje, espera, etc. que se entregan para cada escenario simulado entre cada par de zonas origen destino. Como una gran variedad de modelos de transporte entregan resultados de una forma similar para la asignación, lo que permite generalizar estas metodologías a varios *softwares* como Saturn, Visum u otros.

No obstante lo anterior, en esta investigación la accesibilidad al empleo se mide utilizando los resultados de corridas modeladas en ESTRAUS (De Cea et al., 2005) o sus derivados. ESTRAUS es un modelo estratégico de cuatro etapas de equilibrio simultáneo, una de sus virtudes es considerar la congestión en el transporte público. También tiene derivados como VIVALDI que es de equilibrio secuencial o DIRTP de demanda fija para la optimización de rutas y frecuencias de transporte público. El conjunto de modelos se encuentra calibrado para las diferentes ciudades chilenas de tamaño intermedio y grande, en particular en Santiago se aplican la mayoría de sus versiones. La razón para ocuparlos en esta investigación es principalmente que la mayor parte de los proyectos estratégicos – que afectan la ciudad completa y permiten comparar efectos para los diferentes deciles – son modelados usando estas herramientas.

También por simplicidad, porque el procesamiento de datos se debe ajustar al formato de salida de los resultados de cada modelo. En adelante, se especifica sobre el manejo de estos datos, que se aplica de forma separada tanto en la corrida con proyecto como sin – llamada la base – de una misma evaluación. Estas están modeladas para periodos representativos específicos, por ejemplo punta mañana o fuera de punta. En esta investigación se ocupará sólo el periodo punta mañana, esto porque es el que mejor representa la red en los viajes del hogar al trabajo. Asimismo, debido a la congestión es

el que restringe en mayor proporción la accesibilidad al trabajo que perciben las personas en su localización.

Tras alcanzar el equilibrio, cada conjunto de variables de servicio se presenta en una matriz diferente, las que reúnen todos los pares origen destino y, por tanto, tienen una dimensión equivalente al cuadrado del número de zonas de la corrida. Los hasta cuatro tipos de variables de servicios comentados (Ecuación (3.19)) se presentan para cada modo en la corrida, que puede ser incluso taxi o taxi colectivo. Esta tesis opera con los dos modos que son los más relevantes y están presentes en toda corrida: automóvil y transporte público. El primero sólo presenta tiempo de viaje (t_v) y peaje (t_a), mientras que el segundo además presenta tiempo de caminata (t_c) y de espera (t_e). Algunos casos presentan también varias clases de usuarios por la asignación según rutas tarifadas. Es decir, cada evaluación consta de al menos 12 matrices para trabajar, sumando la base y un proyecto.

Por último, por lo general cada evaluación ocupa una zonificación diferente, debido tanto a las actualizaciones en el tiempo del modelo o a características territoriales particulares del proyecto considerado. Por lo mismo, los datos de oportunidades de empleo y deciles de ingreso en la zonificación de la Encuesta de Movilidad deben ser reasignados a las zonas de cada evaluación. Si bien en la mayoría de casos las zonas son similares, como la Encuesta de Movilidad tiene en general mayor cantidad de zonas, una buena porción de estas deben ser sumadas y otra menor debe ser subdividida. Para ello se utiliza la intersección de los centroides de la Encuesta de Movilidad con cada zonificación de las evaluaciones. Como la zonificación más pequeña tiene 630 zonas, cada matriz de variable de servicio tiene mínimo 396 mil datos.

4.3. Herramienta: EquiAccess

Las particularidades descritas anteriormente proporcionaron un desafío complejo en términos de procesamiento. Al sumar todas las evaluaciones consideradas, esta tesis estuvo realizando cálculos desde un volumen de datos del orden de los 40 millones sólo

en cuanto a variables de servicio, operados en cada corrida con los dos conjuntos de datos complementarios. Adicionalmente, se probaron y analizaron no sólo los dos casos de aplicación de la Ecuación (3.20) para la formulación seleccionada (3.21), sino también para diferentes versiones de esta, de la descartada (3.15) y también diferentes formas de sumar los costos, una de las cuales se muestra en la Sección 4.4.2.

Afortunadamente, la tercera versión de la herramienta construida, EquiAccess, pudo resolver estas operaciones de manera correcta y eficiente. EquiAccess consiste en un programa de varios archivos en código Python que opera principalmente las diferentes bases de datos guardadas en PostgreSQL. Al principio, también convierte y formatea los archivos de salida de ESTRAUS o sus derivados, y al final guarda los resultados en archivos de texto y SIG – sistema de información georreferenciado – a partir de las coordenadas de las zonificaciones. A continuación, la Tabla 4-2 resume la estructura de EquiAccess mientras que en el Anexo E se encuentra el *pseudo-código* de EquiAccess y un log de ejemplo con la interacción con el usuario de las etapas 3 y 4 del programa.

Tabla 4-2. Estructura de programas de EquiAccess en Python

Etapa	Descripción	Programas
1	Instalación: Para el primer uso de EquiAccess	instalacion.py : Genera todas las tablas de datos en PostgreSQL y define sus variables, restricciones y dependencias.
		infocontexto.py : Llena ciertas tablas con información fija.
2	Procesamiento: Opera cada vez que se importa una nueva corrida a las bases de datos	generarbat.py : Crea archivo para transformar las matrices desde lenguaje binario de ESTRAUS a texto formateado.
		variablesservicio.py : Interactúa con el usuario para importar y clasificar las matrices de variables de servicio y les da un nuevo formato para una mayor eficiencia de operación.
		vsintrazonales.py : Imputa un valor de costo intrazonal en caso que la corrida no lo presente, para cada conjunto de variable de servicio. Se calcula a base de una proporción fija del costo a una zona vecina.
3	Cálculo de accesibilidad: Parte fundamental de EquiAccess para calcular cada combinación diferente.	accesibilidad.py : Interactúa con el usuario para calcular la accesibilidad en el territorio a base de las diferentes corridas, tipos de oportunidades, formulaciones, calibraciones y modos disponibles. Guarda estos resultados gradualmente en PostgreSQL.
		exportar.py : Genera un archivos de texto que resume resultados y un conjunto de archivos SIG que los muestra desagregadamente en el territorio para cada formulación, corrida y modo.
4	Cálculo de equidad	equidad.py : Programa que opera sobre los resultados anteriores y los datos socio-económicos para calcular y exportar según las formulaciones de aporte a la equidad de acceso consideradas.

Fuente: Elaboración propia

Por último, la Figura 4-7 muestra las tablas en PostgreSQL instaladas y requeridas por EquiAccess, 5 de las cuales contienen los datos principales (azul), 4 con parámetros y datos complementarios (morado) y las 8 restantes de estructura y orden.

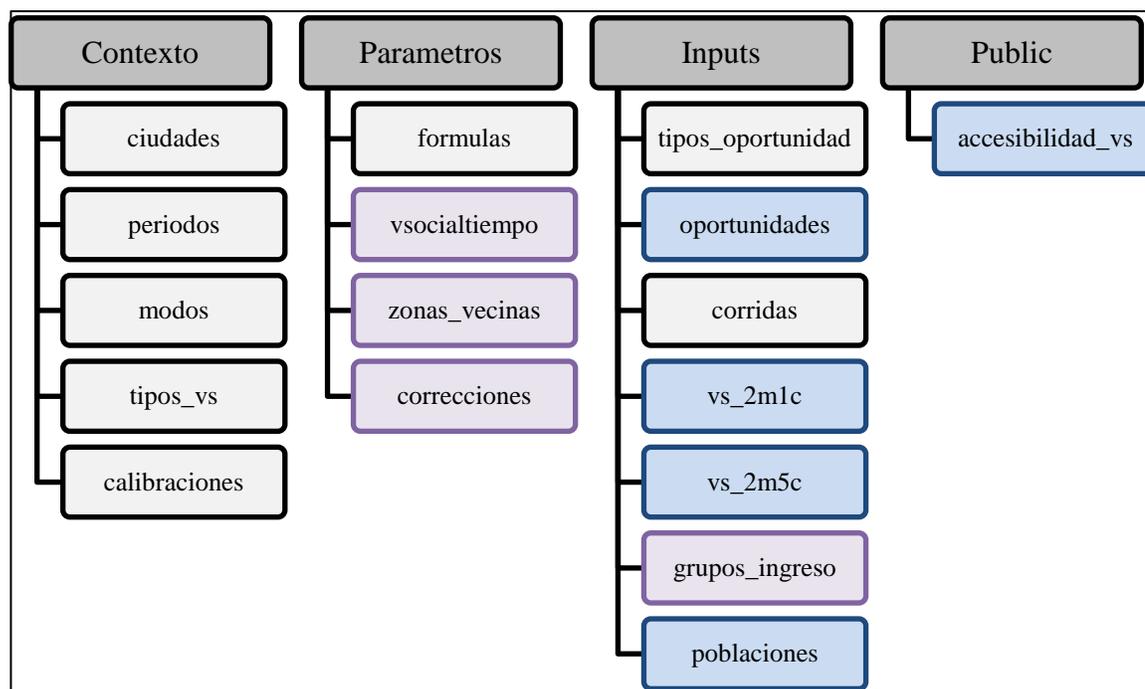


Figura 4-7. Estructura de la base de datos operada por EquiAccess en PostgreSQL.

Fuente: Elaboración propia

4.4. Proyectos considerados

La colaboración generosa de SECTRA permitió obtener y reunir corridas modeladas para procesos oficiales de evaluación social. Gracias a estas se puede calcular directamente la accesibilidad y posteriormente el aporte a la equidad, sin necesidad de codificar situaciones hipotéticas que requieren modificar y optimizar la red y sus servicios. Lo anterior permite realizar las comparaciones sistemáticas y análisis metodológicos presentados en esta investigación. Asimismo, sobretodo ilustra que las metodologías y programación construidas podrían posteriormente aplicarse de manera sencilla, una vez estandarizada su operación. Al final de esta tesis se comenta respecto a

las nuevas herramientas propuestas para futuros procesos de evaluación. Este Capítulo finaliza describiendo y analizando los seis proyectos proporcionados por SECTRA.

4.4.1. Descripción y rentabilidad

La Tabla 4-3 presenta ciertas características de seis corridas de proyecto asociadas a cuatro corridas base, denotadas por la numeración al principio del nombre. Cinco consisten a inversiones de infraestructura para diferentes modos de transporte público, mientras el sexto un proyecto de racionalización del automóvil. Algunos de los proyectos están operando, otros están en proceso de implementación y el último es aún hipotético. En todos ellos, para efectos de esta tesis, se seleccionó el último corte temporal simulado disponible. Cabe mencionar que para las corridas que utilizaron el modelo DIRTP, las matrices de demanda fija fueron calculadas mediante validaciones Bip! del Transantiago.

Tabla 4-3. Proyectos considerados para cálculo de accesibilidad

Nombre del proyecto	Tipo de evaluación y descripción de alternativa	Año simulado	Modelo (Zonas)	Situación actual
1-Metro-L1	Perfil: Extensión hasta Los Dominicos, evaluado 3,9 km de túnel y 4 estaciones (luego se construyeron 3 de alto estándar).	2010	ESTRAUS (630)	Completado 01-2010
1-Metro-L5	Perfil: Extensión hasta Plaza de Maipú, 13,7 km de viaducto y túnel y 13 (luego se construyeron 12 de diferente estándar).	2010	ESTRAUS (630)	Completado 02-2011
2-Corredores	Factibilidad: Actualización del Plan de Corredores con 69,3 kms en 15 ejes. Tres diseños con diferentes experiencias de servicio.	2015	DIRTP (847)	En obra
3-Tarificación	Pre-factibilidad: ECS1, tipo cordón entre Pedro de Valdivia, C. Antunez – M. Zamora, Manquehue y Kennedy – S. María.	2020	ESTRAUS (728)	No anunciado
4-TBatuco-EM	Pre-factibilidad: Implementación de un nuevo servicio de trenes de cercanía hasta Batuco desde Estación Mapocho.	2015	DIRTP (888)	En nuevo estudio
4-TBatuco-QN	Pre-factibilidad: Implementación de un nuevo servicio de trenes hasta Batuco desde Quinta Normal.	2015	DIRTP (888)	En nuevo estudio

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, la Tabla 4-4 resume cifras relevantes respecto a los proyectos anteriores. Sus valores se calcularon a base del informe final de proyecto entregado a SECTRA (2005; 2011; 2013; 2015). Cabe mencionar de inmediato para los análisis que vienen un elemento relevante: por la forma en que fue simulado el proyecto de extensión de la Línea 1 de Metro, los ahorros de tiempo se producen por beneficios en el modo auto, en el modo transporte público en realidad hay aumentos en los tiempos totales. De hecho, si se utilizaran precios sociales vigentes (SECTRA, 2016), que ponderan más fuerte los tiempos de caminata y espera, el proyecto no habría presentado beneficios netos en tiempo.

Tabla 4-4. Resumen de resultados de los proyectos y su rentabilidad

Proyecto	Año de precios	Ahorro tiempo, punta mañana (horas y pesos)	Inversión social (pesos)	VAN social (pesos)	TIR social
1-Metro-L1	2004	3.609 y \$2,66 MM	\$115.342 MM	18.720 MM (tasa 8%)	9,4%
1-Metro-L5	2004	11.062 y \$8,15 MM	\$309.274 MM	45.583 MM (tasa 8%)	9,2%
2-Corredores	2009	6.688 y \$6,73 MM	\$226.672 MM	158.432 MM (tasa 6%)	12,4%
4-Tarificación	2012	2.973 y \$4,21 MM ⁷	\$17.009 MM	-12.970 MM (tasa 6%)	-0,3%
3-TBatuco-EM	2013	1.449 y \$2,09 MM ⁸	Información no disponible		
3-TBatuco-QN	2013	2.840 y \$4,10 MM ⁸	Información no disponible		

Fuente: Elaboración propia

Otro elemento que resalta es que el proyecto 3-Tarificación considerado tiene rentabilidad negativa, no obstante esto es porque se trata del esquema ECS1. No se pudo conseguir las corridas del diseño ECS2 que tiene una rentabilidad social positiva de 3.858 millones (MM) de pesos y una TIR social de 8%. Sin embargo, para el cálculo de accesibilidad se utiliza el horario 1 de la punta mañana que sí registra importantes beneficios en ahorro de tiempo, mientras que en el horario 2 existen incrementos que

⁷ Corresponde sólo al horario 1 de la punta mañana que es lo considerado para el cálculo de accesibilidad

⁸ Ahorros estimados desde *resultados_hjeeves* reportados en corridas DIRTP.

explican la rentabilidad negativa. Tampoco fue posible conseguir el informe relativo a las corridas de los trenes de cercanía. En el resto de proyectos se reportó una rentabilidad positiva de diferente nivel.

Finalmente, queda una acotación sobre extensiones no incluidas en esta metodología. Por un lado, en función de una planificación integrada, los escenarios futuros de proyectos de transporte debieran incluir en la medición de accesibilidad los cambios esperados en oportunidades. Se podría realizar con un modelo como MUSSA o de manera más sencilla según regresiones lineales similares a las usadas para formular los vectores de atracción. Por otro lado, la metodología propuesta serviría para proyectos de planificación urbana que no necesariamente alteran la movilidad, calculando mediante la accesibilidad el impacto de un cambio directo en las oportunidades en la ciudad.

4.4.2. Análisis de proyectos según sus tiempos de viajes

Con los instrumentos y casos ya descritos, este capítulo finaliza con un análisis de los diferentes proyectos según sus efectos en tiempos de viaje medios. A continuación las figuras muestran por cada proceso de evaluación considerado un análisis territorial, que incluye tanto su nivel en la situación base como su cambio por el proyecto. Para ello, se ocupa una versión simplificada de la Ecuación (3.21), un promedio ponderado según el nivel de empleo en el destino (4.1). Por ello también es una medida potencial y representa un inverso al concepto de accesibilidad, donde además no hay manipulación de la variable.

$$T_{vi} := \frac{\sum_j E_j t_{vij}}{\sum_j E_j} \quad (4.1)$$

Lo interesante de este ejercicio es que la unidad en minutos es de fácil interpretación, por lo mismo la escala se mantuvo fija para comparar entre las diferentes evaluaciones. En la Figura 4-8, la primera situación base muestra en blanco las zonas en las que es posible acceder entre 10 y 20 minutos a todos los empleos de la ciudad, porque la mayor

intensidad de estos se encuentra localizada en sus cercanías. Asimismo, muestra que el tiempo es menor en el modo auto (12 a 49 minutos) que en transporte público (16 a 82 minutos), donde el patrón de cada uno se guía por autopistas o Metro respectivamente.

Luego, en las comparaciones con ambas situaciones con proyecto de la Figura 4-8 se muestran efectos sistémicos de ligero cambio, por mejor cobertura o menor congestión. Su resultado es muy sutil por cambios en el tiempo de viaje *hacia* los destinos de empleo, con mejoras o pérdidas en general menores a un minuto. En cambio, la extensión de la Línea 1 contrasta con la de la Línea 5 en donde se concentran las mejoras sustanciales *desde* un origen al trabajo. El primer caso lo hace sólo en las inmediaciones de las nuevas estaciones (mostradas en verde) con un ahorro de hasta 15 minutos, mientras el segundo a lo largo de la línea con ahorros de hasta 13 minutos pero en varias zonas altamente pobladas y vulnerables. Si bien en la extensión de la Línea 5 se muestra una zona con perjuicio significativo, esta está prácticamente despoblada y es porque se eliminó un recorrido de bus.

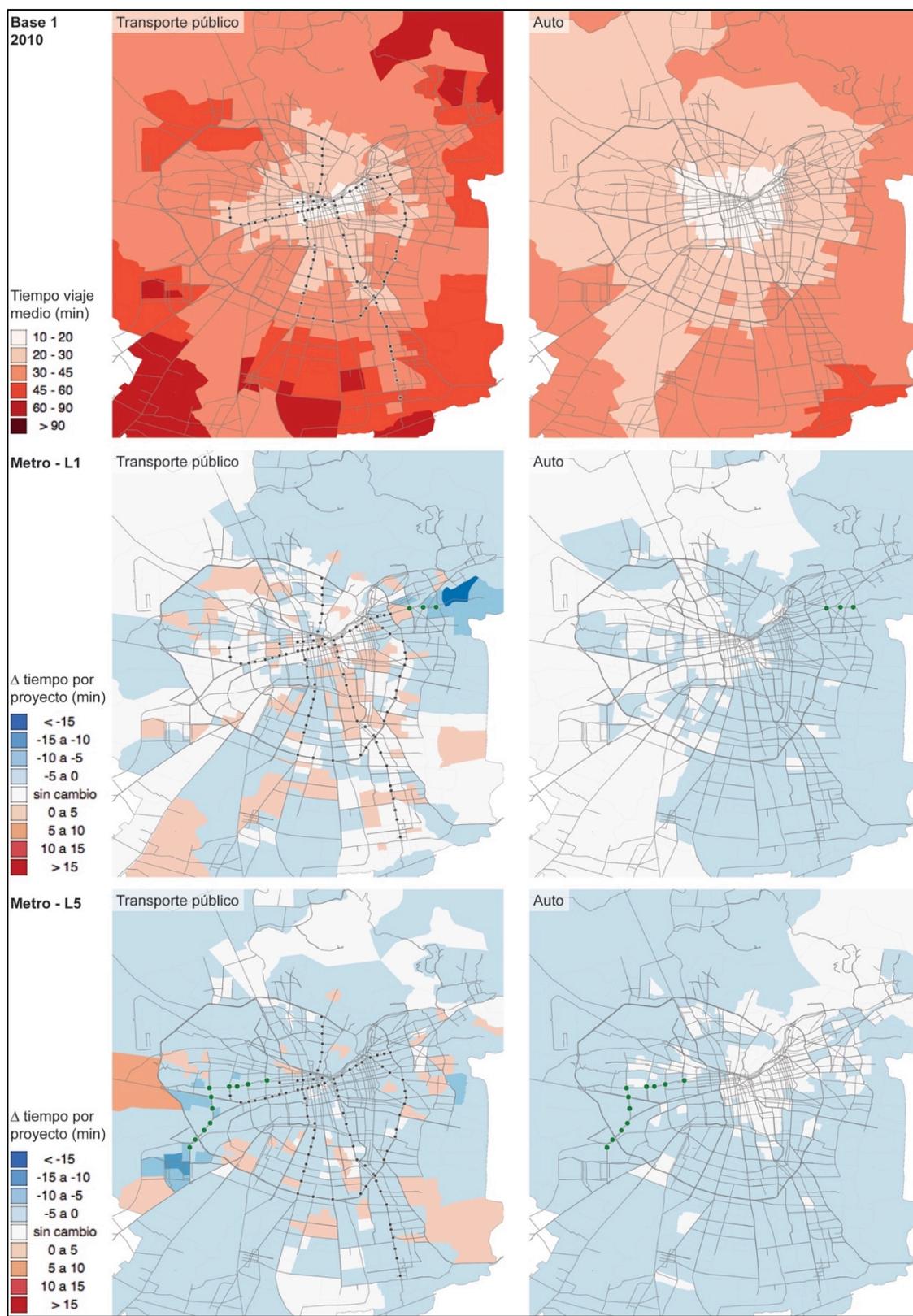


Figura 4-8. Tiempo de viaje medio potencial al empleo en la evaluación 1 – Punta mañana. Fuente: Elaboración propia

En el caso de la Figura 4-9, asociada al proyecto de corredores de buses, sólo se analiza el modo transporte público porque se utilizó el modelo DIRTP, que ocupa sólo asignación del mismo y no se modelan cambios para el auto. Se puede observar en su situación base que este modelo además presenta una escala subestimada del tiempo de viaje, a pesar del pasar de los años y que no se explica meramente por la inclusión de las nuevas estaciones de Metro.

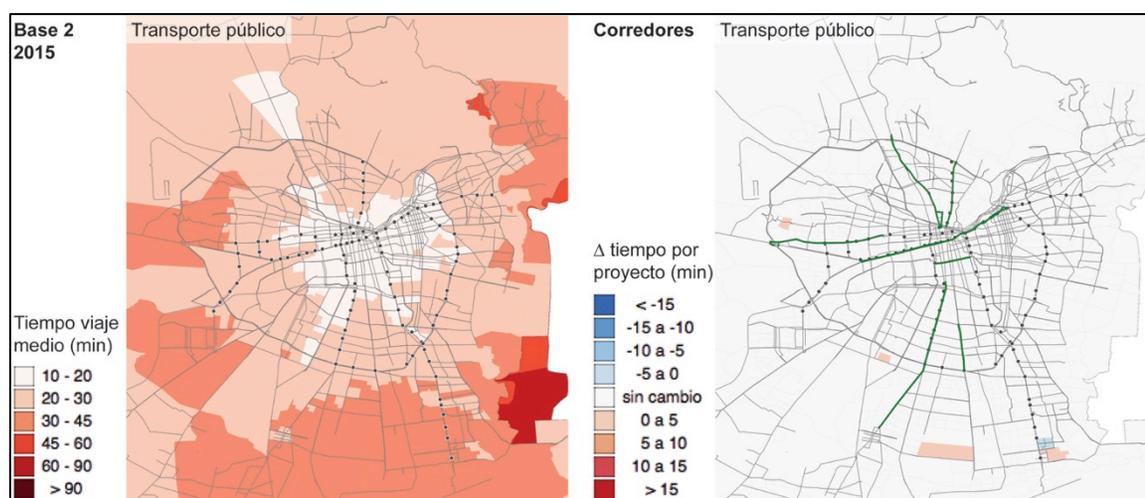


Figura 4-9. Tiempo de viaje medio potencial al empleo en la evaluación 2 – Punta mañana. Fuente: Elaboración propia

Asimismo, la comparación con la situación con proyecto dio un resultado inesperado, ya que no se visualizan cambios relevantes en las variables de servicio, ni siquiera en las inmediaciones de las inversiones. Existen más mejoras que deterioros, pero estos son marginales del orden de centésimas del segundo (la escala considera “sin cambio” a modificaciones menores a 6 segundos). Esto se puede deber a tres razones. Por un lado, que la base proporcionada es “muy mejorada” y no correspondió a la base de comparación del proyecto, o que la codificación del mismo fue inexacta en la modelación de los corredores. Por otro lado, que existe un problema de esta metodología con el modelo DIRTP porque no presentaría los cambios apropiadamente en las variables de servicio. No obstante lo anterior, se mantendrá el proyecto en el análisis

para mostrar qué sucede con la metodología de accesibilidad en el caso de efectos despreciables para ella.

Al contrario, la Figura 4-10 muestra un segundo ejemplo en ESTRAUS con lo interesante y consistente que es la visualización de los resultados de modelación en el proyecto de Tarifación Vial. En comparación a la Figura 4-8, en la situación base se incrementan los tiempos de viaje tanto para el transporte público (se ubican entre 21 y 91 minutos al trabajo) como el auto (26 a 130 minutos). En particular el paso de los años afecta fuertemente al segundo modo, al no contar con algo como Metro que no disminuye su velocidad por la congestión. Cabe recordar que el transporte público tiene tiempos de caminata, espera y tarifa que aumentan sus costos, lo cual no se muestran en este análisis.

