



TESIS DE GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

BUSCANDO EL ORDEN

Autor: Brian Erik Ovrum

Legajo: 46143

Director de Tesis:

Ing. Andrés Basilio Agres, MSc.

2010

Resumen

“La ciencia se construye a partir de aproximaciones que gradualmente se acercan a la verdad.”

Isaac Asimov

El presente trabajo tiene como objetivo principal la planificación estratégica de una red de transporte urbano público mediante colectivos para toda una ciudad.

Como principal característica diferencial, parte de un concepto de gran desarrollo en los últimos años, de ver al conjunto de pasajeros como individuos de comportamientos similares pero sin ningún poder centralizador. Es decir, analiza al sistema mediante un enfoque descentralizado.

En respuesta a esto, la principal herramienta utilizada en el proceso de análisis de las dinámicas en la ciudad es un modelo de simulación basada en agentes, que permite realizar este tipo de análisis con gran facilidad, sin afectar de este modo a la profundidad del mismo, pero reduciendo significativamente los costos de experimentación.

En cuanto a la estructura de presentación de este estudio, se realiza una primera presentación tanto del enfoque como del problema a tratar en la introducción. Luego, en el estado de la tecnología, se realiza un análisis más profundo de distintas herramientas utilizadas a la hora de realizar un planeamiento estratégico del transporte, junto con la evolución cronológica de estas herramientas, y se compara las mismas con el proceso utilizado en nuestro caso.

Una vez definido este marco teórico, se procede a analizar el problema puntual a tratar, y se analiza el mismo con un caso de estudio puntual, para luego pasar a la etapa de presentación y análisis de resultados.

Finalmente, se dedica un capítulo a las conclusiones y a la presentación de posibles futuras líneas de investigación, junto con la evaluación de éxito del proyecto.

Descriptor bibliográfico

El presente trabajo se centra en el problema de planificación estratégica de una red de transporte urbano público, en particular en la definición de una metodología para su resolución. A tal fin se analiza, en primera instancia, el estado de la cuestión, prestando especial atención a algunas de las técnicas de mayor utilización en la actualidad. A continuación, tras definir con mayor precisión el problema a tratar, se desarrolla la metodología, junto con un modelo de simulación que sirve como herramienta de apoyo en el análisis. Luego, a fin de poder verificar su funcionamiento, y validar la información cargada en el mismo, se toma como ejemplo un caso de estudio real.

Haciendo el proceso de planificación para este caso en particular, se termina de demostrar la validez de la metodología desarrollada, y del mismo surgen una serie de conclusiones que sirven de cierre al proyecto.

Palabras clave: planificación estratégica, transporte urbano público, simulación, agentes, autobuses.

Abstract

This paper focuses on the Strategic Planning problem in Urban Public Transport Networks, particularly in the definition of a methodology for its resolution. To this end we start by analyzing the state of the issue, paying particular attention to some of the techniques most commonly used today. Once we finish analyzing this, we develop our methodology, along with a simulation model that serves as a support tool in the analysis. Then, in order to verify its functionalities, and corroborate the information used in it, we take a real case study as an example.

Making the planning process for this particular case, we validate the methodology developed, and this raises a number of conclusions that serve as a closure to the project.

Keywords: strategic planning, urban public transport, simulation, agents, coaches.

Agradecimientos

“Avanzando estos tres pasos, llegarás más cerca de los dioses: Primero: Habla con verdad. Segundo: No te dejes dominar por la cólera. Tercero: Da, aunque no tengas más que muy poco que dar.”

Buda

Agradezco a todas las personas que, en todo este tiempo, siguieron este consejo, ofreciéndome su ayuda y su compañía desde la verdad, la paz y la humildad.

En especial, quiero agradecer a mi tutor, Andrés Basilio Agres, por su dedicación y atención para ayudarme a completar esta tarea; y a toda mi familia, sin los cuales hubiese sido imposible llegar al punto en el que me encuentro hoy en día.



Tabla de contenidos

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1: El transporte como un sistema descentralizado	1
1.2: Introducción al problema	2
1.3: Relevancia del problema	4
1.4: Motivación para abordar el problema	7
1.5: Etapas del proyecto	7
1.6: Criterios de éxito del proyecto	8
2. ESTADO DE LA TECNOLOGÍA	10
2.1: Resumen del estado de la cuestión	10
2.2: Evolución del enfoque conceptual empleado para el problema	10
2.2.a: La descentralización y sus dimensiones	11
2.2.b: La simulación como herramienta de apoyo para la toma de decisiones	15
2.2.c: La simulación y su relación con el desarrollo tecnológico	17
2.3: Clasificación de técnicas modernas para la resolución del problema	18
2.3.a: Licitación Competitiva	19
2.3.b: Evaluación multicriterio	20
2.3.c: Aspectos principales en el Proceso de Planificación de Transporte.	23
2.4: Casos recientes de aplicación de los principales métodos	25
3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	28
3.1: Conceptos básicos y terminología	28
3.1.a: Simulación: categorías	28
3.1.b: Dinámica de Sistemas: lazos reforzadores, lazos balanceadores y apalancamiento	30
3.1.c: Simulación por agentes: Agente, ambiente, estado y evento	32
3.1.d: Recorrido, línea, parada, estación y otros.	33
3.2: El problema	34
3.3: Objetivos, restricciones y recursos	35
4. CASO DE ESTUDIO	38

4.1: Resumen	38
4.1.a: Comportamientos principales de los pasajeros	38
4.1.b: Características generales de la ciudad	38
4.1.c: Desarrollo del modelo	39
4.1.d: Validación del modelo	39
4.1.e: Cierre del proyecto	40
4.2: Una solución integradora	40
4.2.a: Criterio de decisión del pasajero	40
4.2.b: Características principales de las ciudades	43
4.2.c: Flujos de pasajeros	48
4.2.d: Matriz OD	52
4.2.e: Frecuencia de llegada a las paradas	54
4.3: Desarrollo del modelo de simulación	54
4.3.a: Agente: Colectivo	54
4.3.b: Agente: Pasajero	56
4.3.c: Diagramación y salida de colectivos	57
4.3.d: Indicadores: pasajeros totales, ocupación máxima, tiempo de espera	59
4.3.e: Competencia	60
4.3.f: Capacidad máxima, tiempo de espera máximo y fidelidad	60
4.3.g: Optimizador	60
4.4: Definición de indicadores	61
5. RESULTADOS OBTENIDOS	63
5.1: Presentación de resultados	63
5.1.a: Comportamiento de los pasajeros	63
5.1.b: Características de la ciudad	64
5.1.c: Flujo de pasajeros, Matriz OD y frecuencia de llegada a paradas	67
5.1.d: Modelo de simulación. Condiciones particulares	72
5.1.e: Indicadores	73
5.2: Análisis y discusión de resultados	76
6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	79
6.1: Recomendaciones en base al proyecto	79

6.2: Conclusiones del proyecto	79
6.3: Evaluación del éxito del proyecto	82
6.4: Futuras líneas de investigación	84
7. BIBLIOGRAFÍA	85
7.1: Bibliografía general	85
7.2: Documentos técnicos específicos	85
7.3: Otras fuentes de información	86
8. ANEXOS	87
8.1: El Origen de las Especies	87
8.2: La Riqueza de las Naciones	88
8.3: Principio de Incertidumbre de Heisenberg	89
8.4: Teoremas de incompletitud de Gödel	90
8.5: Simulación	91
8.5.a: Dinámica de Sistemas	91
8.5.b: Simulación por eventos discretos	91
8.5.c: Simulación basada en Agentes	92
8.6.d: Sistema Complejo	92
8.6: Foro CIVITAS	93

1. INTRODUCCIÓN

1.1: El transporte como un sistema descentralizado

“Para comenzar -dijo pesadamente-, tenéis que comprender que una gaviota es una idea ilimitada de la libertad, una imagen de la Gran Gaviota, y todo vuestro cuerpo, de extremo a extremo del ala, no es más que vuestro propio pensamiento.”

Richard Bach – Juan Salvador Gaviota

“Una bandada de pájaros recorre el cielo. Como si fuera una compañía de ballet bien coreografiada, las aves viran al unísono hacia la izquierda. Luego, de pronto, todas se lanzan a la derecha y descienden súbitamente hacia el suelo. Cada movimiento parece estar perfectamente coordinado. La bandada como un todo es tan elegante como cualquiera de las aves que la componen, tal vez aún más elegante.

¿Cómo hacen los pájaros para que sus movimientos se mantengan tan bien organizados, tan sincronizados? La mayor parte de las personas suponen que los pájaros juegan a “siga al líder”: el ave que se encuentra al frente de la bandada los conduce y los otros lo siguen. Pero no es así. De hecho, la mayoría de las bandadas de aves no tienen líderes en absoluto. No existe ninguna “ave líder” especial. Más bien, las bandadas son un ejemplo de lo que algunas personas llaman “autoorganización”. Cada pájaro en la bandada sigue un conjunto de reglas simples y reacciona a los movimientos de los pájaros en su entorno. Los patrones bien organizados de la bandada surgen de estas interacciones locales simples. Ninguna de las aves tiene idea del patrón global de la bandada. El ave en la delantera no es líder en ningún sentido significativo; sólo se encuentra en ese lugar. La bandada se organiza sin un organizador, se coordina sin un coordinador.”¹

De la misma forma que ocurre con las bandadas de pájaro, este mismo comportamiento puede verse reflejado en colonias de hormigas, en economías de mercado, y en varios otros sistemas donde los patrones no están determinados por alguna autoridad centralizada, sino que surgen a partir de las interacciones locales entre las partes que componen al sistema como un todo.

Del mismo modo ocurre con los patrones de tráfico, que surgen a partir de las interacciones locales entre los automóviles individuales. Y, extendiendo sobre

¹ Tortugas, Termitas y Atascos de Tráfico [1]

esta base el análisis, puede notarse un comportamiento similar en la interacción entre los demás pasajeros, quienes conforman el grueso de la población, y que optan por el transporte público como medio principal de movilidad. Cada persona, como agente individual, tiene un comportamiento particular pero mantiene una estructura de pensamiento similar al resto de la población, y de la interacción con otros individuos surgen una serie de patrones que definen el comportamiento de la sociedad en referencia al transporte.

A partir de esta idea, se decidió llevar a cabo este estudio, que busca entender este comportamiento en el transporte público, tomando como principio básico la descentralización y buscando un método que permita acoplarse a la misma a la hora de planificar el diseño del transporte urbano público.

1.2: Introducción al problema

El problema de la planificación del transporte urbano público surge como consecuencia de una serie de factores que confluyen a nivel global, y que hacen que su análisis requiera de una especial atención en distintos niveles de la sociedad. Ya no se trata de un tema que afecte solamente a las empresas que brindan dicho servicio, sino que pasa a ser un factor clave en la movilidad de las personas, en especial en los grandes centros urbanos, con grandes concentraciones demográficas. Más aun, tal como muestra la figura 1.1, se trata de un problema insertado en un círculo vicioso que, en consecuencia, debe ser tratado con sumo cuidado para no entrar en una dinámica irreversible de desgaste del transporte público.

Figura 1.1: Círculo vicioso del transporte urbano. Adaptado de *Participación del Banco Mundial en el Sector de Transporte Urbano* [5]

Dentro de los factores que afectan al transporte urbano público, pueden destacarse como algunos de los más importantes los siguientes, separados en distintas categorías de influencia:

- Factores de infraestructura:
 - Saturación de las vías de circulación principales en grandes centros urbanos: autopistas, avenidas y rutas alimentadoras primarias.
 - Saturación de sectores para estacionar los vehículos privados.
- Factores socio-demográficos:
 - Concentración de la población en centros urbanos.
 - Concientización ambiental.
- Factores económicos:
 - Aumento del costo de transporte privado.

- Aumento del costo de combustible.

Dentro de esta categorización, podemos notar que cada medio de transporte público se ve influenciado en mayor o menor medida por cada una de las categorías. A grandes rasgos, hay un comportamiento similar entre el metro y el tren, siendo el primero de mayor costo de instalación y con mayores limitaciones para espacios abiertos, pero más efectivo y con mejor servicio que el segundo en zonas urbanas propiamente dichas. En esos casos, es la principal competencia para los autobuses, mientras que en zonas menos pobladas, y más especialmente en transporte interurbano, la competencia viene dada mayoritariamente entre el autobús y el tren.

Ahora bien, la principal ventaja del autobús ante estos otros medios de transporte, es que su implementación no tiene una necesidad de infraestructura propia, con lo cual puede prestar sus servicios de manera inmediata, una vez que se cuenta con el vehículo en condiciones operativas adecuadas. Si bien para los vehículos articulados como los utilizados en *Transmilenio* para Bogotá² es necesaria la construcción de dársenas de carga y descarga de pasajeros, esta construcción es de un costo económico y de tiempos significativamente inferior a aquella propia de los transportes guiados (aquellos que requieren de un carril o riel para desplazarse). Esto hace que el autobús sea, hoy en día, y más aún en ciudades con un pronóstico de desarrollo sostenido en el mediano plazo, el medio de transporte más atractivo para implementarse.

Se puede observar una comparación entre diferentes tecnologías de transporte público en la tabla 1.1 que aparece a continuación.

Table 1. Comparison of different rapid transit technologies.

Characteristic	Tram -LRT	Metro	Bus Transit
Capacity (Pax/veh)	110-250	140-280	80-160
Vehicles/unit	1-4	1-10	1
Maximum Speed (km/hr)	60-80	70-100	60-70
Commercial Speed (km/hr)	15-35	25-55	15-28
Maximum Frequency at stops (units/hr)	40	20-40	70-210
Capacity at stops (pax/hr/direction)	6,000-20,000	10,000-72,000	11,000-40,000
Capital costs (€ M / km)	15-50	30-200	1-10

(Estimates from our own experience)

² Portales de Transmilenio: revitalización de espacios e integración social urbana [6].

Tabla 1.1: Tabla comparativa de distintos métodos de transporte. Extraído de *Bus Rapid Transport and Urban Development* [14].

Desde este enfoque, puede destacarse que los desarrollos vistos en muchos casos carecen de la seriedad necesaria, y fueron desarrollados en forma de respuesta a una demanda inmediata de un método de transporte masivo, con lo cual su planificación operativa se ve deficiente desde un enfoque tanto estratégico, como metodológico y operativo. En consecuencia, en numerosas ciudades se puede notar, hoy en día, que el servicio brindado no logra satisfacer la demanda, y no tiene la capacidad de crecer más de lo que ya creció, sin un cambio en el método utilizado.

Es en este punto donde se enfocará este trabajo de estudio, que irá analizando los problemas antes mencionados en el transporte público de la actualidad, para determinar el mejor método de diagramación y planificación estratégica del servicio para autobuses, y poder de esta forma satisfacer una necesidad social, de una forma ordenada, eficiente y efectiva.

1.3: Relevancia del problema

La temática que aborda este documento es de gran importancia en la actualidad, y las proyecciones a futuro reafirman este comentario. Puede notarse que hoy en día el sistema de transporte requiere de un desarrollo significativo y, al igual que en otros aspectos sociales, nos encontramos en un proceso de cambio en los paradigmas de la sociedad a nivel global.

Puntualmente, el transporte tiene una gran incidencia en el desarrollo de la sociedad. Es por medio del mismo que se abastece a las distintas poblaciones y, al mismo tiempo, se fomenta la comunicación entre ellas. Además es el principal impulsor del comercio y, por medio del mismo, de la economía de cada localidad.

Más específicamente, el transporte urbano público es, en muchos casos, la única alternativa para una gran parte de la población para poder trasladarse de un lugar a otro, ya sea por el simple hecho y voluntad de ser trasladados, como por una necesidad de todos los días, como puede ser la movilidad de la casa al trabajo. De este modo, entonces, el transporte público puede verse como un limitante en la productividad de una comunidad.

Tal como se discutió en el Curso de Gestión Urbana para Latinoamérica, realizado en Lima en 2003, el transporte público “es esencial para mejorar la eficiencia de la ciudad y disminuir las diferencias de oportunidades entre diferentes personas”. Sin embargo se aclara que, para que el mismo sea competitivo, debe contar con una demanda elevada, en especial debido a las variaciones tanto temporales como espaciales (por origen y destino). Asimismo, se afirma que “una ciudad densa y de uso mixto favorece al transporte público

porque aumenta la demanda por parada de los autobuses o de otros tipos de vehículos. (...) El sistema de transporte público genera enormes externalidades positivas. Entre ellas, da a todos los ciudadanos y a todos los miembros de los hogares cercanos a sus rutas y paradas alternativas de transporte. El transporte público es especialmente “abridor de oportunidades” para niños, adolescentes y ancianos que pueden valerse por sí mismos, pero que no tienen oportunidad de manejar. En general, y especialmente en países de América Latina, el transporte público es capaz de usar el escaso espacio físico de las vías más eficientemente que el automóvil. También puede generar menos consumo de energía y contaminación por pasajero transportado”.³

Por otro lado, según un estudio realizado por el Banco Mundial, hay una serie de problemas principales del transporte público, los cuales se listan a continuación:

- Urbanización rápida y expansión de áreas urbanas.
- Falta de coordinación entre los niveles de gobierno en regiones metropolitanas.
- Falencias en la organización de transporte de autobuses.
- Crecimiento explosivo del sector informal.
- Exclusión social y baja movilidad de los sectores más pobres.
- Subsidios Generales vs Dirigidos.
- Problemas de financiamiento del Transporte Urbano.⁴

Entre todos estos problemas, puede notarse que varios de los mismos serán tratados en este proyecto, y de ahí su relevancia.

Sumados a estos, se deben tener en cuenta otros aspectos, propios de la realidad actual del mundo. Tal como comenta Peter Senge en su obra *La quinta disciplina* [2], “la capacidad de aprender con mayor rapidez que los competidores quizá sea la única ventaja competitiva sostenible”. Al crecer la interconexión en el mundo y la complejidad y el dinamismo en los negocios, el trabajo se vincula cada vez más con el aprendizaje. Ya no basta con tener una persona que aprenda para la organización (...). Ya no es posible “otear el panorama” y ordenar a los demás que sigan las órdenes del “gran estratega”. Las organizaciones que cobrarán relevancia en el futuro serán las que descubran cómo aprovechar el entusiasmo y la capacidad de aprendizaje de la gente de *todos* los niveles de la organización”. Desde este punto de vista, se pone en evidencia la necesidad de tomar un enfoque en el problema que impulse la generación de nuevos ámbitos de aprendizaje, partiendo desde el

³ El Rol del Transporte Urbano en el Desarrollo Económico y Social de la Ciudad [9].

⁴ Participación del Banco Mundial en el Sector del Transporte Urbano [5].

transporte y con posibilidad de ser trasladado a otros ámbitos relacionados con el mismo.

Continuando con las palabras de Senge, se destacan dos comportamientos sistémicos que requieren de una especial atención. Estos comportamientos arquetípicos son los denominados *límite del crecimiento* y *desplazamiento de la carga*.

En el primer caso, el comportamiento hace referencia a un proceso que se refuerza a sí mismo, consiguiendo de este modo un comportamiento de crecimiento exponencial, hasta el punto en el cual comienza a tender a un equilibrio, encontrando una **limitación en su crecimiento**. En sí, no parecería haber ningún problema, pero puede ocurrir que el comportamiento creciente se revierta, entrando de este modo en un ciclo inverso de colapso decreciente. Esto es muy común en sistemas que sufren de una aceleración descontrolada de sus procesos, cosa que se puede apreciar en el sistema de transporte, como fue explicado anteriormente. Hoy en día, se está llegando a un límite en las exigencias al medio y, de no intervenir en el mismo a tiempo, se puede entrar en un comportamiento decreciente que pondría en riesgo la red de transporte. Este estudio tiene, como uno de sus objetivos, crear una plataforma metodológica que permita evitar este comportamiento.

En el segundo caso, del **desplazamiento de la carga**, el comportamiento que se describe es el de corregir un problema con una solución sintomática en el corto plazo, a partir de un comportamiento reactivo; y dejar de lado una solución fundamental, sumado a un efecto lateral que hace cada vez más difícil la aplicación de esta solución fundamental. En nuestro caso en particular, puede notarse que la necesidad de un mejor servicio de transporte hoy en día se viene cubriendo con soluciones inmediatas de poca efectividad, que a su vez tiene un efecto negativo en el sistema, que se podría evitar a partir de una mejor planificación que permita aplicar una solución fundamental. La idea del trabajo es, entonces, evitar este comportamiento, consiguiendo llegar a una solución definitiva del problema.

1.4: Motivación para abordar el problema

El hecho de elegir este problema en particular está vinculado con una serie de aspectos que lo hacen interesante para desarrollar personalmente:

- Teoría: Se trata de un tópico de gran interés, que abarca aspectos psicológicos de las personas pero a su vez permite incorporar conceptos aprendidos en la carrera de ingeniería.
- Técnica: Es un campo que permite la utilización de herramientas de simulación como una aplicación alternativa de apoyo en el análisis, lo

cual permite un enfoque innovador y que agregue valor, y a su vez se relaciona con un desarrollo personal en mi profesión como ingeniero.

- Profesión: Se trata de una temática que fue desarrollada en parte de mi experiencia profesional en un proyecto de consultoría, y por lo tanto cuento con una serie de conceptos que deseo profundizar mediante este estudio en particular.

Junto con estos tres motivos, cabe destacar una visión personal de poder desarrollar una herramienta que sirva para mejorar el análisis del comportamiento de peatones, cuya finalidad sea, principalmente, mejorar la seguridad de las personas y aportar al beneficio de la sociedad en su conjunto.

1.5: Etapas del proyecto

El proyecto de tesis tendrá una serie de etapas iniciales que consisten en la **generación** de un **marco teórico** para identificar los principales aspectos a considerar dentro de cada una de las ramas de investigación en el comportamiento de los pasajeros y su interacción con los medios de transporte (los mencionados en la introducción al problema), para luego poder aplicar estos conocimientos a la generación de una herramienta que permita la integración entre ellos.

Una vez desarrollado el marco teórico, se procederá a la creación de un modelo de simulación que refleje este comportamiento, el cual cuenta con las etapas que se detallan en la figura 1.2 que se muestra a continuación. Aquí puede verse, en términos generales, que se cuenta con una serie de etapas dentro del mundo abstracto o conceptual, y otras que corresponden al mundo real. Dentro de este proceso, se destacan las etapas de **conceptualización**, que consiste en la interpretación de un problema real y en la decodificación de esa realidad para poder desarrollarla de la mejor manera posible en un mundo simplificado y conceptual. Luego, las de **verificación** y **validación**, que consisten en verificar la coherencia en el comportamiento del modelo ante distintos estímulos externos, y validar los resultados ante un hecho con resultados conocidos, respectivamente. Este último proceso de validación es el que permite llevar los datos del mundo abstracto a la realidad, siendo el siguiente paso la **implementación**, la cual es seguida por una realimentación al modelo en la etapa de **evaluación** y análisis de la nueva realidad, para identificar un nuevo **problema** y comenzar nuevamente con el ciclo acá detallado.

Una vez finalizado el proceso de modelización, se contará ya con la información necesaria para la conclusión de la primer etapa del proyecto de planificación del comportamiento del transporte en la ciudad, y de este modo se procede a la **implementación** de dicha estrategia, desde un enfoque más

operativo, concluyendo de este modo la parte central que se pretende estudiar en este documento.

Figura 1.2: Etapas del proceso de modelización. Adaptado de *Introduction to System Dynamics and Modeling* [Richardson; Pugh 1981]

1.6: Criterios de éxito del proyecto

Para que el proyecto pueda considerarse exitoso, el mismo debe cumplir con una serie de condiciones que se detallan a continuación:

- Debe poder superar con éxito la etapa de identificación del problema, permitiendo, a su vez, generar una metodología de identificación rápida y efectiva para proyectos posteriores con similares características.
- Debe, entre las etapas de conceptualización y verificación, cumplir con las condiciones de comportamiento propias de una red de transporte urbano, así como también reflejar un comportamiento significativo de todos los agentes involucrados en la simulación, como son los colectivos y los pasajeros de los mismos.
- La etapa de validación es una de las partes donde más se centra la condición de éxito del proyecto, siendo en la misma donde puede evaluarse en términos reales si los resultados obtenidos a partir del modelo se ajustan con los obtenidos en la realidad.
- Las etapas de implementación y evaluación, en las cuales se podría evaluar con mayor precisión la solvencia del proyecto, dependen de otros factores que exceden al proyecto, con lo cual no formarán parte de las condiciones de éxito del mismo, y quedan como futuras líneas de investigación, a detallarse en el correspondiente capítulo.
- El proyecto, en términos generales, debe permitir una mejora significativa respecto a otras metodologías, reduciendo tanto los costos como los tiempos de análisis. Si bien los costos son más difícil de verificar, y más aún al nivel de detalle con que se analizará en este proyecto en particular, el análisis de los tiempos manejados será un buen indicador de éxito.

2. ESTADO DE LA TECNOLOGÍA

2.1: Resumen del estado de la cuestión

“El aspecto más triste de la vida actual es que la ciencia gana en conocimiento más rápidamente que la sociedad en sabiduría.”

Isaac Asimov

Para poder explicar el estado de la cuestión, se hará un repaso de distintos casos de estudio relacionados con el problema a tratar en este documento que se hayan realizado a nivel global. Éstos serán explicados a partir de la evolución del enfoque conceptual. Dentro de este título, también, se diferenciarán dos conceptos principales de investigación, que son la descentralización y la utilización de la simulación como herramienta de apoyo. Luego, en el siguiente capítulo, se hará una mención especial, a modo introductorio, de algunas de las técnicas utilizadas, tales como la licitación competitiva y la evaluación multicriterio.

2.2: Evolución del enfoque conceptual empleado para el problema

Yendo al nivel más elemental de la evolución de los medios de transporte, podemos remontarnos a la invención de la máquina de vapor, en 1769. A partir de allí, tras unas pocas décadas comenzaron a aparecer las primeras locomotoras y barcos a vapor, que tenían la capacidad de transportar un número considerable de pasajeros a una velocidad hasta ese entonces inimaginada. El mismo proceso evolutivo nos lleva a la invención del automóvil en 1880 y la producción en masa del mismo a partir de 1913, o a la construcción del primer tren eléctrico en 1879.

Toda esta cadena de innovaciones en el sistema de transporte, sin embargo, debía ser acompañada por una red sobre la cual poder transportarse. De ahí que la necesidad de una planificación de la red de transporte sigue un proceso similar, en sus principios, al de las nuevas tecnologías que fueron apareciendo.

Sin embargo, incluso desde sus principios, comenzaron a aparecer una serie de problemas: por un lado, al haber cada vez más y más vehículos, empezaron a aparecer congestiones de tráfico, para desgracia de los habitantes de la ciudad se incrementó el ruido en las calles, así como también la contaminación.

Es en este marco donde aparece la necesidad de una correcta planificación general de la red de transporte para cada ciudad, para entender el comportamiento de la misma, tanto a nivel del transporte público como privado, y su relación con otros medios de movilización.

Esta planificación, a su vez, y debido a la complejidad que tiene una red urbana, independientemente del nivel en el que se la mire, se debe separar en tres etapas. Cada una de ellas tiene un objetivo particular de cumplimiento, y un horizonte de análisis diferente. Estas etapas son:

1. Planificación estratégica
2. Planificación táctica.
3. Planificación operativa.

El primer caso habla de la planificación a más largo plazo, y es la que será tratada en este documento. En la misma se busca determinar los comportamientos principales en una red, y realizar una correcta diagramación de recorridos en la misma, a partir de una serie de restricciones propias del sistema.

En el segundo caso, una vez realizada la planificación estratégica, se busca llevar a la práctica dicho análisis. Para eso entran en juego condiciones como la asignación de la flota, y la frecuencia de servicio a brindar.

Finalmente, en el último nivel está la planificación operativa, la cual consiste en la materialización de las etapas anteriores en la práctica. Esto tiene un horizonte temporal mucho menor que las anteriores, muchas veces reducido a un sólo día laboral, y consiste en determinar los corregimientos a llevar a cabo para poder cumplir, de la mejor manera posible, con los objetivos planteados en la etapa de planificación táctica, salvando todas las eventualidades que pueden aparecer en contacto con la realidad.

Para poder entender, entonces, la metodología a utilizar para realizar esta planificación, se desarrollan una serie de conceptos a continuación.

2.2.a: La descentralización y sus dimensiones

A fines de 1991, dos hechos importantes – por un lado, la disolución de la URSS, confirmada por Boris Yelstin el 7 de diciembre; por otro, la partición de IBM, confirmada por su presidente, John Akers, un día después – confirmaron una tendencia que ya se venía observando en otras organizaciones a nivel mundial: la descentralización.

Al igual que en estos dos casos puntuales que resaltan debido a su importancia a nivel mundial, este mismo comportamiento puede observarse en el pensamiento de un número elevado de personas y organizaciones en todo el Globo.

Sin embargo, si nos vamos dos siglos más atrás, y analizamos *La Riqueza de las Naciones*, publicado por Adam Smith en 1776, nos encontramos con una visión de mercados descentralizados como una alternativa más organizada y

eficiente al control centralizado, logrando el orden económico y la justicia a partir de la ausencia de un control centralizado de la economía. Siguiendo con este análisis, según palabras de Smith, “ningún individuo en la sociedad intenta promover el interés público, ni sabe cuánto lo está promoviendo... sólo pretende su propio beneficio, y en esto, como en muchos otros casos, es guiado por una mano invisible para promover un fin que no fue parte de su invención”.

Otro caso de especial importancia puede verse en el marco de la biología, en *El Origen de las Especies*, de Charles Darwin, publicado en 1859. En el mismo, puede notarse en la teoría de la selección natural un enfoque claramente descentralizado, al afirmar que no se requiere de un diseñador centralizado para crear orden en el mundo viviente, y respaldar esta postura a partir de los procesos de variación y selección, ambos con características descentralizadas.

Si bien estos dos estudios se concentran en este modo de pensamiento como principal respaldo a sus teorías, no es hasta este siglo que se nota una clara tendencia en la forma de pensar las cosas de manera descentralizada. Es recién en este siglo en el cual la sociedad en general se está permitiendo este enfoque para diversos campos de análisis. De tal modo, puede notarse 5 campos principales en los cuales se nota un proceso de descentralización, los cuales serán analizados en términos generales a continuación, enfocado especialmente a lo que hace referencia a nuestro problema en particular del transporte urbano público. Los mismos son:

- Descentralización en las organizaciones.
- Descentralización en las tecnologías.
- Descentralización en los modelos científicos.
- Descentralización en las teorías del Yo y la mente.
- Descentralización en las teorías del conocimiento.⁵

Si bien acá se lista a estos campos y se busca entender a cada uno por separado, cabe destacar, como la misma teoría lo respalda, que ninguno prevalece sobre los otros, sino que en la interacción entre los mismos se encuentra el orden que rige a nuestra sociedad, como un sistema complejo que va dependiendo de uno u otro campo con mayor o menor importancia, dependiendo de las circunstancias particulares que se sucedan.

Descentralización en las organizaciones: en todo tipo de organizaciones puede verse una clara diferencia en el modo de operar. Desde gobiernos nacionales, hasta escuelas, desde empresas multinacionales hasta pequeñas empresas locales. En estas últimas, puede notarse, a partir de la Revolución

⁵ Tortugas, Termitas y Atascos de Tráfico [1].

Industrial, que las compañías fueron organizadas en jerarquías piramidales con niveles definidos e inflexibles en la mayoría de los casos. De este modo, prácticamente la totalidad de las decisiones estaban centralizadas; la información solamente circulaba hacia arriba en la pirámide jerárquica, para bajar las decisiones en dirección opuesta. Tal como explica un artículo de *Harvard Business Review* en 1989, titulado “*Managing without managers*”, “La pirámide organizativa es la causa de gran parte de los malestares en la empresa, porque la cima está demasiado lejos de la base. Las pirámides acentúan el poder, promueven la inseguridad, distorsionan las comunicaciones, traban la interacción y dificultan que las personas que planifican y las que ejecutan se orienten en la misma dirección”. En respuesta a esto, hoy en día puede notarse un “achatamiento” de las organizaciones, evitando la inclusión de gerentes intermedios innecesarios, y distribuyendo las responsabilidades de un modo más equitativo entre las personas involucradas. Un ejemplo de este tipo de comportamientos organizativos está dado por los *círculos de calidad*, en los cuales empleados de distintos niveles jerárquicos trabajan en conjunto, como pares.

Este comportamiento, que se viene buscando cada vez más en las empresas de la actualidad, se corresponde con el buscado en el caso del transporte público. Si bien siguen existiendo una serie de niveles jerárquicos que dificultan llevar a cabo algunas dinámicas similares al círculo de calidad, hoy el enfoque del análisis viene dado por una mayor cercanía con el cliente (en particular, con los pasajeros), y la toma de decisiones se ve relacionada de manera íntima con las exigencias de los mismos. De este modo, se nota que los niveles inferiores en las organizaciones de transporte comienzan a tener mayor importancia dentro de las empresas y, en consecuencia, se les exige mayor participación en los procesos de decisión estratégica.

Descentralización en las tecnologías: esta idea es, posiblemente, una de las causas del comportamiento visto en las organizaciones. Hoy en día, con la utilización masiva de ordenadores, y artefactos móviles electrónicos, cada vez se nota una mayor amplitud tecnológica. Si bien esta evolución viene acompañada por un proceso de convergencia tecnológica, por medio de la cual un individuo puede conseguir, en un mismo artefacto, una serie de funciones que en otro momento requerían de una serie de dispositivos; los avances vistos en la actualidad permiten independizarse prácticamente por completo de un núcleo centralizador de la tecnología.

Llevando este análisis un poco más lejos, puede notarse que, en los ordenadores de hoy en día, se comienza a utilizar, y cada vez en mayor medida, un número elevado de procesadores en paralelo. Ésta es, quizás, una de las mejores ejemplificaciones de un comportamiento descentralizado, al

particionar los problemas u operaciones en un conjunto de tareas de menor envergadura y trabajar con estos procesadores en paralelo. Sobre esta idea de procesadores “masivamente paralelos” se basan también los programas de simulación utilizados hoy en día: si hubiésemos querido desarrollar nuestro proyecto hace un par de décadas, hubiese sido prácticamente imposible, debido a la capacidad de los ordenadores requerida para el correcto funcionamiento de la herramienta. Sin embargo, con la velocidad de procesamiento que se obtiene en la actualidad, se pueden realizar innumerables pruebas y análisis de distintos escenarios sin incurrir en una gran inversión de tiempo ni de costos.

Descentralización en los modelos científicos: durante mucho tiempo, fueron las leyes de Newton las que dominaron, prácticamente en su totalidad, al mundo científico, representando al mismo como un sistema de causas y efectos lineales. Sin embargo, y siguiendo en parte con la tercera ley de Newton, no se hicieron grandes desarrollos analizando las reacciones que surgen como consecuencia de las acciones. Es aquí donde comenzaron, a lo largo del siglo XX, a surgir cuestionamientos, en el campo de los sistemas complejos. Se comenzó a analizar al mundo no más como una cadena causal, sino como un ecosistema de interacciones descentralizadas y circuitos de realimentación, buscando conductas complejas a partir de interacciones entre reglas simples, y patrones a partir de interacciones entre componentes simples.

Dentro de esta tendencia en los modelos científicos, surge el estudio de sistemas autoorganizados como una vertiente del estudio de sistemas dinámicos no lineales, que busca encontrar una base matemática común a cualquier tipo de conducta compleja, y es precisamente sobre esta base sobre la cual se centra este proyecto.

Descentralización en las teorías del yo y la mente: ya desde la división de la mente entre el *yo*, el *superyó* y el *ello* defendida por Freud en el siglo pasado puede verse una corriente en la psicología que considera a la mente no como un único flujo de conciencia, sino como una interacción de un número mayor de partes. De hecho, esta división de la mente se lleva a otro nivel en la teoría de las relaciones objetales, defendida por Melanie Klein, quien dice que las relaciones con las personas en el mundo son internalizadas como agentes y objetos dentro de la mente, y que el *yo* surge de la interacción entre estos objetos internalizados.

Sobre la misma corriente se encuentra la inteligencia artificial, en la cual se inició el estudio – en 1950 – con una serie de enfoques distintos, incluso a partir de redes neuronales, pero se priorizó el análisis más centralizado. Sin embargo, en las últimas décadas (a partir de 1980) se le dio más importancia a

las redes neuronales, representadas principalmente en el libro *Parallel Distributed Processing* (McClelland, 1986). A partir de allí se fueron sucediendo una serie de modelos y arquitecturas, y se pueden encontrar dos principales ramas de estudio de inteligencia artificial: por un lado, las redes neuronales, con una arquitectura de componentes simples, pero con un alto grado de interconexión; y por otro, la Sociedad de la mente, caracterizada por una cantidad limitada de subsistemas complejos, con gran especialización y semiaislados. Sin embargo, el común denominador entre ellas es la descentralización.

Descentralización en las teorías del conocimiento: incluso a este nivel puede notarse una tendencia similar a las vistas anteriormente. Esto está respaldado, principalmente, por estudios tales como el *principio de incertidumbre de Heisenberg* y los *teoremas de incompletitud de Gödel*, que revolucionaron las matemáticas tradicionales tras su publicación. Tal es así que, hoy en día, los filósofos se apartan de la idea de una concepción unificadora del conocimiento, creyendo cada vez más en la reconstrucción permanente del mismo, de modo más descentralizado.

El hecho de creer en el conocimiento como algo dinámico y de constante reconstrucción, justifica el desarrollo de este proyecto, siendo que el mismo busca, como foco principal, la construcción de una herramienta de apoyo ante distintas modificaciones de la realidad imperante, creyendo en la misma como un sistema dinámico, tanto en cuanto a la estructura física del ambiente, como por la modificación del comportamiento entre las partes que interactúan en dicho lugar.

2.2.b: La simulación como herramienta de apoyo para la toma de decisiones

Desde sus inicios la simulación fue utilizada como una herramienta de apoyo en el análisis de una situación, normalmente problemática, de la vida real. La existencia de una herramienta que permita realizar análisis sobre escenarios hipotéticos de la realidad, sin necesidad de implementar realmente las condiciones allí generadas, permite lograr una profundidad de análisis que, en algunos casos, sería prácticamente imposible de lograr.

Desde esta perspectiva, pueden notarse ejemplos de simulación en numerosos campos de investigación, tales como la física, química, biología, economía y Ciencias Sociales; y la tendencia – en especial debido a los avances tecnológicos de los últimos años, que permiten disponer de mejores procesadores y mejores programas de simulación – indica que son cada vez más los campos en los cuales se utiliza este tipo de herramientas.

Se puede ubicar el origen de la simulación en la Segunda Guerra Mundial donde John Von Neumann y Stanislaw Ulam (ambos integrantes del *Proyecto*

Manhattan), al intentar resolver un problema relacionado con el comportamiento de los neutrones, generaron un programa de números aleatorios y distribuciones de probabilidad, luego denominado “método de Montecarlo”. Por la misma época tuvo su origen la Investigación de Operaciones, muy relacionada con la simulación. Luego, a lo largo de toda la Guerra Fría se fueron sucediendo distintos modelos de simulación, especialmente destinados a actividades militares para, a partir de 1960, comenzar a explotarse en el ámbito civil.

Desde este nuevo enfoque, pueden encontrarse hechos significativos a lo largo de las últimas cinco décadas. Uno de ellos es la creación de dos noruegos, Dahl y Nygaard, quienes, en 1967, fueron los pioneros en la programación por objetos, y tuvieron como creación final al programa *Simula 67*, el cual tuvo especial éxito en la simulación discreta, a partir de su clase *SIMULATION*. Cabe destacar que esta programación por objetos no tuvo gran aceptación hasta más de una década después, con lenguajes como Smalltalk, C++, y otros, hasta llegar a Java.

Con este detalle aquí comentado, queda claro que los avances logrados en la rama de la simulación vienen íntimamente relacionados con aquellos avances realizados en la informática y la computación.

Hoy en día, en referencia a la industria, son muchos los rubros en los cuales se utilizan modelos de simulación, abarcando negocios tales como las telecomunicaciones, el transporte, las redes sociales, la estimación de demanda de consumo masivo, y tantos otros.

Además, existen una serie de categorizaciones distintas de la simulación, dependiendo del objetivo que se quiera perseguir con la misma. Estas categorías pueden verse con detalle en la tabla 2.1 que se muestra a continuación.

Clasificación de las simulaciones según su propósito		
Tipo	Modo	Uso
De comportamiento (juego de roles o "role playing")	Acción sobre el comportamiento de los actores. Se ensaya el comportamiento personal en ciertas circunstancias o en determinado ambiente.	Para adquirir habilidad personal a fin de actuar en determinados ambientes, circunstancias o formas de relación.
Sistémica	Acción sobre las entradas a un sistema en diferentes puntos del mismo. Se explora cómo responde un sistema o proceso ante determinados estímulos.	Para comprender en profundidad el funcionamiento de un sistema y adquirir habilidad para actuar sobre él en condiciones conocidas o nuevas.
Estructural	Acción sobre la estructura de un sistema o proceso. Se explora cómo la estructura afecta a su comportamiento.	Para comprender cómo influyen sobre el comportamiento los diferentes elementos estructurales de un sistema o proceso y la forma en que están organizados.
De interpretación	Observación del comportamiento de un sistema que recibe entradas predeterminadas. Se interpretan ciertos síntomas y se trata de descubrir cómo opera el sistema que los genera.	Para interpretar la forma de funcionamiento de un sistema del cual proviene una salida y eventualmente decidir acciones a aplicar en casos similares.
De operación	Acción sobre elementos predeterminados de manejo de un sistema, proceso o equipo.	Para adquirir destreza en el manejo de un sistema, proceso o equipo.
De observación	Observación del funcionamiento de un sistema o proceso, sin poder actuar sobre los factores que lo determinan.	Para comprender en forma general cómo funciona un sistema o proceso.

Tabla 2.1: clasificación de simulación por propósito. Extraído de *Las Simulaciones como recursos de Aprendizaje* [16].

Un caso en particular que cabe la pena mencionar – debido a la relación que tiene con nuestro proyecto – es el desarrollado en la Universidad de Belfort por David Meignan et al. y que fue publicado bajo el nombre de *Simulation and Evaluation of Urban Bus Networks using a Multiagent Approach* [8].

En el mismo, se afirma que existen varias herramientas de simulación de transporte, pero que son muy pocas las que concentran su estudio en el transporte urbano público, y de estas últimas, la mayoría concentra su análisis en la estimación de la demanda.

Luego, se hace una categorización de los principales comportamientos que se aprecian en este tipo de transporte, los cuales son:

1. El comportamiento de la gente,
2. las dinámicas propias del tráfico, y
3. las operaciones específicas de la red de colectivos,

siendo esta última la relación entre los colectivos, los pasajeros y el tráfico propiamente dicho. Con esta aclaración, el estudio respalda la idea de utilizar

un enfoque multi-agente para la resolución del problema, e incluso resalta dos observaciones:

1. Una red de transporte público es, por definición, un sistema complejo que incluye un número considerable de entidades que interactúan entre sí.
2. El comportamiento global de la red emerge a partir de este comportamiento individual de cada entidad y la interacción entre las mismas.

Con todo esto, el autor deja en claro que la mejor forma de llevar a cabo el análisis requiere de la utilización de una herramienta de simulación lo suficientemente desarrollada y avanzada, que pueda abarcar todos los comportamientos aquí mencionados, y lograr un modelo que los integre de la mejor manera posible.

2.2.c: La simulación y su relación con el desarrollo tecnológico

Otra publicación que merece una mención especial es la de Richard Zobel, “*A personal History of Simulation in the UK and Europe, 1964-2001*” [15]. En este documento, el autor relata su historia personal, que sirve para entender la realidad de la simulación a lo largo de las últimas cuatro décadas del milenio en un país desarrollado como es Inglaterra.

En un inicio, las actividades realizadas eran netamente militares, con un simulador que funcionaba a partir de un conjunto de operadores analógicos, para el sufrimiento de las personas involucradas en dicho proyecto, al punto de poder – en los mejores días – correr hasta 300 simulaciones de disparo de misiles; pero con la necesidad de trabajar, en la temporada calurosa, en horarios nocturnos debido al sobrecalentamiento de un buen número de las 5000 válvulas puestas en funcionamiento.

Luego, comenzó a verse un cambio a partir de 1970, con la inclusión de sistemas digitales en la red, conformando de este modo un híbrido analógico/digital. Es en esas épocas cuando comenzaron a aparecer estos nuevos sistemas digitales, con mayor precisión, pero de mayor lentitud que los analógicos. Junto a ellos, los modelos a simular también evolucionaron: comenzaron a aparecer distintos criterios de decisión a partir de distintas variables de control iniciales. Sin embargo, seguía existiendo un serio problema con la exactitud de los datos obtenidos, y la velocidad de operación no terminaba de convencer. De ahí que, al tiempo, comenzaron a desarrollar un sistema completamente digital, denominado MOSAIC (*Modular On-hue Signal and Instrumentation Computer*), que superaba en 10 veces la velocidad del mejor procesador hasta ese entonces conocido.