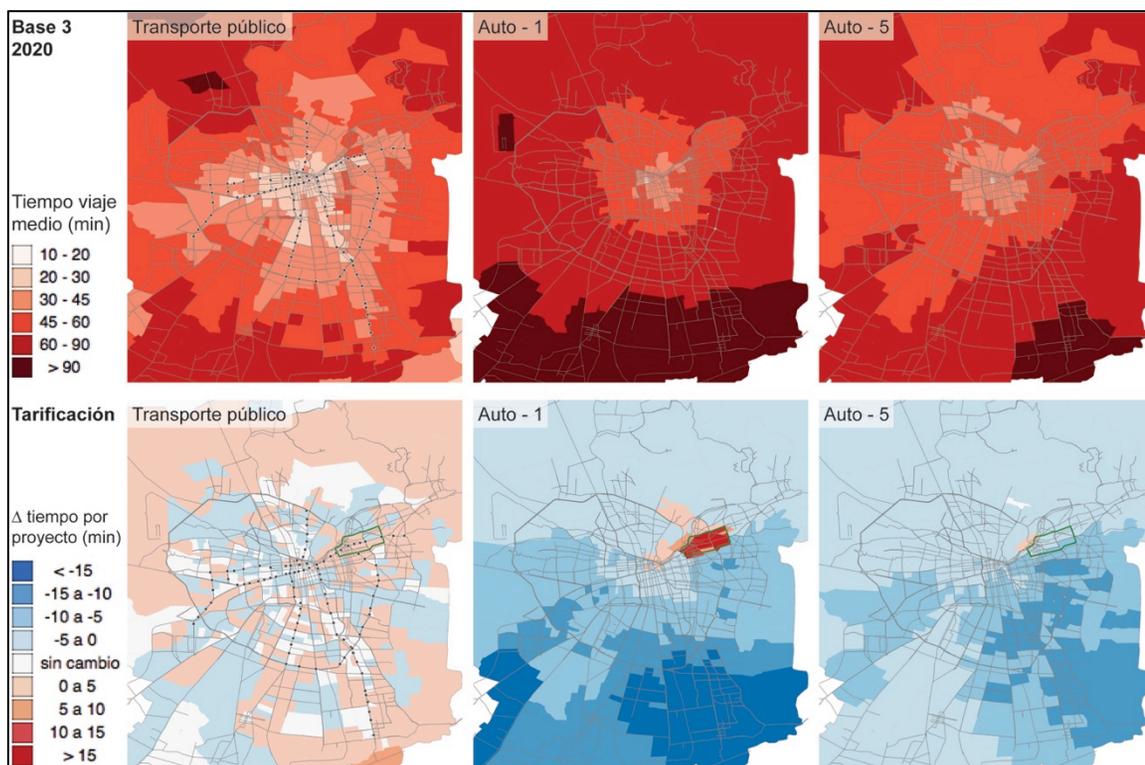


Figura 4-10. Tiempo de viaje medio potencial al empleo en la evaluación 3 – Punta mañana 1. Fuente: Elaboración propia

En esta simulación existen 5 clases de usuario para la asignación de auto, que varían principalmente en la disposición a pagar peajes, lo cual es clave para evaluar el proyecto de Tarifación Vial. Se muestran resultados tanto para la clase 1 de menor recursos y la 5 la mayor. Como la segunda utiliza autopistas tiene tiempos de viaje medios sustancialmente menores. Por lo mismo, en la situación con proyecto, si bien los beneficios son generalizados y muy intensos para la clase 1, también es la única que percibe intensamente sus costos por optar por rutas inconvenientes desde las inmediaciones de la zona tarifada. La política tiene de todas formas un efecto sistémico.

Por último, la Figura 4-11 presenta lo que definitivamente es un problema con la información proporcionada, donde los proyectos estarían empeorando intensamente el tiempo de viaje en la ciudad. Esto no es consistente el reporte de resultados de DIRTP, por lo que se asume que la base proporcionada no es comparable con la situación con proyecto. Por lo mismo, esta fuente de datos es en adelante descartada de la metodología.

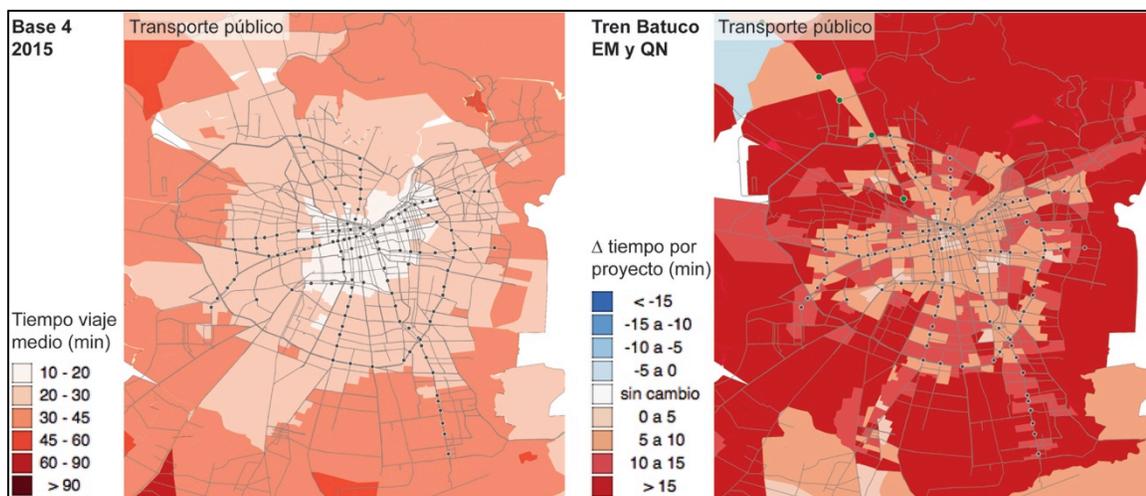


Figura 4-11. Tiempo de viaje medio potencial al empleo en la evaluación 4 – Punta mañana. Fuente: Elaboración propia

Los análisis anteriores enriquecerían el proceso de evaluación social proyectos, y esto repetirse para cada tipo de costo para profundizar el análisis. Además serviría para evitar problemas como los detectados en dos de las evaluaciones, a los que se añaden problemas en las simulaciones de extensiones de Metro a detallar en la Sección 5.2.1. Aquí se eligió el tiempo de viaje porque es el que presenta mayor importancia en ambos modos. Sin embargo, no es parte de esta tesis entrar más detalle de cada proyecto. Requiere conocer la forma de modelación para entender las razones de cada variación, por lo que sólo se ahondó en un caso de la primera a modo de ejemplo. En conjunto, el ejercicio anterior se realizó con el objetivo de transparentar los datos de entrada y para interpretar y validar los resultados tanto visuales como cuantitativos de accesibilidad en el siguiente capítulo.

5. APLICACIÓN DE METODOLOGÍAS Y RESULTADOS

A continuación se relata la aplicación de las metodologías presentadas anteriormente (Capítulo 3), específicamente al caso de estudio de la ciudad de Santiago y la modelación de seis proyectos de transporte urbano de carácter estratégico descritos en el Capítulo 4. Al final de cada temática se muestran sus resultados principales, luego de comentar y discutir ciertas particularidades de importancia para su obtención. En primer lugar, se continua con el análisis de los proyectos de transporte aplicando las metodologías de medición de accesibilidad. Luego se retoma el tema de distribución del ingreso con la generación de poblaciones sintéticas. Finalmente, ambas metodologías se mezclan para dar paso a la aplicación de indicadores de equidad de acceso y propuestas de su inclusión en la evaluación social de proyectos.

5.1. Accesibilidad al empleo

5.1.1. Estimación de parámetros

En la Ecuación (3.21) o (5.2) que define la medida de accesibilidad seleccionada quedaron algunos parámetros por explicitar en mayor detalle. En primer lugar corresponde calibrar el parámetro de sensibilidad o escala β de acuerdo al promedio de costos (Ecuación (3.18)). Como se comentó, la finalidad es que abarque apropiadamente el rango de costos de acuerdo al rango más sensible de la función exponencial negativa y que al mismo tiempo mejore la interpretación de sus resultados. Esto según la recomendación de Geurs y van Wee (2004), o como en el caso de Cervero et al. (1999) que también utiliza valores empíricos similares para el parámetro de sensibilidad de su función, en su caso una inversa proporcional.

Adicionalmente este se dejará fijo para poder comparar entre las diferentes situaciones base o con proyecto, como también ambos modos considerados. Por lo mismo, en coherencia con la literatura (Sección 2.2) y el análisis metodológico (3.2.4) se recurrió a una fuente de datos externa para calibrarlo, en particular la Encuesta de Movilidad o

EOD (SECTRA, 2015). En ella el tiempo medio de trayecto registrado fue 46,52 minutos. La Ecuación (5.1) muestra la estimación del parámetro para que la accesibilidad parcial valga 0,5 cuando el promedio de los costos (\bar{c}) reflejen ese tiempo medio (aplicación de Ecuación (3.18)).

$$\beta = -\ln 0,5 / 46,52 \text{ luego } \beta^1 = 0,0149 \quad (5.1)$$

Asimismo, la Figura 5-1 muestra la forma funcional de la accesibilidad parcial calibrada en conjunto con las medias de los costos totales para cada modo de la primera base de evaluación en ESTRAUS. Si bien ambos modos quedan en el tramo relevante de la función, al incluir el costo monetario su promedio es más alto que en la EOD. Cabe notar que en el resto de evaluaciones la diferencia entre cada modo se acorta.

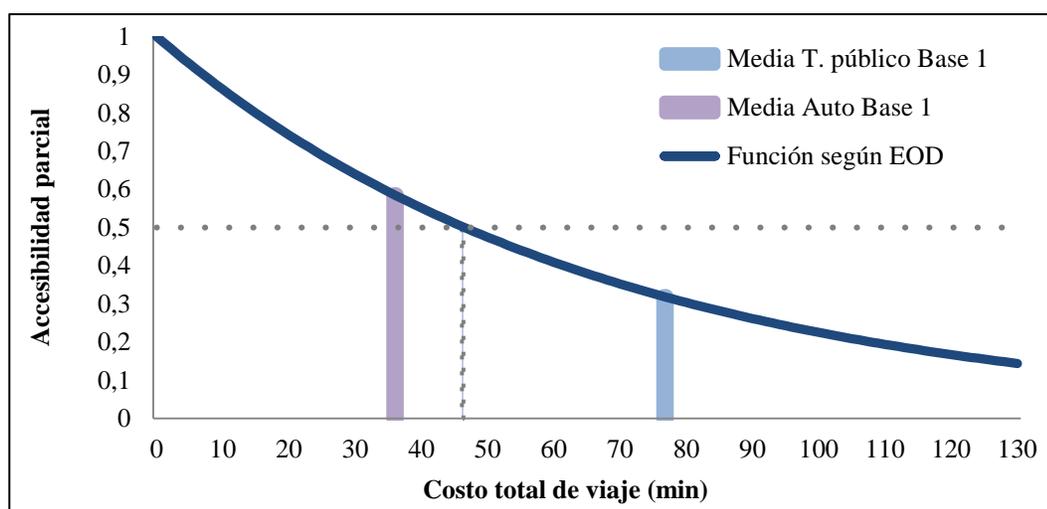


Figura 5-1. Función exponencial negativa calibrada y costos medios en la Base 1.

Fuente: Elaboración propia

Lo anterior corresponde si el nivel de costos fuera parejo entre las diferentes formulaciones. Sin embargo, la Ecuación (3.21) (5.2) tiene dos versiones que justamente cambian según cómo se pondera el vector de costos, con α^1 y α^2 de la Ecuación (3.20), donde el segundo se encuentra multiplicando los tiempos de caminata y espera según precios sociales. Para hacer ambas formulaciones comparables en el caso del transporte

público, en el segundo caso corresponde disminuir el parámetro de escala proporcionalmente al aumento en el nivel de costos del mismo. De esta forma, $\beta^2 = 0,0117$ y las escalas de accesibilidad de transporte público de ambas formulaciones quedan similares. Esto se resume en la Ecuación (5.3) más adelante.

Cabe comentar que el ajuste anterior no es ideal, porque ninguno de los modos queda con su media de costo de viaje en el valor de calibración. En este trabajo por razones exploratorias y analíticas se prefirió mantener una escala para ambos modos para poder comparar más sencillamente la accesibilidad de ambos y entre situaciones. En futuros desarrollos bien se podría optar por tener escalas diferentes, fijadas en un manual o que se ajustan a la situación base en cuestión, para mejor interpretación de la accesibilidad. Este paso es relevante de acuerdo a lo concluido por Karner y Niemeier (2013).

Por último, falta explicitar el valor de α'_a que multiplica la tarifa o peaje de la corrida. Para continuar la unidad de costos de viaje en minutos, se utiliza el inverso del valor social del tiempo (VST) del año en que se modeló el proyecto en cuestión. Esto evita el efecto de inflación que registran los costos monetarios en evaluaciones diferentes. La Tabla 5-1 muestra los VST considerados, donde inverso se aplica a la tercera columna. Cabe notar que no se utilizó valor subjetivo del tiempo porque la medida de accesibilidad busca calcular para la población promedio, además de para hacer consistente sus resultados a los de la evaluación social.

Tabla 5-1. Valores sociales del tiempo de las respectivas evaluaciones

Evaluación	Año	VST (\$/hr)	VST (\$/min)
1	2004	737	12,28
2	2009	1.006	16,77
3	2012	1.416	23,60
4	2013	1.443	12,28

Fuente: Elaboración propia a partir de diversas fuentes

5.1.2. Mediciones de accesibilidad en situaciones base

A continuación se aplicará lo desarrollado en cuanto accesibilidad en las secciones anteriores a las situaciones base de cada evaluación. En ese sentido, las Ecuaciones (5.2) y (5.3) recuerdan las dos formulaciones para medir accesibilidad. El objetivo es comparar como varían los resultados de ambas y comentarlos. La Tabla 5-2 presenta la accesibilidad al empleo en las situaciones base de cada una de las evaluaciones, en términos de promedio simple (sin ponderar por la población que habita en cada zona).

$$Acc_i^r = \frac{\sum_j E_j \exp(-\beta^r (\alpha^r C_{ij}))}{\sum_j E_j} \text{ con } r = 1 \text{ o } r = 2 \text{ (sólo en transporte público)} \quad (5.2)$$

$$\text{donde } \beta^1 = 0,015 \text{ y } \alpha^1 = \begin{matrix} 1/VST \\ 1 \\ 1 \end{matrix} ; \quad \beta^2 = 0,012 \text{ y } \alpha^2 = \begin{matrix} 1/VST \\ 3 \\ 2 \\ 1 \end{matrix} \quad (5.3)$$

Tabla 5-2. Resultados agregados de accesibilidad al empleo en situaciones base

Corrida	Modo	Nivel de accesibilidad		
		Promedio	Rango	Desviación std.
Base 1	T. público (r=1)	0,333	0,119 – 0,452	0,057
	T. público (r=2)	0,332	0,072 – 0,468	0,058
	Auto	0,589	0,320 – 0,791	0,085
Base 2	T. público (r=1)	0,420	0,228 – 0,518	0,051
	T. público (r=2)	0,406	0,143 – 0,505	0,056
Base 3	T. público (r=1)	0,296	0,000 – 0,429	0,063
	T. público (r=2)	0,296	0,000 – 0,443	0,061
	Auto – clase 1	0,404	0,161 – 0,673	0,088
	Auto – clase 5	0,319	0,110 – 0,608	0,095

Fuente: Elaboración propia

La accesibilidad media al empleo en las modelaciones es bastante baja al considerar también el costo monetario. Particularmente, para el modo de transporte público, cuyo mínimo baja considerablemente cuando se pondera más fuerte la caminata y espera (r=2, ponderación de los tiempos de acuerdo a los precios sociales según MDS, 2016). Como se muestra a continuación, los patrones de las figuras son consistentes con los de los

costos de viaje analizados en 4.4.2, en transporte público cuando $r=1$ (ponderación homogénea de los distintos tiempos de viaje, i.e. pesos son iguales a uno). En cambio, cuando $r=2$, aportan una dimensión de análisis sobre el tiempo de caminata. Los resultados de la Tabla 5-2 se validan por la razón anterior y por los análisis que siguen. En primer lugar, la Figura 5-2 muestra los resultados de la Base 1 en el territorio que corresponde a la situación sin proyecto de las extensiones de Metro.

Lo comentado en la Sección anterior se refleja visualmente en la Figura 5-2 respecto a la Base 1, donde la paleta de colores se mantiene constante para ambos modos (y también para el resto de bases). Para efectos de interpretación, cabe recordar que la escala de accesibilidad fue calibrada en accesibilidad 0,5 cuando los costos totales asciendan a 47 minutos. Es decir, si los habitantes de una zona se demoran en acceder a todos los empleos de la ciudad en promedio alrededor de 47 minutos – entre tiempo de caminata, espera y viaje junto a la transformada de la tarifa – esa zona obtiene accesibilidad 0,5 y un azul bastante oscuro. En la Base 1 este nivel no se logra en el transporte público, mientras que en el auto se logra adentro de casi todo el anillo Américo Vespucio.

En el caso del transporte público, cuando $r=1$ se aprecia la influencia de Metro en la mantención de relativa buena accesibilidad más allá del centro. Sin embargo, esta se diluye con $r=2$ que agrega heterogeneidad local, además de destacar nuevas zonas como San Bernardo o Colina que son poblados compactos cerca de autopista. Esto se debe principalmente porque en varias zonas con Metro el tiempo de caminata es alto y la alta frecuencia de buses da ventaja en términos de espera. Por ejemplo, en el eje Santa Rosa o Pajaritos que el resultado de accesibilidad fue superior que ejes vecinos con Metro. La razón tiene que ver con que el año de elaboración de la simulación (2005) es anterior a la implementación de Transantiago. Por lo mismo, el Metro era operado con menor frecuencia, junto a que la modelación de la integración de submodos de transporte público podría no ser coherente respecto a la realidad posterior.



Figura 5-2. Accesibilidad al empleo en la situación Base 1, punta mañana.

Fuente: Elaboración propia.

En cambio, el caso del auto es de alta accesibilidad por la relativa baja congestión modelada en esa época. El patrón de la Figura 5-2 no distingue tanto las autopistas porque existe sólo una clase de usuario que le proporciona un nivel de uso promedio, su patrón se distingue más cuando también se desagregan las clases de usuarios. La distribución no varía localmente, por tenencia de auto por ejemplo, porque el modelo

calcula variables de servicio entre cada par origen destino independiente de si existen viajes entre los mismos.

En segundo lugar, la Figura 5-3 muestra un caso similar para el transporte público presente en la simulación de la Base 2 (en relación con el proyecto Corredores), en términos tanto del patrón de accesibilidad como su heterogeneidad local. Asimismo, como se comentó en la sección 4.4.2, esta versión de DIRTP tiende a subestimar los tiempos de viaje y por lo mismo se presenta una accesibilidad más alta que en la Figura 5-2.

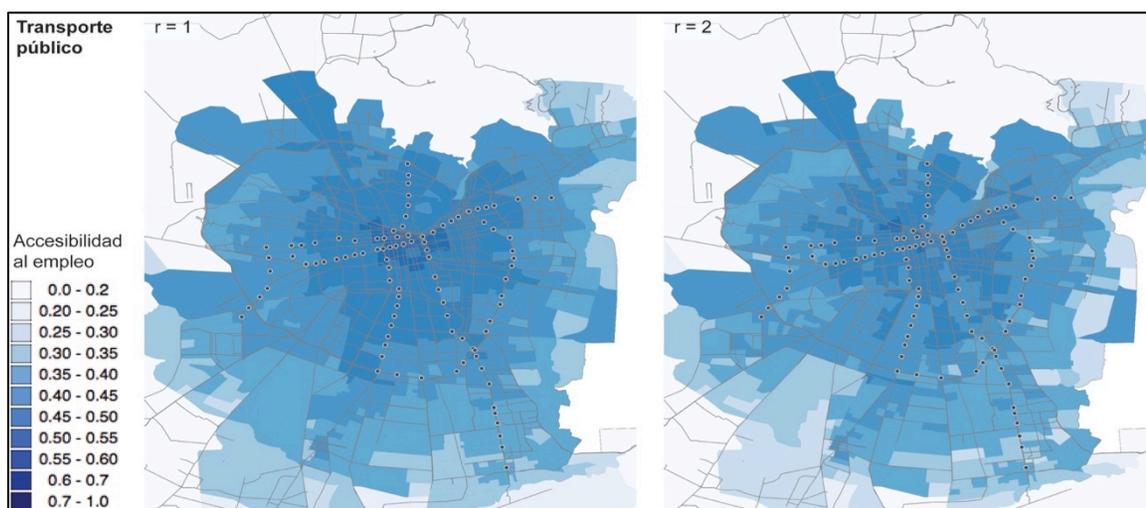


Figura 5-3. Accesibilidad al empleo en la situación Base 2, punta mañana.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, el análisis más interesante es el de la Base 3 (relacionada a la Tarifación Vial), representado en la Figura 5-4. En este caso, debido a una mejor simulación en ESTRAUS, el nivel de accesibilidad se ve afectado por una mayor congestión y se distribuye consistentemente siguiendo la infraestructura principal de cada modo. En el caso del transporte público, el patrón a base de Metro y sus tiempos de viaje es claro, con $r=2$ aportando heterogeneidad local.

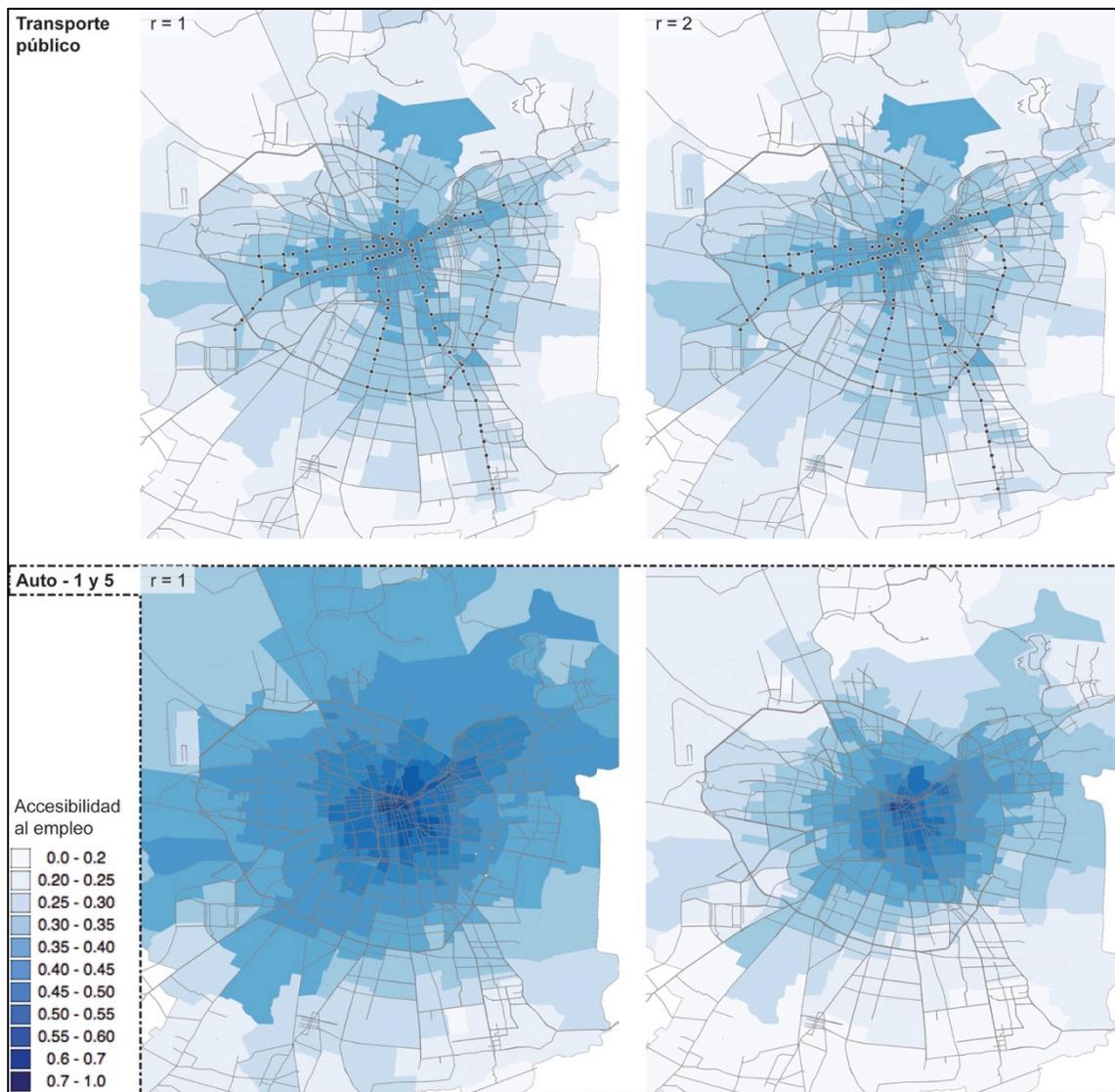


Figura 5-4. Accesibilidad al empleo en la situación Base 3, punta mañana 1.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso del modo auto, la menor accesibilidad medida para la clase de mayores ingresos se debe al mayor uso de autopistas y su correspondiente pago de peaje. Que lo anterior represente una baja de accesibilidad es consistente con un valor social del tiempo que es menor al valor subjetivo del tiempo de la clase 5. Es decir, en el modelo esta clase de usuarios elige más rutas pagadas porque le reportan un beneficio, pero en

términos de la población promedio esa elección implica una disminución de accesibilidad.

De acuerdo a lo expuesto en el Capítulo 3, la interpretación de la medida de accesibilidad es independiente de la clase socioeconómica, en este caso depende del tipo de ruta que escoge la población. Si un chileno promedio utiliza más autopistas, su accesibilidad es la de la clase 5, que se ve disminuida con un valor social del tiempo bajo. En caso que no las utilice su accesibilidad es la de la clase 1, con las clases entremedio representando un rango de uso. En otras palabras, las clases de ruteo de auto se interpretan como submodos diferentes. Será importante recordar esta explicación para las secciones que siguen.

5.2. Efectos de los proyectos como cambio de accesibilidad

5.2.1. Análisis de la distribución territorial de impactos

El análisis territorial continúa en esta sección con su dimensión más relevante: los resultados del impacto de cada proyecto. De acuerdo a la metodología, se calcula como la diferencia de accesibilidad al empleo entre la situación con proyecto y su base respectiva (Ecuación (3.5)). En esta sección se muestran mapas con incrementos o disminuciones de accesibilidad en el territorio, calculada para los modos transporte público y auto.

Según cada proyecto se observan resultados consistentes en cuanto a su intensidad y distribución, con la consideración además de efectos sistémicos en el resto de la ciudad. La escala de representación se mantiene de nuevo constante en todos ellos, cuya unidad se presenta como un porcentaje respecto a la máxima accesibilidad (valor 1). La paleta de colores muestra en azules los aumentos y en rojo las bajas de accesibilidad.

La mirada de ciudad y el conocimiento sobre los proyectos aporta en darle sentido y validar cualitativamente los resultados. Primero, la Figura 5-5 presenta el impacto de la extensión de la Línea 1 de Metro hasta Los Dominicos en los modos transporte público y

auto. Como parecía intuitivo, los cambios de accesibilidad en el transporte público se concentran cerca de las nuevas estaciones, en particular los positivos en zonas aledañas que cuentan con bajos niveles de accesibilidad inicial.

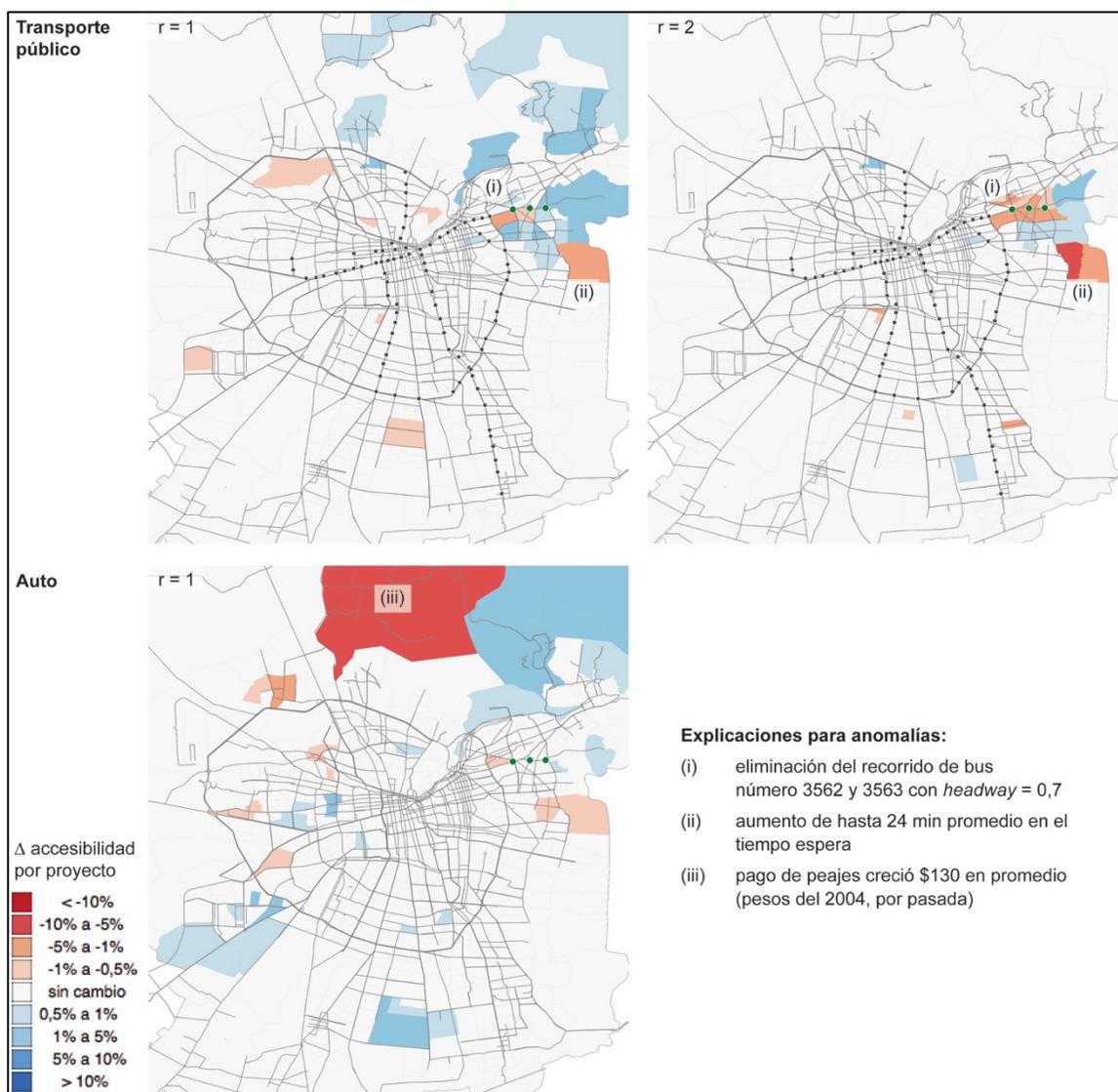


Figura 5-5. Impacto en accesibilidad al empleo del proyecto de extensión de la Línea 1 de Metro. Fuente: Elaboración propia.

El patrón general es consistente con las disminuciones de tiempo de viaje mostradas en la sección 4.4.2, sobretudo en el caso de $r=1$. Sin embargo, se presentan disminuciones importantes de accesibilidad en las inmediaciones de las inversiones, en particular cuando $r=2$. Se investigó sus causas mediante una examinación de la codificación de la simulación, tanto en esta corrida como la de la extensión de la Línea 5 a Maipú (Figura 5-6). Las razones son coherentes y se explicitan en el cuadro de texto presente en ambas figuras.

Un comentario relevante sobre este ejercicio es el siguiente. Aquellos efectos no esperados refuerzan profundamente el valor de esta metodología de análisis territorial en la etapa de diseño y evaluación, ya que muestran elementos que posiblemente fueron ignorados por el modelador. Por ejemplo, para el caso (ii) y (iii) de la Figura 5-5 – en rojo en La Reina y Colina respectivamente – haber evitado dichas pérdidas de accesibilidad en la simulación no afectaba mayormente el proyecto. Algunos de los infrecuentes recorridos de bus que pasaban por La Reina colapsaron, porque no se les puso atención luego que estos comenzaran a alimentar estaciones de Metro. El caso en Colina es aún más innecesario, la importante alza en pago de peajes tiene que ver aparentemente con un problema de modelación respecto a la conectividad y capacidad de la red vial en el norte.

El segundo comentario tiene que ver con la forma de evaluación de la época. Tanto el caso anterior (iii) como el caso (i) se repiten en el proyecto de extensión de la Línea 5 de Metro a Maipú. En ambas corridas (i) afecta las inmediaciones de las nuevas estaciones y se agrava cuando $r=2$. Se explica por efectos sumados de aumento de tiempo de caminata y de espera. Esto tiene que ver con un tema más del proyecto mismo, que reemplaza líneas de buses muy frecuentes y de muchas paradas por un servicio de Metro más infrecuente y estaciones distanciadas. De hecho, la forma de simular la extensión de la Línea 1 posiblemente no habría salido rentable de haber considerado los actuales precios sociales, que ponderan fuerte la caminata y espera (se explica adelante en Tabla 5-3).

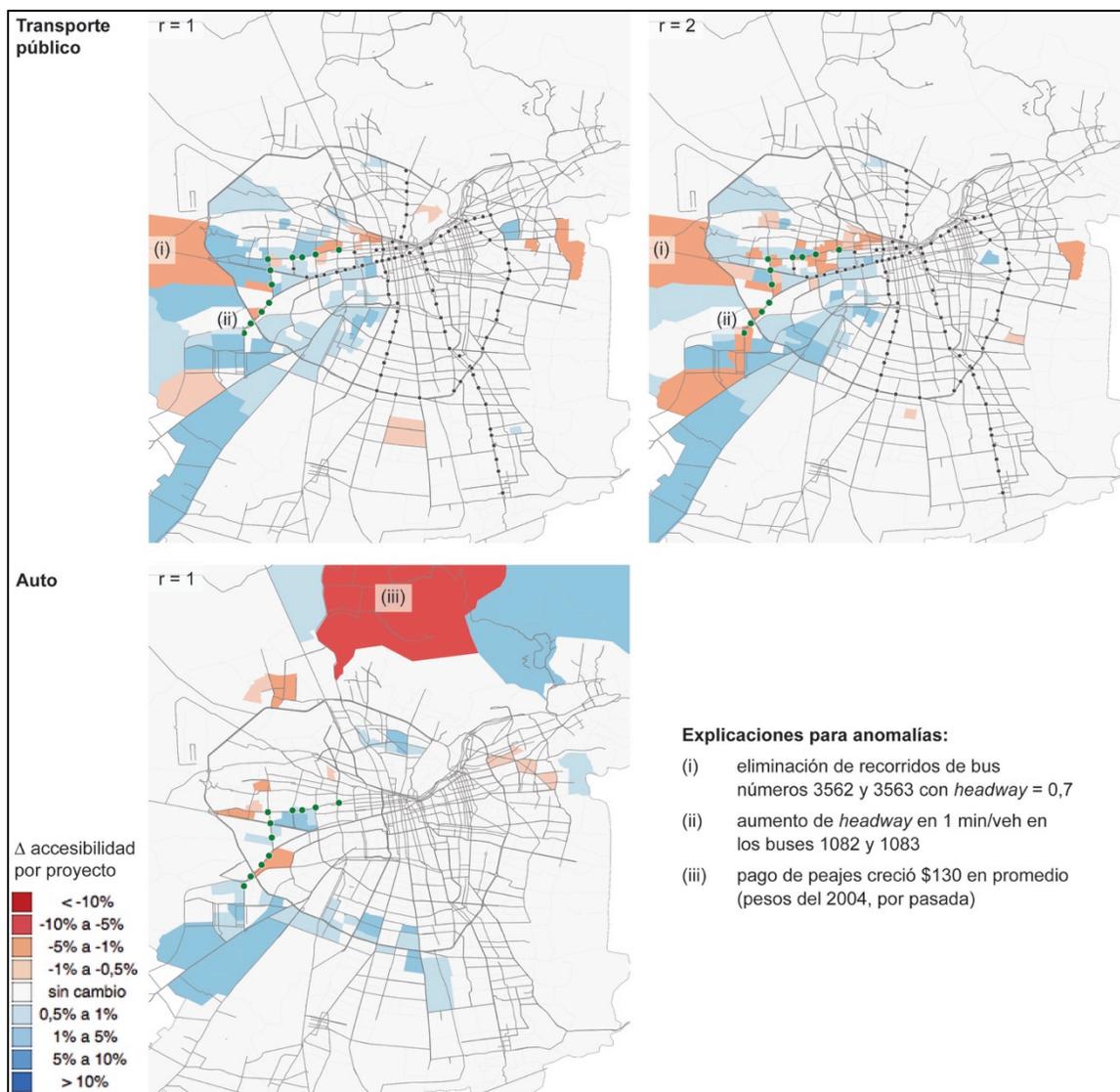


Figura 5-6. Impacto en accesibilidad al empleo del proyecto de extensión de la Línea 5 de Metro. Fuente: Elaboración propia.

Por ejemplo, en la Figura 5-6 el retiro de estas y variantes adicionales del recorrido de buses, generan un efecto desde Quinta Normal hasta Maipú y Pudahuel (i) y (ii). La extensión de la Línea 5 de Metro se codificó con un *headway* o intervalo de 2,6 minutos entre trenes hora punta, mientras que los recorridos retirados eran dos con un bus cada 40 segundos y dos que se les aumentó el intervalo de 30 segundos a 1,5 minutos. Por la

forma en que estaba planteado el modelo ESTRAUS para esta simulación, lo anterior representa una pérdida en tiempo de espera a pesar de que en realidad los buses carecen de la regularidad de Metro en los intervalos.

Al considerar las anomalías en la simulación anteriormente explicadas, los resultados son consistentes y elocuentes. Ante todo para mostrar la distribución de beneficios y perjuicios de los proyectos. La Tabla 5-3 de la siguiente sección resume los resultados agregados de todos los proyectos. En el caso anterior confirma lo que visualmente se intuye, que la extensión de la Línea 5 mejora más la accesibilidad que la de la Línea 1, según la metodología presentada por este trabajo.

El tercer proyecto es el de Corredores de buses que se muestra en la Figura 5-7. Este se mantuvo entre los proyectos evaluados a sabiendas de que sus ahorros de costos son marginales y no se concentran entorno al proyecto (Sección 4.4.2). Consistentemente esto se confirma en la Figura 5-8, donde sólo una zona periférica logra sobrepasar un cambio positivo sobre de 0,5% o en términos absolutos 0,005 de accesibilidad a los empleos de la ciudad.



Figura 5-7. Impacto en accesibilidad al empleo del proyecto de Corredores de buses.

Fuente: Elaboración propia.

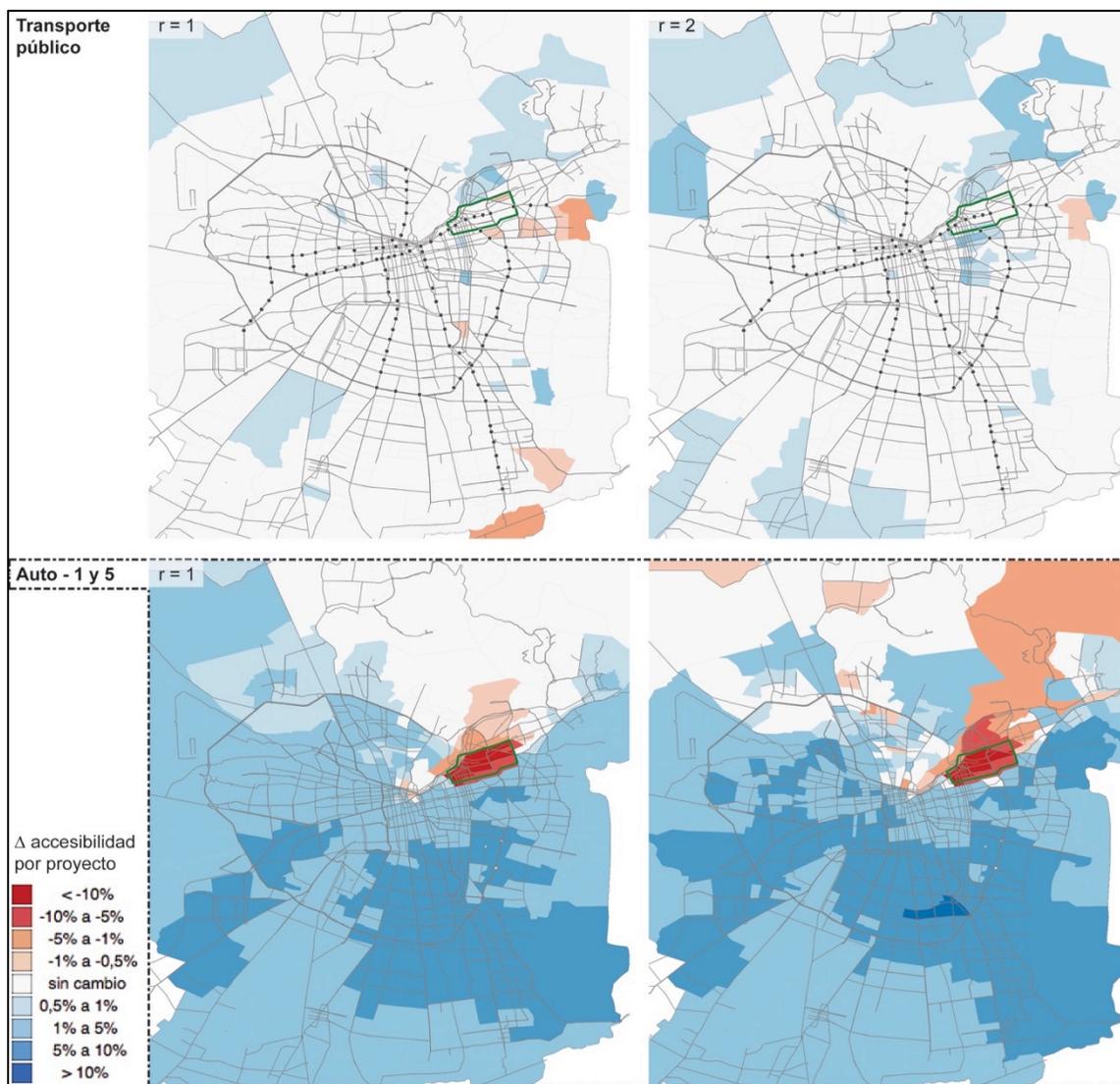


Figura 5-8. Impacto en accesibilidad al empleo del proyecto de Tarificación Vial.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, la Figura 5-8 presenta los importantes impactos positivos del proyecto de Tarificación Vial por congestión. Este fue modelado recientemente en ESTRAUS y los efectos se visibilizan de mejor manera. Los impactos en el transporte público, al no estar en presencia de una inversión para el mismo, tiene que ver con los cambios de ruta de los automovilistas. Por lo mismo, no se concentran cerca de líneas de Metro sino en

diferentes lugares de la ciudad. Se comprueba en la evaluación social oficial del proyecto que la modelación no pronostica beneficios relevantes para este modo y el cambio de accesibilidad es consistente con esto.

En este proyecto el caso del modo auto es más interesante, tanto en el caso de si se asume un comportamiento con pocas rutas pagadas (auto – 1) como con muchas (auto – 5). En ambos, tanto los aumentos como disminuciones de accesibilidad alcanzan niveles muy altos. Los primeros dispersados por la ciudad y sobretodo en su hemisferio sur, mientras los segundos se concentran en la zona tarifada y el sector oriente. En primer lugar, de acuerdo al informe del proyecto, la velocidad del automóvil aumentó por la disminución de congestión, en parte por cambios modales y sobretodo por cambio de horario. De hecho en el segundo horario el aumento de congestión genera importantes pérdidas.

En segundo lugar, la distribución de los cambios de accesibilidad tienen más sentido al observar que el cordón tarifado encierra las principales avenidas que conducen desde o hacia el sector oriente. Por ello, los habitantes del sector oriente que no desean pagar la tarifa, para acceder al empleo deben maniobrar para esquivar el cordón y aumentan su tiempo de viaje (auto 1). En cambio, si son habitantes que eligen rutas pagadas y atraviesan el cordón, lo deben hacer para llegar a casi todos los empleos de la ciudad, por ende aumentan su costo monetario (auto 5). En cambio, la menor congestión beneficia la accesibilidad al empleo de los habitantes del sector sur de la ciudad en ambos casos. Esto porque se les facilita la llegada a la gran mayoría de trabajos que no está en el área tarifada. En particular, el beneficio es mayor también si están dispuestos también pagar por autopistas o la entrada al área tarifada, posiblemente porque perciben aún menor tráfico, lo que se evidencia en el sector sur oriente.

En la Sección 5.4 los resultados anteriores de cambios de accesibilidad serán reinterpretados en función de su aporte a la equidad. Aunque, teniendo en mente los mapas sobre los impactos de los proyectos junto con el de la distribución de ingresos, ya se podría intuir el orden de los proyectos en función de la equidad.

Queda un comentario respecto a la transferencia posterior de beneficios o perjuicios en el territorio por cambios de accesibilidad⁹. Si bien se trata de punta mañana y los cambios en los costos en general debieran ser percibidos por los residentes de las zonas de origen, esto no es efectivo en presencia de gentrificación. Este efecto significa que los incrementos en accesibilidad podrían elevar los costos privados de vivienda y obligar a migrar a los residentes de menores ingresos que se intentó beneficiar. Lo anterior es más grave para arrendatarios que se quedan sin oportunidad de percibir el beneficio que queda en manos del propietario, o en el caso de propietarios no informados que sean embaucados por agentes inmobiliarios que se anticipen a las inversiones públicas.

Esta aplicación de la metodología considera que los cambios de accesibilidad se aplican a las poblaciones presentes en sus territorios en la actualidad. Sin embargo, aporta al problema de la gentrificación en dos sentidos. Por un lado, análisis territorial como el anterior permite anticiparse a estos efectos y que los planificadores diseñen políticas complementarias al proyecto para evitar la gentrificación, en caso de preverse necesario. Por otro lado, trabajos futuros podrían agregar ajustes a la metodología y profundizarla para también medir los beneficios efectivos en la población, incluso con gentrificación. En cualquier caso, en Chile la proporción de dueños de hogar versus arrendatarios es de las más altas de la OCDE (Razmilic, 2015).

5.2.2. Análisis del resultado cuantitativo de cada proyecto

En línea con los resultados anteriores, el estudio de los cambios de accesibilidad culmina con una visión respecto a la variación de su nivel global. Asimismo, a modo de segunda validación de la metodología, corresponde analizarlos en contraposición a los ahorros en

⁹ Se agradece al revisor anónimo del proceso de publicación de la revista *Research in Transportation Economics* por la observación.

el consumo de tiempos¹⁰ – de caminata, espera y viaje – medidos en la modelación tradicional. La Tabla 5-3 presenta por cada proyecto los resultados agregados de ambos enfoques, primero de acuerdo a la variación aplicada al total de población o viajes, y segundo la normalización de estas según su situación base.

Tabla 5-3. Resultados agregados de cambio de accesibilidad y comparación

Proyecto	Modo	Δ Accesibilidad según población		Ahorros de tiempos según viajes	
		Abs	vs Base	Abs (horas)	vs Base
1 Metro-L1	T. público (r=1)	-1197	-0,06%	-365 ¹¹	-0,09%
	T. público (r=2)	-6850	-0,34%	-3.302 ³	-0,55%
	Auto	1085	0,03%	859	0,95%
1 Metro-L5	T. público (r=1)	16.165	0,80%	4.469	1,16%
	T. público (r=2)	2.947	0,15%	40	0,01%
	Auto	5.462	0,15%	410	0,45%
2 Corredores	T. público (r=1)	394	0,01%	5.581	1,71%
	T. público (r=2)	543	0,02%	6.733	1,33%
3 Tarificación	T. público (r=1)	3.852	0,21%	1.186	0,23%
	T. público (r=2)	7.133	0,40%	3.388	0,45%
	Auto ¹²	53.088	2,37%	1.505	0,36%

Fuente: Elaboración propia

A pesar de las diferencias metodológicas de cada medición, los balances resultan consistentes en todos los proyectos, tanto en sus signos como en el nivel del impacto de acuerdo a la medición normalizada (vs Base). Lo de los signos tiene sentido por aplicarse una función monótona decreciente, que al considerar el negativo de las disminuciones de tiempos (los ahorros de tiempos), ambos signos quedan igual. En el

¹⁰ Los ahorros de tiempo se toman de los reportes *indicadores_globales* y *resultados_hjeeves* de las respectivas corridas, en vez de los informes de proyecto (Tabla 4-4).

¹¹ Como se mencionó, llama la atención que este proyecto de t. público haya salido rentable, cuando el neto de beneficios en la punta mañana es salvado sólo por el modo auto. De hecho, con las ponderaciones actuales no se habría aprobado. También la diferencia entre lo reportado en el informe (Tabla 4-4) versus lo revisado en el reporte de simulación.

¹² En el caso de la accesibilidad corresponde a un promedio del efecto, en el caso del ahorro de tiempo corresponde a la suma según la importancia de clases de acuerdo a *indicadores_globales*.

caso del balance del valor absoluto, tiene sentido que los de accesibilidad se muestren más intensos que los de ahorro de tiempos, porque hay más población que viajes simulados en punta mañana. Por otro lado, también que la versión normalizada del primero sea en general menos sensible que la segunda, debido a las características de la función exponencial negativa.

La validación anterior aplica para los dos proyectos en ESTRAUS, no así para el de Corredores de DIRTP por las razones anteriormente explicadas. O la comparación base-proyecto no es posible por un traspaso incompleto de información, o DIRTP no es compatible con la metodología por no reflejar sus resultados en las variables de servicios. En cuanto a los otros tres proyectos, la relación entre cambios de accesibilidad y ahorros de tiempos no es lineal por tres razones:

- (i) Ya se mencionó pero es muy relevante: los efectos de accesibilidad se aplican a poblaciones en vez de viajes, por razones de equidad ya explicadas. Por ello depende de la localización de los impactos cuánto se alejan las dos mediciones.
- (ii) En relación con lo anterior, la preponderancia de los cambios en los costos se pondera por la ubicación de los empleos en vez de la distribución origen destino.
- (iii) En la medida de accesibilidad se considera el costo monetario para la población, mientras que en la metodología tradicional estas transferencias se cancelan.

Es por una combinación de las tres razones anteriores que el proyecto de Tarificación Vial proporciona en el modo auto altísimos niveles de mejora, incluso según su propia base de comparación. Anteriormente la accesibilidad y el ahorro de tiempo normalizados resultaron similares para su modo de transporte público o para los proyectos de Metro. Lo anterior se entiende recordando la Figura 5-8 con la localización de los impactos. La metodología de ahorro de tiempos es ponderada por la cantidad de viajes, que en el modo auto son más altos en grupos de alto ingreso. Como para estos existen importantes pérdidas y ganancias, el neto influenciado por el resto de la población es bajo. En cambio, como la metodología de accesibilidad se pondera por la cantidad de población,

el alto beneficio reportado en el altamente poblado hemisferio sur de la ciudad implica un neto de aumento de accesibilidad también muy alto. Con esto se cierra la aplicación de la metodología de accesibilidad con el fin de profundizar en el resto del capítulo respecto a la equidad.

5.3. Poblaciones sintéticas

Comenzar a analizar en detalle los impactos de equidad de acceso en la ciudad requiere de poblaciones sintéticas como insumo, ante todo si es para análisis de equidad (Karner y Niemeier, 2013). En este caso, las poblaciones sintéticas se construyeron a base de la variable de ingreso per cápita de cada hogar para responder a dos niveles de desagregación: (i) territorial y (ii) en grupos de ingresos según deciles. A continuación se detallan los resultados intermedios de cada etapa de la metodología descrita en la sección 3.3, aplicada con el objetivo de estimar cantidad de habitantes por decil de ingreso per cápita en cada zona del Gran Santiago.

5.3.1. Distribuciones de ingreso de las comunas

El primer paso comienza con obtener las distribuciones de probabilidad del ingreso de cada comuna. Consiste en aplicar el método de ajuste de distribución a las respuestas de la pregunta de ingreso de la Encuesta de Movilidad – descrita a lo largo del Capítulo 4. De nuevo se utiliza EasyFit pero esta vez para cada comuna del Gran Santiago (MathWave Technologies, 2004). De esta manera, entre las distribuciones disponibles para modelar bayesianamente en el programa R (R Core Team, 2012) en el paso siguiente, se obtuvo la que mejor ajusta a los datos de cada comuna del Gran Santiago según la prueba estadística de Anderson-Darling (AD), que se presenta normalizada además de sus respectivos parámetros.

Se observó una buena bondad de ajuste en cada una de las distribuciones elegidas, principalmente del tipo Lognormal con algunas excepciones de Gamma y Weibull. Esto se verifica también al comparar cada distribución modelada con su histograma, lo cual

se incluye en el Anexo F junto a una tabla que resume parámetros y otros valores relevantes. La Tabla 5-4 y la Figura 5-9 contienen una selección de cuatro comunas.

Tabla 5-4: Características de comunas, parámetros y bondad de ajuste de distribuciones

Comuna	Hogares	Ingreso per cap. medio	Distribución	Parámetros	AD ¹³	AD / muestra
Las Condes	103,109	557,412	Lognormal	$\sigma=0.78$ $\mu=12.93$	1,341.3	0.0130
San Bernardo	74,916	155,608	Lognormal	$\sigma=0.72$ $\mu=11.73$	1,145.6	0.0153
La Pintana	51,688	124,423	Gamma	$\alpha=3.67$ $\beta=0.34 \cdot 10^5$	45.6	0.0009
Lo Espejo	28,987	147,370	Weibull	$\alpha=1.90$ $\beta=1.64 \cdot 10^5$	254.7	0.0088

Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, en la Figura 5-9 es posible distinguir el grado de homogeneidad o heterogeneidad de cada comuna al verificar qué tan concentrada es la curva entorno a un valor. Para esto se incluyó una línea punteada fija en un valor de densidad 0.05. Mientras más área del histograma y curva de distribución de una comuna se encuentre por encima de la línea, más homogénea es la comuna dentro del rango de ingresos de la misma (Las Condes).