A partir de ese entonces comenzaron a sucederse una serie de desarrollos en el campo de la tecnología, desde la inclusión de discos floppy 8", a los procesadores Intel y discos floppy 5.25", a fines de la década del '80. Es aquí donde el autor ubica el inicio de la simulación como herramienta de apoyo para la resolución de problemas modernos, con la posibilidad de realizar los procesos de verificación y validación con precisión, en un tiempo considerablemente corto. De aquí mismo surgen la simulación orientada a los objetos y, posteriormente, el lenguaje de JAVA.

Luego, comienzan a sucederse modelos de representación de realidades tales como los procesos de manufactura, simulación espacial, y simuladores de manejo (tanto de automóviles como de aviones), para llegar a la simulación basada en agentes a fines del siglo, confirmando la tendencia en un taller de esta temática realizado en Passau, Alemania, en abril de 2000.⁶

De este modo, basándonos en la información brindada por el autor, podemos asegurar que las técnicas aquí desarrolladas se encuentran aún en proceso de crecimiento y guardan gran relación con el desarrollo tecnológico vivido en las últimas tres décadas. Asimismo, del mismo modo que este desarrollo acompaña una necesidad en la sociedad, y no se puede pensar a la misma sin este soporte tecnológico; la simulación va cobrando cada vez más importancia en el campo del análisis.

2.3: Clasificación de técnicas modernas para la resolución del problema

Para el caso analizado en este proyecto, se pueden identificar dos conceptos en particular relevantes a la hora de resolver el problema de planificación de transporte. Éstos son la **licitación competitiva** y la **evaluación multicriterio**, que serán desarrollados a continuación.

Además de éstos, se hará una descripción de los principales aspectos a tener en cuenta en la planificación del transporte en Estados Unidos, en donde se incluye una breve explicación de la utilización de modelos de simulación como herramienta de apoyo.

2.3.a: Licitación Competitiva

Una corriente de planificación que últimamente viene siendo utilizada con frecuencia, en especial en países desarrollados de Europa, es la de la *Licitación Competitiva*.

Esta metodología tiene sus inicios en el cambio de milenio, con la publicación del *White Paper sobre Política de Transporte en Europa (2001)*. En este documento se estimaba un crecimiento en el transporte de pasajeros para la

⁶ Adaptado del documento "A Personal History of Simulation in the UK and Europe, 1964-2001" [15]

unión Europea de un 24%, con un principal crecimiento en el uso de coches privados, que tiene consecuencias muy negativas en la movilización de la gente en una red urbana, en especial para ancianos y estudiantes; así como también un incremento en los niveles de contaminación. Ahora bien, con el enfoque histórico el sistema de transporte público se encuentra en desventaja frente al transporte privado, y requiere de grandes subvenciones y otros tipos de financiamientos para continuar siendo medianamente competitivos.

Dentro de este entorno surge la idea de la licitación competitiva, que consiste, básicamente, en otorgar derechos exclusivos para dirigir una ruta, o una red de rutas, a un operador, a partir de un proceso competitivo. Asimismo, pueden existir subvenciones de parte de la autoridad al operador que demuestre el mejor rendimiento y nivel de servicio.

Un ejemplo de caso de éxito de esta modalidad puede verse en la ciudad de Göteborg, Suecia, donde se logró un aumento de 7,5% en el número de pasajeros transportados, a pesar de un decremento de 30% en las subvenciones públicas. En promedio, también, se realizó una comparación entre ciudades en las que se implementó la modalidad contra los que no se hizo, y se obtuvo un aumento en el número de pasajeros de 1,7% en los casos en que se utilizó y de 0,4% en los casos en los que no.

Ahora bien, para que esta modalidad sea efectiva, es necesario contar con una serie de medidas de respaldo:

- Se deben establecer con claridad los requisitos de la red, llevar a cabo la convocatoria pública y controlar de cerca el cumplimiento de las mismas.
- La autoridad de transporte debe tener como principal objetivo brindar el máximo servicio posible en cada red, a partir de los fondos disponibles.
- Los planes de transporte público deberían ser parte de las visiones a largo plazo, generando un modelo integrado de transporte público sostenible que, a su vez, debería ser coherente con otras políticas y aprobado por los ciudadanos.
- Priorizar el acceso al transporte público en cada nuevo proyecto de desarrollo urbanístico.

- Animar a la autoridad local para firmar la declaración de CIVITAS⁷ y a las compañías de transporte público para adoptar la carta de la UITP⁸ de Desarrollo Sostenible.

En el siguiente capítulo se listan una serie de ciudades en las cuales se desarrollaron con éxito proyectos bajo esta modalidad, a lo largo de toda Europa.

2.3.b: Evaluación multicriterio

La planificación de una red de transporte público, tal como puede notarse, debe cumplir con una serie de condiciones elementales, y puede seguir una serie de objetivos diferentes en simultáneo. Desde este enfoque, pueden desprenderse dos grandes orientaciones, que son el beneficio percibido (o buscado) por el pasajero, quien cumple la función del demandante de un servicio; o el beneficio de la empresa que brinda dicho servicio, es decir, el ofertante.

Sumados a estos dos principales grupos, existe también un nivel superior de análisis, en donde entra en juego el gobierno u organismo de control que determina el tipo de servicio que debe brindar cada empresa de transporte público, y donde el beneficio surge como combinación de los dos enfoques antes mencionados, junto con otros factores adicionales.

Del mismo modo que ocurre con los distintos agentes que participan de la dinámica de transporte público, también existen distintos niveles de jerarquía en el análisis, que se deben a los distintos niveles de planificación. De este modo, en un primer nivel puede notarse un criterio de evaluación que priorice la faceta operativa; luego, un nivel más arriba, una evaluación socioeconómica; para pasar finalmente a un nuevo nivel, que tiene mayor relación con el aspecto estratégico, de evaluar la viabilidad del proyecto.

Bajo esta perspectiva, donde queda en evidencia que la implementación de una red de transporte público abarca distintos niveles en una sociedad, y cada estrategia a seguir afecta en mayor o menor medida a distintos organismos, con objetivos diferentes e, incluso, opuestos en algunos casos, surge el *sistema de evaluación multicriterio*. El mismo, tal como dice su nombre, tiene en cuenta una serie de criterios distintos y la relación entre los mismos para determinar la mejor estrategia a seguir, a fin de poder cumplir con el mayor número de criterios en paralelo o, en su defecto, cumplir con un objetivo final

⁷ La declaración de CIVITAS obliga a “realizar un cambio significativo en la distribución de los distintos modos de transporte, hacia un modo de transporte sostenible”.

⁸ La UITP es la Unión Internacional de Transporte Público, fundada hace 125 años, y constituye la red internacional de autoridades del transporte público, junto con operadores, responsables políticos, institutos científicos y la oferta de transporte público y la industria de servicios. Su principal función es servir de plataforma para la cooperación mundial en el rubro, contando con más de 3000 miembros de más de 90 países.

que englobe a todos los objetivos particulares, generando el mayor bien para la sociedad.

A fin de entender con mayor claridad el funcionamiento de este sistema de evaluación, tomaremos como ejemplo el estudio realizado por el *Banco Interamericano de Desarrollo* [4].

En dicho documento, se parte de la base de que existen muchos parámetros que pueden servir como indicadores de nivel de servicio en una red de transporte, pero que no se sabe con exactitud qué puede significar cada uno en consecuencia, divide estos parámetros en distintos criterios de evaluación, los cuales, a su vez, se dividen en subcriterios. De esta forma, genera una jerarquía en los parámetros a analizar. Los tres criterios que se generan son:

- a. *Evaluación operativa*: incluye la legibilidad, accesibilidad, eficiencia e interferencias, entre otros.
- b. *Evaluación socioeconómica*: principalmente concentrada en los costos, para cada uno de los agentes involucrados (entiéndase, el usuario, el operador y el sistema global).
- c. *Evaluación de la viabilidad de implantación*: incluye las oportunidades de intervención urbana, la aceptabilidad por parte de usuarios y de los transportistas del lugar y la complejidad de gestión que dicho análisis puede acarrear para la institución responsable.

A fin de poder comparar distintas alternativas, desde los tres criterios de evaluación en conjunto, generan un método de estudio multicriterio. Para el mismo, el principal inconveniente surge a la hora de determinar la importancia relativa de cada criterio frente al resto. Ante este inconveniente, se proponen dos metodologías distintas: por un lado, cuantificar estos pesos a partir de comparaciones cualitativas; y por otro seleccionar la mejor alternativa para cada combinación posible de pesos.

En este segundo caso, al compararse tres criterios de evaluación, suele representarse a los mismos a partir de un triángulo equilátero, siendo cada vértice la máxima puntuación para cada criterio, y el baricentro una ponderación uniforme entre los tres. Para poder evaluar cada combinación de pesos, se utiliza una función objetivo que surge del método de las *medias ponderadas con escala normalizada*.

En pocas palabras, este método consiste en la generación de una matriz de evaluación parcial (de cada alternativa, desde el punto de vista de cada criterio), que luego se normaliza (en escala de $[0,1]$) para cada una de dichas alternativas. De este modo, se pueden comparar las distintas alternativas, y darles un peso determinado de acuerdo a las condiciones que se crean

relevantes a la hora de realizar el análisis. Una forma de entender este peso es a partir de una normalización de cada criterio: si a cada uno de los criterios (C_j) se le asigna un peso (w_j), de modo que la suma de los valores normalizados de cada alternativa equivale a 1 ($\sum_j P_j = 1$), luego el peso de cada alternativa surge como producto de cada peso de los criterios por su evaluación de la alternativa ($P_i = \sum_j (E_{ij} \cdot w_j)$).

A partir de este método, entonces, se realizaron los análisis para cada criterio, que se describen a continuación:

- a. En la **evaluación operativa**, se busca evaluar el cumplimiento de los distintos objetivos básicos operativos que se delimitaron a la hora de realizar el estudio. Desde este punto de vista, es necesario analizar parámetros de tres tipos: de *legibilidad*, que indican la claridad que tiene la alternativa propuesta para ser entendida por el usuario; de *accesibilidad y cobertura*, que indican en cuánto se mejora el servicio frente al existente hoy en día, midiendo la reducción de restricciones físicas, principalmente; y de *eficiencia*, donde se analiza la mejora en el nivel de dicho servicio, junto con la compatibilidad con la red de transporte privado.
- b. En la **evaluación socioeconómica**, de acuerdo a las características propias de una red de transporte urbano, y el período en el cual se realiza el análisis, resulta conveniente realizar un análisis por separado de los costes y los beneficios, y luego analizar por medio del método de las medias ponderadas normalizadas cada uno por separado. Sin embargo, de este análisis, al igual que en nuestro caso, se excluyen todas las inversiones necesarias, tales como canales exclusivos, semaforización, y renovación de flota.
- c. En la **evaluación de viabilidad de implantación**, debido a que se trata quizás del aspecto menos cuantitativo de los tres evaluados, el enfoque busca, principalmente, eliminar las alternativas que resultan atractivas desde otros aspectos, pero que su implantación resulta inviable. Principalmente, en esta evaluación se consideran las oportunidades de implantación, la aceptabilidad tanto de los usuarios como de los transportistas y la complejidad de gestión, analizando cada uno de estos aspectos de manera cualitativa.

Una vez llevada a cabo cada una de estas tres evaluaciones, se procede a armar la matriz, y normalizarla, tal como se explicó anteriormente. El objetivo, al realizar esto, es obtener una resolución en la cual la red cumpla con las condiciones requeridas en todos los aspectos, de la manera más abarcativa posible, y que sea coherente con cada una de las etapas del proyecto en su totalidad, beneficiando a cada uno de los actores intervinientes de la mejor

manera posible. De este modo, antes de realizar el proceso de evaluación para determinar cuál de estas alternativas prevalece sobre las otras, se realiza un análisis previo de cuáles resultan comparables y cuáles no. Lo mismo ocurre con la identificación de alternativas que son representativas de la situación real, tanto desde un punto de vista actual como por lo que se propone realizar.⁹

2.3.c: Aspectos principales en el Proceso de Planificación de Transporte.

Tal como puede desprenderse del documento publicado por el Departamento de Transporte de Estados Unidos, bajo el mismo nombre que este capítulo (*The Transportation Planning Process – Key Issues* [13], en inglés), este proceso requiere de un gran poder de análisis y de planificación, junto con un seguimiento y mantenimiento que, a su vez, afectan en gran medida al desarrollo de la sociedad en la que se está desarrollando dicho plan. Aquí se describen, brevemente, los aspectos principales de este documento.

A modo introductorio, se afirma que “la planificación de transporte es un proceso cooperativo diseñado para fomentar la participación de todos los usuarios del sistema, a partir de un proceso de participación pública proactiva conducido por la Organización de Planificación Metropolitana y el Departamento de Transporte estatal, junto con los operadores de tránsito.”

A tal fin, se listan los principales pasos en el proceso de planificación:

- Monitorear las condiciones existentes.
- Predecir los crecimientos futuros de la población y la economía local.
- Identificar los principales problemas y necesidades de transporte actuales y los proyectados a futuro.
- Desarrollar planes a largo plazo de estrategias alternativas para el transporte tanto de personas como de bienes.
- Estimar el impacto de las propuestas realizadas.
- Desarrollar un plan financiero que permita cubrir todas las inversiones proyectadas de acuerdo al plan.

Ahora bien, para poder llevar a cabo estas tareas, es necesario contar con una serie de organismos competentes. De ahí que, en el documento, se incluye a la Organización de Planificación Metropolitana (MPO, por sus siglas en inglés) y al Departamento de Transporte estatal (DOT).

La *MPO* es un cuerpo a cargo de generar políticas de transporte, formado a partir de representantes tanto de los gobiernos locales como de agencias de transporte, con autoridad y responsabilidad en áreas de planificación

⁹ Cabe destacar que la alternativa de mejoras nulas entra también en el proceso de evaluación, a fin de utilizarse como parámetro de referencia y, de este modo, poder comparar las distintas alternativas entre sí y frente a la realidad actual.

metropolitana. Su principal objetivo es asegurar que todos los proyectos de transporte cumplan con las 3 C: que el proceso de planificación sea Continuo, Comprensivo y Cooperativo. A tal fin, se destacan las siguientes funciones:

- **Establecer un entorno** sobre el cual realizar el análisis.
- **Identificar y evaluar propuestas** de mejora en el medio de transporte.
- Preparar un **Plan de Transporte Metropolitano**.
- Desarrollar un **Programa de Mejoras en el Transporte** para el corto plazo.
- **Incluir al público** en las cuatro actividades anteriores.

La *DOT*, por otro lado, tiene una serie de funciones adicionales a las ya vistas en la MPO: además de responsabilidades en la planificación del transporte, también tiene responsabilidad en el diseño, construcción, operación y/o mantenimiento de instalaciones estatales para distintos medios de transporte, trabajando en conjunto con distintas empresas o grupos que controlen parcial o totalmente alguna de las redes de transporte. En este caso, sus funciones principales son:

- Preparar y mantener un **Plan a Largo plazo de Transporte** a lo largo de todo el estado.
- Desarrollar un **Programa Integral de Mejora en el Transporte** a lo largo de todo el estado.
- **Incluir al público** en las actividades anteriores.

Luego, una vez definidas estas dos organizaciones, y sus principales funciones, en el documento se discuten una serie de conceptos propios del proceso, dentro de los cuales se encuentran el Sistema de Gestión y Operaciones y las Aplicaciones Tecnológicas en la Planificación.

El **sistema de gestión y operaciones** analiza el transporte regional como una red interconectada de sistemas y servicios, a fin de obtener mejoras en su rendimiento a través de una mejor administración y uso de la red multimodal de transporte. Su objetivo principal es, en consecuencia, integrar distintas redes, ya sea redes de distinta naturaleza en una misma localidad, como redes de misma naturaleza pero de ciudades distintas. Esta idea fundamental del sistema muestra una clara tendencia a la unificación de sistemas, analizando todo como un sistema único y complejo.

Con respecto a las **aplicaciones tecnológicas**, se las reconoce como herramientas de apoyo en la toma de decisiones con una importancia cada vez mayor. Entre otros, se incluye a los Sistemas de Información Geográfica (GIS) y los modelos de Simulación. Para este último caso, se listan tres características que aparecen en todos los modelos:

- **Escenario base**, con información real y actual acerca de la red de transporte, descrita a partir de variables cuantificables.
- Una relación entre las variables antes mencionadas y el **comportamiento de los individuos** que realizan el viaje.
- **Proyecciones** para años futuros de las características claves en el sistema de transporte.

Además, lista un proceso de 4 pasos para el desarrollo de los modelos de simulación, los cuales coinciden en buena forma con los que serán tratados en nuestro caso:

1. Generación de Viajes: determina, por cada zona, los orígenes de los distintos viajes.
2. Distribución de Viajes: se estiman la cantidad de viaje y, especialmente, los destinos de los mismos. De este punto, junto con el anterior, surge la matriz de orígenes y destinos.
3. Diferenciación en el Medio de Transporte utilizado: se trata de una aproximación de los viajes realizados por cada medio de transporte, y con qué tipo de compañía se realizan los mismos.
4. Determinación de la línea utilizada dentro de la red: determina, a partir de toda la información anterior, y en correspondencia con las características propias de la red analizada, qué cantidad de pasajeros circulan por cada segmento de la red, y en qué medio.

2.4: Casos recientes de aplicación de los principales métodos

La **licitación competitiva** es un sistema que se viene desarrollando en los últimos años, desde el inicio del milenio. En consecuencia, todos los casos que se listan a continuación son de aplicación reciente, con menos de 10 años de implementación y, debido a esto, no se cuenta con grandes cantidades de información que indiquen cómo funcionó el sistema en los mismos.

Göteborg (Suecia): la ciudad de Gotenburgo tiene una de las mejores redes de tranvías de Suecia, y sirve como ejemplo incluso a nivel mundial. Se trata de una ciudad ubicada a la orilla del puerto y de una serie de canales, con las principales atracciones turísticas en su centro. Los tranvías aquí mencionados cubren toda la ciudad a través de 12 líneas, que a su vez son alimentadas por una serie de líneas de autobuses. Lo más atractivo, quizás, de esta ciudad es el método de pago: se puede utilizar la *tarjeta de Gotenburgo*, la cual sirve para todo medio de transporte público, y de manera ilimitada. Esta tarjeta fue una de las modalidades implementadas bajo esta nueva gestión, a partir de 2006, a cargo de la compañía de transporte Västtrafik.

Helsinki (Finlandia): el sistema de transporte público en esta ciudad también es muy completo, y un gran número de pasajeros utilizan el mismo día a día. En especial, aquí se destacan 10 líneas de tranvías que conectan los distintos barrios de alrededor del centro, y una línea de metro que conecta a este último con los barrios del este. También se cuenta con varias líneas de autobuses y de trenes regionales, así como con una extensa red de circuitos para la circulación de bicicletas. En este caso, la empresa a cargo del control es HKL (*Helsinki kaupungin liikennelaitos*, en finlandés, que se traduce en inglés como *Helsinki City Transport*), una empresa con un pasado extenso en la ciudad, que tiene una cantidad de empleados que superan los 1000 profesionales, en colaboración con HSL (*Helsinki seudun liikenne*, en finlandés. *Helsinki Region Transport*, en inglés) con quien se asoció a principios de 2010.

Frankfurt (Alemania): en esta ciudad alemana, donde se nota un claro contraste entre los grandes rascacielos modernos y los recuerdos de una época colonial en la parte vieja de la ciudad, la red de transporte también demuestra su eficiencia. En este caso, el principal fuerte de la ciudad es el metro o U-bahn, con un servicio de 7 líneas que funciona prácticamente las 24 horas (salvo de 2 a 4 de la mañana). Asimismo, también tiene un servicio de tranvía muy efectivo, y el boleto sirve para los dos medios de transporte por igual. Igualmente a lo que ocurre con Helsinki, la red de autobuses también está muy bien diagramada, y ofrece un muy buen servicio en cada una de sus 24 líneas. Para este último caso, la empresa a cargo del control del transporte es VGF (*Verkehrsgesellschaft Frankfurt*, en alemán. Traducido al español significa *Sociedad Histórica de Tráfico de Frankfurt*). Esta empresa tiene, desde 1979, uno de los primeros Centros de Operaciones en el mundo desde el cual controla toda la red de transporte urbano de la ciudad (tanto para el tranvía, como el metro y la red de autobuses en simultáneo).

En el caso de la **evaluación multicriterio**, es en los proyectos del BID (Banco Interamericano de Desarrollo) donde se nota claramente su utilización. Lo mismo ocurre con los casos de estudio del Banco Mundial, con una metodología muy similar al anterior. De hecho, existe cierta colaboración entre las dos organizaciones (BID y BM), con lo cual no se diferencia la participación de una u otra en los siguientes casos, siendo esto de poca relevancia para nuestro caso.

Bogotá (Colombia): Movilizado en especial debido a los altos niveles de contaminación observados en la ciudad, se realizó un proyecto de implementación de una nueva red de transporte urbano público, a partir de vehículos BRT (*Bus Rapid Transport*), lo cual llevó a la necesidad de un estudio de la demanda en la ciudad y a la diagramación de toda la red. Este plan fue denominado Sistema Integrado de Transporte Público (SITP), y se encuentra

actualmente en proceso de implementación, siendo éste un proceso de largo plazo iniciado en 2004 y con fecha de finalización estimada en 2012. La red aquí diseñada consiste en una serie de rutas troncales con vehículos articulados tipo *Transmilenio*, y otros recorridos pre-troncales o alimentadores de los primeros, más un sistema de cobro electrónico que integre todos los medios de transporte de la red.

Curitiba (Brasil): en este caso, el proyecto de renovación en el sistema de transporte público forma parte de un proceso mucho mayor de inserción social dentro de la ciudad de Curitiba, en especial concentrado en la urbanización de las *favelas* allí instaladas. La ciudad en sí es reconocida a nivel mundial por un exitoso planeamiento urbano, siendo una de las principales ciudades en el rubro a nivel Latinoamérica desde la década del '70 en adelante. En este marco, a partir de un incremento en la planta de vehículos privados en la ciudad, surgió el clásico problema de congestionamiento y su posterior efecto negativo en la eficiencia del transporte público. En respuesta a esto, se realizó un plan de modernización del medio de transporte, con rutas troncales de carriles exclusivos para los autobuses, y plataformas de carga y descarga de pasajeros, más una red secundaria de alimentación a estas rutas principales.