En segundo lugar, un aspecto aún más relevante para efectos de la pregunta de investigación, es el nivel de ingreso en sí de cada comuna. Como las escalas son lineales pero van cambiando, el análisis se facilita al observar la fecha negra que ubicada en \$250 mil pesos per cápita. Como referencia, esta cifra es aproximadamente la media del área de estudio completo, al mismo tiempo que bordea la media del decil número 7 (clase media-alta). Así, mientras más área del histograma y curva se encuentre a la izquierda de la flecha, menor nivel de ingreso per cápita tendrá la comuna (La Pintana).

¹³ Notar que la escala de la prueba depende del tamaño de muestra, comparar el test ajustado (NIST, 2012)

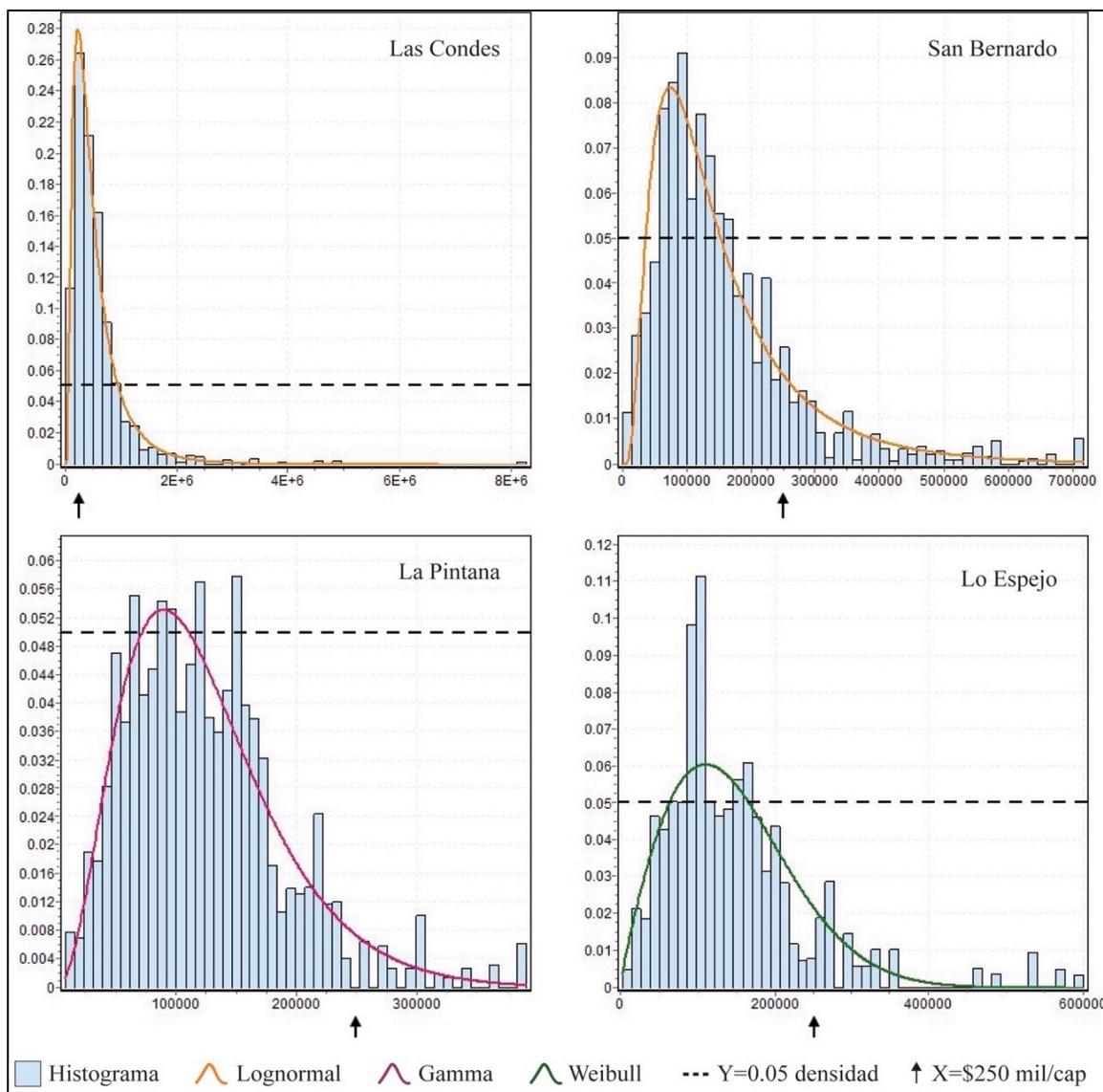


Figura 5-9: Distribución ajustada e histograma del ingreso per cápita por comuna

Fuente: Elaboración propia a partir de SECTRA 2015

San Bernardo, en cambio, es una comuna de ingreso medio que al mismo tiempo es bastante heterogénea comparada con el resto, grupo en el que también podría entrar Macul, Quinta Normal o Recoleta (Anexo F). Ambas dimensiones de las comunas se

traducirán luego directamente en diferentes distribuciones de deciles de ingresos en las zonas que las componen, aspecto a tratar en la siguiente sección.

Entre las particularidades, existen puntas y vacíos que parecen escapar del ajuste de su distribución, lo cual se hace notar claramente en el caso de la comuna de Lo Espejo, como también en otras comunas de bajo ingreso. Sin embargo, el origen tiene que ver con que casi la mitad de la muestra de la encuesta corresponde a respuestas en montos (SECTRA, 2015). Estos valores específicos tienden a repetirse tanto por la tendencia de los empleadores a pagar cifras cerradas, como la de las personas a redondear cifras al responder, sobretodo si sus ingresos fluctúan mes a mes.

Asimismo, dentro del área de estudio, Lo Espejo además está entre las cuatro comunas con la menor cantidad de puntos muestrales, en su caso 196. Si bien esto amplifica el tema de repetición de montos, se puede verificar que la distribución ajusta correctamente a los datos. La curva suaviza las situaciones anteriores, lo cual es positivo para este trabajo, que busca modelar impactos de manera continua.

5.3.2. Acomodo bayesiano a zonas y resultado en el territorio

Como la Encuesta de Movilidad – usada anteriormente y descrita en el Capítulo 4 – cuenta con representatividad comunal pero no zonal, no sería correcto construir distribuciones de ingreso desde los puntos muestrales de cada zona, que en muchos casos son pocos. Por ello, la metodología sigue con la aplicación del modelo de inferencia bayesiano – descrito en la Sección 3.3.2 – para estimar una distribución de probabilidad continua a nivel de zonas. Esto se realiza a partir de su distribución de ingreso per cápita comunal y las observaciones presentes en la zona.

Una vez obtenida la distribución de ingreso per cápita de cada zona, y tras aplicar las definiciones de los deciles presentados en la Tabla 4.1, es posible estimar la proporción de habitantes de cada decil en las zonas. A continuación, la Figura 5-10 muestra los porcentajes para los deciles 2do, 4to, 8vo y 10mo, según su distribución en la ciudad.

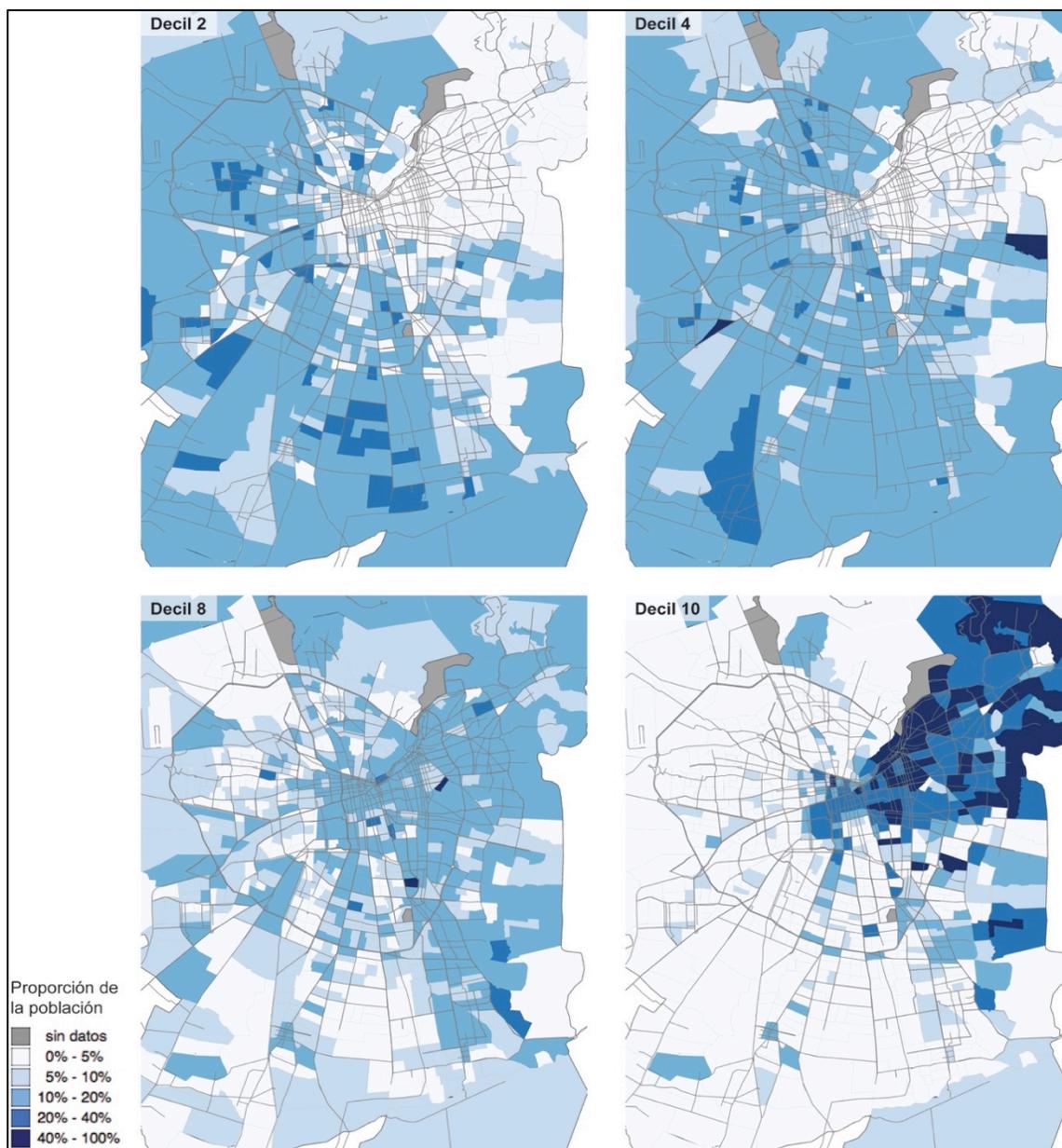


Figura 5-10. Distribución del ingreso per cápita según proporciones de deciles por zona.

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, para el mismo conjunto de deciles de ingreso, la Figura 5-11 muestra el cruce de la información anterior con el número de habitantes por zona. Lo último corresponde a la población sintética generada, cuyas cantidades serán ocupadas para estimar los

aportes de equidad de acceso de los proyectos en la sección siguiente. Cabe notar que las zonas más grandes tienen mayor población y por lo mismo se destacan más. Visualmente es más fácil interpretar densidades, pero se prefirió mostrar la variable en la metodología. En ambas imágenes se comprueba la alta segregación residencial entre grupos socio-económicos, comentada en el Capítulo 4.

Por último, en el Anexo G está la comparación de la media de ingreso de la población simulada versus la anterior media zonal de la Encuesta (Figura 4-2). La primera se calcula tras ponderar las medias de ingreso per cápita por decil por el número de habitantes de estos en cada zona. La comparación muestra un patrón muy similar, pero con menor heterogeneidad local en el caso simulado.

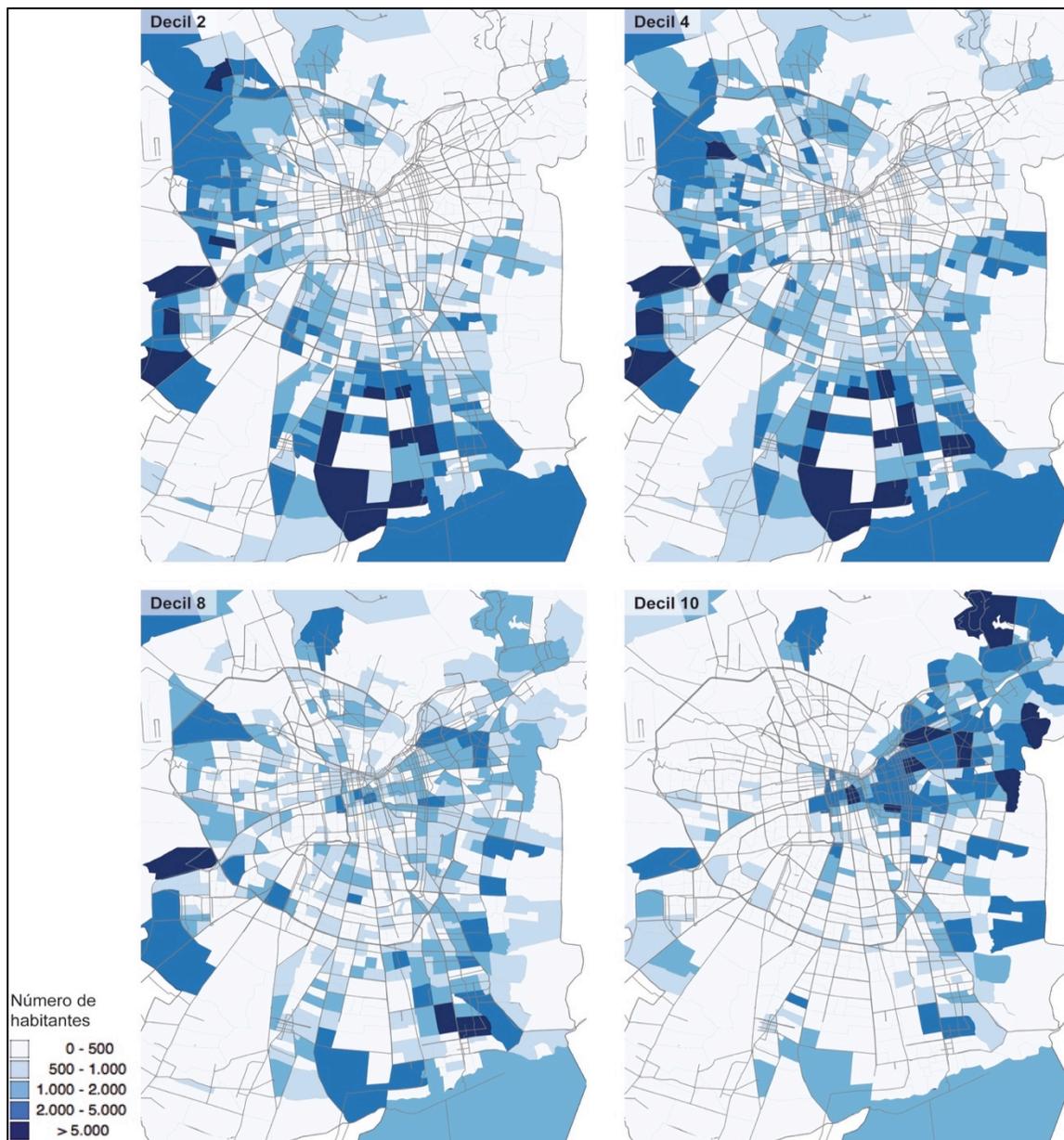


Figura 5-11. Distribución del ingreso per cápita según la población de cada decil.

Fuente: Elaboración propia.

5.4. Accesibilidad equitativa e impactos de los proyectos

Este Capítulo culmina con la aplicación de la confluencia de todos los desarrollos metodológicos y sus aplicaciones aportados hasta el momento. Lo que viene a continuación consiste en aplicar herramientas para medir la equidad de acceso en la ciudad, tanto su diagnóstico (Sección 5.4.1) como el aporte que le realizan o no los proyectos urbanos (5.4.2 y 5.4.3).

5.4.1. Herramientas de diagnóstico: Inequidad de acceso

Dentro del contexto de planificación, el uso de herramientas cuantitativas aportaría en precisar el diagnóstico y entendimiento de los desafíos de la ciudad. En particular para el levantamiento o etapas tempranas del diseño de políticas o proyectos urbanos. La idea que sigue es aprovechar la información que reportan modelos de transporte para analizar la desigualdad en el acceso a oportunidades. Cabe recordar en qué consiste la curva de Lorenz y el indicador Gini, lo que se explica en la Sección 3.4.1 (Figura 3-4).

En primer lugar, la Figura 5-12 presenta en color tres curvas de Lorenz de la accesibilidad zonal medida en la Base 3 (la última, Tarificación), según cada modo y su formulación. Además se las acompaña en negro de la Lorenz respecto a la desigualdad del ingreso per cápita según su media en cada zona. Se puede observar que las tres primeras no difieren mucho entre sí, y además que la desigualdad en el acceso al empleo de cada zona es menor que la desigualdad de ingreso. Esto tiene sentido en términos de las distancias propias y reales de las características ambos tipos de mediciones. Por una parte, la accesibilidad al empleo difiere en hasta 4 veces entre las zonas mínima y máxima. Por otra, las dinámicas económicas y urbanas provocan que las medias zonales de ingreso per cápita tengan diferencias de hasta 40 veces.

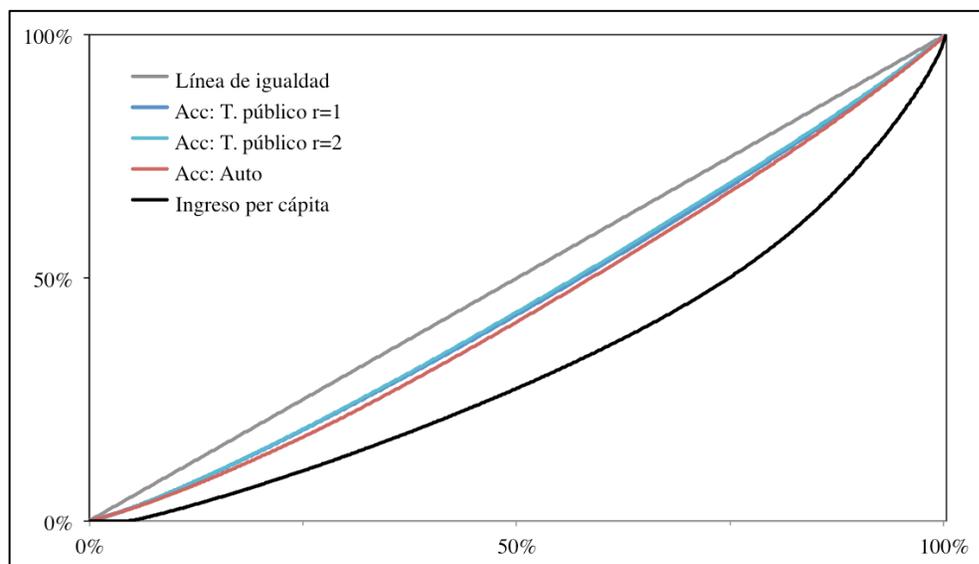


Figura 5-12. Curvas de Lorenz de la accesibilidad zonal. Fuente: Elaboración propia.

También influye la formulación de exponencial negativa y el parámetro de escala β utilizados, que suavizan las diferencias. Sin embargo, este efecto es pequeño, ya que la media de costos para llegar a todos los empleos siguen teniendo diferencias sustancialmente menores que las de ingreso. De esta forma, se verifica que la desigualdad en la accesibilidad es menor a la del ingreso per cápita. Esto se muestra también cuantitativamente en los resultados del Gini asociado a cada curva en la Tabla 5-5, calculados según lo resumido en la Sección 3.4.1.

Tabla 5-5. Gini zonal de la accesibilidad al trabajo y del ingreso per cápita

Medición	Modo y formulación	Gini
Media zonal de accesibilidad en la Base 3 (2013)	Transporte público (r=1)	0,1234
	Transporte público (r=2)	0,1169
	Auto	0,1498
Media zonal de ingreso per cápita (2012)		0,2937

Fuente: Elaboración propia

No obstante el resultado anterior, ambas desigualdades se interpretan como subestimadas. Como se hizo hincapié, corresponden a mediciones en una agregación a nivel zonal. Es decir, las diferencias se suavizan con respecto a una medición

desagregada a nivel de familias o individuos. Si bien se recuerda en la Sección 4.1.2, la medición en este trabajo del Gini de ingreso de Gran Santiago resultó en 0,45, mientras la Tabla 5-5 muestra uno de 0,29. Son prácticamente los mismos datos, pero agregados a nivel zonal. Consistentemente, si se midiera accesibilidad al empleo en modelos de transporte con mayor desagregación territorial se espera encontrar resultados de Gini también más altos.

El ejercicio anterior es interesante tanto en términos de análisis urbano como metodológicos. Sin embargo, cabe recordar que en el caso de su aplicación a la accesibilidad, el Gini mide sólo *equidad horizontal*. Implica asumir que todas las personas perciben de igual forma la accesibilidad, que en este caso su medición se limita al componente de transporte según las variables de servicio reportadas por modelos. Como se ha comentado, las desigualdades de origen afectan fuertemente en una accesibilidad equitativa, cuyo argumento ya se mencionó en la Sección 3.4.1 y fue discutido a lo largo del Capítulo 2.

En segundo lugar, por las razones anteriores también se desarrolló una herramienta de diagnóstico que incorpora el concepto de *equidad vertical* respecto a la accesibilidad al empleo, pero además esta permitir el análisis territorial. A partir de los componentes de las Ecuaciones (3.26) a (3.28) de aporte a la equidad de acceso, se simplifica una versión que permite diagnosticar la situación actual. La Ecuación (5.4) multiplica los niveles de accesibilidad con los del nivel de ingreso de cada zona, a lo cual luego se le aplica una doble normalización según sus promedios para todas las zonas.

$$\text{Inequidad de acceso}_i := \frac{\text{Acc}_i \bar{\Gamma}_i}{\overline{\text{Acc}} \bar{\Gamma}} \quad (5.4)$$

El uso de la aproximación del ingreso ya fue explicado en la Sección 3.4.2. También es consistente con los resultados de Cervero et al. 1999 respecto a la inconsistencia de baja empleabilidad en zonas céntricas de alto ingreso – con alta accesibilidad en términos de transporte – por omitir las características de la población. La normalización tiene que ver con aislar las unidades de cada variable para así contribuir una mejor interpretación. El

mapa de la Figura 5-13 toma los resultados anteriores con la finalidad de servir como herramienta de análisis territorial para diagnosticar los lugares más postergados y aventajados. Es decir, con peores y mejores oportunidades de acceder al empleo, según una definición en su sentido amplio del concepto que considera las circunstancias de los habitantes.

En términos de su interpretación, cuando la medición de inequidad de acceso está cercana a uno implica que la zona está en una situación intermedia, según el efecto conjunto de ambas variables (accesibilidad al empleo e ingresos). Esto se caracteriza por el color amarillo en la Figura 5-13. Asimismo cuando el valor es menor a uno (tonalidades de rojo) la situación de la zona es de una accesibilidad deficitaria al empleo, inversamente los azules representan una accesibilidad superior al mismo.

En todos los casos se observa la situación privilegiada del sector oriente para acceder a oportunidades para desarrollarse por medio del empleo con respecto al resto de la ciudad, en particular la periferia sur y poniente. Si bien entre ambas formulaciones del transporte público existen sólo ligeras diferencias, en el modo auto el panorama cambia. Con respecto a las primeras, con el auto la accesibilidad en su sentido amplio mejora según en las inmediaciones de las autopistas que son radiales al centro como Costanera Norte y la Autopista Central. De forma inversa, la accesibilidad en transporte público mejora con respecto a la del auto hacia el sur según sus principales ejes de infraestructura.

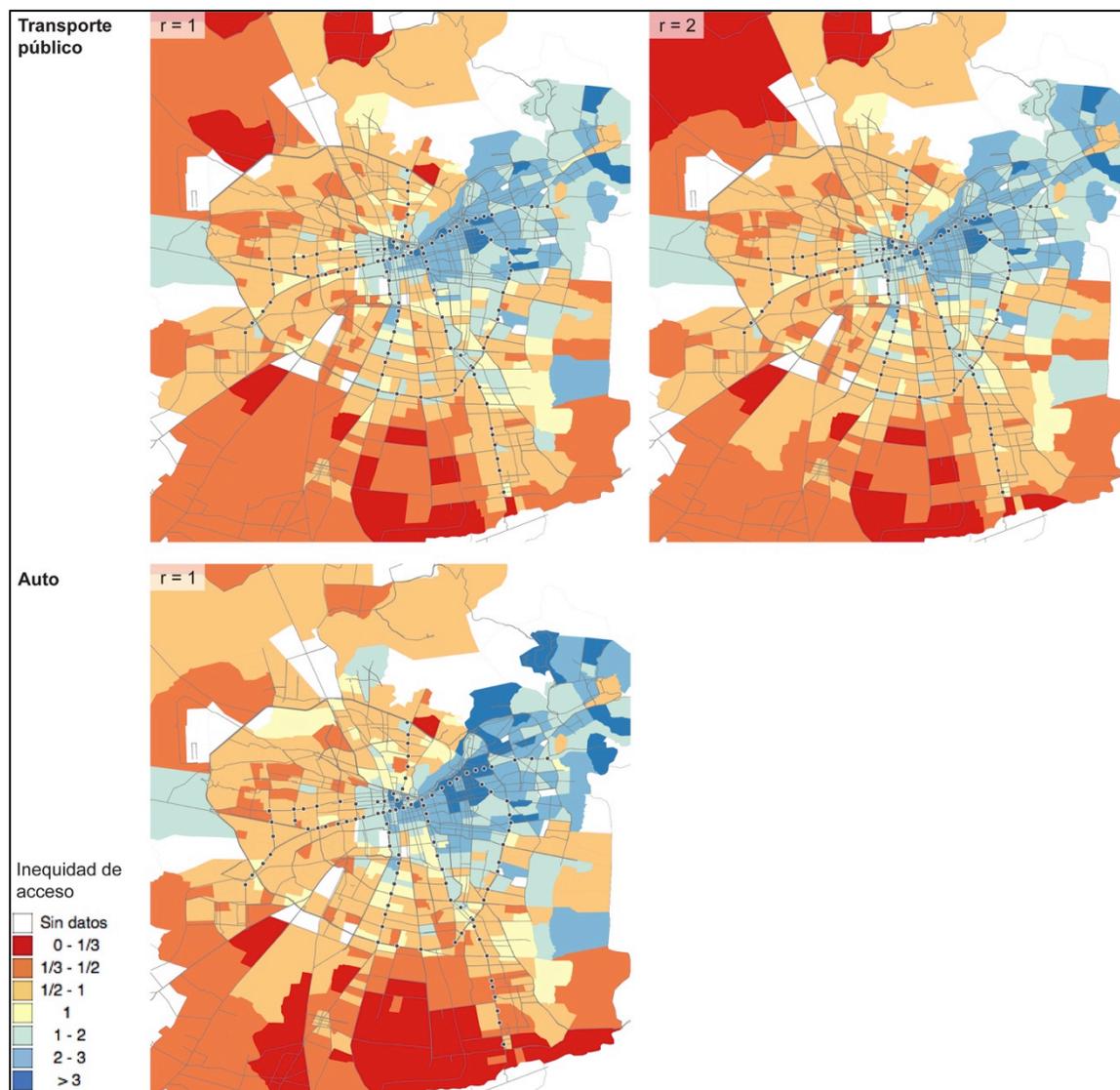


Figura 5-13. Inequidad de acceso al empleo en el Gran Santiago de acuerdo a los resultados de la Base 3 (Tarificación). Fuente: Elaboración propia

Por último, también es posible aplicar Gini a la medición de inequidad de acceso para estudiar ambas variables de manera conjunta, lo cual se resume en la Tabla 5-6. De este ejercicio se verifica y resume una conclusión muy relevante, que fueron intuidas en secciones anteriores. Cuando se mide el efecto conjunto del ingreso con la accesibilidad al empleo, es posible observar que se reporta un nivel de desigualdad superior a la del

ingreso per cápita. Es decir, como las zonas de mayores ingresos al mismo tiempo tienen en general mejor accesibilidad, y viceversa, las diferencias se amplifican.