Santiago de Chile (Chile): el sistema implementado en esta ciudad, bajo el nombre de *Transantiago*, tiene características muy similares a aquellas del sistema de Curitiba. Se trata de un proyecto de integración de autobuses con el metro, en un proceso simultáneo de expansión de las dos redes de transporte, y una adaptación de los sectores en donde las mismas coexisten. La característica que se resalta, en este caso, es que las distintas líneas son otorgadas a distintas entidades mediante el proceso de licitación competitiva, siendo entonces un caso que engloba las dos metodologías hasta aquí mencionadas. En principio, es una red de nueve rutas alimentadoras, cinco rutas troncales y una red de metro que maneja la *Empresa de Transporte de Pasajeros Metro S.A.*

3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

3.1: Conceptos básicos y terminología

Para poder realizar una correcta interpretación del problema a tratar, es necesario desarrollar primero una serie de términos y conceptos que ayudan al entendimiento del marco teórico general. Para ello vamos a ir definiendo los mismos por separado, con algunos comentarios adicionales en el caso de haber relación entre términos que ameriten ser resaltados.

3.1.a: Simulación: categorías

En términos generales, se pueden diferenciar tres clases de simulación diferentes. Cada una de ellas tiene un enfoque diferente, y sin embargo, también puede obtenerse modelos de simulación híbridos que las relacionen entre sí. Estas clases son:

- Simulación Discreta o por Procesos
- Simulación Continua o mediante Dinámica de Sistemas
- Simulación por Agentes

La **simulación discreta** realiza un análisis más estático que en los otros dos casos, y la evolución en estos modelos viene dada, en general, a partir de eventos, que pueden depender a su vez de los distintos actores que forman parte de la simulación. En este tipo de simulación, el estado del sistema se ve modificado solamente a partir de la ejecución de eventos, los cuales se encuentran “almacenados” y, a partir de una serie de procesos, se van ejecutando y eliminando, de acuerdo al tiempo correspondiente en la simulación. Además, al ejecutarse un evento se puede desencadenar la generación de eventos futuros, los cuales se encuentran marcados, a su vez, por el tiempo correspondiente, con lo cual la generación y ejecución de eventos pueden estar desfasados en el tiempo (el orden de generación y de ejecución puede ser diferente).

La **Dinámica de Sistemas** realiza el análisis a partir de una idea principal, que es ver el sistema como un continuo, y lo mismo con las partes intervinientes. Se parte de diagramas de depósitos y flujos (*Stocks & Flows*, en inglés), para analizar el comportamiento entre distintos estados, suponiendo una relación entre las partes que se mantiene y se retroalimenta continuamente en el tiempo.

Tal como indica en su estudio Luis R. Izquierdo, “la filosofía de la Dinámica de Sistemas gira en torno al concepto de retroalimentación, o causalidad circular entre variables observables. Estas variables observables pueden describir algún atributo de los componentes básicos del sistema, o referirse a una

magnitud global del sistema”. Son estas últimas (las variables observables del sistema como un conjunto) las preferidas en el análisis, y cabe destacar que el hecho de estudiar magnitudes agregadas del sistema global supone un alto grado de abstracción.

Ahora bien, en la Dinámica de Sistemas el foco del análisis está en analizar la relación entre estas variables observables, las cuales, en sistemas complejos, suelen no tener una relación lineal causa-efecto definida. Es aquí donde esta técnica tiene su principal fuerte: al analizar las relaciones de causalidad entre variables, y definir de este modo la estructura causal (construida a partir de lazos reforzadores y balanceadores), se pueden definir con facilidad los comportamientos globales del sistema, y las posibles modificaciones del mismo.¹⁰

Por último, la **simulación por agentes** tiene un enfoque que difiere de los otros dos anteriores, al considerar al sistema como un ambiente en el cual interactúan una serie de participantes, a quienes se los llama agentes, de un modo descentralizado, y sobre esta interacción se pueden llegar a obtener comportamientos emergentes. En este caso, lo que se modela y programa es el comportamiento de estos agentes, para luego analizar, por medio de la inyección de un número (muchas veces elevado) de estos agentes en un ambiente en común, cómo se comportan en sociedad.

Siguiendo con las palabras de Luis R. Izquierdo, “mediante la simulación basada en agentes, el modelador reconoce explícitamente que los sistemas complejos, y en particular los sociales, son producto de comportamientos individuales y de sus interacciones.

Lo que distingue a la simulación basada en agentes de otras técnicas de modelado es la forma en que se construye la primera abstracción del sistema real y, consecuentemente, el modelo formal. En los modelos formales construidos mediante simulación basada en agentes, los componentes básicos del sistema real están explícita e individualmente representados en el modelo.

(...) Los sistemas basados en agentes se caracterizan por comprender varios agentes que son – en mayor o menor grado – autónomos, heterogéneos e independientes, que muestran cada uno sus propias metas y objetivos, y que generalmente son capaces de interactuar entre sí y con su entorno.

(...) los métodos basados en agentes facilitan el estudio y modelado de sistemas complejos a partir de las unidades que los componen, permitiéndonos

¹⁰ Modelado de Sistemas Complejos mediante Simulación basada en Agentes y mediante Dinámica de Sistemas [7].

construir modelos experimentales de la realidad desde un punto de vista diferente al tradicional: desde lo más simple hacia lo más complejo”.¹¹

En nuestro caso de estudio en particular, se utilizará principalmente la simulación basada en agentes. Aún así, se utilizarán algunas técnicas que se relacionan más con la Dinámica de Sistemas, en especial para tener un mejor entendimiento de cómo son algunos de los comportamientos globales del entorno en el cual se trabajará, para luego poder identificar con mayor claridad los focos en los cuales prestar especial atención para optimizar el sistema de transporte a implementar. En términos propios de Dinámica de Sistemas, se buscará analizar los distintos **lazos** y las formas de **apalancar** los mismos.

3.1.b: Dinámica de Sistemas: lazos reforzadores, lazos balanceadores y apalancamiento

En Dinámica de Sistemas, existen dos herramientas principales para realizar todos los análisis, que son los **diagramas causales** y los **diagramas de depósitos y flujos** (o *Stocks & Flows*).

Los diagramas causales vinculan las variables observables antes mencionadas, por medio de flechas conectoras, con una polaridad positiva o negativa: una flecha positiva indica que la variable en la cual tiene origen la flecha afecta de manera directa en la variable de destino, es decir, que cuando la primera crece la segunda también crece; y una flecha negativa indica que la relación es inversa, y cuando la primera crece, la segunda decrece.

El diagrama causal básico que sirve para entender con mayor claridad este comportamiento directo e inverso, es el de nacimientos y muertes: a mayor población, se obtiene una mayor cantidad de nacimientos, y en consecuencia una mayor población; mientras que a mayor población también existe una mayor cantidad de muertes, y en consecuencia disminuye la población. Este diagrama puede verse en la figura 3.1.

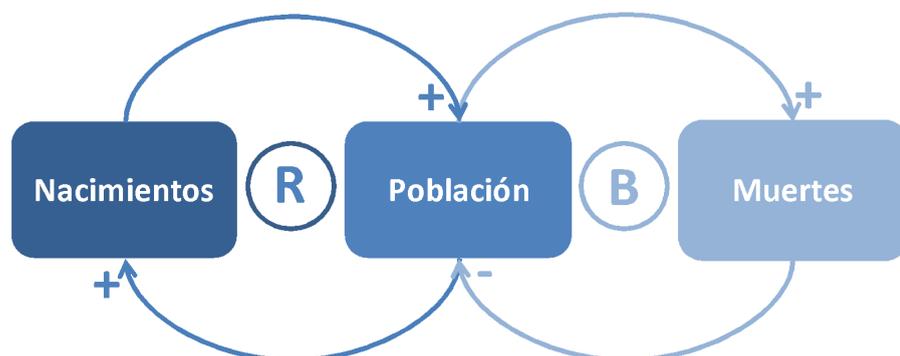


Figura 3.1: diagrama causal de población, nacimientos y muertes.

¹¹ Ídem a la anterior.

Además, puede notarse que se generan lazos cerrados, los cuales, en términos básicos, haciendo el producto entre todas las polaridades involucradas, pueden ser positivos o negativos.

Los lazos positivos, llamados **lazos reforzadores** (identificados con una R), son aquellos en los cuales un incremento de una variable tiene como resultado final un efecto positivo en la variable que la antecede, entrando de esta forma en un círculo vicioso realimentado. Tal es el caso de los nacimientos, donde más nacimientos hacen que aumente la población, que hace aumentar nuevamente los nacimientos. En el tiempo, el comportamiento que suele obtenerse se semeja a una función exponencial.

Por otro lado, los lazos negativos, llamados **lazos balanceadores** (identificados con una B), son los que, al sufrir un incremento en una variable, se obtiene como resultado final un efecto negativo en el antecesor, balanceando de este modo su efecto inicial. Es un ejemplo característico de este lazo el que ocurre con las muertes, donde a mayor población, se obtienen más muertes, pero éstas hacen disminuir la población, con lo cual disminuyen luego las muertes para volver al equilibrio inicial, o a un nuevo equilibrio estable. En este caso, el comportamiento en el tiempo tiende a ser asintótico.

La otra herramienta utilizada, que tiene una mayor utilidad al ser la que permite crear un modelo de simulación, son los diagramas de *Stocks & Flows*. En este caso, las variables cuantificables y almacenables se consideran *Stocks*, y éstos son almacenados en contenedores, los cuales son llenados o vaciados por medio de flujos, siguiendo en consecuencia un comportamiento similar a una red de cañerías y tanques contenedores. Siguiendo el mismo ejemplo que antes, la población sería la variable a simular mediante un depósito, mientras los nacimientos y muertes serán los que modifiquen esta población, siendo el primero un flujo de entrada y el segundo un flujo de salida, respectivamente. Estos flujos, representados con una flecha doble, son **flujos materiales**, mientras la realimentación de parte de la población hacia los flujos está representada con una flecha simple y son **flujos de información**. Todo esto puede verse en la figura 3.2 que aparece a continuación.



Figura 3.2: Diagrama Stocks & Flows de población, nacimientos y muertes

Como regla simple, puede notarse que los lazos que aparecen en el diagrama conceptual, aparecen también en el diagrama de *Stocks & Flows*; y que el primer tipo de diagrama sirve para una etapa cualitativa, mientras el segundo tipo es el utilizado para una etapa cuantitativa, y es el adecuado para el proceso de modelización, verificación y validación vistos en la introducción.

Con respecto al **apalancamiento**, se trata de un efecto (sea positivo o negativo, dependiendo de la situación) que se logra sobre el sistema definido anteriormente, a partir de una causa externa al mismo. Este efecto, siguiendo con el mismo sistema visto hasta ahora, podría verse de manera externa como un control de natalidad, afectando de este modo el lazo reforzador de los nacimientos, pero sin modificar por completo el comportamiento del sistema en sí; o como un efecto estructural al evitar por completo los nacimientos, y de este modo eliminando el lazo reforzador, modificando en consecuencia el comportamiento del sistema.

3.1.c: Simulación por agentes: Agente, ambiente, estado y evento

Tal como se dijo anteriormente, al trabajarse con un modelo de simulación por agentes, el principal participante en el modelo es, precisamente, el **agente**: éste va a representar al hombre o criatura real de la mejor manera posible dentro del mundo abstracto, y se lo definirá con la mayor cantidad de características relevantes posibles según el grado de complejidad que se maneje. Cada agente en el modelo representa a una criatura en la realidad o, en su defecto, a un conjunto de criaturas que se comporten con el mismo comportamiento.

Siguiendo el mismo ejemplo que se manejó hasta ahora, el agente podría ser un conejo, con reglas básicas como (i) buscar otro conejo de sexo opuesto para aparearse, (ii) buscar comida para alimentarse, (iii) crecer y fallecer a una determinada edad.

Dentro del modelo, el agente deberá tener un entorno que lo contenga. A este entorno se lo suele denominar **ambiente**, y suele tener una serie de características particulares, con posibilidad de interactuar a su vez con los agentes. Al igual que estos últimos, se busca que el ambiente represente, en el mundo abstracto, de la mejor manera posible al entorno que rodea al agente en el mundo real.

El ambiente, en nuestro ejemplo, sería una pradera, con (i) una superficie determinada, (ii) una capacidad de acobijar un número determinado de conejos, y (iii) una cantidad determinada de alimento.

Otros dos términos importantes al hablar de simulación por agentes, son los **estados** y los **eventos**. El estado es una situación en la cual puede

encontrarse un agente, y en la cual puede tener un comportamiento en particular, diferente al de algún otro estado. Por ejemplo, una coneja puede estar (i) embarazada o (ii) no embarazada. El evento, por otro lado, es un suceso que ocurre en algún momento en particular dentro de la simulación, y que puede tener diferentes causas: puede ser accionado por el modelador, puede accionarse a partir de otros eventos anteriores, puede ocurrir a partir del cambio de estado de algún agente dentro del modelo, y otras alternativas más. Un ejemplo sería que, al quedar embarazada una coneja, se accione un evento que luego de un tiempo haga que la misma de a luz, y otro evento que, al dar a luz, cree un nuevo agente como “conejo bebé”.

3.1.d: Recorrido, línea, parada, estación y otros.

Para poder entender mejor el sistema de transporte público, en especial el realizado a partir de colectivos, es necesario entender el significado de una serie de conceptos.

Para esto, partimos de cuatro conceptos que desarrolla C. Meignan en su estudio (recorrido, línea, parada y estación)¹², y a éstos se agregarán otros términos adicionales propios de nuestro caso, para poder entender mejor la estructura del transporte de colectivos.

El primero de estos conceptos es el **itinerario** o **recorrido**, el cual es la secuencia de caminos que debe recorrer el vehículo, a lo largo de la red de caminos, rutas y avenidas de la ciudad en la cual se encuentra inmerso. Cabe destacar que este recorrido está definido con una dirección, y la unión de dos recorridos similares pero con sentido opuesto determinan lo que es una **ruta** o **línea** de transporte. Es decir, el recorrido de “ida”, junto con el de “vuelta”, conforman una *línea*.

Básicamente, en este estudio se analizarán dos tipos de rutas, las **rutas troncales** y las **rutas alimentadoras**. Las primeras, tal como se puede desprender de su definición, conforman la parte central del transporte, y suelen ser líneas que, en la mayor parte del recorrido, utilizan avenidas principales y conectan los principales focos urbanos dentro de la red. Por otro lado, las rutas alimentadoras suelen cumplir la función de acercar la gente a las paradas propias de las rutas troncales, introduciéndose por rutas secundarias a barrios o barriadas por donde no pasa ninguna avenida principal.

A lo largo del recorrido, la unidad va pasando por distintas **paradas**, en las cuales carga o descarga pasajeros, y tiene un cierto tiempo de demora. Estas paradas, nuevamente, se encuentran en una dirección en particular, y el par de paradas ubicadas en la misma zona de una línea, cada una para un recorrido

¹² Simulation and Evaluation of Urban Bus Networks Using a Multiagent Approach [8].

en particular, conforman lo que es una **estación**. Entonces, la parada es el destino del pasajero que tiene una dirección definida, mientras que la estación servirá como punto de referencia independientemente del destino al que quiera dirigirse el pasajero.

Además de las paradas normales, que se pueden encontrar a lo largo de todo el recorrido, se encuentran las paradas que conforman los extremos de la línea. Estas paradas se denominan **cabeceras**, y es en esas paradas donde los vehículos y los colectiveros cumplen con su período de descanso entre vueltas, y que a veces se utiliza como buffer para regular la frecuencia de salidas.

En la figura 3.3 se puede ver un esquema con el detalle de cada uno de los términos hasta aquí mencionados, a fin de respaldar esta explicación.

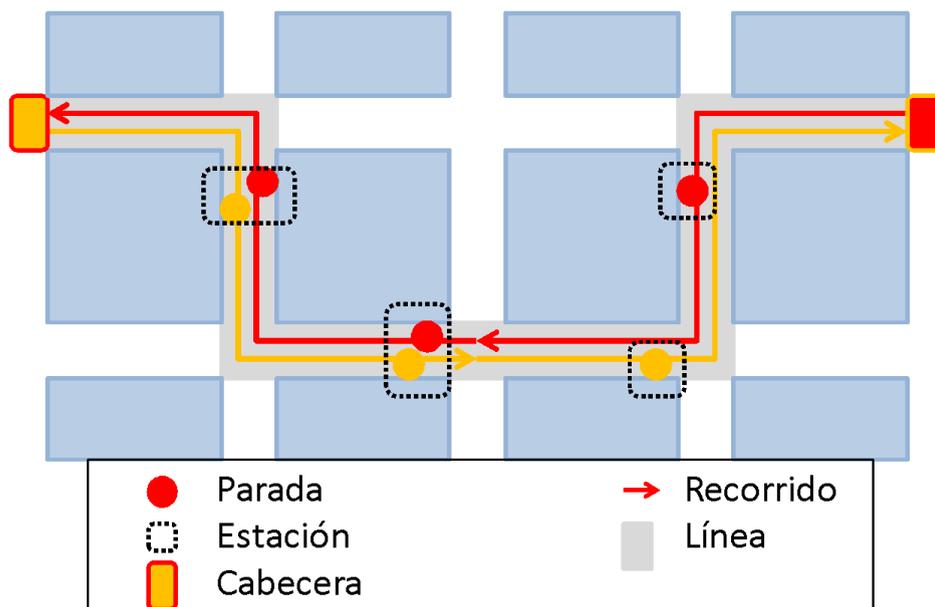


Figura 3.3: esquema de distintos componentes en una línea de colectivos.

El **pasajero** es la persona que decide utilizar el servicio de transporte público, que se encuentra ubicado, en algún momento del día, en un punto que servirá como punto de **origen**, con intenciones de dirigirse a otro punto geográfico, que denominaremos **destino**. De esta combinación de origen y destino, para un número considerable de pasajeros, se obtiene la **matriz Origen-Destino**, que estima la probabilidad de que una persona con una determinada parada de origen decida como destino ir a otra determinada parada.

Ahora bien, para poder realizar ese viaje, el pasajero debe esperar al colectivo – o **interno** – de la línea que corresponda. A este tiempo, desde que el pasajero llega a la parada hasta que llega el colectivo a cargo de transportarlo, se lo llama **tiempo de espera** del pasajero, que depende, entre otras cosas, de la **frecuencia de llegada** a la parada (de los pasajeros) y de la frecuencia de la

línea, que no es otra cosa que el tiempo que existe entre salidas de colectivos consecutivos. Esta última **frecuencia de servicios** se determina al realizar la **diagramación de recorridos**, que es la lista de órdenes de salida de colectivos de las cabeceras que se utiliza a lo largo de todo un día o, en un nivel inferior, a lo largo de toda una **franja horaria**, las cuales se determinan normalmente de acuerdo al comportamiento de los pasajeros. Bajo este criterio de división lo común es encontrar cuatro franjas bien definidas, que son la franja de la noche, del pico de la mañana, del valle del mediodía y el pico de la tarde. Se entiende por **pico** a una demanda alta y por **valle** a una demanda inferior, medida en cantidad de pasajeros.

3.2: El problema

El problema a resolver en este documento está relacionado con algunos conceptos ya desarrollados en capítulos anteriores. En especial, se quiere destacar la idea de la descentralización, siendo que el enfoque elegido para resolver el problema será respaldado con esta teoría, desde varios puntos de vista (tal como se fue detallando en las dimensiones de la descentralización, desarrolladas por M. Resnick).

Tomando como base, entonces, este concepto, se buscará resolver un problema puntual dentro del campo de la planificación estratégica, concentrado en el transporte público, y los comportamientos de los distintos actores intervinientes en dicho sistema.

La idea de desarrollar un análisis de estas características no es sólo resolver el problema particular que se detalla como caso de estudio, sino definir una metodología de resolución que pueda aplicarse en otros estudios futuros de manera relativamente simple y que permita, de este modo, una optimización de tiempos y recursos.

La definición, entonces, del problema puntual a tratar en esta tesis, es:

Analizar y definir una metodología de planificación estratégica de la red de transporte urbano público de colectivos para una ciudad, mediante un criterio aplicable a otros procesos similares.

Ahora bien, este problema, tal como fue definido, abarca un espectro muy amplio de posibilidades. En consecuencia, deben definirse también los límites del mismo, lo cual será desarrollado a partir de los objetivos a cumplir, las restricciones con las cuales se cuenta y los recursos disponibles para llevar a cabo la tarea, los cuales se detallan a continuación.

3.3: Objetivos, restricciones y recursos

Como objetivo principal de este trabajo se entiende que se busca resolver el problema antes planteado, de lograr definir una metodología de planificación estratégica adecuada para la red de transporte urbano. Pero para poder lograr este objetivo es necesario definir una serie de objetivos parciales, a fin de, logrando cumplir cada uno de éstos, acercarnos cada vez más al objetivo global. A continuación se listan dichas metas que, a su vez, se encuentran esquematizadas en la figura 3.4:

1. Lograr un análisis que permita identificar patrones de conducta generales observados en los pasajeros del Transporte Público.
2. Analizar el comportamiento en particular de la totalidad de la red urbana que se quiera analizar.
3. Desarrollar un modelo de simulación representativo de las dos situaciones antes mencionadas.
4. Validar el modelo, a partir de datos reales.
5. Llegar a conclusiones que agreguen valor.

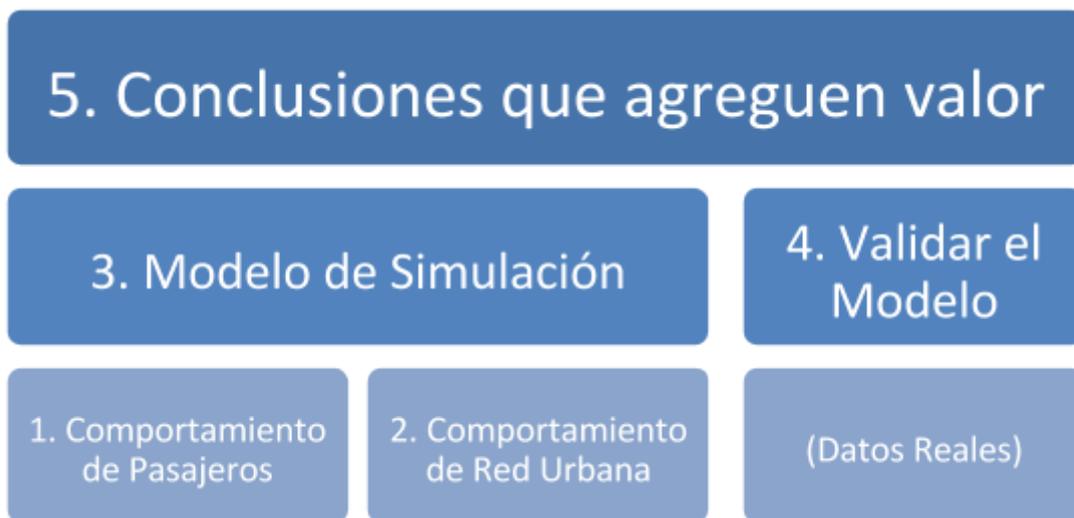


Figura 3.4: Esquema de objetivos. Cada objetivo parcial forma parte de uno de los niveles de análisis, y a partir de eso se va construyendo el siguiente nivel.

El primer aspecto es, quizás, el más psicológico de todos los aquí mencionados. En el mismo se busca definir el **criterio de decisión de las personas** en el momento en que deben trasladarse de un punto a otro en una ciudad. A fin de lograr determinar este comportamiento, se utilizarán herramientas como Dinámica de Sistemas y Teoría de la Decisión, y se realizará un análisis de campo que se describirá con mayor detalle en el siguiente capítulo. En este caso en particular, la principal restricción viene dada por el número de gente a la cual tendremos oportunidad de encuestar y

analizar sus comportamientos, y el principal recurso son las personas a cargo de realizar las encuestas.

En el caso del **análisis de la red urbana**, la idea principal es generar una metodología que permita resaltar, en especial, los puntos de mayor demanda, los flujos principales de gente, los comportamientos característicos de las ciudades (de acuerdo a su geografía), y la interacción de la gente con las características definidas en el punto anterior con este entorno. Este tipo de análisis ya se ha realizado en varios estudios anteriores, pero no es común encontrar al mismo inserto dentro de un análisis tan amplio como el realizado en este caso. En consecuencia, este objetivo deberá ser tratado con especial atención, ya que de él dependen también los objetivos posteriores. Como restricciones cabe destacar la imposibilidad de relevar la totalidad de los centros urbanos propios, y la poca disponibilidad de tiempos para hacerlo. Sin embargo, esto se compensa con una óptima utilización de esos tiempos, que será detallado en el correspondiente capítulo. Los recursos utilizados serán principalmente una flota de cinco a diez personas, a cargo del relevamiento a lo largo de la ciudad, y una serie de documentos específicos que complementen y validen esta información obtenido en el estudio de campo.

El **modelo de simulación** tomará como base los dos estudios anteriores para determinar las características principales de los agentes intervinientes, tanto de los pasajeros como de los colectivos. Su desarrollo permite generar una serie de escenarios en paralelo, los cuales servirán como información adicional a la hora de determinar qué estrategia conviene seguir en cuanto a la planificación. El recurso principal aquí es la información de entrada, obtenida en los pasos anteriores, y el simulador propiamente dicho, junto con el personal capacitado para programar en el mismo. Lo bueno es que, de contar con un buen programa de simulación, y con los conocimientos suficientes, no existen grandes restricciones para esta etapa, más allá de la restricción temporal.

Para la etapa de **validación**, lo que se busca es confirmar el comportamiento del modelo antes realizado para el caso de estudio en particular. Este proceso es necesario para determinar si la simulación es consistente y si se puede reutilizar la misma para nuevos estudios posteriores. Asimismo, al validar el comportamiento nos permite realizar un número mayor de estudios para el caso de estudio en particular, que se verán en la etapa de resultados. Este proceso, tal como se vio en la introducción, forma parte del ciclo de modelación, con lo cual se desarrolla en paralelo con el objetivo anterior, y cuenta con las mismas restricciones y recursos que el mismo.

Finalmente, la etapa de **conclusiones** sirve como plataforma para determinar las condiciones de funcionamiento de toda esta metodología, y será en esta

etapa donde se le termine de dar forma al documento. El objetivo global, de este modo, utilizaría como respaldo todos los objetivos anteriores, pero se terminaría de cumplir una vez finalizada esta última etapa. Al tratarse de una etapa principalmente conceptual, no existen grandes restricciones ni necesidad de recursos específicos, más que contar con todas las etapas anteriores ya definidas y entendidas.

4. CASO DE ESTUDIO

4.1: Resumen

La metodología desarrollada en este documento fue utilizada para una ciudad en particular, para poder determinar, en la misma, el comportamiento de toda la red de transporte urbano público y los pasajeros trasladados en la misma. En este capítulo, se hará una descripción de las características de la ciudad, desde un punto de vista geográfico, para luego pasar a describir los flujos de pasajeros dependiendo de cada franja horaria. Una vez definidos estos comportamientos, se pasa al desarrollo propio del modelo, y se detalla aquí dicho proceso. Finalmente, se validará dicho modelo con datos reales, y se culminará el estudio con una serie de conclusiones. De este modo, se cumplirá con todos los objetivos parciales definidos en el capítulo anterior.

4.1.a: Comportamientos principales de los pasajeros

En esta etapa se busca determinar qué condiciones, en la mente de las personas, son determinantes a la hora de decidir por un medio de transporte frente a otro y, una vez decidido el medio, en el caso de inclinarse por el transporte público por colectivo, por saber qué interno tomar.

A grandes rasgos, cabe destacar como factores principales la condición económica de la persona, quien muchas veces decide entre el transporte público, privado o no tomar ningún medio de transporte y trasladarse caminando de acuerdo a su condición económica; y, por otro lado, la tolerancia de ocupación del medio de transporte que tiene el pasajero, así como también el tiempo de espera máximo que admite y la fidelidad que tiene el mismo para con el medio de transporte elegido. Todos estos últimos factores dependen, en buena parte, de la interacción del pasajero con el medio de transporte, mientras el primer caso (la condición económica) depende mayoritariamente de la persona.

4.1.b: Características generales de la ciudad

Para determinar el comportamiento dentro de la ciudad, la cual será el ambiente sobre el cual se desarrolle toda la simulación, serán necesarios una serie de estudios. Por un lado, se requerirá definir los principales focos de atracción dentro de la ciudad, tanto a nivel turístico como laboral y educativo. En esta etapa, lo que se busca es entender la ciudad desde un nivel macro, para luego poder decidir en qué puntos realizar un análisis más detallado del movimiento de las personas.

Luego, se debe realizar el análisis más detallado de los flujos de pasajeros, para distintas franjas horarias del día. A partir de este análisis, se obtiene un

diagrama de flujos y se esquematiza la ciudad como un sistema continuo, con una cantidad determinada de actores (pasajeros) que realizan un número determinado de movimientos.

De esta etapa, los principales *outputs* serán la matriz de Origen y Destino, y la frecuencia de llegada de la gente a las distintas regiones, llegando en algunos casos a definir la parada correspondiente en cada una de esas regiones (y aproximando la parada para los casos en que no pueda determinarse con precisión).

4.1.c: Desarrollo del modelo

El modelo será desarrollado mediante simulación por agentes, pero contará con información de alimentación que estará influenciada por medio de Dinámica de Sistemas.

En este modelo, se contará con dos agentes en particular, los cuales serán:

1. Los pasajeros.
2. Los colectivos.

Los pasajeros tendrán un criterio de decisión determinado de acuerdo a lo visto en la etapa de definición del comportamiento de los pasajeros. Si bien la cantidad de pasajeros a simular es elevada, las decisiones que deben tomar los pasajeros no son muchas, ni requieren de una elaboración muy extensa, con lo cual no se afecta en gran medida a la duración de cada corrida en el simulador. En consecuencia, cada agente en el mundo conceptual representará a una persona del mundo real, y se podrá modificar a un número de esos pasajeros, e incluso a cada uno por separado, para acercarse aún más a las condiciones observadas en la realidad.

Por su parte, los colectivos también tendrán un criterio de decisión en particular, que dependerá principalmente de las características del vehículo a tener en cuenta. En este caso, no existirán grandes diferencias entre los distintos colectivos, y su comportamiento dependerá de decisiones generales de la simulación y la interacción con los pasajeros.

Como información de entrada para el modelo, tendremos la frecuencia de llegada de pasajeros a cada parada, la matriz de origen y destino, y los tiempos y distancias de transporte entre cada una de las paradas. Las otras variables a simular o de control, se irán viendo con mayor detalle en el capítulo correspondiente.

Como salida del modelo, la principal información que obtendremos será el tiempo de espera de los pasajeros, tanto particular como general, que servirá

para determinar el grado de satisfacción del usuario; y la cantidad total de pasajeros transportados, que sirve de indicador de la eficiencia de cada línea.

4.1.d: Validación del modelo

Para poder validar el modelo es necesario contar con una cantidad considerable de información. En consecuencia, para poder realizar este proceso de validación, se siguieron dos metodologías distintas, y se comprobaron los datos en paralelo con las dos:

1. Se realizó un análisis de campo para obtener los datos, a partir de coches testigos, en la misma ciudad.
2. Se contaba con una cantidad de información ya procesada del comportamiento de la ciudad, a partir de un estudio realizado con anterioridad al actual, por parte del gobierno de la ciudad, en sociedad con un organismo internacional.

4.1.e: Cierre del proyecto

Aquí se hace referencia al proceso de cierre, enmarcado dentro del capítulo de conclusiones y futuras líneas de investigación. La idea, aquí, es determinar qué aspectos utilizados dentro de la resolución del caso de estudio son propios del caso en particular, y cuáles pueden ser generalizables, a fin de determinar el mejor procedimiento posible a seguir en un proceso de planificación de similares características que pueda presentarse en un futuro. Esto constituye el foco principal del problema a resolver de esta tesis, y el principal factor que originó el desarrollo de la misma.

4.2: Una solución integradora

“La nube ignora por qué se desplaza en una determinada dirección, y a una velocidad específica. Siente un impulso... Ese es el rumbo del momento. Pero el cielo conoce las razones y las configuraciones que hay detrás de todas las nubes, y tu también las conocerás cuando te eleves a la altura indispensable para ver más allá de los horizontes.”

Richard Bach

En esta sección se detallan todos los análisis realizados con anterioridad a la construcción del modelo, y que sirven como información de entrada para el mismo.

4.2.a: Criterio de decisión del pasajero

Tal como se dijo en el resumen, hay una serie de factores preponderantes a la hora de decidir cómo trasladarse, que son los siguientes:

1. Factor económico
 - a. Disponibilidad de medio de transporte privado
 - b. Posibilidad de solventar el pasaje de transporte público
2. Factor geográfico
 - a. Acceso a red de transporte público
 - b. Cercanía de lugar de destino
3. Otros factores
 - a. Tolerancia de ocupación del medio de transporte
 - b. Tolerancia de tiempo de espera en la parada
 - c. Fidelidad del pasajero de un medio de transporte
 - d. Fidelidad del pasajero de una línea frente a otra

El **factor económico** es el principal limitante de la cantidad de pasajeros que puede llevarse en total en la red urbana. Si bien hay personas que, teniendo un medio de transporte privado, utilizan el transporte público, no suele ser el común comportamiento; y con mayor razón todavía se justifica el segundo ítem económico, siendo que existe gente que, si tuviese la solvencia económica suficiente, tomaría el servicio de transporte público, pero se ve imposibilitada de hacerlo en las condiciones actuales.

Para poder entender estos dos factores, es necesario recurrir a estudios socioeconómicos de los centros urbanos a analizar, y diferenciar, por medio de los mismos, qué parte de la población cuenta con un medio de transporte propio, y qué parte tiene la capacidad de costear un medio de transporte público. A partir de allí, se obtiene un primer valor que representa la gente que tiene la capacidad potencial de utilizar el transporte urbano público, para un valor de boleto determinado.

Al hablar del **factor geográfico**, ya estamos teniendo en cuenta dos condiciones propias de la ciudad a analizar. En este caso, hay una que actúa como limitante, que es la accesibilidad a la red de transporte público: se debe analizar, en primera instancia, si la gente que cumple con las condiciones económicas antes mencionadas se encuentra dentro del área geográfica que intenta cubrir nuestra red de transporte urbano. En caso de no estarlo, se debe analizar si la gente cuenta con la capacidad de acercarse a un lugar dentro de esta red y, en caso de no poder hacerlo, se verá si la red puede modificarse para poder llegar a un área común. En caso de no poder hacerse, esta gente quedará excluida del análisis. Por otro lado, la cercanía del lugar de destino ya no actúa como limitante, sino como un factor de influencia en la decisión. En este caso, el peatón deberá decidir, en su momento, la utilidad o valor que tiene una decisión frente a la otra.

Finalmente, en los **otros factores**, se encuentran los otros criterios que influyen en esta decisión final, pero en un nivel inferior al anterior. En este caso,

la persona ya tomó la decisión de tomar el transporte público, pero dependerá de otras condiciones si finalmente toma el servicio que uno quiere brindarle. En este caso, entonces, ya existe una interacción con el colectivo, y va a depender de si el mismo llega a tiempo, y de su ocupación, si el pasajero se sube o no. Además, existen otras dos variables, que dependen principalmente de la competencia: si existe otro medio de transporte público que brinde un servicio de características similares o incluso equivalentes, o si se cuenta con dos líneas de colectivos que compartan parte del recorrido, el individuo deberá elegir entre uno u otro, dependiendo principalmente de la fidelidad que tiene hacia el servicio elegido como primera opción y de quién llega primero para ver si finalmente toma el servicio o no.

Como complemento de este análisis, se destaca un estudio acerca del comportamiento de las personas a la hora de trasladarse de un lugar a otro, que es el realizado por Rob Methorst y Martin Damen, *Footsteps in the Snow* [10].

En el primero, si bien se centra más en el comportamiento de los peatones, se observa un diagrama que explica claramente el proceso de decisión, con cinco factores preponderantes: por un lado (la demanda), la necesidad de la persona de trasladarse de un lugar a otro. Por otro (la oferta), las distintas modalidades disponibles para realizar ese trayecto. Sumado a esto, y también como un factor externo, están las características espaciales. Entre estas tres, se influye en la etapa de confrontación, en la que se realiza el análisis de cómo viajar y se toma la decisión final. Por último, están las características personales, que influyen a este proceso de decisión pero que, a su vez, se ven modificadas (realimentadas) por cada decisión que se toma. Este diagrama puede verse en la figura 4.1.

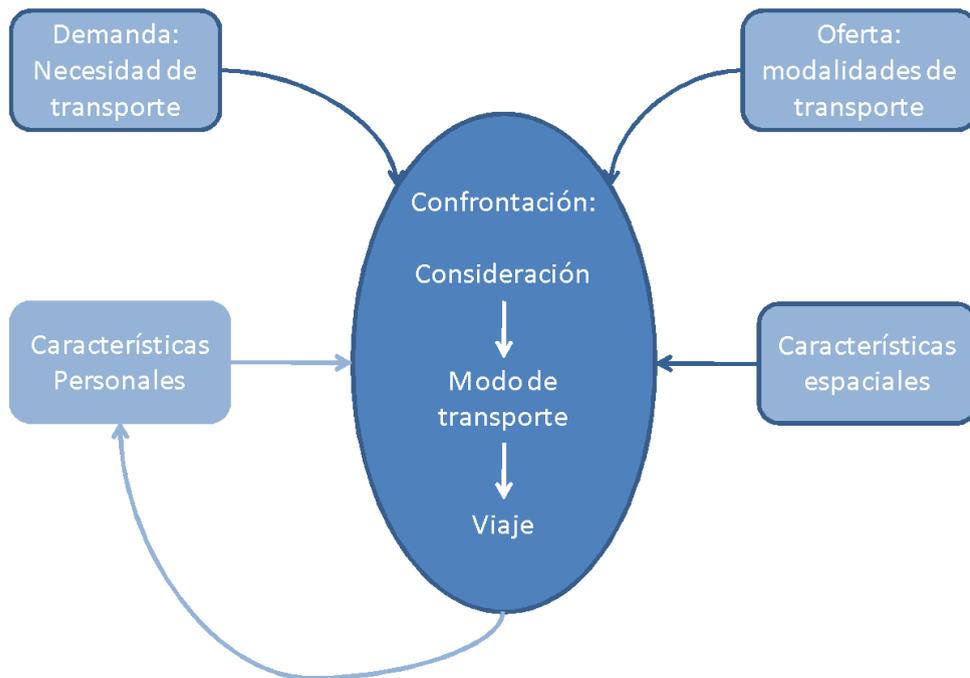


Figura 4.1: Proceso de decisión de transporte. Extraído del documento *Footsteps in the Snow* [10].

A todos los niveles de decisión definidos puede representárselos en el diagrama de flujos que aparece en la figura 4.2, donde se puede distinguir claramente la prioridad de un nivel frente a otro (en primer instancia, el nivel económico; luego, el nivel geográfico; y luego el último nivel decisorio, caracterizado por cuestiones más personales que las anteriores).

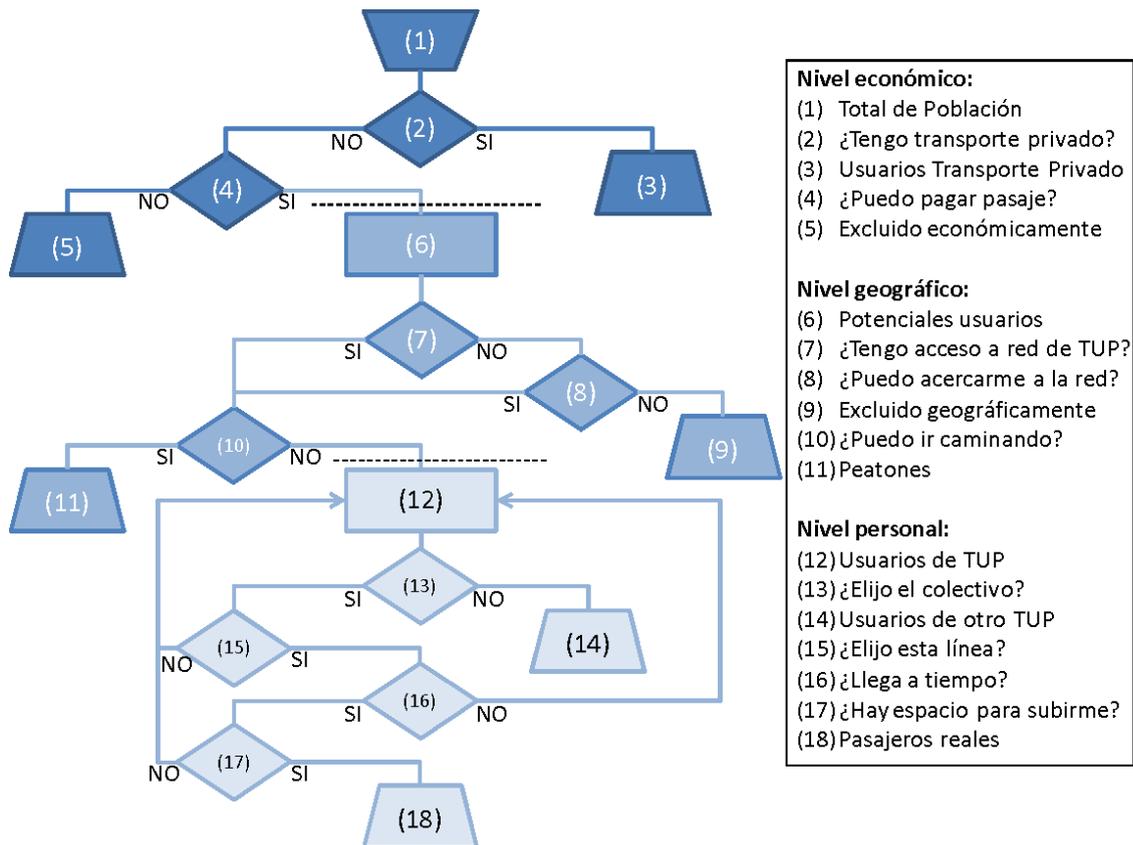


Figura 4.2: Diagrama de Flujo de decisión de transporte, por medio del pasajero.

4.2.b: Características principales de las ciudades

En este caso hay que distinguir varios aspectos principales a observar en las ciudades:

1. La ubicación de **centros de atractivo** turístico, económico o comercial.
2. La **densidad demográfica** de las distintas zonas dentro de cada ciudad.
3. Las principales **vías de transporte** dentro de la ciudad.
4. Las distintas **alternativas de transporte** a tener en cuenta como sustitutas o complementarias al medio de transporte a analizar.
5. La ciudad como un todo.

La ubicación de **centros de atractivo** resulta importante en especial para determinar puntos particulares de origen o destino de un conjunto significativo de personas. Así, son muy importantes las escuelas, zonas de oficinas o semejantes, a la hora de determinar centros de comportamiento estacional a lo largo de una jornada, siendo un principal foco de destino en un horario específico y de origen en otro horario.

El estudio realizado por la organización *Project for Public Spaces* [12] da cuenta de una serie de factores que hacen que un lugar sea atractivo, diferenciados por cuatro categorías: la sociabilidad, los usos y actividades, el confort y la imagen, y la accesibilidad. De estas categorías, las tres primeras

están relacionadas con este primer punto, mientras que la última tiene más relación con el tercer punto aquí listado (las vías de transporte), que se explica más adelante. En la figura 4.3 puede verse un diagrama que ilustra el análisis aquí citado, con tres niveles de análisis: los atributos claves, las variables intangibles que los definen, y aquellas variables que permiten una medición para cada atributo.