Tabla 5-6. Gini zonal de la inequidad de acceso al trabajo

Medición	Modo y formulación	Gini
Media zonal de accesibilidad en la Base 3 (2013)	Transporte público (r=1)	0,3468
	Transporte público (r=2)	0,3390
	Auto	0,3874

Fuente: Elaboración propia

Lo anterior sucede en circunstancias en que la política pública, ya sea en cuanto a desarrollo urbano o proyectos de transporte, debiera tender a evitar esta situación. En otros contextos esta amplificación de la desigualdad efectivamente parece no ocurrir. Por ejemplo, en otras ciudades donde los suburbios son de mayores ingresos que las zonas céntricas y cuya vivienda social se construyó en lugares accesibles, la inequidad de acceso al empleo (y otros servicios) se compensa de mejor manera.

5.4.2. Impacto de proyectos según decil de ingreso per cápita

En línea con lo anterior, en el caso de los proyectos de transporte cobra relevancia saber a qué poblaciones se les mejora la conectividad. Por lo mismo, en esta Sección se mide y analizan los aportes de accesibilidad con respecto a cada grupo socio-económico. En lo siguiente se separan los análisis en orden según modo y formulación de accesibilidad, para comparar los méritos en términos de *equidad vertical* de los proyectos según los resultados en cada una. El orden a mantener es primero transporte público con $r=1$ (peso relativo de los tiempos parejo), luego el mismo con $r=2$ (pesos según Precios Sociales) y tercero el modo auto.

A continuación se presentan dos conjuntos diferentes de gráficos, ambos con los resultados según decil de ingreso y en el orden de formulación. Las Figuras 5-14 a 5-16 muestran los cambios de accesibilidad al empleo (ΔAcc) de cada proyecto según su aplicación a poblaciones.

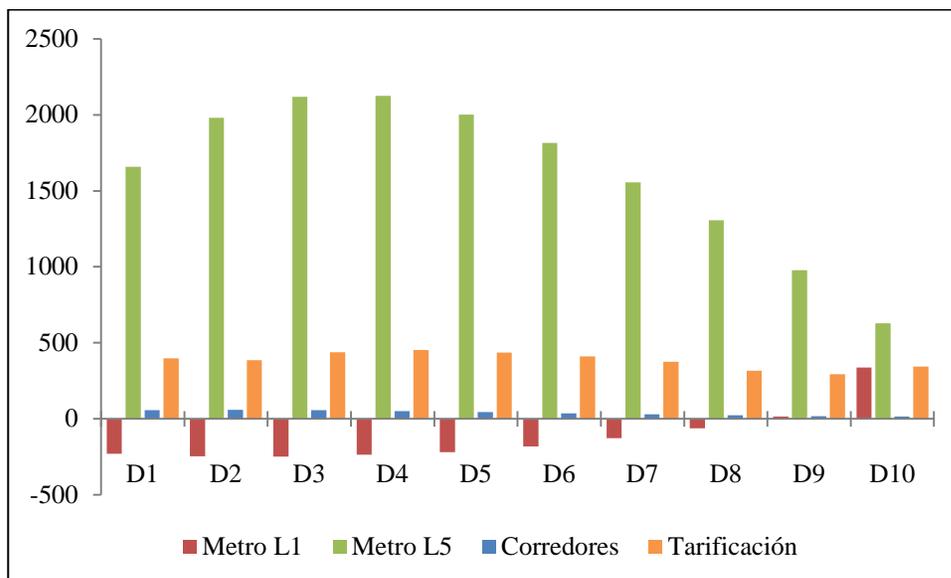


Figura 5-14. Cambio de accesibilidad para cada decil, modo transporte público $r=1$.

Fuente: Elaboración propia.

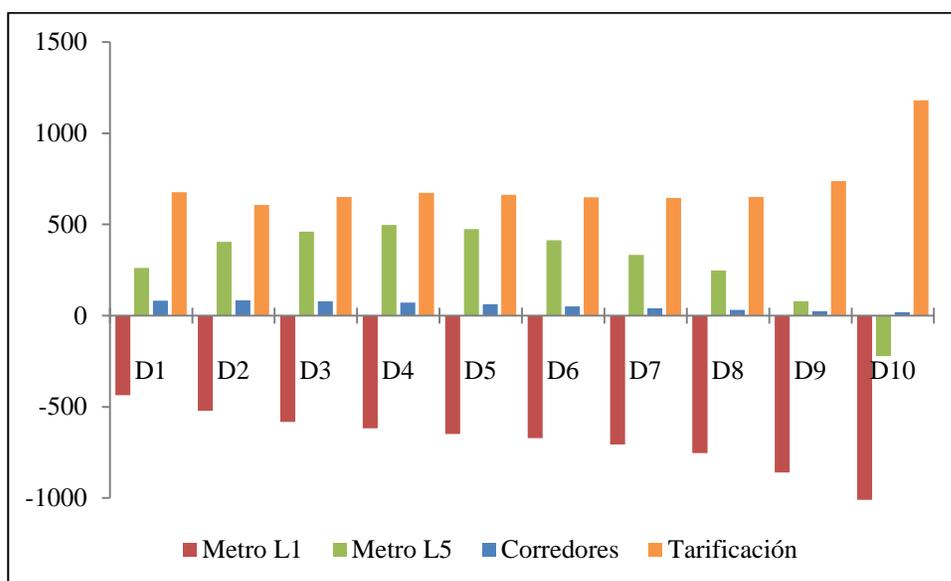


Figura 5-15. Cambio de accesibilidad para cada decil, modo transporte público $r=2$.

Fuente: Elaboración propia.

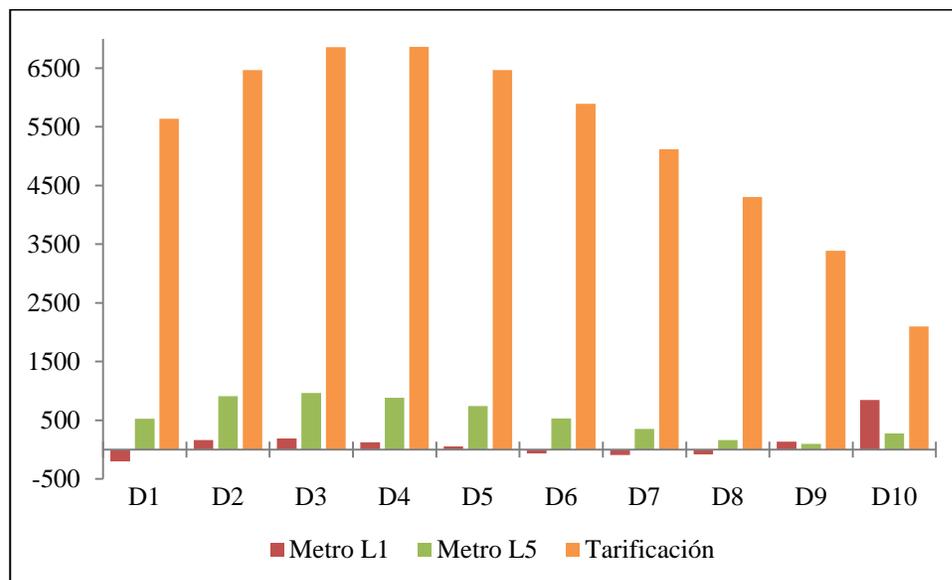


Figura 5-16. Cambio de accesibilidad para cada decil, modo auto.

Fuente: Elaboración propia.

En el conjunto anterior es posible observar tanto la distribución en los deciles como la magnitud de los cambios de accesibilidad por cada proyecto. En ellas es posible analizar visualmente cada componente de manera conjunta, lo cual está íntimamente relacionado al aporte de equidad (AEA) según su primera formulación (Ecuación 3.26). No obstante, en esta Sección interesa sólo su distribución relativa, porque la magnitud de los impactos ya fue analizada en la Tabla 5-3. Luego las Figuras 5-17 a 5-19 presentan el mismo resultado pero como porcentaje, tras normalizar cada columna según el cambio total de accesibilidad por el proyecto. En ellas se visualiza más fácilmente la distribución de los impactos, lo que se relaciona con AEA_2 y AEA_3 de las Ecuaciones 3.27 y 3.28.

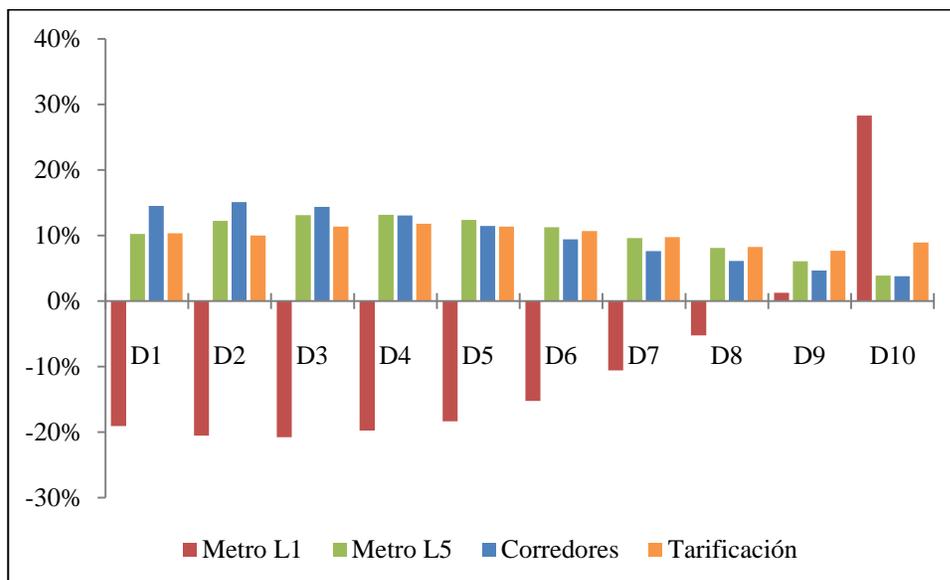


Figura 5-17. Relevancia del cambio de accesibilidad para cada decil, modo transporte público $r=1$. Fuente: Elaboración propia.

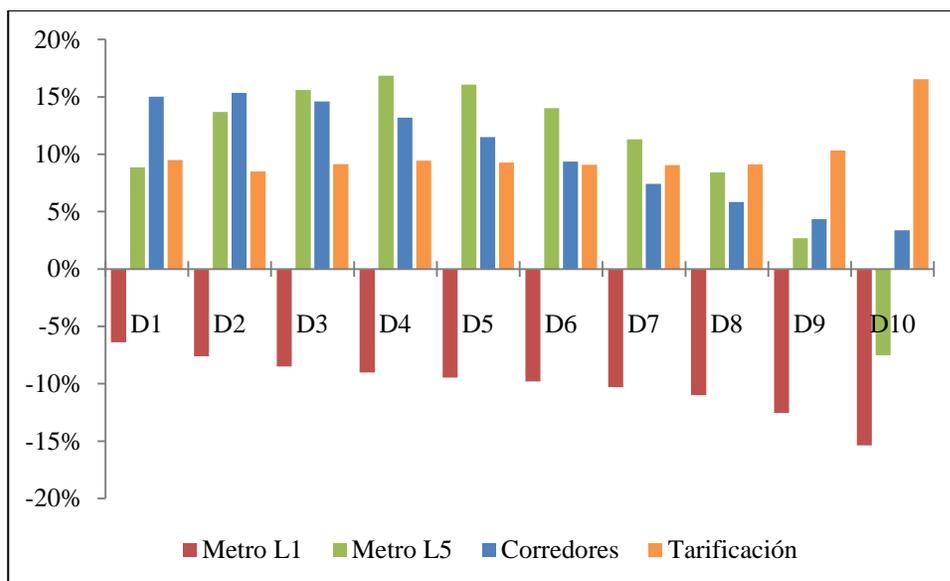


Figura 5-18. Relevancia del cambio de accesibilidad para cada decil, modo transporte público $r=2$. Fuente: Elaboración propia.

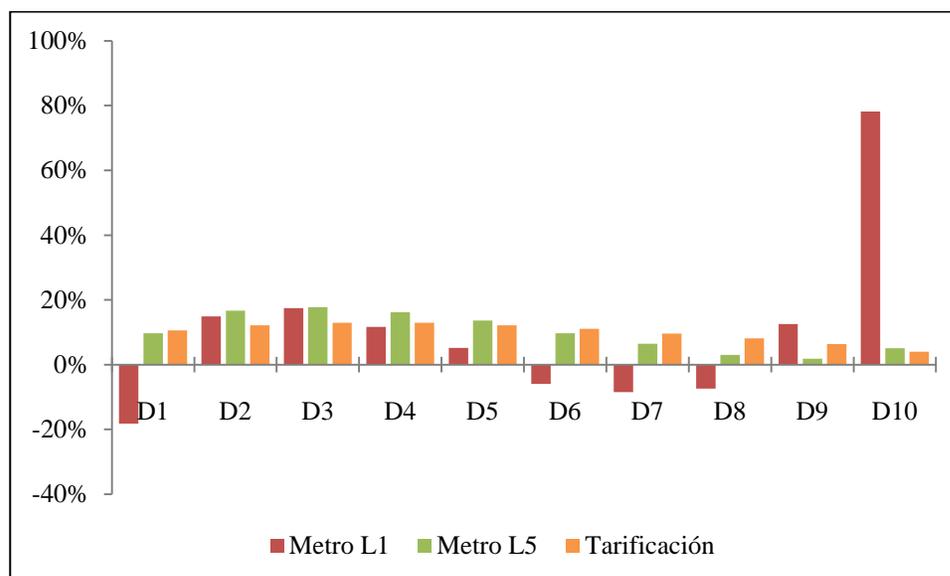


Figura 5-19. Relevancia del cambio de accesibilidad para cada decil, modo auto.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso del modo transporte público con $r=1$ (Figura 5-17), es notable el aporte a una accesibilidad equitativa que realiza el proyecto de extensión de la Línea 5 de Metro, con la mayor parte de sus beneficios en los deciles de bajo ingreso. Una contribución similar sucede con el proyecto de Corredores, en términos de sus incrementos marginales registrados, estos tendieron a ser también mayores donde habita la población de menores ingresos. También la Figura 5-17 los impactos del proyecto de Tarificación Vial son bastante homogéneos en la población. Por el contrario, la extensión de la Línea 1 ocasiona un menoscabo a la equidad que se comprueba en el impacto en cada decil: más negativo a medida que baja el ingreso y positivo sólo en los deciles de mayores ingresos.

Cuando se compara con $r=2$ (Figura 5-18), resalta que tanto en las extensiones de Metro como en los Corredores el impacto de equidad mejora, mientras que en el de Tarificación pasa a menoscabarla levemente. La extensión de la Línea 1 incluso comienza a contribuir a una forma de equidad, en el sentido perjudica más a los deciles de mayores ingresos (relacionado a las anomalías en la simulación mostradas en la Figura 5-6).

Asimismo, en el caso del análisis visual para el modo auto de la Figura 5-19, los proyectos que contribuyen a la equidad en la accesibilidad al empleo son la extensión de la Línea 5 seguido por la Tarifación Vial. Si bien el segundo proporciona mejoras relativas ligeramente menores, cabe recordar que la magnitud de estas es muy superior que el primero o cualquier proyecto (Figura 5-16). Al contrario, el deterioro de la equidad por la extensión Línea 1 se vuelve a repetir. En este caso, se produce porque una gran parte de los cambios son beneficios se concentran sólo en el último decil y existen efectos diversos de menor tamaño en el resto.

5.4.3. Aporte a la Equidad de Acceso de proyectos

A continuación el impacto de cada proyecto es analizado cuantitativamente de acuerdo a diferentes indicadores agregados de su contribución a una accesibilidad equitativa. Los ejercicios anteriores permitieron no sólo mirar su situación inicial o desagregada, además permiten validar los resultados de estos indicadores. Por un lado, se presenta los cambios en el Gini que se asocia al análisis de la Sección 5.4.1. Por otro lado, los indicadores de Aportes a la Equidad de Acceso (AEA) se relacionan a 5.4.2.

En primer lugar, tras aplicar la metodología de medición del Gini tanto en cada situación base como con proyecto, es posible comparar el cambio en el Gini que proporciona cada uno. Esto se resume en la Tabla 5-7 y representa la contribución a la *equidad horizontal*, es decir, dónde se localizan las mejoras de accesibilidad de acuerdo a la distribución inicial de accesibilidad en la ciudad. Esta medición es diferente y complementa lo visualizado anteriormente (pronto a explicitar cuantitativamente en la siguiente Sección).

Cuando el cambio en el Gini es negativo quiere decir que la desigualdad en la distribución de la accesibilidad en la ciudad bajó gracias al proyecto. Por el contrario cuando el cambio en el Gini es positivo quiere decir que los lugares más accesibles mejoraron y/o los menos accesibles empeoraron. En este caso, la extensión de la Línea 1 de Metro apenas aporta *equidad horizontal* en el transporte público, pero la empeora en

el modo auto. El resto de los proyectos sí disminuye la desigualdad de accesibilidad entre las zonas, en particular el de Tarificación para esta disminución es muy importante en el caso del auto.

Tabla 5-7. Cambio en el Gini de cada proyecto según modo y formulación

Modo y formulación	Proyecto	Cambio en Gini zonal
Transporte público (r=1)	1 – Metro-L1	-0,03%
	1 – Metro-L5	-1,01%
	2 – Corredores	-0,17%
	3 – Tarificación	-0,35%
Transporte público (r=2)	1 – Metro-L1	-0,06%
	1 – Metro-L5	-0,49%
	2 – Corredores	-0,21%
	3 – Tarificación	-0,49%
Auto	1 – Metro-L1	1,47%
	1 – Metro-L5	0,64%
	3 – Tarificación	-16,44%

Fuente: Elaboración propia

En segundo lugar, antes de mostrar los resultados de los indicadores AEA corresponde recordar sus respectivas formulaciones, desarrolladas en la Sección 3.4.2. Las tres propuestas de indicadores se resumen en las Ecuaciones (3.26) a (3.28).

$$AEA_1 := \sum_q \frac{\sum_i \Delta Acc_i P_i^q}{\bar{I}^q} \quad (3.26)$$

$$AEA_2 := \left(\sum_q \frac{\sum_i \Delta Acc_i P_i^q}{\bar{I}^q} \right) / \left(\frac{\sum_i \Delta Acc_i P_i}{\bar{I}} \right) \quad (3.27)$$

$$AEA_3 := \left(\sum_q \sum_i \Delta Acc_i P_i^q \frac{\bar{I} - \bar{I}^q}{\bar{I}} \right) / \left(\sum_i \Delta Acc_i P_i \right) \quad (3.28)$$

En tercer lugar, y como elemento final en términos de análisis de proyectos, los indicadores AEA se aplican a cada uno de ellos. Los resultados se resumen en la Tabla 5-8. Para facilitar el entendimiento de los indicadores, se agrega además el caso

hipotético de un proyecto que provoca cierto nivel de mejoras de accesibilidad homogéneas en los grupos socio-económicos, en particular $\sum_i \Delta \text{Acc}_i P_i^q = 1.000$ para cada decil q .

A continuación se analizan los resultados finales de la prueba de concepto de los indicadores de equidad en la Tabla 5-8, a la luz del resto de resultados. Existe diferentes grados de consistencia al contrastar estos indicadores con los análisis visuales de cambios de accesibilidad por decil de la Sección 5.4.2. En primer lugar el AEA_1 presentan resultados que son consistentes con el primer conjunto de Figuras (5-14 a 5-16), donde el valor del indicador depende tanto de la magnitud de los impactos como su distribución en los deciles. Esto sigue el concepto de ponderadores de equidad de los impactos, como en la metodología en U.K. (HM Treasury 2011), que tiene sentido ante todo para una contabilización neta (como en el VAN). Sin embargo, para el análisis de equidad puro la mezcla de efectos de magnitud y distribución oscurece cada componente.

Tabla 5-8. Resultados por proyecto en los indicadores de Aporte a la Equidad de Acceso

Modo	Proyecto	Indicadores		
		AEA_1	AEA_2	AEA_3
Caso hipotético de mejoras iguales ($\sum_i \Delta \text{Acc}_i P_i^q = 1.000$ para cada decil q)		0,076	1,94	-0,02
Transporte público (r=1)	1 – Metro-L1	-0,015	-3,29	-1,34
	1 – Metro-L5	0,137	2,16	0,23
	2 – Corredores	0,004	2,46	0,30
	3 – Tarificación	0,031	2,03	0,05
Transporte público (r=2)	1 – Metro-L1	-0,043	-1,62	0,24
	1 – Metro-L5	0,027	2,32	0,59
	2 – Corredores	0,005	2,50	0,32
	3 – Tarificación	0,051	1,81	-0,21
Auto	1 – Metro-L1	0,001	0,21	-1,93
	1 – Metro-L5	0,050	2,36	0,31
	3 – Tarificación	0,452	2,17	0,22

Fuente: Elaboración propia

De hecho, el valor en el caso hipotético – que es por definición neutro en equidad – supera a varios de los resultados de los tres proyectos que se comprobó que aportan a la equidad, por la magnitud de impacto del primero. Inversamente, el menoscabo a la equidad de la extensión de la Línea 1, en el caso del modo auto se esconde en la magnitud del beneficio al decil superior y el resultado queda neutro.

Por aquella razón, el indicador AEA_2 sigue el mismo enfoque pero realiza una normalización primero según el tamaño del cambio de accesibilidad, además de una segunda respecto al nivel de ingreso medio para evitar una unidad inversa monetaria ($\frac{1}{\$}$).

Con la primera se despeja el impacto de equidad de los proyectos y los resultados se asemejan a lo intuido en las Figuras 5-17 a 5-19. Sin embargo, se descubrió que la consistencia no es plena por un problema con el enfoque de los ponderadores de equidad en presencia de perjuicios en uno o varios de los deciles. Es un problema de cambio de signo, que se reflejó en el valor final esta vez sólo en la extensión de la Línea 1.

En el caso de $r=2$ se había analizado que este proyecto realizaba un aporte positivo a la equidad, porque eran impactos perjudiciales en todos los deciles pero más fuertemente en los de alto ingreso. Como la normalización también es mediante un número en este caso negativo, en la operatoria por deciles se suman valores positivos de estos impactos como si fueran beneficios anti-equidad, en vez de perjuicios pro-equidad. Esto no se resuelve dividiendo por el valor absoluto de la normalización, porque al estar sumando en ese caso valores negativos el indicador igual queda negativo.

Efectos similares ocurren cuando solo algunos deciles tienen perjuicio, porque el efecto en el indicador es perjudicial si se trata tanto de deciles de ingreso bajo (resta relativamente mucho) o alto (resta un poco). Además, en el caso hipotético el valor neutro resulta cercano a 2, lo que dificulta la interpretación y parece un número arbitrario, pero la razón está en los ponderadores empleados que dependen del valor absoluto del ingreso medio de cada decil.

En consecuencia, se decidió cambiar el enfoque de ponderadores de equidad en la propuesta de AEA₃, desde basarlos en el nivel de ingreso absoluto de cada grupo, a hacerlo de forma relativa respecto al ingreso medio de la población (explicado en 3.4.2). Asimismo, se mantiene la misma normalización de magnitud de cambio de accesibilidad y una análoga en términos de unidad monetaria. De esta manera, el indicador refleja la contribución a la equidad de cada proyecto en plena consistencia con los impactos de accesibilidad de cada decil (Figuras 5-17 a 5-19).

Los elementos anteriores hacen a AEA₃ la propuesta final de indicador recomendado por esta investigación para medir el impacto de proyectos en la *equidad vertical*. Resalta su capacidad de reflejar fielmente si los beneficios son diluidos (valor cercano a 0) o se concentran en grupos de menores ingresos (valor positivo) o mayores ingresos (valor negativo). Y viceversa en presencia de perjuicios, junto a considerar impactos mixtos. Si bien se debe tener cuidado en no asociar a su resultado la importancia del proyecto – como en el caso del proyecto Corredores que los impactos eran despreciables – esta dimensión de magnitud se recoge en el resultado global del cambio de accesibilidad. Como se comprueba en la Tabla 5-3, la magnitud de impactos del proyecto también se recoge en la metodología tradicional de ahorro de costos, por lo que la obtención de AEA₃ basta para complementarla profundamente.

6. CONCLUSIONES

El ámbito de la planificación urbana requiere de diversas fuentes de información y herramientas, a fin de realizar análisis multidimensionales respecto a sistemas tan complejos como una ciudad. En particular, desde el punto de vista del transporte, existe una gran cantidad de interacciones entre la demanda de viajes (bienes cuasi-únicos) y la oferta representada en redes. En el caso de la evaluación de políticas y proyectos, cualquier cambio relevante en la demanda u oferta genera una gran diversidad de efectos que deben ser estudiados. La complejidad del análisis anterior se incrementa por un contexto territorial de dimensiones económicas y sociales, reflejadas en el desarrollo urbano a corto y largo plazo.