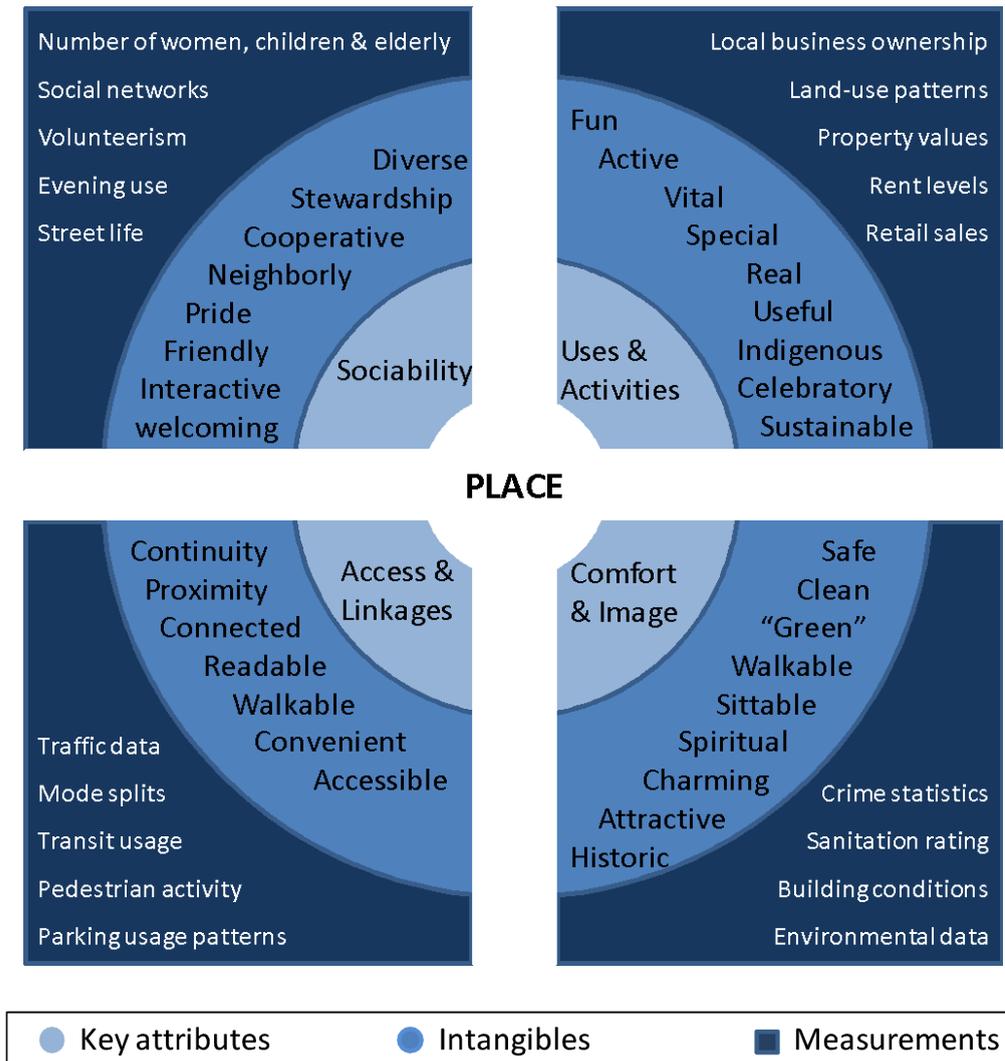


Figura 4.3: Extraído de *What Makes a Great Place* [12].

Por otro lado, los **centros de densidad demográfica** a veces se ubican en las mismas zonas que los focos de atractivo, pero se trata de un análisis de mayor abstracción que el anterior, y nos indica a un nivel más general las grandes regiones de origen y destino de pasajeros a lo largo de todo el día. Este análisis es especialmente importante para determinar los límites de cada barrio, y poder de este modo diferenciar las principales zonas de actividad de cada línea.

En la figura 4.4 se puede ver un ejemplo de delimitación de distintos barrios, cada uno con un color distinto. Tal como puede notarse, hay algunas zonas de mucha mayor dimensión que otras, y algunas otras, de menor dimensión, ubicadas en la misma región del mapa. Esto responde a características propias de la ciudad, donde existe una gran concentración de población en la región central y menor cantidad en las zonas más lejanas (en la figura, las regiones 1 y 19, por ejemplo).

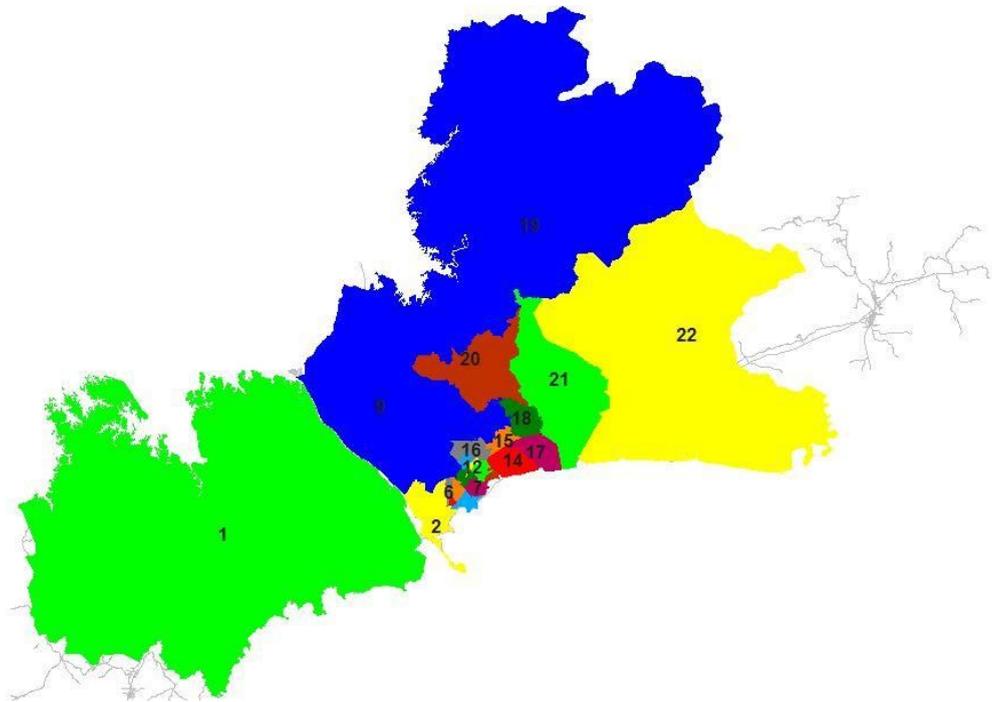


Figura 4.4: mapa de ciudad dividida por zonas.

De manera semejante, se observa un análisis similar en el caso de la ciudad de Santiago de Chile. Tal como se detalla en el trabajo realizado por la profesora Munizaga del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, en 2006, como origen del proyecto de *TranSantiago*, se dividió la ciudad en 6 zonas principales, caracterizadas por su condición socioeconómica y su actividad industrial y educativa, entre otras características. Esta división puede notarse en la figura 4.5. Nuevamente, pueden verse dos regiones de un área considerablemente mayor a las otras, que son las zonas norte y sur, mientras que la zona céntrica es la de menor área de todas las aquí delimitadas.

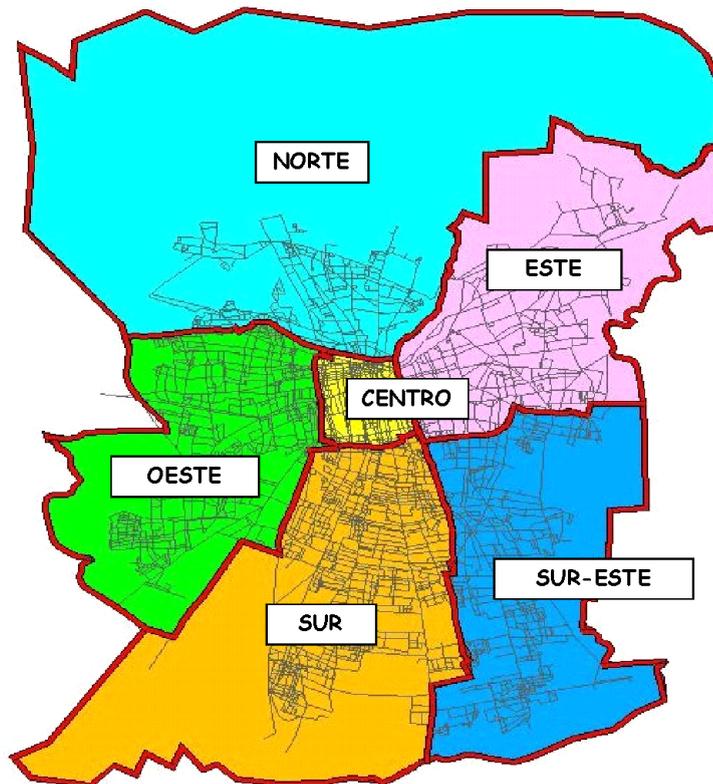


Figura 4.5: mapa de seis zonas de la ciudad de Santiago de Chile. Extraído de *Comportamiento de usuarios del sistema de transporte* [11].

Las **vías de transporte** aquí mencionadas son las propias del medio de transporte a analizar. En este caso, entonces, serían las principales rutas y avenidas que cruzan el centro urbano. Poder identificar cuáles son las rutas habilitadas para el transporte público, o qué condiciones de operación permite cada una, nos dan la pauta del nivel de utilización que podemos hacer de cada una y, a partir de eso, y en conjunto con los dos análisis descriptos anteriormente, determinar las líneas y rutas para satisfacer de la mejor manera posible la demanda de la ciudad y, más en detalle, de cada barrio.

Finalmente, analizar las distintas **alternativas de transporte** permite realizar un mejor análisis de qué tipo de competencia existe en cada caso. Un ejemplo de esto, es la existencia en la gran mayoría de lugares de competencia con el transporte privado, dado que utiliza las mismas rutas para circular (las excepciones vienen dadas en casos donde existan carriles exclusivos, pero no es habitual contar con rutas exclusivas en su totalidad). Otro caso particular que se suele analizar es la relación con otros medios de transporte público, como el metro o el tren, donde muchas veces se diagraman recorridos en paralelo a los mismos, cuyos comportamientos se ven enormemente afectados por el comportamiento de éstos.

Una vez se culmina con estas 4 etapas de análisis, se procede a una quinta etapa, posiblemente la más importante, en la cual se analiza a las mismas

como un **todo**, y se obtiene de este modo un esquema general del comportamiento de la ciudad. Este esquema va a servir especialmente para la próxima etapa, en la cual se pasa a analizar el comportamiento de la gente propiamente dicha dentro de esa red urbana.

De este modo, se pueden diferenciar distintos **esquemas de ciudades**, entre los que se pueden listar los siguientes:

1. Ciudad de avenidas radiales con centro en el medio.
2. Ciudad de avenidas radiales con centro corrido a un extremo.
3. Ciudad longitudinal.
4. Ciudad con avenidas troncales y alimentadoras.
5. Cuadrícula.
6. Combinación de los anteriores.

Para cada una de estas ciudades se puede señalar un ejemplo característico. En el primer caso, una ciudad de avenidas radiales centrada, es Santiago de Chile. El caso de Capital federal se asemeja más al segundo caso, de avenidas radiales pero con el centro corrido hacia el este. El comportamiento de crecimiento longitudinal se asemeja más a las ciudades costeñas, como puede ser el caso de prácticamente todas las ciudades a lo largo de la costa argentina. En el cuarto caso, una ciudad de avenidas troncales y rutas alimentadoras, es una característica similar a la vista en Brasilia. También existen ciudades que respetan una cuadrícula, como es el caso de la ciudad de La Plata. Por último, se pueden observar esquemas que surgen como combinación de todas estas categorizaciones, dependiendo de la evolución de las ciudades en el tiempo. Un ejemplo sería la ciudad de San Carlos de Bariloche, en donde la ciudad se fue adaptando al relieve, y combina un crecimiento a lo largo de la costa del lago, junto con una cuadrícula en la zona céntrica y otro crecimiento longitudinal a lo largo de la ruta provincial 258.

En la figura 4.6 se puede ver una representación de cada uno de estos esquemas, a fin de respaldar esta descripción. En dicho gráfico puede observarse que las distintas rutas o avenidas tienen un grosor distinto, dependiendo del flujo de vehículos que registra cada una. Se exceptúa de esta representación el sexto caso, dado que el mismo es combinación de los casos anteriores, y por ende no agrega valor.

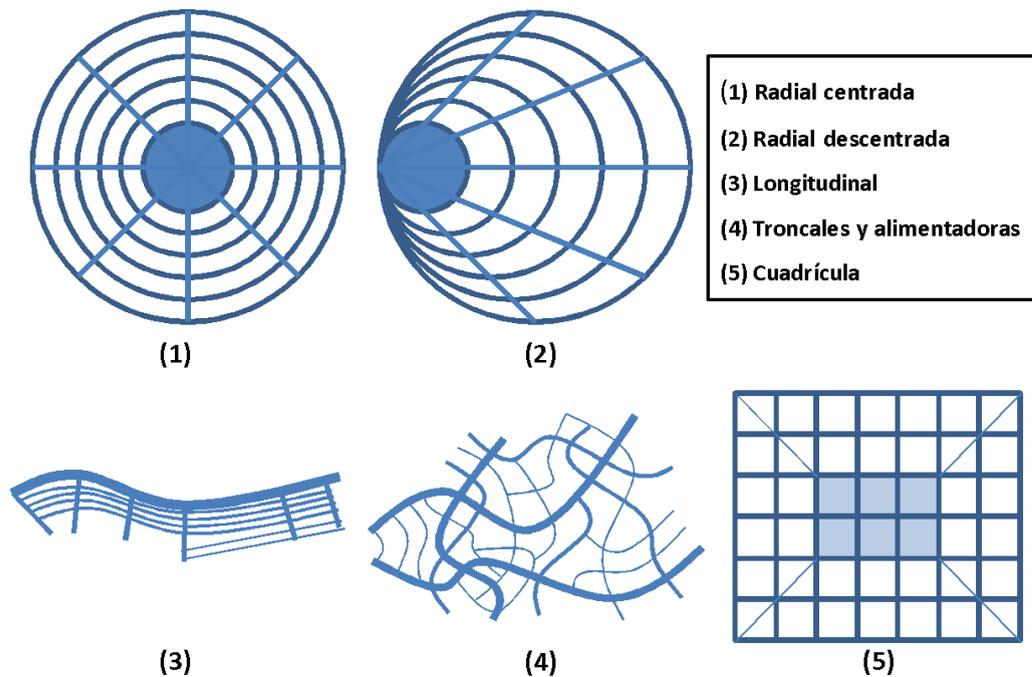


Figura 4.6: esquemas de distintos tipos de ciudades.

4.2.c: Flujos de pasajeros

Siguiendo con lo visto en la sección inmediata anterior, y considerando a su vez lo visto en la anterior a ésta, se puede determinar el flujo de pasajeros a lo largo de la ciudad, para cada una de las franjas horarias a analizar.

En orden de lograr este análisis, se cuenta con una serie de pasos:

1. Coches testigo.
2. Áreas de paso.
3. Red de avenidas y calles principales.
4. Red de calles alternativas.
5. Diagrama de redes.

Los **coches testigo** son aquellos colectivos que hoy en día circulan por la ciudad, y que permiten realizar un primer análisis del flujo de gente a lo largo del día. En particular, en estos coches se sube una persona a cargo de realizar el relevamiento en la cabecera del recorrido, y a lo largo de la línea va anotando cuánta gente se sube y se baja en cada parada. A partir de este dato, se deduce la ocupación del coche a lo largo del recorrido, junto con las principales paradas, estaciones y áreas de subida y de bajada de pasajeros. En pocas palabras, el coche testigo nos brinda la información de campo necesaria para poder analizar el comportamiento de la gente.

En la figura 4.7 se puede ver un ejemplo de las planillas de relevamiento de coches testigo. En la misma puede verse los distintos campos a llenar: la línea y sentido (recorrido), el interno que se utiliza como coche testigo, la fecha de

relevamiento y la persona a cargo del mismo; también se carga el nombre o código de la parada, con la cantidad de pasajeros que suben y bajan en la misma.

PLANILLA DE RELEVAMIENTO COCHE TESTIGO																																																																																																																																																																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Línea:</td> <td style="padding: 2px;"><i>ID de la línea que se está relevando</i></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Sentido:</td> <td style="padding: 2px;"><i>Sentido de dirección (IDA-VTA)</i></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Interno:</td> <td style="padding: 2px;"><i>número de ID del coche relevado</i></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Fecha:</td> <td style="padding: 2px;"><i>fecha en la cual se relevó</i></td> </tr> </table>	Línea:	<i>ID de la línea que se está relevando</i>	Sentido:	<i>Sentido de dirección (IDA-VTA)</i>	Interno:	<i>número de ID del coche relevado</i>	Fecha:	<i>fecha en la cual se relevó</i>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Hora inicio:</td> <td style="padding: 2px;"><i>inicio del relevamiento</i></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Hora fin:</td> <td style="padding: 2px;"><i>fin del relevamiento</i></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Hoja nro:</td> <td style="padding: 2px;"><i>orden de planillas completadas</i></td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Nombre:</td> <td style="padding: 2px;"><i>nombre del encargado de relevar</i></td> </tr> </table>	Hora inicio:	<i>inicio del relevamiento</i>	Hora fin:	<i>fin del relevamiento</i>	Hoja nro:	<i>orden de planillas completadas</i>	Nombre:	<i>nombre del encargado de relevar</i>																																																																																																																																																								
Línea:	<i>ID de la línea que se está relevando</i>																																																																																																																																																																								
Sentido:	<i>Sentido de dirección (IDA-VTA)</i>																																																																																																																																																																								
Interno:	<i>número de ID del coche relevado</i>																																																																																																																																																																								
Fecha:	<i>fecha en la cual se relevó</i>																																																																																																																																																																								
Hora inicio:	<i>inicio del relevamiento</i>																																																																																																																																																																								
Hora fin:	<i>fin del relevamiento</i>																																																																																																																																																																								
Hoja nro:	<i>orden de planillas completadas</i>																																																																																																																																																																								
Nombre:	<i>nombre del encargado de relevar</i>																																																																																																																																																																								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: left;"> <thead> <tr> <th style="width: 5%;">Nº</th> <th style="width: 20%;">Código de parada</th> <th style="width: 20%;">Sube</th> <th style="width: 20%;">Baja</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td><i>ID de parada</i></td> <td><i>pax suben</i></td> <td><i>pax bajan</i></td> </tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>11</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>12</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>13</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>14</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>15</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>16</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>17</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>18</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>19</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>20</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	Nº	Código de parada	Sube	Baja	1	<i>ID de parada</i>	<i>pax suben</i>	<i>pax bajan</i>	2				3				4				5				6				7				8				9				10				11				12				13				14				15				16				17				18				19				20				<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: left;"> <thead> <tr> <th style="width: 5%;">Nº</th> <th style="width: 20%;">Código de parada</th> <th style="width: 20%;">Sube</th> <th style="width: 20%;">Baja</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>21</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>22</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>23</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>24</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>25</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>26</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>27</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>28</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>29</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>30</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>31</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>32</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>33</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>34</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>35</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>36</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>37</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>38</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>39</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>40</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>	Nº	Código de parada	Sube	Baja	21				22				23				24				25				26				27				28				29				30				31				32				33				34				35				36				37				38				39				40			
Nº	Código de parada	Sube	Baja																																																																																																																																																																						
1	<i>ID de parada</i>	<i>pax suben</i>	<i>pax bajan</i>																																																																																																																																																																						
2																																																																																																																																																																									
3																																																																																																																																																																									
4																																																																																																																																																																									
5																																																																																																																																																																									
6																																																																																																																																																																									
7																																																																																																																																																																									
8																																																																																																																																																																									
9																																																																																																																																																																									
10																																																																																																																																																																									
11																																																																																																																																																																									
12																																																																																																																																																																									
13																																																																																																																																																																									
14																																																																																																																																																																									
15																																																																																																																																																																									
16																																																																																																																																																																									
17																																																																																																																																																																									
18																																																																																																																																																																									
19																																																																																																																																																																									
20																																																																																																																																																																									
Nº	Código de parada	Sube	Baja																																																																																																																																																																						
21																																																																																																																																																																									
22																																																																																																																																																																									
23																																																																																																																																																																									
24																																																																																																																																																																									
25																																																																																																																																																																									
26																																																																																																																																																																									
27																																																																																																																																																																									
28																																																																																																																																																																									
29																																																																																																																																																																									
30																																																																																																																																																																									
31																																																																																																																																																																									
32																																																																																																																																																																									
33																																																																																																																																																																									
34																																																																																																																																																																									
35																																																																																																																																																																									
36																																																																																																																																																																									
37																																																																																																																																																																									
38																																																																																																																																																																									
39																																																																																																																																																																									
40																																																																																																																																																																									

Figura 4.7: Planilla de relevamiento de coches testigo.

Como alternativa a la utilización de coches testigo, en caso de no existir una red de transporte público en la actualidad en dicho lugar, se debe conseguir esta información a partir de encuestas, pero en este caso sería necesario una estimación de mucho menor profundidad, con aproximaciones que deben realizarse con mucho cuidado, evaluando si las mismas son representativas de la realidad del lugar.

También se cuenta con el relevamiento del flujo de colectivos en una estación en particular. En este caso, se registran todos los coches que circulan por un determinado punto, independientemente de la línea a la cual pertenecen, y se registra la ocupación estimada de los mismos. Esto puede verse en la planilla de registro de paradas, que aparece en la figura 4.8. Como puede notarse, en

estas planillas se registra el lugar donde se realiza el relevamiento, el área o pantalla a la cual pertenece dicho punto, el sentido de dirección de los coches, y la hora y fecha del relevamiento. Además, de cada coche se registra el tipo de vehículo (en nuestro caso, existen tres tipos de coche, con distintas capacidades), la hora en la que pasa, y la ocupación aproximada del mismo.

PLANILLA DE RELEVAMIENTO DE PARADAS																																																																																																																																																																																																								
Lugar: <i>lugar donde se realiza el relevamiento</i> Pantalla/aforo: <i>área a la que pertenece</i> Sentido: <i>para dónde se dirigen los buses</i> Fecha: <i>fecha en la cual se relevó</i>				Hora inicio: <i>inicio del relevamiento</i> Hora fin: <i>fin del relevamiento</i> Hoja nro: <i>orden de planillas completadas</i> Nombre: <i>nombre del encargado de relevar</i>				<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>ID</th> <th colspan="2">DESCRIPCIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td colspan="2"><i>(coche tipo 1)</i></td> </tr> <tr> <td>ID</td> <td>DESCRIPCIÓN</td> <td>OCUP</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>POCOS SENTADOS</td> <td>18</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>MITAD SENTADOS</td> <td>28</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>MUCHOS SENTADOS</td> <td>56</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>ALGUNOS DE PIE</td> <td>63</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>LLENO</td> <td>75</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>SOBRECARGADO</td> <td>85</td> </tr> </tbody> </table>				ID	DESCRIPCIÓN		1	<i>(coche tipo 1)</i>		ID	DESCRIPCIÓN	OCUP	1	POCOS SENTADOS	18	2	MITAD SENTADOS	28	3	MUCHOS SENTADOS	56	4	ALGUNOS DE PIE	63	5	LLENO	75	6	SOBRECARGADO	85																																																																																																																																																																		
ID	DESCRIPCIÓN																																																																																																																																																																																																							
1	<i>(coche tipo 1)</i>																																																																																																																																																																																																							
ID	DESCRIPCIÓN	OCUP																																																																																																																																																																																																						
1	POCOS SENTADOS	18																																																																																																																																																																																																						
2	MITAD SENTADOS	28																																																																																																																																																																																																						
3	MUCHOS SENTADOS	56																																																																																																																																																																																																						
4	ALGUNOS DE PIE	63																																																																																																																																																																																																						
5	LLENO	75																																																																																																																																																																																																						
6	SOBRECARGADO	85																																																																																																																																																																																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Nº</th> <th>Código tipo de bus</th> <th>Código de ocupación de buses</th> <th>Hora</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td><i>ID del coche</i></td> <td><i>ID ocupación</i></td> <td><i>hora de paso</i></td> </tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>11</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>12</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>13</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>14</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>15</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>16</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>17</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>18</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>19</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>20</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>				Nº	Código tipo de bus	Código de ocupación de buses	Hora	1	<i>ID del coche</i>	<i>ID ocupación</i>	<i>hora de paso</i>	2				3				4				5				6				7				8				9				10				11				12				13				14				15				16				17				18				19				20				<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Nº</th> <th>Código tipo de bus</th> <th>Código de ocupación de buses</th> <th>Hora</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>21</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>22</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>23</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>24</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>25</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>26</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>27</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>28</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>29</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>30</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>31</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>32</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>33</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>34</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>35</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>36</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>37</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>38</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>39</td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>40</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table>				Nº	Código tipo de bus	Código de ocupación de buses	Hora	21				22				23				24				25				26				27				28				29				30				31				32				33				34				35				36				37				38				39				40				<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>ID</th> <th colspan="2">DESCRIPCIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td colspan="2"><i>(coche tipo 2)</i></td> </tr> <tr> <td>ID</td> <td>DESCRIPCIÓN</td> <td>OCUP</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>POCOS SENTADOS</td> <td>18</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>MITAD SENTADOS</td> <td>28</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>MUCHOS SENTADOS</td> <td>56</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>ALGUNOS DE PIE</td> <td>63</td> </tr> </tbody> </table>				ID	DESCRIPCIÓN		2	<i>(coche tipo 2)</i>		ID	DESCRIPCIÓN	OCUP	1	POCOS SENTADOS	18	2	MITAD SENTADOS	28	3	MUCHOS SENTADOS	56	4	ALGUNOS DE PIE	63
Nº	Código tipo de bus	Código de ocupación de buses	Hora																																																																																																																																																																																																					
1	<i>ID del coche</i>	<i>ID ocupación</i>	<i>hora de paso</i>																																																																																																																																																																																																					
2																																																																																																																																																																																																								
3																																																																																																																																																																																																								
4																																																																																																																																																																																																								
5																																																																																																																																																																																																								
6																																																																																																																																																																																																								
7																																																																																																																																																																																																								
8																																																																																																																																																																																																								
9																																																																																																																																																																																																								
10																																																																																																																																																																																																								
11																																																																																																																																																																																																								
12																																																																																																																																																																																																								
13																																																																																																																																																																																																								
14																																																																																																																																																																																																								
15																																																																																																																																																																																																								
16																																																																																																																																																																																																								
17																																																																																																																																																																																																								
18																																																																																																																																																																																																								
19																																																																																																																																																																																																								
20																																																																																																																																																																																																								
Nº	Código tipo de bus	Código de ocupación de buses	Hora																																																																																																																																																																																																					
21																																																																																																																																																																																																								
22																																																																																																																																																																																																								
23																																																																																																																																																																																																								
24																																																																																																																																																																																																								
25																																																																																																																																																																																																								
26																																																																																																																																																																																																								
27																																																																																																																																																																																																								
28																																																																																																																																																																																																								
29																																																																																																																																																																																																								
30																																																																																																																																																																																																								
31																																																																																																																																																																																																								
32																																																																																																																																																																																																								
33																																																																																																																																																																																																								
34																																																																																																																																																																																																								
35																																																																																																																																																																																																								
36																																																																																																																																																																																																								
37																																																																																																																																																																																																								
38																																																																																																																																																																																																								
39																																																																																																																																																																																																								
40																																																																																																																																																																																																								
ID	DESCRIPCIÓN																																																																																																																																																																																																							
2	<i>(coche tipo 2)</i>																																																																																																																																																																																																							
ID	DESCRIPCIÓN	OCUP																																																																																																																																																																																																						
1	POCOS SENTADOS	18																																																																																																																																																																																																						
2	MITAD SENTADOS	28																																																																																																																																																																																																						
3	MUCHOS SENTADOS	56																																																																																																																																																																																																						
4	ALGUNOS DE PIE	63																																																																																																																																																																																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>ID</th> <th colspan="2">DESCRIPCIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3</td> <td colspan="2"><i>(coche tipo 3)</i></td> </tr> <tr> <td>ID</td> <td>DESCRIPCIÓN</td> <td>OCUP</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>POCOS SENTADOS</td> <td>18</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>MUCHOS SENTADOS</td> <td>28</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>LLENO</td> <td>32</td> </tr> </tbody> </table>				ID	DESCRIPCIÓN		3	<i>(coche tipo 3)</i>		ID	DESCRIPCIÓN	OCUP	1	POCOS SENTADOS	18	2	MUCHOS SENTADOS	28	3	LLENO	32																																																																																																																																																																																			
ID	DESCRIPCIÓN																																																																																																																																																																																																							
3	<i>(coche tipo 3)</i>																																																																																																																																																																																																							
ID	DESCRIPCIÓN	OCUP																																																																																																																																																																																																						
1	POCOS SENTADOS	18																																																																																																																																																																																																						
2	MUCHOS SENTADOS	28																																																																																																																																																																																																						
3	LLENO	32																																																																																																																																																																																																						

Figura 4.8: Planilla de relevamiento de paradas.

Las **áreas de paso** son aquellas que se definen en el punto anterior, como ser los barrios y los centros de gran concentración demográfica, o de gran movimiento de gente en algún momento en particular del día. Tal como se definió anteriormente, cada barrio o región se determina de acuerdo a la semejanza en el comportamiento a lo largo del día, y saber por qué áreas pasa cada línea nos permite saber, en consecuencia, cómo se comportará la gente en cada tramo de la misma.

Nuevamente se listan aquí las **avenidas** y **calles principales**. En este caso, lo que se diagrama es una red esquemática de las distintas rutas, en dirección longitudinal y transversal, a fin de diferenciar cada uno de los tramos que componen la red principal de transporte de la ciudad. De este modo, se puede determinar qué secuencia de tramos sigue cada una de las líneas, y al mismo tiempo especificar cuánta gente pasa por cada uno de estos tramos.

Esto mismo ocurre con las **calles alternativas**, que son de especial importancia a la hora de diagramar recorridos de retorno para cada una de las líneas, en especial cuando las mismas circulan por avenidas de una sola dirección de circulación.

Ahora, una vez se termina de definir esta **diagramación de la red**, se procede a analizar el flujo de gente a lo largo de cada uno de los tramos, suponiendo leyes similares a las *leyes de Kirchoff*, donde la suma de gente en un nodo debe ser nula, y el número de pasajeros a lo largo de cada uno de los segmentos entre nodos se mantiene constante a menos que exista una fuente de carga o descarga de los mismos entre medio. Al ser este el caso real, lo que se tiene en cuenta en este análisis es el movimiento de pasajeros con un viaje que se realice al menos entre dos segmentos. Es decir, se desprecian, por este medio, todos los viajes que no cruzan, al menos, un nodo.

En la figura 4.9 se ejemplifica este proceso de diagramación de la red: la figura (a) muestra la identificación de las rutas principales, la (b) las rutas secundarias y la (c) el diagrama final de la red.

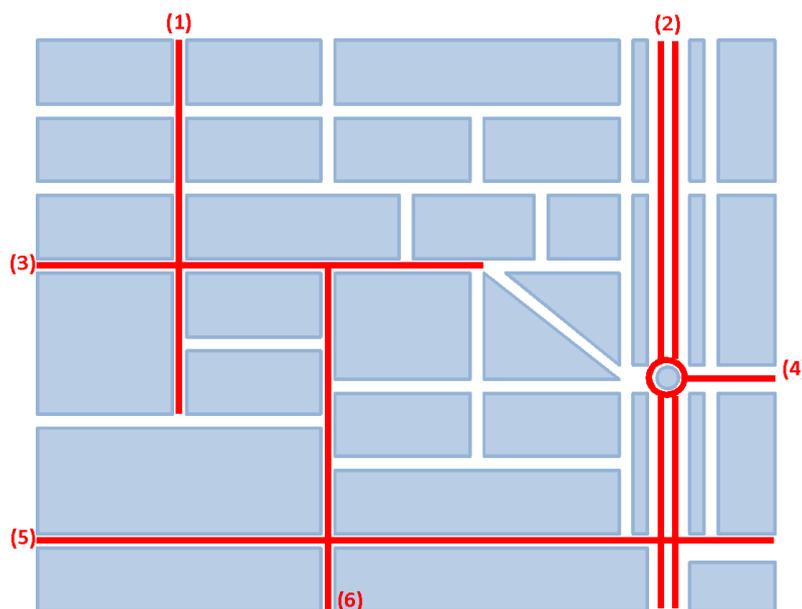


Figura 4.9.a: Rutas Principales.

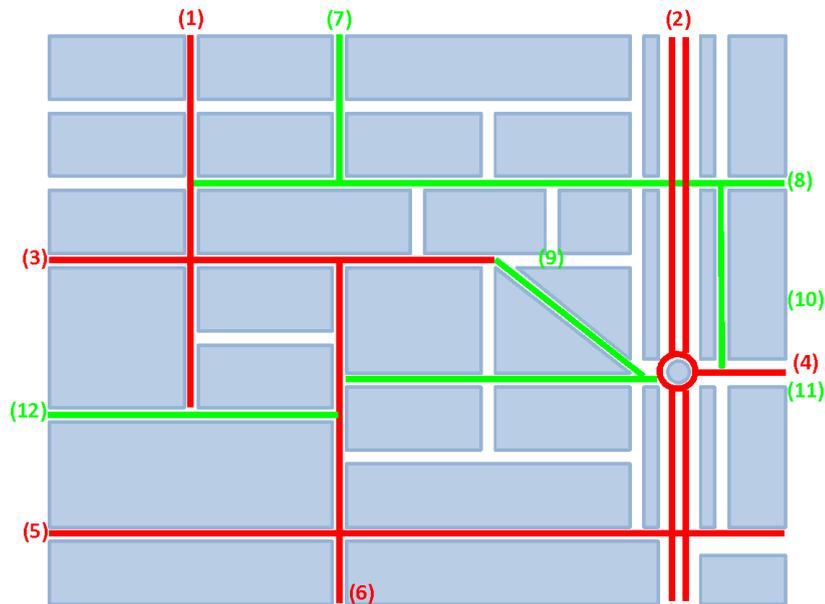


Figura 4.9.b: Rutas Principales y Secundarias.

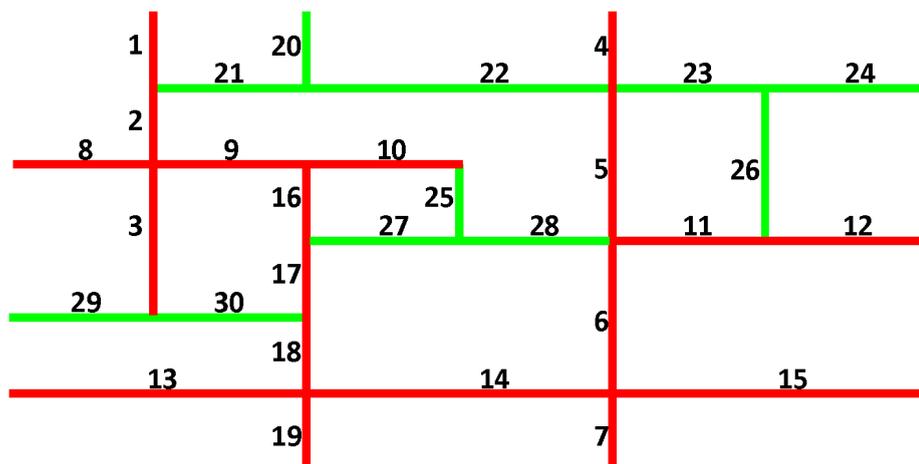


Figura 4.9.c: Diagrama de Red con todos los tramos numerados.

Con este mecanismo se logra determinar el movimiento de gente en la red, independizándolo de las líneas de colectivos que circulan por la misma en la actualidad. Una vez se consigue esta información, se deducen de modo directo dos datos que servirán de alimentación al modelo de simulación: la matriz de Origen y Destino y la frecuencia de llegada a las paradas.

4.2.d: Matriz OD

La **matriz de Origen y Destino** determina, tal como dice la palabra, la probabilidad que una parada o región tiene como destino, para cada una de las paradas como origen. Básicamente, se trata de una matriz cuadrada donde las filas y las columnas representan a las mismas paradas (la primer fila es representativa de la primer parada, y lo mismo ocurre con la primer columna), y donde la fila representa el origen y la columna el destino. Entonces, si quiero

saber qué probabilidad tengo, partiendo de la primer parada, de bajarme en la parada número 10, debo ir a la celda ubicada en la décima columna de la primer fila, y allí estará dicha información.

Como comentario lógico, cabe destacar que la diagonal de la matriz, en el caso de que cada fila represente una parada, tendrá todos valores nulos, ya que de no ser así se estaría diciendo que una parada es, al mismo tiempo, origen y destino del viaje. Contrario es el caso en que cada fila o columna representa un barrio, en donde estas celdas pueden tener valores no nulos, y que representarían los movimientos internos del barrio.

Esta matriz se genera a partir de los datos obtenidos en el punto anterior, y cada parada se encuentra inserta en algún punto de los conectores entre nodos. Siguiendo con la comparación a los circuitos de *Kirchoff*, son las fuentes o sumideros de pasajeros dentro de la red.

Las figuras 4.10 y 4.11 son dos ejemplos de matriz de Origen y Destino. La primera es una matriz de valores absolutos, que indica la cantidad de gente que se mueve de un punto a otro, entre distintas áreas de la ciudad, mientras la segunda indica la probabilidad de origen y destino para una línea en particular.

Sector de Origen	SECTOR DE DESTINO																						TOTAL	%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22		
1	123	2.542	12.341	820	4.254	369	1.107	1.886	1.353	697	861	492	123	1.435	41	1.066	1.025	41	656	779	2.460	492	34.973	13,2%
2	228	5.624	11.400	1.292	4.332	684	1.292	1.216	2.052	1.064	2.052	532	76	1.748	76	1.368	1.672	380	1.368	1.596	5.092	684	45.828	17,3%
3	162	2.844	486	72	144	18	108	0	54	72	396	18	18	18	18	216	126	54	1.242	306	1.098	432	7.902	3,0%
4	84	840	252	0	56	0	0	28	224	0	28	28	0	28	0	28	28	0	188	140	140	168	2.240	0,8%
5	56	504	112	28	112	0	28	56	56	0	28	0	56	0	28	196	112	0	588	168	896	280	3.304	1,2%
6	0	1.316	188	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	196	0	0	84	84	308	84	2.240	0,8%
7	0	91	91	0	39	0	182	13	13	91	143	0	13	26	0	26	52	26	91	0	260	26	1.183	0,4%
8	26	442	299	286	65	13	26	65	52	13	65	104	52	26	39	182	156	78	221	169	442	117	2.938	1,1%
9	8	80	80	0	88	48	8	0	8	16	24	32	56	24	16	56	8	8	248	24	336	80	1.248	0,5%
10	0	112	144	8	56	0	120	8	24	8	24	0	0	0	0	24	32	0	8	72	56	24	720	0,3%
11	24	376	256	72	88	0	160	64	40	16	32	128	0	40	8	72	288	32	248	104	968	648	3.664	1,4%
12	19	589	380	76	95	0	76	95	57	0	19	19	0	57	114	152	76	38	741	209	532	57	3.401	1,3%
13	0	19	76	19	57	57	19	0	0	0	19	19	0	0	0	0	0	0	19	0	0	38	342	0,1%
14	40	660	1.100	220	120	0	400	20	100	120	540	60	0	40	40	240	140	0	80	100	340	100	4.460	1,7%
15	0	480	700	100	620	60	60	240	500	0	40	240	0	0	0	180	60	0	40	180	40	0	3.520	1,3%
16	468	2.652	8.580	1.404	3.744	468	1.092	1.716	1.248	780	3.120	1.560	0	1.872	166	2.652	2.028	780	2.496	4.680	3.432	624	45.552	17,2%
17	26	936	845	39	104	0	104	130	26	26	494	169	0	78	0	13	455	104	26	156	2.301	611	6.643	2,5%
18	0	416	650	65	481	208	39	260	429	26	39	143	0	13	117	169	143	39	13	26	312	65	3.653	1,4%
19	87	7.018	9.483	2.030	4.872	928	1.306	1.305	2.755	377	2.552	1.479	174	1.595	261	3.625	986	435	3.045	3.016	1.305	348	48.991	18,5%
20	54	1.755	1.755	522	639	27	288	315	549	45	279	144	27	270	99	936	297	99	324	630	513	117	9.684	3,6%
21	45	3.681	3.969	459	1.440	207	387	486	963	162	1.593	498	45	684	315	685	2.133	405	234	549	3.330	1.143	23.301	8,8%
22	0	854	1.813	175	637	35	112	224	609	42	378	266	14	126	147	371	602	245	217	126	651	1.925	9.569	3,6%
Total	1.450	33.811	54.990	7.687	22.053	3.122	6.913	8.127	11.112	3.555	12.726	5.919	694	8.080	1.475	12.353	10.419	2.764	12.157	13.114	24.812	8.063	265.346	100,0%
%	2,0%	12,3%	5,3%	2,1%	1,7%	0,4%	1,4%	1,0%	2,4%	2,3%	3,5%	1,4%	0,4%	0,9%	1,3%	8,8%	3,1%	1,3%	17,6%	7,0%	19,2%	6,7%	100,0%	

Figura 4.10: Matriz OD de movimientos entre áreas.

De\A (%)	Parada0	Parada1	Parada2	Parada3	Parada4	Parada5	Parada6	Parada7	Parada8	Parada9	Parada10	Parada11	Parada12	Parada13	Parada14
Parada0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,69	0,31	0	0	0	0	0	0	0
Parada1	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,69	0,31	0	0	0	0	0	0	0
Parada2	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,69	0,31	0	0	0	0	0	0	0
Parada3	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,69	0,31	0	0	0	0	0	0	0
Parada4	0	0	0	0	0,00	0,00	0,69	0,31	0	0	0	0	0	0	0
Parada5	0	0	0	0	0	0,00	0,69	0,31	0	0	0	0	0	0	0
Parada6	0	0	0	0	0	0	0,00	1,00	0	0	0	0	0	0	0
Parada7	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,03	0,00	0,00	0,10	0,13	0,29	0,45
Parada8	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,10	0,13	0,30	0,47
Parada9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,10	0,13	0,30	0,47
Parada10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,10	0,13	0,30	0,47
Parada11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,15	0,33	0,52
Parada12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,39	0,61
Parada13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	1,00
Parada14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00

Figura 4.11: Matriz OD de probabilidades entre paradas.

4.2.e: Frecuencia de llegada a las paradas

Este dato se obtiene como resultado, también, del análisis de flujos de pasajeros. En el caso de tener rutas definidas, se obtiene a partir del dato de subidas a los coches testigo, de quienes se tiene el horario en que se pasa por una parada, y la frecuencia de paso. De este modo, a partir del número de subidas por parada, y la frecuencia de la línea, se deduce la frecuencia de llegada de pasajeros a la parada. Este dato es una simplificación, dado que no se tiene en cuenta los pasajeros que abandonan la parada por llegar primero la competencia, o por no llegar el colectivo a tiempo o llegar lleno. Sin embargo, se utiliza para esto otra encuesta, que se realiza en las paradas, donde se registra la llegada de pasajeros a las mismas, el tiempo de estadía en las paradas y el transporte que utilizan. Asimismo, en los casos en que se obtiene permiso y se dispone del tiempo y del personal suficiente, se realiza la encuesta al pasajero de su lugar de destino, a fin de obtener una información más precisa para validar los datos de la matriz de Origen y Destino.

En los casos de no existir una ruta definida, se obtiene de la diferencia en los flujos que aparecen en la red de avenidas y calles del punto anterior (4.2.c). En este caso el procedimiento es similar al anterior, deduciendo la frecuencia de llegada de acuerdo a la diferencia de flujo, la frecuencia del servicio y la cantidad de paradas dentro de cada segmento: en los casos en que las paradas sean más de una, se aproxima ponderando el peso específico de cada parada en el segmento, y se distribuye la cantidad de gente que se sube en el segmento de acuerdo a esta ponderación (por ejemplo, si se obtiene que la frecuencia del servicio es de un coche cada diez minutos, y al mismo se suben veinte personas en un segmento con dos paradas, con importancia similar cada una de ellas, se deduce que se suben diez personas en cada parada. De este modo, la frecuencia de llegada a paradas efectiva termina siendo de diez personas cada diez minutos en ambos casos, es decir, de sesenta personas por hora, o de una persona por minuto. A este número luego se lo corrige de

acuerdo a la cantidad de decesos, para obtener la frecuencia real de llegada a las paradas).

4.3: Desarrollo del modelo de simulación

El modelo, tal como se dijo anteriormente, fue realizado mediante simulación por agentes. En consecuencia, el desarrollo del mismo puede dividirse en etapas que guardan relación con cada módulo a crear, las cuales servirán como título de cada una de las secciones que se detallan a continuación.

4.3.a: Agente: Colectivo

El colectivo es el primer agente que pasaremos a describir. El mismo, como se dijo anteriormente, tiene reglas básicas de funcionamiento:

- Partir de cabecera en el momento en que se le ordena que lo haga.
- Hacer todo el recorrido, parando en todas las paradas a subir y bajar gente.
- No levantar más gente que la que se ordena como capacidad máxima.
- Volver a cabecera.

A partir de estas reglas, puede notarse que el colectivo tiene un comportamiento autónomo desde el momento en que sale de la cabecera hasta que vuelve a la misma, y que en dicho recorrido su tiempo de viaje y su ocupación dependerán de la interacción del mismo con los pasajeros. El esquema interno del colectivo puede verse en la figura 4.12. En el mismo puede notarse, como característica principal, la existencia de tres estados: cabecera, que hace referencia al momento en el cual el coche se encuentra estacionado o en fila a la espera de su próxima salida; ruta, cuando el coche se encuentra en el trayecto intermedio entre paradas; y parada, cuando se encuentra estacionado en la parada. Otra característica a destacar es el módulo de decisión, que se utiliza para determinar si se arribó a la cabecera o si se trata de una parada intermedia.