Por lo mismo se recurre a simplificaciones, indicadores y modelos para concentrarse en estimar los escenarios o impactos más relevantes. Si bien esto se ha realizado con relativo éxito, existe una deuda en la disciplina del transporte respecto al análisis territorial y de equidad de los efectos de la movilidad. Como se argumentó en esta investigación, esta falencia es importante en el caso de Chile, debido al contexto de alta desigualdad y segregación de ingreso presente en sus ciudades. En particular, se observó que la localización de oportunidades como la de empleo empeora la situación de inequidad en su acceso de las personas para desarrollarse.

Existe el desafío de mejorar la planificación urbana con herramientas que orienten un desarrollo urbano más equitativo. A lo largo de este trabajo de tesis se desarrollaron diferentes metodologías para estudiar la accesibilidad y la equidad en relación con el transporte. Por un lado se construyó una herramienta de accesibilidad para facilitar el análisis territorial, por otro lado se propusieron indicadores de aporte a la equidad. Los métodos fueron aplicados y analizados en profundidad en el caso de Santiago de Chile según variados proyectos de transporte urbano.

En cada etapa metodológica es posible identificar aportes tanto científicos como prácticos al área de planificación de transporte. La Sección 6.1 resume lo desarrollado en

esta tesis, poniéndolo en valor en relación con su posible contribución a la planificación urbana y la evaluación social de proyectos. Luego, en 6.2 se comentan conceptos similares en una aplicación simplificada de acuerdo a la metodología de ahorro de costos, además de otras posibles aplicaciones a explorar. Por último, la Sección 6.3 propone caminos de investigación a partir de los elementos que corresponde seguir profundizando o que presentan alternativas.

6.1. Contribuciones en el contexto de la evaluación social de proyectos

La investigación desarrollada en capítulos anteriores presenta algunas innovaciones en el ámbito teórico, en particular a lo largo del Capítulo 3. En primer lugar, se desarrolla la temática de equidad en el transporte con respecto a economías de aglomeración y patrones de viaje frente a cambios de accesibilidad. Se argumentó que a través de ambos efectos se podría estar contribuyendo a *sesgos de largo plazo* que deben ser de alguna manera remediados. En una línea similar, mediante la aplicación y revisión teórica con una mirada crítica se encontraron razones relevantes para *evitar el uso de accesibilidad utilitaria basada en factores de balance*, que profundiza la literatura al respecto y ayuda a explicar por qué estas han tenido bajo uso.

Segundo, se profundizó el concepto de *accesibilidad potencial*, tanto en su derivación y relación con la accesibilidad utilitaria basada en factores de balance, como sus ventajas frente a la última. En ese sentido, se aportó un método para *calibrar su parámetro de sensibilidad* a los costos, el cual es estandarizable, adaptable al contexto de cada ciudad y permite mejor interpretación y comparación. Asimismo, la comparación con diferentes formulaciones y entre fuentes de datos, adaptadas al contexto propio, aportó elementos que fundamentan el uso de la formulación elegida, lo cual aún no ha sido zanjado en la literatura.

En tercer lugar, una innovación principal tiene que ver con *coincidir metodologías de accesibilidad simulada con la de poblaciones sintéticas* para mejorar el análisis de

equidad. La contribución permite análisis más detallados, lo cual fue aprovechado en la proposición de indicadores de aporte a la equidad para la evaluación de proyectos.

Esta tesis también realiza aportes que podrían ser importantes en la práctica de la disciplina. Tanto la medición de accesibilidad como indicadores de aporte a la equidad pueden *contribuir a afinar diseños, priorizar proyectos y mejorar la planificación* con análisis más profundos. De hecho, lo realizado en la aplicación a proyectos (Capítulo 5) refleja el tipo de ejercicios que a futuro podría replicarse con una metodología similar respecto a proyectos en evaluación. La Figura 6-1 reúne diferentes elementos desarrollados en esta tesis, que se destacan según su potencial aporte en diferentes etapas en del proceso de planificación de transporte. Asimismo, menciona la posibilidad de fomentar una planificación más integrada, poniendo énfasis también a la localización de las oportunidades además de la mirada de equidad.

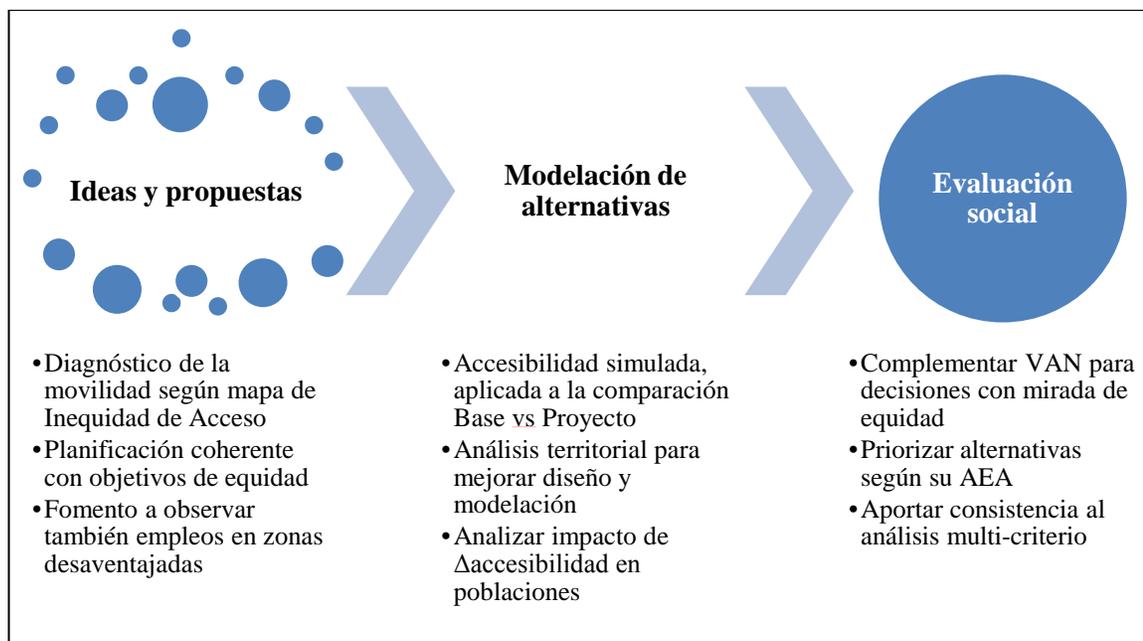


Figura 6-1. Posibles contribuciones de las metodologías de análisis propuestas en la planificación urbana. Fuente: Elaboración propia.

Para la práctica las contribuciones se pueden resumir en dos dimensiones. En ambos casos aporta la herramienta EquiAccess desarrollada a lo largo de esta tesis. Por un lado, se encuentra el valor propio del *análisis territorial* mediante las herramientas desarrolladas. Este aporta tanto en diagnosticar la ciudad para mejorar la planificación como en *visualizar los impactos de proyectos* para un mejor diseño y modelación de los mismos. Lo anterior incluye la posibilidad de detectar más fácilmente errores o efectos no deseados para *corregir una simulación*. Además, se verificó que en Chile los barrios de mayor vulnerabilidad tienen peor accesibilidad al empleo, lo que profundiza una desigualdad que inhibe el desarrollo de sus habitantes. Ambos elementos se traducen en una doble barrera para acceder a estas oportunidades, lo cual se puede representar en el *mapa de inequidad* propuesto que incorpora como aproximación la variable de ingreso.

Por otro lado, se encuentra el valor del *análisis distributivo* a partir de los cambios de accesibilidad producto de proyectos. En primer lugar, se recomienda fomentar una mirada de los *impactos por cuantil de ingreso per cápita* durante la modelación de alternativas. En segundo lugar, los denominados indicadores de Aporte a la Equidad de Acceso (AEA) podrían complementar la priorización de proyectos de manera cuantitativa, donde se favorecen los impactos a cuantiles de menores ingresos. En particular, *este trabajo recomienda el AEA₃*, que aporta una medición consistente de aporte a la equidad vertical y de fácil interpretación. Lo anterior apoyaría un mejor diseño de proyectos y posteriormente complementar la priorización de proyectos.

En ese sentido, retomando la temática revisada en la literatura, los AEA son medidas cuantitativas y estandarizables que podría aportar a un *análisis multi-criterio (MCA) más robusto*, que complemente los tradicionales VAN y TIR social. En particular aportaría en darle consistencia por el lado de equidad, resaltándola de una forma compatible con variables del análisis costo-beneficio (CBA). Esta investigación recomienda implementar algo similar al AEA₃ en las metodologías del MCA, en paralelo a avances en el CBA que podrían estudiarse (Sección 6.2).

Como ejemplo de la aplicación del conjunto de herramientas anteriores, se podría pensar en qué pasaría con proyectos que obtienen un bajo rendimiento (como la extensión de la Línea 1 de Metro). Posiblemente los resultados fomenten elegir alternativas más equitativas de proyecto, aunque más probablemente podrían contribuir a diseñar mejoras a los mismos. Por ejemplo, resolver problemas con los servicios de buses modificados o que se sobrecargaron. En una mirada más amplia, también compensar mediante un mejor estándar en las estaciones de la extensión de la Línea 5 – en vez de haberlo hecho en la 1 – ajustando los niveles de inversión entre ambos proyectos. En el último caso, una accesibilidad más equitativa a oportunidades refuerza por ejemplo pensar en dotar de más equipamientos urbanos las nuevas estaciones en barrios más vulnerables, aportándoles calidad de vida.

6.2. Otras aplicaciones que derivan de la propuesta

En primer lugar las herramientas anteriores se podrían aplicar de manera simplificada desde la metodología tradicional. Si bien se omitiría el importante valor de la accesibilidad como medida apropiada en términos de equidad, la implementación sería más directa y sencilla. A lo largo de la tesis se comprobó el enorme interés y aporte en diversos ámbitos de observar la distribución de los impactos de los proyectos en dos dimensiones, tanto en el territorio (Figuras 5-5 a 5-8) como en los cuantiles de ingreso (Figuras 5-14 a 5-19). Llama la atención por qué esto no se realiza, por un lado, en la práctica de la disciplina en cuanto a la evaluación social de proyectos. Por ejemplo, en ninguno de los proyectos revisados – que son alrededor del doble de los que efectivamente se obtuvo datos – se encontraron análisis siquiera similares según el ahorro de costos. Esto se entiende cuando en general estos tipos de análisis no se enseñan.

Por otro lado, tampoco es promovido ni guiado en los instructivos metodológicos oficiales o en las herramientas de los modelos en uso. Por ejemplo, en el entorno ESTRAUS no existe un utilitario que entregue una desagregación territorial de los

impactos en los costos medios zonales, de acuerdo a los vectores de viajes. Tampoco en sus reporte de indicadores se separan los efectos por grupo-socioeconómico en el caso del transporte público. En el caso del auto sólo lo explicita la versión más reciente por un tema de asignación – y se hizo para el proyecto de Tarificación – donde de todas formas no existe un utilitario que facilite la comparación.

La combinación de los elementos anteriores deja a los análisis de equidad en el peor de los escenarios: no se ha enseñado a los especialistas ni tampoco se promueve desde los mandantes, al mismo tiempo que su aplicación requiere de definiciones subjetivas y bastante trabajo manual. Por lo mismo fue que esta tesis se enfocó en sacar adelante una propuesta metodológica completa al respecto, para comenzar un camino consistente más que enfocarse en discutir cada definición en particular. Si bien se recomienda implementar la medida de accesibilidad y el uso de poblaciones para un mejor análisis en términos de equidad y largo plazo, también es posible aplicar las herramientas simplemente en los ahorros de costos y sus viajes.

En segundo lugar, lo analizado respecto a los ponderadores de equidad – implementados en las metodologías de evaluación de U.K. – podría ser investigado para el CBA chileno. Funcionan multiplicando los beneficios monetarios a cada cuantil de ingreso atenuando los impactos en los de alto ingreso y amplificando en los de bajo ingreso. Si bien el concepto es sencillo, lo complejo está en que se requiere de voluntad política para realizar un cambio fundamental en la metodología tradicional. También debe ir acompañado de introducir y estandarizar los cuantiles en los modelos, para evitar arbitrariedades en el cálculo de beneficios. Asimismo está el desafío de calibrar los ponderadores según la utilidad marginal del consumo de cada uno y mantener su actualización.

Por último, a las ventajas del análisis territorial de la Sección 6.1 también se le puede sumar el potencial de utilizar sus visualizaciones para facilitar la participación ciudadana en el marco de la planificación. Existen varios ejemplos en Chile en los que una inadecuada comunicación con la comunidad ha desembocado en retrasos o costos

adicionales en los proyectos. La contribución está en que los vecinos pueden entender de mejor manera los proyectos y los beneficios que les podrían traer. Ejemplos de esta aplicación se pueden leer en el trabajo de Stewart y Zegras (2015) o Stewart (2014), cuya herramienta CoAXs muestra cambios de accesibilidad de forma instantánea y amigable para reuniones de participación.

6.3. Caminos de investigación

Entre los caminos de investigación, por un lado, están los elementos que se podrían mejorar, ampliar o profundizar en las metodologías desarrolladas. Como comentario general, para la implementación es necesario agregar a la investigación una mirada de política pública que estandarice ciertos elementos. La siguiente lista se identifican temáticas que se podrían continuar:

- Aplicar la medida de accesibilidad a más tipos de oportunidades, o a un set de oportunidades generalizado, en conjunto con diferentes periodos de simulación. Se requerirá proponer formas adecuadas de agregación de estas medidas.
- En línea con una planificación urbana integrada, estudiar cambios de accesibilidad también producto de alteraciones en las oportunidades, además de proponer metodologías para afectarlas.
- Estudiar la incorporación de variables para medir la calidad del empleo y ponderar también de acuerdo a esto. Tener consideración por la falencia de datos en este sentido, con respecto a aplicaciones como la de Cervero et al. (1999).
- Trabajar en la agregación y desagregación de datos y resultados en el territorio, para hacer compatibles las zonificaciones de mejor manera. Explorar potencialidades de la interpolación (i.e. krigeaje)
- Profundizar la generación de poblaciones sintéticas con una metodología multivariable. Por ejemplo, simular – aparte del ingreso – también el tamaño y cantidad de hogares por zona.

- Investigar la pertinencia del uso de la medida de accesibilidad propuesta para alimentar modelos de uso de suelo, como por ejemplo MUSSA en Santiago (Martínez, 1996).
- Comparar indicadores como los de Aporte a la Equidad de Acceso con más alternativas, como por ejemplo índices de disimilaridad o aislación.

Por otro lado, durante la tesis también se caviló respecto a extensiones metodológicas o temáticas alternativas como nuevos caminos de investigación, los cuales se pueden apoyar en el trabajo desarrollado. En primer lugar está estudiar el fenómeno de gentrificación por cambios de accesibilidad en el territorio, es decir, si existe migración de personas de relativo mayor ingreso a lugares revitalizados por proyectos de transporte. Lo anterior va acompañado con cambios en el mercado urbano que podrían evitar el beneficio a las poblaciones a las que se tenía la intención de favorecer. De encontrar la relación en el encuentro chileno y cuándo esta ocurre, las herramientas construidas en esta tesis podrían ayudar a anticiparla y estimar sus efectos.

En segundo lugar, de manera similar a la temática anterior, los cambios de accesibilidad relevantes generalmente ocasionan economías de aglomeración en las ciudades (Graham, 2007), lo cual impacta económicamente el mercado urbano (Macário, 2014). La conexión entre ambos efectos podría ser analizada por herramientas como la desarrollada. La literatura ya ha abordado como hacerlo y también existe *software* especializado que realiza sus estimaciones, como por ejemplo el análisis de impacto económico de TREDIS principalmente en Estados Unidos (Weisbrod et al. 2015).

Tercero, si a ambos elementos anteriores se suma el objetivo de estimar el valor del cambio de accesibilidad en sí, sería posible comenzar a estimar un valor social de la accesibilidad. Este aún no ha sido calculado y su búsqueda presenta múltiples complejidades. Un cuarto nuevo camino de investigación es de alto costo pero podría ayudar en las temáticas anteriores, y es la realización de evaluaciones ex-post de proyectos ya implementados para descubrir sus impactos reales en un sentido más amplio.

BIBLIOGRAFÍA

Browne D. y Ryan L. (2011) Comparative analysis of evaluation techniques for transport policies. *Environmental Impact Assessment Review* 31, 226-233.

Bruun E. y Givoni M. (2015) Six research routes to steer transport policy. *Nature*, 523, 29-31.

Cervero R., Rood T., y Appleyard B. (1999) Tracking accessibility: Employment and housing opportunities in the San Francisco Bay Area. *Environment and Planning A*, 31(7), 1259-1278.

Cowell F.A. y Gardiner K. (1999) *Welfare Weights*. STICERD, London School of Economics.

De Cea J., Fernández E., Dekock V. y Soto, A. (2005) Solving network equilibrium problems on multimodal urban transportation networks with multiple user classes. *Transport Reviews*, 25(3), 293-317.

Delbosc A. y Currie G. (2011) Using Lorenz curves to assess public transport equity. *Journal of Transport Geography*, 19, 1252–1259.

Dix M. (2015) Transport for London and the Crossrail 2 project. *International Conference Series on Competition and Ownership in Land Passenger Transport (Thredbo)*. Santiago, Chile, August 29 – September 4, 2015.

Farooq B., Bierlaire M., Hurtubia R., y Flötteröd G. (2013). Simulation based population synthesis. *Transportation Research Part B: Methodological*, 58, 243-263.

Farooq B., Hurtubia, R. y Bierlaire, M. (2015). Simulation based generation of a synthetic population for Brussels, in M. Bierlaire, A. de Palma, R. Hurtubia and P. Waddell (Eds.), *Integrated Transport and Land Use Modeling for Sustainable Cities*, EPFL Press / Routledge.

- Gálvez T.E. y Jara-Díaz S.R. (1998) On the social valuation of travel time savings. *International Journal of Transport Economics*, 25(2), 205-219.
- Geurs K.T y van Wee, B. (2004) Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12, 127-140.
- Gini C.W. (1912) Variability and mutability, contribution to the study of statistical distributions and relations. *Studi Economico-Giuricici della R. Università de Cagliari*.
- Graham D.J. (2007) Agglomeration, productivity and transport investment. *Journal of Transport Economics and Policy*, 41(3), 317-343.
- Handy S.L. y Niemeier D.A. (1997) Measuring accessibility: an exploration of issues and alternatives. *Environment and Planning A*, 29, 1175-1194.
- Hansen W.G. (1959) How accessibility shapes land use. *Journal of the American Institute of Planners*, 25(2), 73-76.
- Her Majesty Treasury (2011) *The Green Book: Appraisal and Evaluation in the Central Government*. TSO, Londres.
- Hurtubia R. (2014) Un indicador de accesibilidad para evaluar la localización de proyectos de vivienda social. *International Conference Uneven Mobilities Conference*. Santiago, Chile. October 13-15, 2014.
- Jara-Díaz S.R. (2001) *Transport economic theory*. Emerald Group, Bingley.
- Laird J. (2010) Transport welfare benefits in the presence of an income effect. En S. Hess y A.J. Daly (eds.) *Choice modelling: The state-of-the-art and the state-of-practice*. Emerald Group, Bingley.
- Lakshmanan T.R. (2011) The broader economic consequences of transport infrastructure investments. *Journal of Transport Geography*, 19, 1-12.
- Litman T. (2007) *Evaluating transportation equity: Guidance for incorporating distributional impacts in transportation planning*. Victoria Transport Policy Institute.

Lorenz M.O. (1905) Methods of measuring the concentration of wealth. *Publications of the American Statistical Association*, 9, 209-219.

Macário R. (2014) Access as a social good and as an economic good: is there a need of paradigm shift? In Sclar, E.D., Lönnroth, M. and Wolmar, C. (Eds.), *Urban Access for the 21st Century: Finance and Governance Models for Transport Infrastructure* (87-115). Routledge, Taylor & Francis Group, New York.

Mackie P.J., Jara-Díaz S. y Fowkes A.S. (2001) The value of travel time savings in evaluation. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 38(2), 91-106.

Mackie P., Worsley T. y Eliasson, J. (2014) Transport appraisal revisited. *Research in Transportation Economics*, 47, 3-18.

Martens K., Golub A. y Robinson G. (2012) A justice-theoretic approach to the distribution of transportation benefits: Implications for transportation planning practice in the United States. *Transportation Research Part A*, 46, 684-695.

Martínez F. (1995) Access: The transport-land use economic link. *Transportation Research Part B: Methodological*, 29(6), 457-470.

Martínez F. (1996) MUSSA: land use model for Santiago city. *Transportation Research Record*, 1552, 126-134.

Martínez F. y Araya C. (2000) Transport and Land Use Benefits under Location Externalities. *Environment and Planning A*, 32(9), 1611-1624.

MDS - Ministerio de Desarrollo Social (2016) Precios sociales vigentes. Gobierno de Chile, Santiago.

MDS - Ministerio de Desarrollo Social (2015) Base de datos CASEN 2013. Gobierno de Chile, Santiago.

Metz D. (2008) The myth of travel time savings. *Transport Reviews*, 28(3), 321-336.

Mulley C. y Walters, J. (2014) Thredbo Workshop 7 Report: Innovative finance for innovative public transport. *Research in Transportation Economics*, 48, 389-392.

Muñoz J.C. (2014) Congestión en el sector oriente. *Cartas al Director*, El Mercurio. Accedido el 3 de abril de 2016 en <http://www.elmercurio.com/blogs/2014/04/02/20746/Congestion-en-el-sector-oriente.aspx>

Neuberger H. (1971) User benefits in the evaluation of transport and land-use plans. *Journal of Transport Geography*, 5(1), 52-75.

Niehaus M., Galilea P. y Hurtubia, R. (en imprenta) Accessibility and equity: An approach for wider transport project assessment in Chile. *Research in Transportation Economics*.

NIST (2012) Anderson-Darling Test. En *e-Handbook of Statistical Methods*, U.S. Department of Commerce. Accedido por última vez el 12 de febrero de 2016 en <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3/eda35e.htm>

OCDE (2014) *Society at a Glance: OECD social indicators*. Accedido por última vez el 20 de abril de 2016 en <http://www.oecd.org/els/soc/OECD2014-SocietyAtAGlance2014.pdf>

Ortúzar J.d.D. y Willumsen, L.G. (2011) *Modelling transport* (4th edition). John Wiley & Sons, West Sussex.

Pacheco J.F. y Contreras E. (2008) *Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos*. CEPAL – Serie Manuales N°58. Naciones Unidas, Santiago, Chile.

QGIS Development Team (2015) *Quantum Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>

R Core Team (2012). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>

- Rawls, J. (1971) *A Theory of Justice*. Harvard University Press, Cambridge.
- Razmilic S. (2015) *Subsidio al arriendo: primeros resultados y pasos a seguir*. Propuestas de Política Pública 6 marzo. Centro de Estudios Públicos, Santiago.
- Reyes S. y Figueroa I.M (2010) *Distribución, superficie y accesibilidad de las áreas verdes en Santiago de Chile*. EURE 36(109), pp. 89-110.
- Rizzi L.I. y Steimetz S.S.C. (2014) *On using standard values of time in project appraisal: Income equity vs. preference equity*. Documento de Trabajo, Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, Pontificia universidad Católica de Chile.
- Sabatini F., Wormald G., Sierralta C. y Peters P.A. (2009) *Residential Segregation in Santiago: Scale-related effects and trends, 1992-2002*. En B.R. Roberts y R.H. Wilson (eds.), *Urban segregation and governance in the Americas* (pp. 121-143). Palgrave Macmillan, Londres.
- SECTRA (2003) *Actualización de encuestas origen y destino de viajes, V Etapa*. Reporte por Departamento de Ingeniería de Transporte UC. Santiago: Biblioteca de SECTRA.
- SECTRA (2005) *Análisis y modernización transporte público, VII etapa, orden de trabajo 3*. Reporte por Fernández y De Cea Ingenieros. Santiago: Biblioteca de SECTRA.
- SECTRA (2008) *Anexo 5: Metodología de cálculo de las medidas de acceso. Análisis, desarrollo y evaluación de proyectos urbanos, III Etapa. Efectos urbanos futuros en Santiago EFFUS*. Reporte por Labtus, Universidad de Chile.
- SECTRA (2011) *Evaluación social programa n°3 del Plan Maestro de Infraestructura 2010-2015*. Resumen ejecutivo en SECTRA.
- SECTRA (2013) *Estudio de tarificación vial por congestión II etapa*. Reporte por Steer Davies Gleave. Santiago: Biblioteca de SECTRA.

SECTRA (2014) Corridos base, Estación Mapocho y Quinta Normal de trenes de cercanía. Modelado por EFE.

SECTRA (2015) Actualización y recolección de información del sistema de transporte urbano, IX Etapa: Encuesta Origen Destino Santiago 2012. Reporte por Observatorio Social, Universidad Alberto Hurtado. Santiago: Biblioteca de SECTRA.

Seremi del Medio Ambiente (2016) Depósitos clandestinos de la Región Metropolitana. En noticia de La Tercera, accedido el 12 de abril de 2016 en <http://papeldigital.info/lt/2016/04/12/01/paginas/020.pdf>

SII (2014) Base de datos: Catastro de roles de Santiago 2013. Santiago: Transparencia del Servicio de Impuestos Internos.

Stan Development Team (2015) The R interface to Stan. Accedido por última vez el 15 de diciembre de 2015 en <http://mc-stan.org/interfaces/rstan>

Stanley J.K., Hensher D.A., Stanley J.R. y Vella-Brodick (2011) Mobility, social exclusion and well-being: Exploring the links. *Transport Research Part A*, 45, 789-801.

StataCorp (2011) Stata Statistical Software: Release 12. College Station, TX: StataCorp LP.

Stephens M.A. (1974). EDF Statistics for Goodness of Fit and Some Comparisons, *Journal of the American Statistical Association*, 69, pp. 730-737.

Stewart A.F. (2014) Visualizing urban accessibility metrics for incremental Bus Rapid Transit projects. Thesis for the Master of Science in Transportation and Master in City Planning at Massachusetts Institute of Technology.

Stewart A.F. y Zegras C. (2015) CoAXs: interactive mapping for measuring and communicating transit's accessibility impacts to support co-creative planning. International Conference Series on Competition and Ownership in Land Passenger Transport (Thredbo). Santiago, Chile, August 29 – September 4, 2015.

Shirahige, M., Correa, J. (2015) La desigualdad en el acceso al transporte público en el área metropolitana de Santiago: Análisis mediante la aplicación del modelo PTAL en campamentos y villas de blocks. *Revista CIS*, 18, 55-88.

Tanzi V. (2005) Building regional infrastructure in Latin America. Inter-American Development Bank, INTAL-ITD, working paper SITI nr 10.

Tressidier J.O., Meyers D.A., Burrell J.E. y Powell T.J. (1968) The London transportation study: Methods and techniques. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers* 39, 357-379.

World Bank (2011) Datos: Índice de Gini. Accedido por última vez el 20 de abril de 2016 en <http://data.worldbank.org/indicator/SI.POV.GINI>

Thomopoulos N., Grant-Muller S. y Tight, M.R. (2009) Incorporating equity considerations in transport infrastructure evaluation: Current practice and a proposed methodology. *Evaluation and Program Planning*, 32, 351-359.

Tudela A., Akiki N. y Cisternas R. (2006) Comparing the output of cost-benefit and multi-criteria analyses: an application to urban transport investments. *Transportation Research Part A*, 40(5), 414-423.

Van Wee B. y Geurs K. (2011) Discussing equity and social exclusion in accessibility evaluations. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 11(4).

Vasconcellos E.A. (2011) Equity evaluation of urban transport. En Dimitriou, T. and Gakenheimer, R. (eds.) *Urban Transport in the Developing World: A Handbook of Policy and Practice* (Capítulo 12). Edward Elgar Publishing, London.

Wallace C.S. (2004) Inductive Inference. In C.S. Wallace (ed.) *Statistical and inductive inference by minimum message length* (Capítulo 1). Springer, New York.

Weisbrod G., Mulley C. y Hensher D. (2015) Recognising the complementary contributions of cost benefit analysis and economic impact analysis to an understanding of the worth of public transport investment: A case study of bus rapid transit in Sydney,

Australia. International Conference Series on Competition and Ownership in Land Passenger Transport (Thredbo). Santiago, Chile, August 29 – September 4, 2015.

Williams H.C.W.L. (1976) Travel demand models, duality relations and user benefit analysis. *Journal of Regional Science*, 16(2), 147-165.

Williams H.C.W.L y Senior M.L. (1978) Accessibility, spatial interaction and the spatial benefit analysis of land use – transportation plans. In A. Karlqvist, L. Lundqvist, F. Snickars, J.W. Weibull (Eds.) *Spatial interaction theory and planning models*. Elsevier North-Holland, Amsterdam, 253-287.

Wilson A.G. (1967) A statistical theory of spatial distribution models. *Transportation Research* 1, 253-269.

ANEXOS

A. ACCESIBILIDAD UTILITARIA SEGÚN FACTORES DE BALANCE

Como se explicó a lo largo de la Sección 3.2, la aplicación de una medida de accesibilidad utilitaria desde factores de balance según un modelo doblemente acotado presentó problemas de incompletitud e inconsistencia, además de desventajas en interpretación, compatibilidad y criterios de equidad. Esto se presenta también visualmente en los mapas de las Figuras A-1, A-2 y A-3, que representan la accesibilidad según esta fuente de datos para tres de las trece categorías de usuario del modelo ESTRAUS. En particular, es posible apreciar la incompletitud de los pares origen-destino, lo cual resulta en una mayoría de las zonas de origen sin datos (color amarillo), además de la ausencia de un patrón de acuerdo a los costos de viaje producto. Esta incoherencia se debe a la indeterminación de los factores de balance por el modelo doblemente acotado.

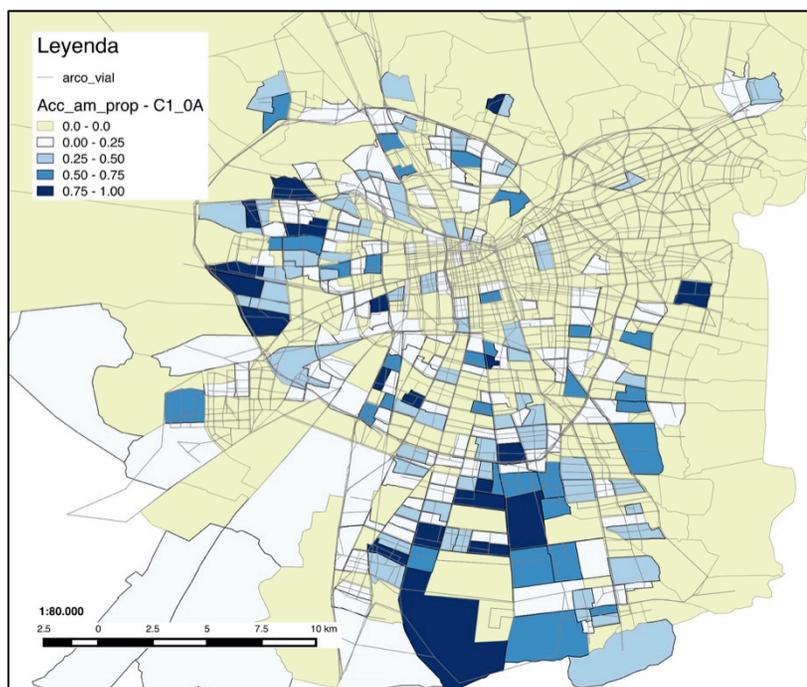


Figura A-1. Accesibilidad según factores de balance, categoría de ingreso 1 sin auto.

Fuente: Elaboración propia

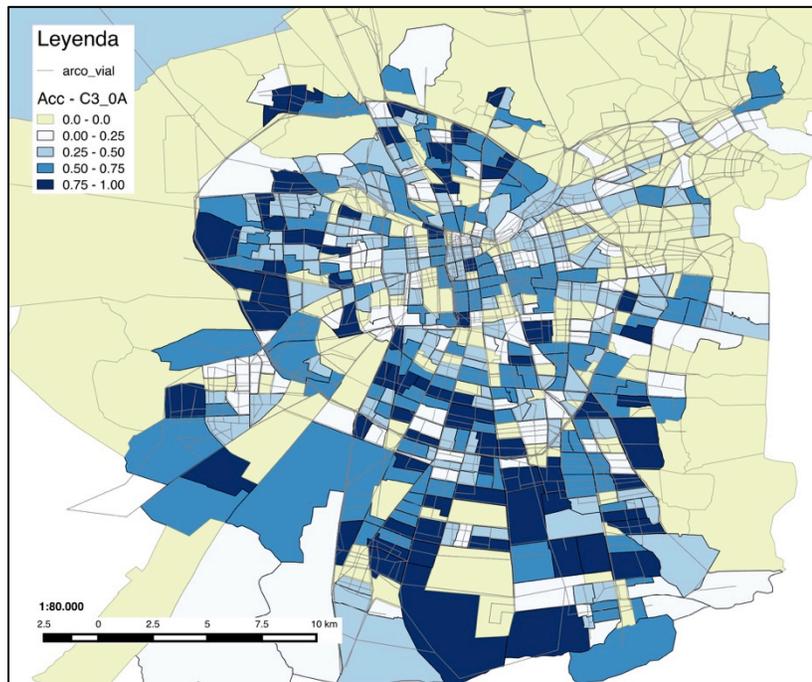


Figura A-2. Accesibilidad según factores de balance, categoría de ingreso 3 sin auto.

Fuente: Elaboración propia

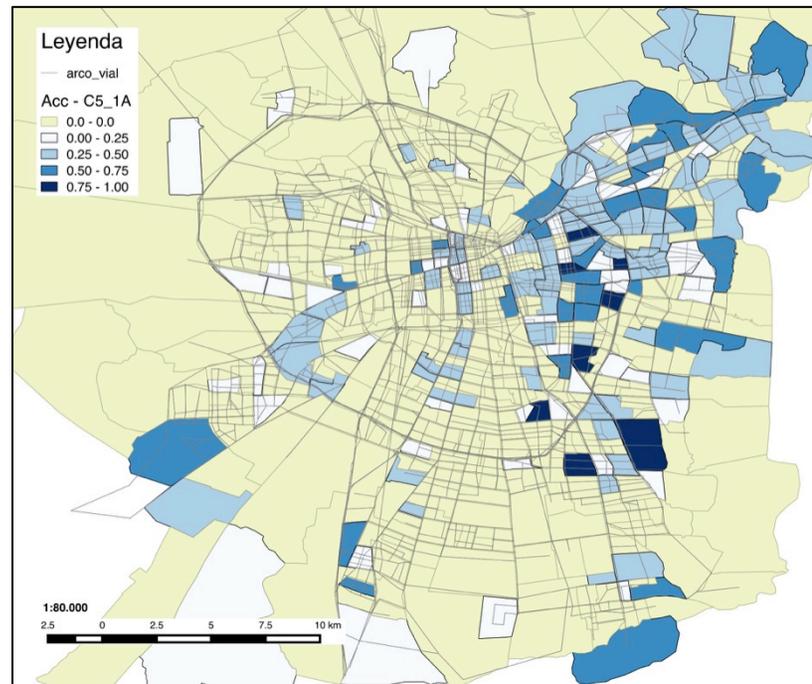


Figura A-3. Accesibilidad según factores de balance, categoría de ingreso 5 con un auto.

Fuente: Elaboración propia

B. ANUALIZACIÓN DE LOS VIAJES Y PROPÓSITOS EN LA ENCUESTA

A continuación la Tabla B-1 muestra el cálculo de un factor para la anualización de los viajes, cuyas razones se explicaron en la Sección 4.1.1. Se utilizó una método en el que los factores de expansión se multiplican con el factor anual que se basa en la importancia relativa de cada temporada y tipo de día. De esta forma, los viajes de un día promedio del año corresponde a la suma de los viajes según el conjunto de factores.

Tabla B-1. Temporadas y periodos en la Encuesta, factores anuales calculados

Propósito	Normal, laborales	Normal, sábados	Normal, domingos	Estival, laborales	Estival, fines de semana
Trabajo (viajes)	5.984.235	2.950.729	1.712.160	4.937.892	2.754.036
Estudio (viajes)	3.605.600	343.502	200.220	314.524	46.487
Otros (viajes)	8.871.299	11.500.561	10.590.109	7.994.943	9.987,095
Total (viajes)	18.461.134	14.794.793	12.502.490	13.247.358	12.787.618
Nº días al año	218	44	44	42	17
Factor Anual	0,597	0,121	0,121	0,115	0,047

Fuente: Elaboración propia a partir de SECTRA 2015

La Tabla B-2 muestra información sobre propósitos de viaje interesantes de la Encuesta de Movilidad (SECTRA, 2015), para usar como oportunidades en la medición de accesibilidad. Se reclasificaron como grupos de actividades, mostrando en cada uno su código de propósito, cantidad de puntos muestrales y la cantidad de viajes anualizados luego de aplicar factores de expansión.

Tabla B-2. Viajes según propósitos en la Encuesta de Movilidad

Actividad	Código de propósito	Puntos muestrales	Viajes (% del total)	
Residencial	7	Volver a casa	52.413	7.565.642 (46%)
Empleo	1	Al trabajo	18.375	2.375.539 (14%)
	2	Por trabajo	1.651	270.504 (2%)

	12	Trámites	4.097	573.753 (3%)
Estudio	3	Al estudio	8.470	978.615 (6%)
	4	Por estudio	1.176	121.874 (1%)
Salud	5	De salud	2.246	287.942 (2%)
Comercio	11	De compras	11.092	1.893.598 (12%)
Social y recreación	6	Visitar a alguien	3.734	563.042 (3%)
	13	Recreación	3.186	592.752 (4%)
Otros	8, 9, 10, 14		7.141	1.213.413 (7%)
Todas	Todos		113.581	16.436.674 (100%)

Fuente: Elaboración propia a partir de SECTRA 2015

Entre ellos se seleccionó la actividad de tipo empleo como la oportunidad a la cual se va a medir la accesibilidad, por las razones descritas en la Sección 4.1.1. Si bien los propósitos 2 “por trabajo” y en parte el 12 “trámites” también se relacionan a oportunidades de desarrollo en el empleo, muchas veces los viajes que representan no ocurren desde el hogar, por ejemplo en el caso de reuniones a mitad de la jornada. No obstante estas localizaciones fueron descartadas, se analizó que de incluirse podrían aportar ligeramente a una distribución más homogénea en el territorio y a intensificar centros locales.

C. PROPÓSITO AL TRABAJO Y REZONIFICACIÓN

Específicamente se consideró sólo el propósito 1 “al trabajo”, ya que interesa ante todo las localizaciones de los lugares de empleo a los que se viaja desde el hogar. En la Tabla C-1 se presenta información más detallada respecto a este propósito, incluidos los puntos muestrales depurados por destinos indeterminados. También se muestra información sobre su concentración en punta mañana, partición modal principal y el tiempo de viaje medio, tanto en la temporada normal en días laborales como en su versión anualizada.

Tabla C-1. Información sobre el propósito al trabajo de la Encuesta de Movilidad

Temporada	Depuración	Concentración AM	Partición caminata, t. público y auto	Tiempo de viaje
Normal Laboral	750 puntos	61% de viajes	16%, 22% y 31%	45,7 min
Anualizado	1532 puntos	60% de viajes	15%, 23% y 30%	46,5 min

Fuente: Elaboración propia a partir de SECTRA 2015

En cuanto a la rezonificación, el archivo georreferenciado de la Encuesta de Movilidad cuenta con un número mayor de zonas que los ocupados por modelos de transporte. Por ello, en general los centroides de las primeras quedaban bien ubicados dentro de los polígonos de cada zonificación de las simulaciones de proyectos. Así, la cantidad tanto de oportunidades como de poblaciones de una subdivisión de zonas de la encuesta se suman a la nueva zona que las contiene de los modelos.

Existieron dos casos en que se procedió de manera diferente, teniendo que mover el centroide de la zona de la Encuesta para que quedara dentro de las zonificaciones de los modelos. Se trata del centroide de la zona que incluye plaza San Enrique una al sur de la Plaza de Puente Alto. Ambas tenían oportunidades y poblaciones no despreciables, pero al incluir áreas rurales en la Encuesta su centroide se ubica fuera del área de estudio de los modelos.

D. COMPARACIÓN SEGÚN FUENTES DE DATOS SOBRE EMPLEO

En el trabajo de esta tesis se emplearon dos fuentes de datos para medir la distribución de las oportunidades de empleo en la ciudad. Por un lado está el Catastro de Roles del Servicio de Impuestos Internos del año 2013, el cual mide el área destinada a diversas actividades de acuerdo al registro institucional (SII, 2013). Por otro lado los destinos con propósito al trabajo de la Encuesta de Movilidad realizada el año 2012, que corresponde a una medición de la demanda con un muestreo de probabilidades proporcionales (SECTRA, 2015).

Se seleccionó la segunda opción de la Encuesta por las razones metodológicas descritas en la Sección 4.2.1, descartando el Catastro. No obstante lo anterior, se realizaron pruebas de medición de accesibilidad con ambas fuentes, aplicadas a un mismo set de variables de servicio y zonificación. El resultado en ambos casos se muestra en las tablas siguientes, donde se observa las similitudes y también diferencias entre ambas. En la Tabla D-1 se ve que la diferencia entre el transporte público y el auto es más pronunciada con la Encuesta, lo cual es coherente con el nivel de costos de cada uno. Además, al usar la Encuesta se presenta una menor desviación estándar en ambos modos, lo cual implica una mayor dispersión del empleo en el territorio, consistente con la inclusión de empleo no formal e independiente.

Tabla D-1. Comparación de fuentes de datos según resultado de accesibilidad al empleo

Fuente de datos	Catastro (SII, 2013)	Encuesta (SECTRA, 2015)
Modo	Media accesibilidad (D. estándar)	Media accesibilidad (D. estándar)
Transporte público	0,593 (0,124)	0,555 (0,097)
Auto	0,642 (0,090)	0,661 (0,070)

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, en las Tablas D-2 y D-3 aportan a la comparación con una mirada desagregada en el caso de transporte público. Respectivamente, para cada fuente de datos se muestra las 10 zonas con mejor y las 10 con peor accesibilidad. Es posible

observar que las zonas en cada lista se repiten, ubicándose en lugares similares en cada fuente de datos a pesar de la distinta unidad de la medición.

Tabla D-2. Comparación de fuentes de datos según diez zonas con mejor accesibilidad

Lugar	Catastro (SII, 2013)		Encuesta (SECTRA, 2015)	
	Zona	Puntaje	Zona	Puntaje
1	277	44.470	275 (+4)	2.281.851
2	237	44.434	238 (+4)	2.277.205
3	246	44.396	155 (+5)	2.272.667
4	276	44.390	258 (+3)	2.269.614
5	275	44.340	276 (-1)	2.264.328
6	238	44.337	159 (+7)	2.252.567
7	258	44.118	237 (-5)	2.252.316
8	155	44.112	246 (-6)	2.251.508
9	241	43.962	256 (+5)	2.240.837
10	245	43.926	277 (-9)	2.238.320

Fuente: Elaboración propia

Tabla D-3. Comparación de fuentes de datos según diez zonas con peor accesibilidad

Lugar	Catastro (SII, 2013)		Encuesta (SECTRA, 2015)	
	Zona	Puntaje	Zona	Puntaje
630	440	10.926	440	618.430
629	468	13.684	225 (-1)	804.666
628	225	13.807	451 (-1)	818.449
627	451	14.001	468 (+2)	824.667
626	475	15.220	475	871.220
625	376	16.224	130 (-3)	878.443
624	588	16.754	588	958.999
623	611	16.760	611	959.230
622	130	17.013	376 (+3)	965.954
621	436	17.369	357 (-21)	1.032.017

Fuente: Elaboración propia

E. EQUIACCESS

A continuación este Anexo presenta dos elementos respecto a la herramienta *EquiAccess* programada dentro del marco de la tesis. Su rol está en procesar la información proveniente de modelos de transporte para aplicar medidas de accesibilidad e indicadores de impacto en la equidad. Primero se muestra un *pseudo-código* sobre los programas que componen EquiAccess, seguido en segundo lugar por un ejemplo de la interacción con el usuario en algunos de ellos.

Pseudo-código de EquiAccess

01_instalación.py :

- Librería `psycopg2` es para interactuar con PostgreSQL (ya instalado)
- Creación del usuario y la base de datos
- Acceso a la base de datos y creación variables para interactuar
- Clasificación de esquemas para las tablas
- Se crean todas las tablas necesarias para correr los módulos de EquiAccess, con su clasificación, orden de parámetros y datos. Según esquemas:
 - Contexto de ESTRAUS
 - Parámetros para cálculos
 - Input de datos:
 - Dependiendo de los modos y clases de usuario a analizar se crean tablas para guardar las variables de servicio. En ellas, en cada fila de origen hay columnas con todos los tipos de VS y adentro son arreglos con su valor a todos los destinos
 - Clasificación de población, los arreglos agrupan deciles u otros y se registra sus niveles de ingreso, luego su distribución
 - Los resultados se dejan en esquema public.

01_infocontexto.py

- Ingresa a la base de datos
- Escribe información de contexto que es fija y define denominaciones (ciudades, periodos, modos, tipos de variables de servicio)

- Guarda y se desconecta

02_generarbat.py

- Se importan librerías de archivos y directorios
- Pide la carpeta desde donde generar la batería de transformación de formato
- Ahí también busca todas las matrices, se recorre cada archivo y se extrae sus nombres para escribir el bat

02_variabllesservicio.py

- Pregunta a usuario id_corrida, luego verifica que esté disponible e importa su calibración
- Buscará todas las variables de servicio (**) en una carpeta, deben ser archivos en formato **modo_h_?.dat
- Inicio del procedimiento automático
- Importación de zonificación y clases de usuario
- Por eficiencia, dependiendo de la configuración de ESTRAUS, el número de clases determina la tabla donde importar los datos
- Función auxiliar para el loop que sigue
- Se recorre cada archivo y se extrae su información de tipología desde el nombre
 - Se chequea de qué tipo de modo, variable de servicio (vs) y usuario se trata, con ayuda de la función recién definida
 - El modo bus es lo mismo que tpub, en las tablas se guardará como tpub
 - Obtener el id_modos e id_tvss
 - Se crea matriz donde se guardarán temporalmente los datos
 - Se obtienen las VS en cada línea del archivo actual
 - Se lee la matriz recién creada para extraer datos como arreglos de destinos.
 - Loop de escritura, según el modo/tipo se inserta en columna diferente de la base de datos
 - Caso con 2 modos y 1 clase de usuario o 5 clases de usuario
 - Comienza siempre creando la tabla con los pares O-D, sin datos
 - Luego para cada caso siguiente modifica la tabla, siempre igual.

- Por último, se verifica que auto_ta tenga datos, sino se crea una lista de ceros (compatibilidad para el resto de módulos)
- Finalizaron ambos loops
- Cierra y entrega tiempo de ejecución total

02_vsintrazonales.py

- Pregunta a usuario id_corrida, luego verifica que esté disponible e importada
- Inicio del procedimiento automático
- Importación de zonificación y clases de usuario
- Primero se consigue el parámetro correlativo de las zonas vecinas más cercanas de cada zona de origen
- Por último, se verifica que auto_ta tenga datos, sino se crea una lista de ceros (compatibilidad para el resto de módulos)
- Se recorrerá toda la diagonal de la matriz en la base de datos para editar su viaje intrazonal
 - Caso con 2 modos y 1 clase de usuario o 5 clases de usuario
 - Por un lado, se necesita extraer las VS de cada origen a su zona vecina
 - Por otro lado, ahora estos valores de VS se usan para reemplazar la diagonal de la matriz en cada columna de la BD
 - Fijo: 2/3 del costo a la zona vecina más cercana, excepto tarifa de transporte público que directamente se copia el valor
- Finalizó el loop, cierra y entrega tiempo de ejecución total.

03_accesibilidad.py

- Pregunta a usuario id_corrida, luego verifica que esté disponible e importada
- Importación de zonificación y clases de usuario de la primera corrida
- Entre los tipos de oportunidad disponibles para el cálculo, pregunta el id_toportunidad
- Entre las fórmulas, pregunta el id_formula
- Pregunta si se debe corregir la zonificación al final
- Pregunta sobre qué hacer con resultados
- Inicio del procedimiento automático
- Importación del valor social del tiempo según el año de modelación de la primera corrida, en minutos

- Parámetros fijos: Beta a base de TV medio de la EOD 2012. Los aplhas (para cada VS) se sacaron de precios sociales
- Se extrae el set de oportunidades escogido, como una lista
- ALGORITMO: Itera en (A) corridas a calcular, (B) zonas de origen donde importa la información y (C) las fórmulas de cálculo. Ahí dentro opera en (D) zonas de destino, para luego en (E) guardar las accesibilidades. Todo esto ocupando (cu-1) y (cu-5), las respectivas tablas para 1 y 5 clases de usuario.
- (A) Loop corridas
 - (B) Loop zonas de origen
 - Reinicialización para contabilización de VS inexistentes en algún par OD.
 - Primero se extraen las VS del origen actual a todos los destinos, en este caso se distinguirán por sus particularidades
 - Se crean matrices dependiendo de la calibración de la primera corrida, se guardan según (cu-1) o (cu-5)
 - (C) Loop fórmulas de cálculo
 - Reinicialización de accesibilidades
 - (D) Loop zonas de destino
 - Se utilizan la fórmulas para operar VS de cada modo, se calculan en simultáneo para cada destino
 - Esquema opcional para corregir vacíos de pares O-D en ciertos modos
 - APLICACIÓN DE FÓRMULAS: Con (cu-1) y (cu-5) adentro de cada una.
 - Finaliza loop de destinos
 - Se calcula la normalización de oportunidades
 - Se aplican las normalizaciones respectivas y cerrar la corrección al id_toportunidad
 - (E) SE GUARDAN ACCESIBILIDADES
 - Por último se ingresa a la BD las accesibilidades calculadas para cada modo en la zona de origen actual, considerando (cu-1) y (cu-5)
 - Finaliza loop de fórmulas
 - Finaliza loop de orígenes
 - En caso que se elija, algoritmo para corregir los resultados de ciertas zonas por problemas en la zonificación

- Primero se extrae de los parámetros las zonas a corregir, itera dentro para cada una de las zonas base
- Extrae los valores de accesibilidad de la zona base a corregir, para cada fórmula y modo
- Repite lo anterior para cada zona fantasma, guardando sus valores
- Saca los promedios y actualiza la zona base ya corregida
- Algoritmo para exportar resultados a un archivo de texto, desde la base de datos PostgreSQL recién actualizada.
 - Parámetros necesarios: modos disponibles y fórmulas ingresadas (las vuelve a recorrer)
 - Se crea archivo específico, se cargan los resultados y luego se escriben línea a línea
 - Similarmente se exportan los delta accesibilidad con respecto a la primera corrida
- Finaliza loop de corridas
- Finaliza, reporta tiempo y desconecta base de datos.

03_exportar.py

- Primero exporta también una tabla con resultados agregados
- Principalmente crea los shapefiles según todos los resultados para calibraciones en uso, se exportarán agrupados por calibración y fórmula.
- Comienza por importar ordenadamente los resultados, primero según fórmulas y luego según corridas
 - Loop fórmulas
 - Se inicializa matriz donde se guardarán todos los resultados, también características
 - Loop corridas
 - Importación de calibración, zonificación y clases de usuario
 - Extrae resultados de BD postgres, iterando por modos
 - Loop modos
 - Así, los resultados quedan en el siguiente formato:
resultados[corrida][modo][zona][valor(de acc o de zona)]
 - Dentro de una fórmula, creará un archivo shp que para cada conjunto de corridas para reunir sus resultados
 - Loop corridas

- Importación de calibración, zonificación y clases de usuario
- El proceso se resetea en según cada base
- Se importan las coordenadas respectivas y se crea el archivo shp
- Crea también los campos del shp respectivos a la corrida, cada una agrega columnas según número de modos
 - Loop zonas
 - Lee la matriz y escribe en todas las columnas línea a línea según las zonas
 - Calcula deltas de accesibilidad
- En corrida final se graba archivo personalizado según su número de columnas
- Finalizan todos los loops
- Finaliza, reporta tiempo y desconecta base de datos.

04_equidad.py

- Se crea el archivo donde al final se guardarán los resultados
- Importación de poblaciones por decil de ingreso (se realiza 1 vez)
- Importa la estructura de las corridas con accesibilidad calculada
- Se extraen medias de ingreso por decil
- Algoritmo para calcular de Índices de Aporte a la Equidad de Acceso (AEA)
 - Loop fórmulas
 - Loop modos
 - Por cada fórmula y modo se llenan matrices que extraen los resultados de accesibilidad de las corridas
 - Loop corridas
 - Por cada fórmula de índice AEA se realiza una suma por zona paralela
 - En cada zona se importan las poblaciones por decil de ingreso afectadas, junto con recorrer las matrices anteriores
 - Loop zonas
 - Se realizan los cálculos y se van agregando para toda la ciudad
 - Se calcula el indicador
 - Loop grupo de ingreso

- Se calcula el indicador según la suma de cada uno
- Los resultados de la corrida, modo y fórmula respectiva se guardan en el archivo de texto
- Finalizan todos los loops
- Finalmente se cierra el archivo

Ejemplo de interacción de EquiAccess

Usuario ejecuta 03_accesibilidad.py

Corridas disponibles:

- 2: Metro06_base, año 2010 (Importada: True)
- 4: Metro06_dominicos, año 2010 (Importada: True)
- 6: Metro06_maipu, año 2010 (Importada: True)
- 7: Corredores11_base, año 2010 (Importada: False)
- 8: Corredores11_base, año 2015 (Importada: True)
- 9: Corredores11_plan, año 2010 (Importada: False)
- 10: Corredores11_plan, año 2015 (Importada: True)
- 12: Tarificacion14_base, año 2020 (Importada: True)
- 14: Tarificacion14_ECS1, año 2020 (Importada: True)
- 15: Tren14_base, año 2015 (Importada: True)
- 16: Tren14_batucoEM, año 2015 (Importada: True)
- 17: Tren14_batucoQN, año 2015 (Importada: True)

Ingresa los ID de corridas DEL MISMO TIPO para calcular accesibilidad (separar con ", "):

Usuario: 12,14

(En caso de error responde “Corrida no disponible” / “Corrida no importada”; “Inténtelo nuevamente”)

La calibración de la PRIMERA CORRIDA es 113 con zonificación 728 y 5 clase(s) de usuario

Tipos de oportunidades:

- 0: Sin oportunidades, año 0

- 112630: Intensidad atracción tipo trabajo (EOD), año 2012
- 112728: Intensidad atracción tipo trabajo (EOD), año 2012
- 112848: Intensidad atracción tipo trabajo (EOD), año 2012
- 112888: Intensidad atracción tipo trabajo (EOD), año 2012

Ingresa el ID del tipo de oportunidad, RECUERDA que debe aplicar a todas:

Usuario: 112728

(En caso de errar responde “Número ingresado inválido, inténtelo nuevamente”)

Tipos de fórmulas:

- 1: Costo medio TV, sin oportunidades
- 2: Costo medio TV, con oportunidades normalizado
- 3: Costo medio TC y TE, con oportunidades normalizado
- 4: Costo medio TA (VST), con oportunidades normalizado
- 5: Costo medio Gral, alphas p. sociales, sin oportunidades
- 6: Costo medio Gral, alphas p. sociales, con oportunidades normalizado
- 10: Exponencial negativa, alphas = 1 (VST), sin oportunidades
- 11: Exponencial negativa, alphas = 1 (VST) y normalizado por oportunidades
- 12: Exponencial negativa, alphas sociales y normalizado por oportunidades
- 20: Inversamente proporcional, alphas = 1 (VST), sin oportunidades
- 21: Inversamente proporcional, alphas = 1 (VST) y normalizado por oportunidades
- 22: Inversamente proporcional, alphas sociales y normalizado por oportunidades

Ingresa los ID de las fórmulas (separar con ","):

Usuario: 2,11,21

(“Fórmula no disponible”; “Inténtelo nuevamente”)

¿Esta zonificación requiere corregir "zonas fantasma"? 1: Sí, 0: No

Usuario: 1

(“Número ingresado inválido, inténtelo nuevamente”)

¿Deseas exportar resultados como .txt? 1: Sí, 0: No

Usuario: 1

("Número ingresado inválido, inténtelo nuevamente")

El valor social del tiempo a utilizar es 23.6 pesos/min

(ERROR: no se encontró un VST, ingrésalo primero)

Betas, Alphas y VST cargados

Oportunidades cargadas

(ERROR: No se encontraron oportunidades para cálculo)

Comienza la corrida 12

(ERROR: Problema al cargar matrices)

(ERROR: Fórmula no disponible)

Corrigiendo resultados por problemas de zonificación

Resultados de primera corrida cargados como base

Se exportó accesibilidad como .txt

Corrida 12 calculada exitosamente tras 1,50 minutos

Comienza la corrida 14

Corrigiendo resultados por problemas de zonificación

Se exportaron accesibilidades y delta_accesibilidades como .txt

Corrida 14 calculada exitosamente tras 1,68 minutos

Proceso finalizado exitosamente tras 3,18 minutos

Usuario ejecuta 03_exportar.py

Se exportaron resultados generales agregados

(ERROR: Corrida no reconocida)

Archivos shp creados al final de corrida 14 de 728 zonas, para fórmula 2

Archivos shp creados al final de corrida 14 de 728 zonas, para fórmula 11

Archivos shp creados al final de corrida 14 de 728 zonas, para fórmula 21

Usuario ejecuta 04_equidad.py

Se imprimirán los detalles de impacto por decil a medida que se calculan los indicadores AEA

(ERROR: No se encontraron valores de accesibilidad para calcular)

Se exportaron resultados de equidad

F. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD DE LAS COMUNAS

Tabla F-1. Características de comunas, parámetros y bondad de ajuste de distribuciones

Comuna	Hogares	Ingreso p. cap. medio	Distribución	Parámetros	AD ¹⁴	AD / muestra
Calera De Tango	6,485	160,540	Lognormal	$\sigma=0.76 \mu=11.70$	44.6	0.0069
Cerrillos	23,743	185,870	Gamma	$\alpha=2.71 \beta=0.69 \cdot 10^5$	274.0	0.0115
Cerro Navia	39,608	131,177	Lognormal	$\sigma=0.61 \mu=11.61$	130.9	0.0033
Colina	29,360	207,566	Gamma	$\alpha=3.09 \beta=0.67 \cdot 10^5$	70.4	0.0024
Conchalí	37,350	175,034	Lognormal	$\sigma=0.52 \mu=11.94$	72.7	0.0019
El Bosque	48,133	157,244	Lognormal	$\sigma=0.75 \mu=11.73$	353.5	0.0073
Estación Central	39,834	167,494	Lognormal	$\sigma=0.64 \mu=11.83$	107.6	0.0027
Huechuraba	24,956	233,472	Lognormal	$\sigma=0.79 \mu=12.06$	121.5	0.0049
Independencia	24,534	216,282	Lognormal	$\sigma=0.60 \mu=12.12$	63.5	0.0026
La Cisterna	27,269	206,362	Lognormal	$\sigma=0.69 \mu=12.01$	111.0	0.0041
La Florida	115,108	230,970	Lognormal	$\sigma=0.74 \mu=12.10$	171.0	0.0015
La Granja	37,340	167,495	Gamma	$\alpha=2.66 \beta=0.63 \cdot 10^5$	89.4	0.0024
La Pintana	51,688	124,423	Gamma	$\alpha=3.67 \beta=0.34 \cdot 10^5$	45.6	0.0009
La Reina	28,945	464,934	Lognormal	$\sigma=0.78 \mu=12.76$	47.4	0.0016
Lampa	22,057	214,466	Lognormal	$\sigma=0.62 \mu=12.08$	37.3	0.0017
Las Condes	103,109	557,412	Lognormal	$\sigma=0.78 \mu=12.93$	1,341	0.0130
Lo Barnechea	25,559	541,486	Lognormal	$\sigma=0.96 \mu=12.75$	41.2	0.0016
Lo Espejo	28,987	147,370	Weibull	$\alpha=1.90 \beta=1.64 \cdot 10^5$	254.7	0.0088
Lo Prado	30,317	157,050	Lognormal	$\sigma=0.65 \mu=11.76$	103.8	0.0034
Macul	37,332	258,964	Lognormal	$\sigma=0.69 \mu=12.23$	243.4	0.0065
Maipú	153,280	189,500	Lognormal	$\sigma=0.61 \mu=11.97$	216.9	0.0014
Ñuñoa	76,534	438,891	Gamma	$\alpha=1.87 \beta=2.34 \cdot 10^5$	137.4	0.0018
P. Aguirre Cerda	31,841	171,503	Lognormal	$\sigma=0.59 \mu=11.89$	58.3	0.0018
Peñalolén	70,221	235,911	Lognormal	$\sigma=0.72 \mu=12.12$	67.6	0.0010
Pirque	6,407	241,483	Lognormal	$\sigma=0.84 \mu=11.92$	57.9	0.0090
Providencia	64,374	632,013	Lognormal	$\sigma=0.77 \mu=13.07$	511.1	0.0079
Pudahuel	68,043	173,483	Lognormal	$\sigma=0.74 \mu=11.79$	168.6	0.0025
Puente Alto	165,715	180,372	Lognormal	$\sigma=0.67 \mu=11.88$	212.6	0.0013
Quilicura	56,465	193,995	Weibull	$\alpha=1.67 \beta=2.06 \cdot 10^5$	655.4	0.0116
Quinta Normal	34,474	171,823	Gamma	$\alpha=2.17 \beta=0.79 \cdot 10^5$	302.5	0.0088
Recoleta	50,637	201,852	Lognormal	$\sigma=0.62 \mu=12.03$	86.5	0.0017
Renca	42,553	161,186	Gamma	$\alpha=2.52 \beta=0.64 \cdot 10^5$	425.5	0.0100
San Bernardo	74,916	155,608	Lognormal	$\sigma=0.72 \mu=11.73$	1,146	0.0153
San Joaquín	28,168	166,937	Lognormal	$\sigma=0.64 \mu=11.83$	134.9	0.0048
San Miguel	30,660	270,192	Lognormal	$\sigma=0.73 \mu=12.25$	355.4	0.0116
San Ramón	27,028	160,142	Lognormal	$\sigma=0.64 \mu=11.78$	70.9	0.0026
Santiago	146,822	381,305	Lognormal	$\sigma=0.81 \mu=12.53$	58.4	0.0004
Vitacura	28,721	563,039	Lognormal	$\sigma=0.69 \mu=13.03$	1,238	0.0431

Fuente: Elaboración propia

¹⁴ Notar que la escala de la prueba depende del tamaño de muestra, comparar el test ajustado (NIST, 2012)

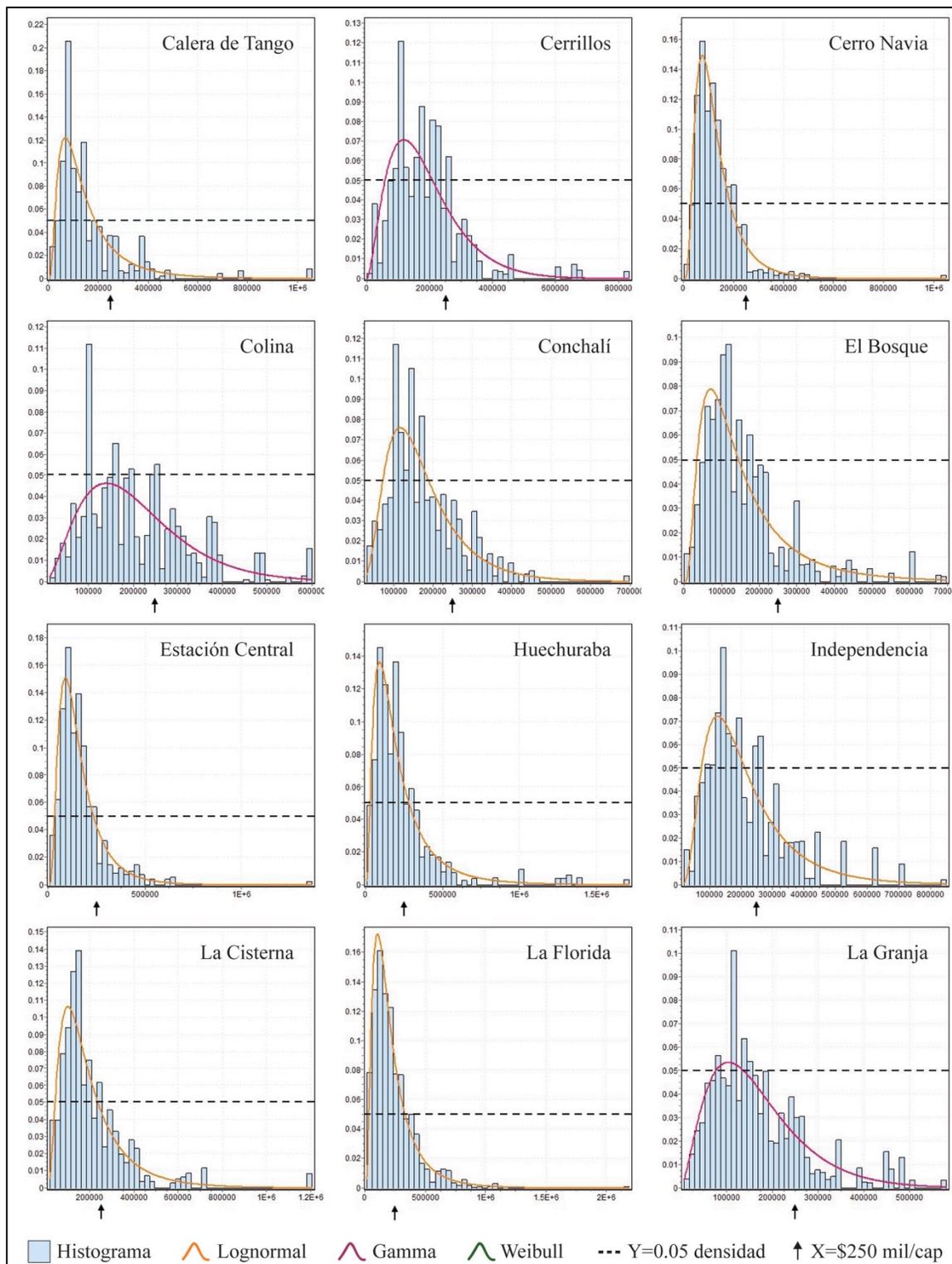


Figura F-1. Distribución ajustada e histograma del ingreso per cápita por comuna (I)

Fuente: Elaboración propia a partir de SECTRA 2015

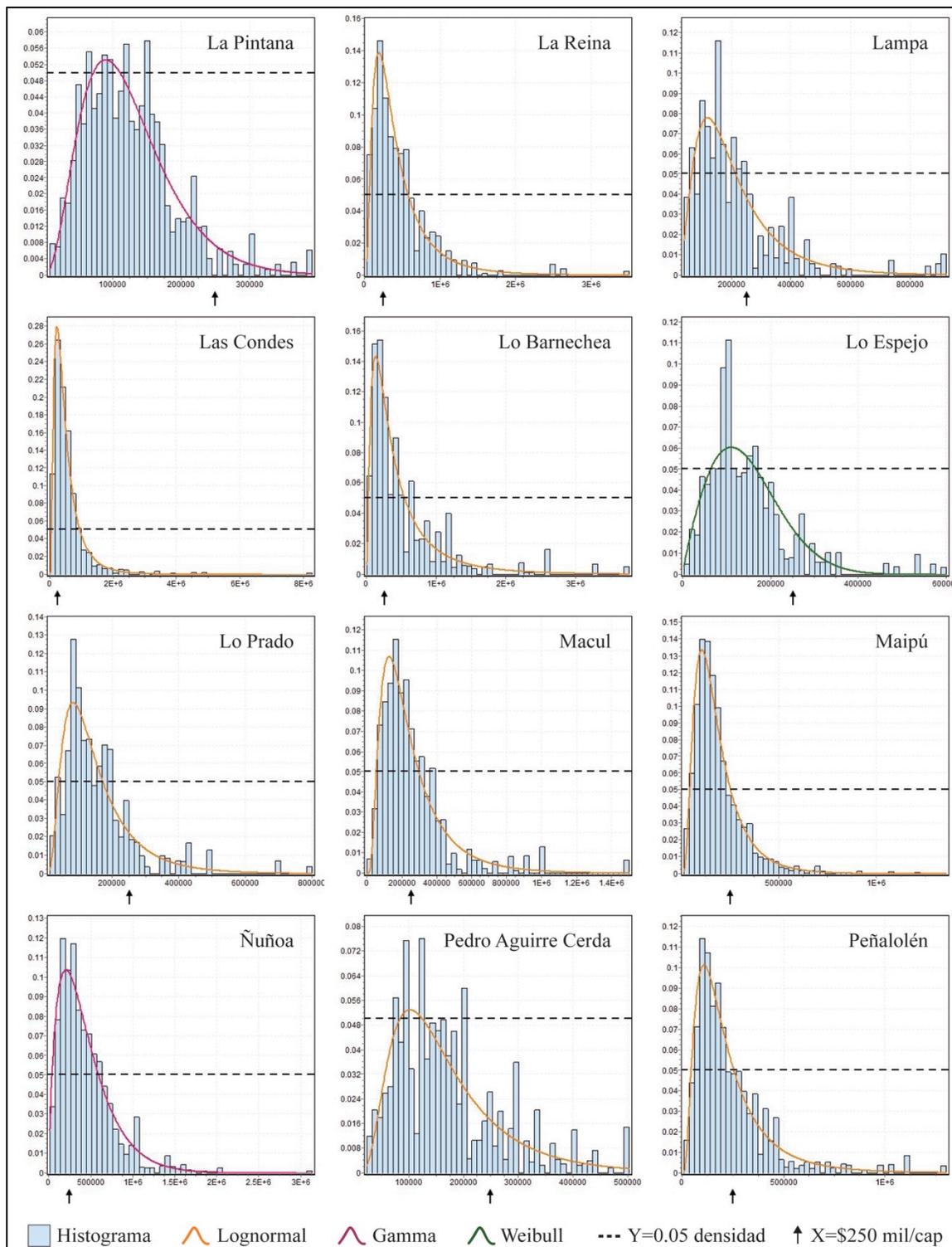


Figura F-2. Distribución ajustada e histograma del ingreso per cápita por comuna (II)

Fuente: Elaboración propia a partir de SECTRA 2015

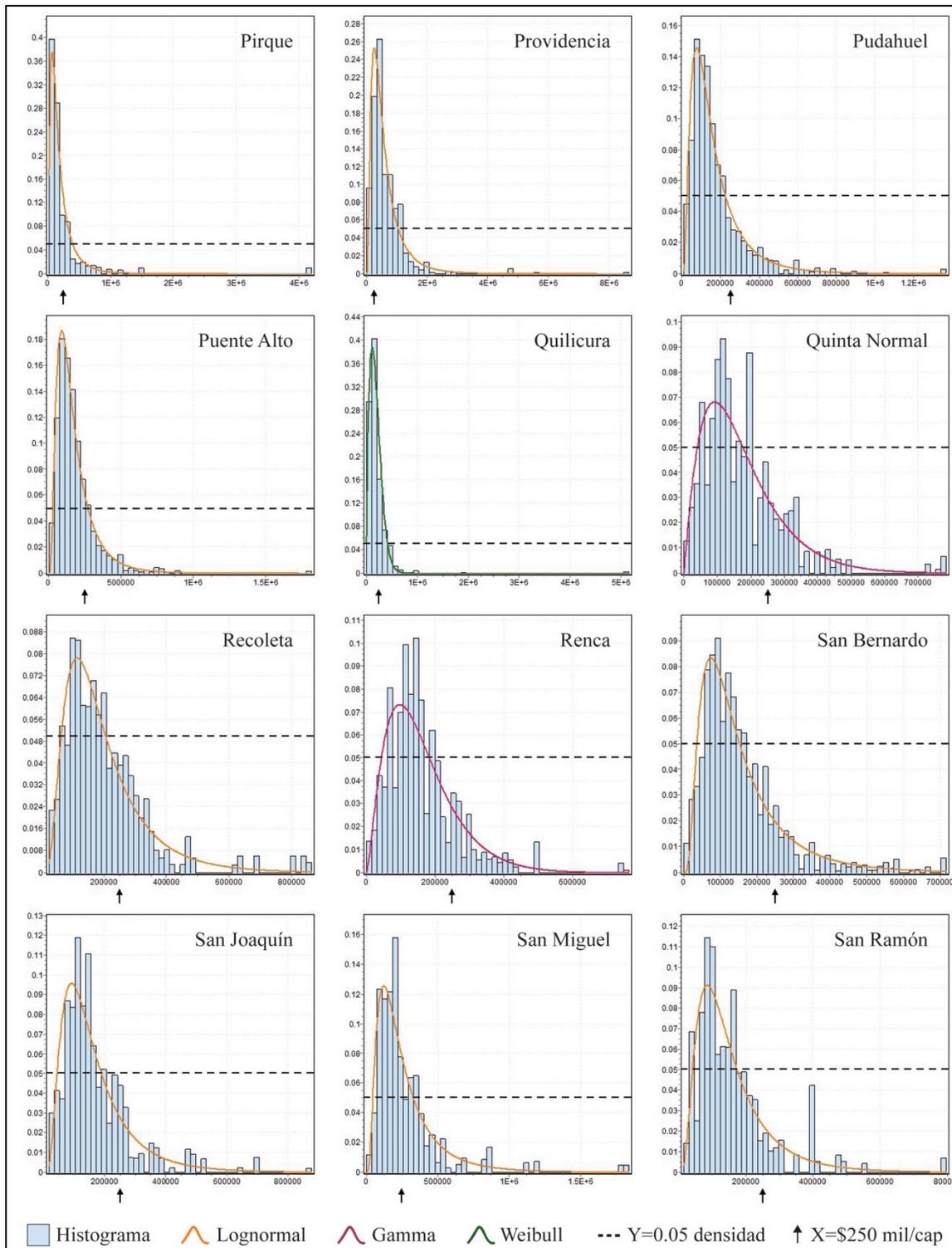


Figura F-3. Distribución ajustada e histograma del ingreso per cápita por comuna (III)

Fuente: Elaboración propia a partir de SECTRA 2015

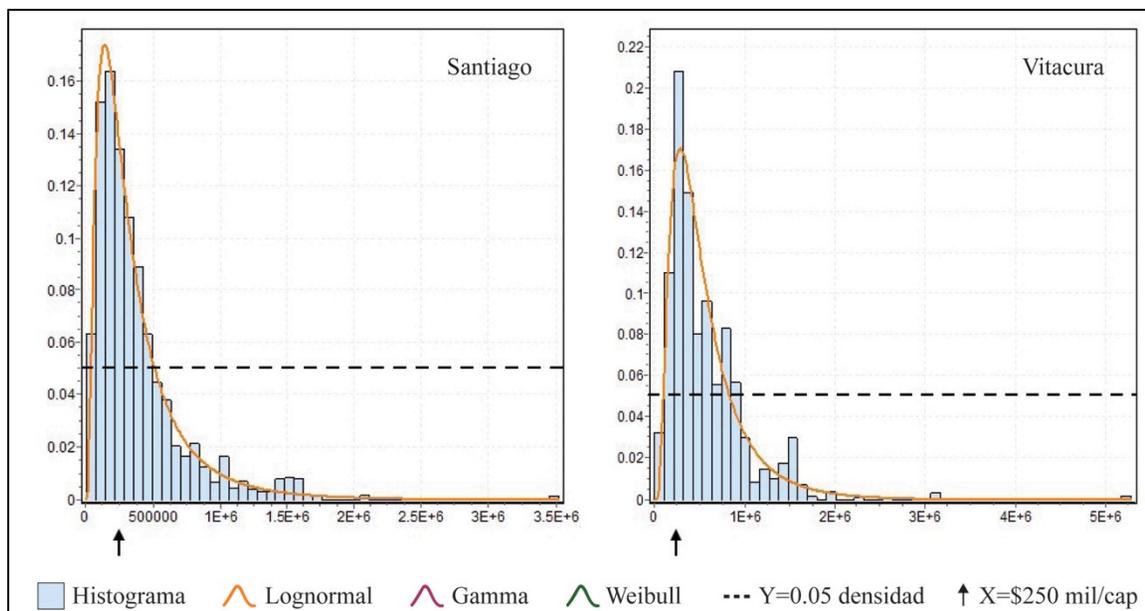


Figura F-4. Distribución ajustada e histograma del ingreso per cápita por comuna (IV)

Fuente: Elaboración propia a partir de SECTRA 2015

G. RESULTADOS DE LA POBLACIÓN SINTÉTICA GENERADA

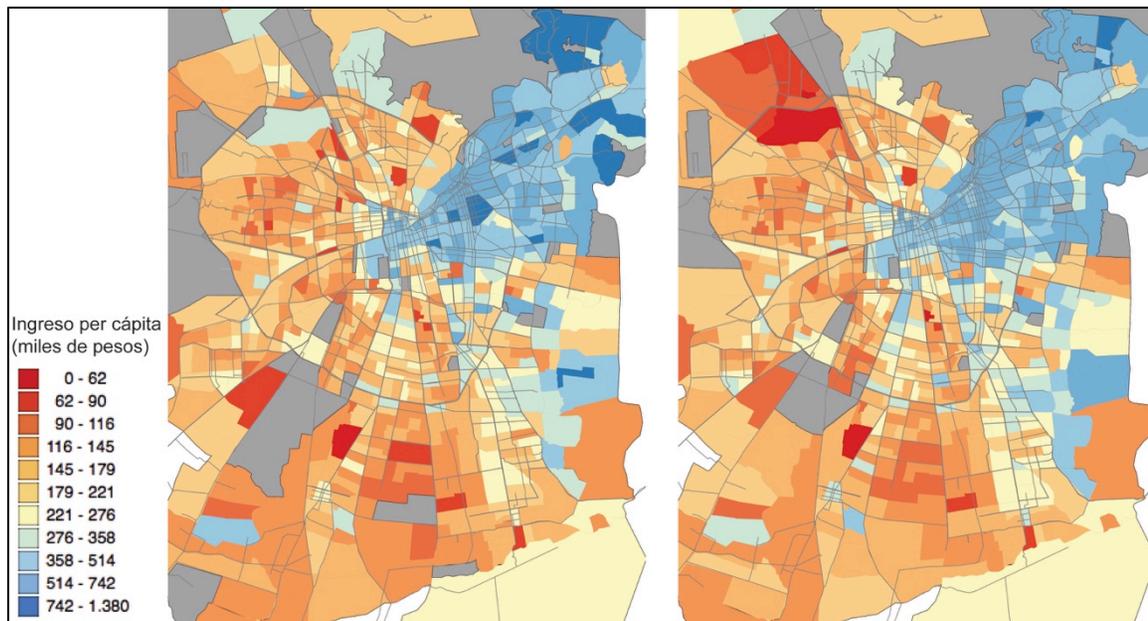


Figura G-1. Distribución del ingreso según la encuesta versus la simulación.

Fuente: Elaboración propia a partir de SECTRA (2015)