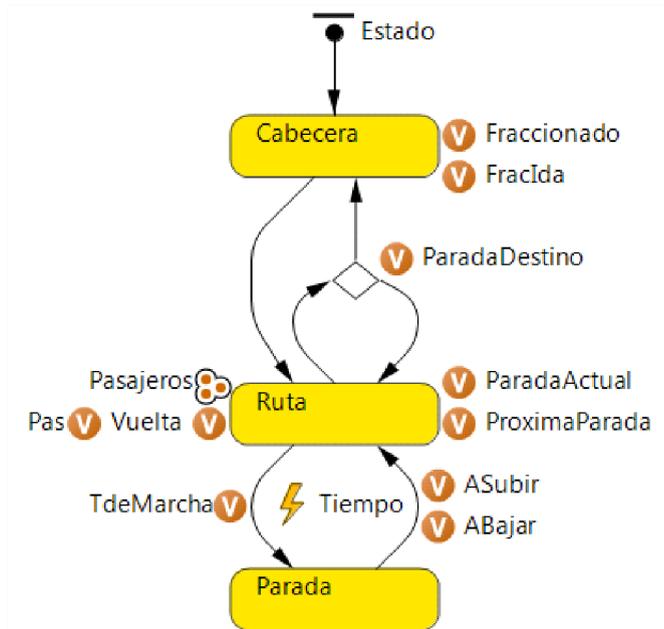


Figura 4.12: esquema de comportamiento del colectivo.

Para el colectivo, la orden de partir desde cabecera le viene dada desde un nivel superior, y se genera a partir de un evento que será detallado más adelante. Lo mismo ocurre con la restricción en el número máximo de gente que puede levantar, que se carga como un parámetro en particular y que constituye la capacidad del colectivo: en algunos casos se utiliza, por ejemplo, una capacidad máxima de 80 pasajeros, mientras en otros la capacidad no puede superar las 50 personas.

Por otro lado, el colectivo toma como información de entrada dos datos en particular: la **distancia** a recorrer entre cada parada, y el **tiempo** que transcurre mientras la recorre. Con el primer dato, se determina la distancia total recorrida por el vehículo, que luego es utilizada para un cálculo económico de consumo de combustible, entre otras cosas. Con el segundo, se determina el tiempo de viaje, sumándose al tiempo de cada parada.

Este **tiempo en la parada** se calcula a partir de una combinación de tiempos: se trata del máximo entre el tiempo de subida y el de bajada, los cuales se calculan a partir del tiempo de apertura y cierre de puertas, el tiempo de frenado y arranque de la unidad, el tiempo de subida o de bajada de los pasajeros y (en el caso de la subida de pasajeros) el tiempo que se tarda en comprar el boleto (este último tiempo es determinante cuando la cantidad de gente que quiere subirse al vehículo supera las 5 personas, momento en el cual una sexta persona debe esperar en la puerta de la unidad hasta que la primera termina de comprar el boleto, para recién en ese momento poder subirse y permitir que el transporte arranque nuevamente). El código utilizado para calcular el tiempo en la parada puede verse con claridad en la figura 4.13.

Allí se calcula cada uno de los tiempos (de subida y de bajada) por separado, y luego se toma el máximo de los dos como el tiempo de parada.

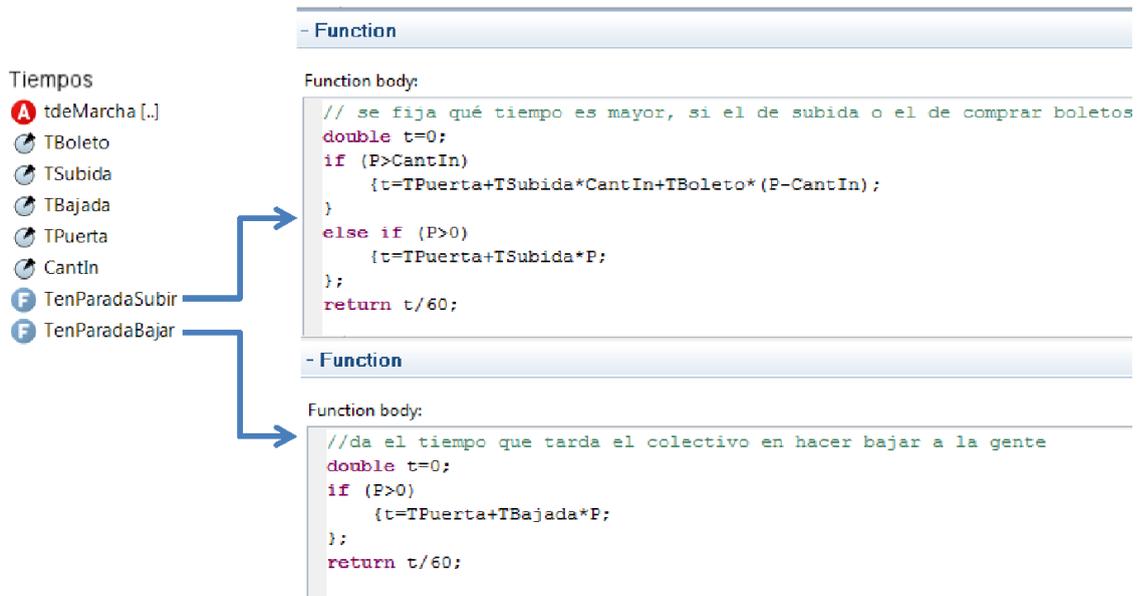


Figura 4.13: código de cálculo del tiempo en la parada

4.3.b: Agente: Pasajero

El otro agente a desarrollar es el pasajero. En este caso, es necesario tener en cuenta las siguientes condiciones, que se corresponden con lo visto en el capítulo 4.2.a con respecto al tercer nivel de decisión del pasajero.

- Llegar a la parada correspondiente a la línea seleccionada.
- Esperar al colectivo.
- Retirarme de la parada en caso de excederse el tiempo máximo de espera.
- Verificar la ocupación del vehículo cuando arriba.
- Subirse al mismo en caso de que la ocupación sea menor a la tolerada.
- En caso de que arribe primero a la parada un vehículo de la competencia, decidir si subirse o no a dicha unidad de acuerdo a la fidelidad a la línea elegida en primer instancia.

Con todas estas decisiones, el esquema del pasajero queda definido tal como puede verse en la figura 4.14. En este caso, este agente es creado de acuerdo a la frecuencia de llegada a las paradas (información que se obtiene a partir de lo visto en el capítulo 4.2.e), y su comportamiento no está regido por más reglas que las propias, y la interacción con el colectivo. En consecuencia, no existe control alguno sobre el pasajero, funcionando el mismo de manera

totalmente autónoma desde el momento de su creación hasta que deja de formar parte de la simulación.

En este caso, al ver el esquema de la figura, se identifican dos estados, que son el de espera (cuando el pasajero ya se encuentra en la parada), y el de viaja (cuando ya se subió al colectivo). Entre medio, está la decisión de subir o no al interno, dependiendo de la ocupación (el parámetro *MaxGente* hace referencia a esto) y de la fidelidad (el cambio de estado se activa por cada vehículo que arriba a la parada, independientemente de qué línea se trata, y es aquí donde el pasajero debe decidir por subirse o no al mismo). Asimismo, se destaca el otro conector de cambio de estado, que se activa una vez que se supera el tiempo máximo de espera (*MaxEspera*), y tras el cual el pasajero pasa automáticamente a desaparecer de la simulación.

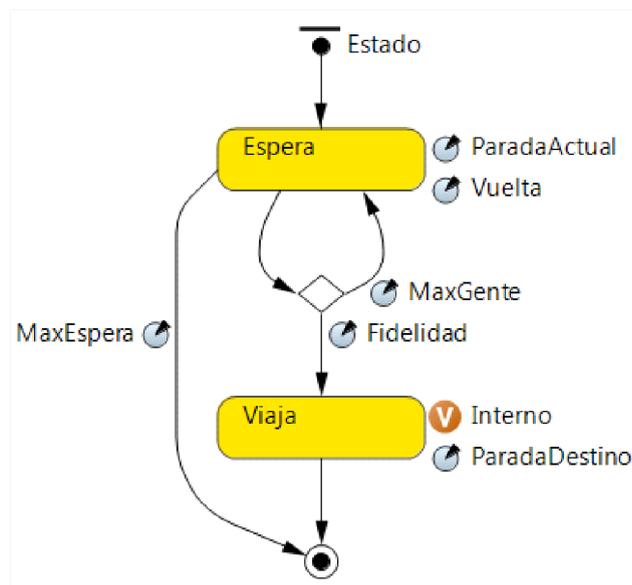


Figura 4.14: esquema de comportamiento del pasajero.

4.3.c: Diagramación y salida de colectivos

La diagramación, en este modelo, se encuentra simplificada, evitando el proceso de diagramación propiamente dicho que se realiza en cada empresa de transporte.

En este caso, la diagramación es la que determina el momento en el cual se le ordena a un coche que salga de cabecera, y el orden se realiza de la siguiente manera:

1. Verifica la duración de la franja en la que se encuentra: en nuestra simulación, la simulación se realiza con un horizonte temporal de un día, y se divide dicho día en 8 franjas horarias distintas. Entonces, por ejemplo, la franja 3 tiene 3 horas de duración, es decir, 180 minutos.

2. Verifica cuántos coches se quiere despachar en esa franja horaria: esto se determina de acuerdo a una lista de valores iniciales, determinada por el programador: por ejemplo, se ordena que salgan 30 coches en la franja 3.
3. Distribuye las salidas de manera uniforme a lo largo de toda la franja: siguiendo nuestro ejemplo, se ordenaría una salida cada seis minutos.
4. En caso de existir servicios fraccionados, se distribuyen también de manera uniforme, reemplazando cada uno de dichos servicios a uno de los servicios normales. En nuestro caso, si tuviese 3 servicios fraccionados, pondría uno cada hora, reemplazando a los servicios 10, 20 y 30.
5. Con todo lo anterior se determina la frecuencia de salida. Con esta frecuencia se activa un evento, que es el que cambia el estado del colectivo, pasando del estado de Cabecera al siguiente estado, de Ruta. Esto sucede con el primer coche en la fila que se arma en cabecera, siguiendo una lógica FIFO (el primero en llegar será el primero en partir).
6. En caso de no contar con un coche en cabecera, se activa otro evento, que no respeta el tiempo de descanso de los vehículos y que automáticamente despacha al próximo coche que llegue a cabecera, intentando de este modo cubrir el bache de la mejor manera posible.

Todo este proceso se puede ver claramente en el código que aparece en la figura 4.15.

```

double EntreTiempo;
double ComienzoFranja=0.0;
int UnoCada;
int i;
int j;
int Fida;
int Fvuelta;
int Fsuma;
int n=0;
//para cada una de las 8 franjas (de 0 a 7) carga el entretiempos entre c/u de los colectivos
for (i=0;i<8;i++)
{EntreTiempo=60*HsPorFranja((double)i)/CantFranja.get(i);
Fida=FracIdaFranja.get(i);
Fvuelta=FracVueltaFranja.get(i);
Fsuma=Fida+Fvuelta;
//agrega todos los servicios correspondientes a cada franja
for (j=0;j<CantFranja.get(i);j++)
{ServiciosDiagramados.add(EntreTiempo*((double)j)+ComienzoFranja);
FraccionadosDiagramados.add("N");
};
//modifica aquellos servicios que son fraccionados, uniformemente en toda la franja
if (Fsuma>0)
{UnoCada=(int)floor((double)CantFranja.get(i)/((double)Fsuma+0.001))+1;
for (j=0;j<CantFranja.get(i);j+=UnoCada)
{if (Fida>Fvuelta)
{FraccionadosDiagramados.set(n+j,"I");
Fida--;
}
else
{FraccionadosDiagramados.set(n+j,"V");
Fvuelta--;
}
};
};
//pone el inicio de cada franja, de acuerdo a la cantidad de hora q le corresponde
ComienzoFranja+=60*HsPorFranja((double)i);
n+=CantFranja.get(i);
};

```

Figura 4.15: código del proceso de diagramación.

4.3.d: Indicadores: pasajeros totales, ocupación máxima, tiempo de espera

Aquí pasaremos a listar cuáles son los principales indicadores que surgen a partir del modelo, y cómo se obtiene cada uno de ellos en el mismo.

En primer instancia, están los indicadores de **ocupación**. Aquí se encuentran la ocupación promedio del vehículo a lo largo de su recorrido, la ocupación máxima, y la cantidad total de pasajeros que levanta. Todo esto se carga en cada uno de los agentes *Colectivo*, cada vez que arriba a una parada: se le suma la cantidad de pasajeros que suben en la misma, y este contador proporciona el total de pasajeros al final del recorrido; y, por otro lado, se carga otro contador que indica la cantidad de gente que se sube menos la cantidad que se baja en la misma parada, del cual se deduce la ocupación promedio y la ocupación máxima. En la figura 4.12 se puede notar dos parámetros, que son los que se actualizan en cada parada y son utilizados para cargar estos indicadores: *ASubir* y *ABajar*.

El otro grupo de indicadores importantes son los que se corresponden a los **tiempos de espera**, el cual es el tiempo que debe esperar el pasajero desde que llega a la parada hasta que puede subirse finalmente a un colectivo. Para obtener este valor, en cada agente *Pasajero*, al crearse el mismo (que en la simulación coincide con el momento en el que arriba a la parada) se activa un

parámetro de tiempo inicial, y al cambiar al estado de *Viaja* se carga otro parámetro como tiempo final. De la diferencia entre estos dos sale el tiempo de espera, y al final del recorrido se hace un cálculo del tiempo de espera promedio, junto con el desvío y con el tiempo de espera máximo. Además de esto, hay otro indicador más, que corresponde a la cantidad de pasajeros que abandonan la parada debido a que se excede el tiempo de espera máximo.

Finalmente, existe un tercer grupo de indicadores de menor nivel de importancia, que sirven para analizar las **salidas a destiempo** de cabecera. En este caso, cuando no puede cumplirse con las salidas diagramadas y se debe recurrir a una salida de emergencia (tal como se explicó en **4.3.c**), se activa un contador y se registra el tiempo total de demora en la salida. Con esto, se puede obtener, al final de la simulación, la cantidad total de salidas que se realizaron fuera del tiempo diagramado, y el tiempo promedio de retraso que tuvieron las mismas frente a la diagramación.

4.3.e: Competencia

La competencia en el modelo no se encuentra simulada de la misma forma que el colectivo, sino que se carga de manera indirecta en cada una de las líneas. Para poder hacer esto, se tienen en cuenta las siguientes condiciones:

- La primer parada en la cual aparece la competencia.
- La última parada que comparte la competencia con mi línea.
- La ocupación promedio que tienen los colectivos de la competencia.
- La frecuencia de servicio que tiene dicha competencia, en cada una de las franjas horarias.

En base a estos cuatro parámetros el pasajero decide subirse al colectivo de la competencia o a esperar por un colectivo de nuestra línea, a partir de la fidelidad que tenga, que se explica en el próximo punto.

4.3.f: Capacidad máxima, tiempo de espera máximo y fidelidad

Estos son los parámetros que aparecen dentro de las decisiones a tomar por parte del pasajero. Tal como puede verse en la figura 4.14, estos parámetros aparecen dentro del mismo agente. En consecuencia, se puede modificar los mismos tanto a nivel general como para cada agente en particular. Además, hay que destacar que los valores medios utilizados se pueden especificar para cada una de las paradas, y que se agrega a su vez una variación, siguiendo cada uno una distribución normal con una media y un desvío determinado.

En nuestro caso, se utilizaron valores medios de capacidad máxima tolerada, tiempo de espera máximo y fidelidad para todos los agentes, y en algunos

casos en particular se fue modificando dichos valores a fin de analizar situaciones especiales.

4.3.g: Optimizador

A fin de obtener una distribución óptima de la flota, se realizó, en el modelo, un módulo de optimización. En este módulo, se utiliza el modelo de simulación para representar el comportamiento de la ciudad, con los datos ya explicados como información de entrada, y se busca cumplir con la demanda estimada, con el menor número posible de colectivos (de este modo, se maximiza la productividad de cada colectivo).

Para poder determinar el número de internos, se pueden utilizar tres funciones objetivo¹³ de minimización, con una ponderación de los siguientes valores:

1. Cantidad de internos y de pasajeros con más de 15 minutos de espera: en esta función, se busca cumplir con las condiciones demandadas por el pasajero, de tener menos de 15 minutos de espera en la parada, con la menor cantidad posible de internos.
2. Cantidad de internos, pasajeros con 15 minutos de espera y cantidad de salidas por franja: se busca cumplir con lo mismo que en el caso anterior, pero con la menor cantidad posible de salidas en cada franja horaria. De este modo, se busca evitar salidas innecesarias en los horarios valle.
3. Cantidad de internos, pasajeros con 15 minutos de espera, cantidad de salidas por franja y cantidad de salidas a destiempo: se busca lo mismo que en el caso anterior, pero cumpliendo con el horario de salida. Al minimizar el número de internos, se corre el riesgo de no contar con un interno en la cabecera para alguna salida, y con esta función se evita esto. Es de especial importancia para los casos en los que los recorridos tienen un tiempo de servicio muy grande.

Como puede notarse, cada una de las funciones objetivo le agrega algo de información a la anterior, siendo la tercera la más compleja. Sin embargo, es también la que más tiempo demanda de simulación, con lo cual se debe analizar si conviene realizar la optimización con la misma, o si resulta más efectivo optimizar a partir de alguna de las primeras funciones y luego verificar los datos con otras corridas del simulador.

En nuestro caso, debido a una limitación en la capacidad del procesador y de los tiempos disponibles para obtener un óptimo de cantidad de internos

¹³ La función objetivo es aquella función o variable que se quiere optimizar en el módulo de optimización. Normalmente, esta función suele minimizarse o maximizarse, aunque también existen las funciones de ocurrencia o de equivalencia.

necesarios, se realizó el análisis a partir de la primer función, y luego se verificaron los números obtenidos.

4.4: Definición de indicadores

Ya habiendo explicado en los puntos anteriores de dónde se obtienen los indicadores, en este capítulo se discute para qué sirve cada uno de ellos.

El indicador de cantidad total de **pasajeros transportados** sirve para determinar el beneficio económico que representa cada una de las líneas para la empresa. Además, permite controlar que la línea trabaje de forma uniforme, resaltando los casos en que un colectivo levanta muchos pasajeros y no permite que el vehículo que viene detrás levante lo que le correspondería (en el caso de que se abra la línea y se apilen los coches). Asimismo, separando este valor por cada franja horaria, se puede determinar qué horario, a lo largo del día, es el más importante y limitante de la flota (el horario en el que se transporte la mayor parte de la gente, será el que defina la frecuencia máxima de servicio que se debe prestar y, en consecuencia, el número de coches que se requiere para cumplir con esa frecuencia).

Por su lado, el **tiempo medio de espera** sirve para determinar, de cierta forma, el beneficio percibido por el cliente: el pasajero. Un tiempo medio de espera bajo representa un mayor beneficio para el cliente, y en consecuencia puede afectar en la demanda, aumentando la cantidad de viajes totales.

El **tiempo máximo de espera** se utiliza para un análisis similar al anterior, siendo normalmente una restricción que se le impone al modelo: no superar, en ningún caso, un determinado tiempo de espera. Esto puede verse desde dos puntos de vista: como una restricción absoluta, de que ni siquiera una persona supere el tiempo determinado de espera (para lo cual se utiliza este indicador); o ver al tiempo de espera como un continuo, y exigir que menos de un determinado porcentaje de la población espere más de un cierto tiempo (Por ejemplo, que menos del 5% de la gente espere más de 15 minutos). En este último caso, se utiliza una combinación entre el tiempo medio de espera y el desvío de este valor.

Finalmente, otro indicador importante es la **cantidad de internos** requeridos en cada línea. Si bien no se trata de una información de salida del modelo, sino que se utiliza como un valor de entrada al mismo, es un limitante de la frecuencia de servicio. Entonces, haciendo el camino inverso, si pretendo una determinada frecuencia de servicio para una línea, entonces voy a requerir de una cierta cantidad de internos. Esto es de vital importancia, teniendo en cuenta el costo que representa invertir en un coche nuevo.

5. RESULTADOS OBTENIDOS

En este capítulo se presentan los resultados que se obtuvieron en nuestro caso de estudio en particular. Los mismos están relacionados con los capítulos desarrollados en el punto anterior, y se presentan en el mismo orden, para facilitar el seguimiento.

5.1: Presentación de resultados

5.1.a: Comportamiento de los pasajeros

Los pasajeros siguen las mismas reglas que se vieron en el capítulo anterior. En primer caso, se decide de acuerdo a la condición económica. Luego, por la geográfica, para finalmente decidir por cada medio de transporte, dependiendo de cada situación en particular.

Sin embargo, en nuestro caso en particular, existe una característica distintiva, propia de la cultura de la ciudad analizada: el común de la gente no se traslada de un lugar a otro caminando, y la ciudad misma está diagramada sobre esta idea, sin buenas vías de tráfico peatonal. En consecuencia, la gente, a la hora de trasladarse, se puede dividir en dos o tres grandes grupos:

1. Aquel que tiene sustento económico, suele tener un vehículo personal para trasladarse, y lo hace de este modo en casi la totalidad de los casos.
2. Existe un grupo intermedio, que tiene solvencia económica suficiente para tomar un medio semipúblico, pero que no puede mantener un vehículo propio. Estos casos son potenciales usuarios, pero que hoy en día utilizan taxis o remises para trasladarse.
3. Los actuales usuarios del transporte público son las personas de más bajo recurso, que cuentan con poco dinero y aprovechan los actuales precios bajos del boleto, junto con la falta de control arriba del colectivo, para trasladarse. Esta gente suele utilizar este medio para hacer grandes viajes y, dependiendo de la situación, tienden a evitar los viajes cortos, aun cuando trasladarse por sus propios medios puede ser riesgoso.

Además de estos grupos, y en parte asociado al segundo de los grupos, se produce un fenómeno muy particular en esta ciudad: los taxis, en la mayoría de los casos, dejaron de brindar un servicio exclusivo, para pasar a brindar un servicio colectivo. En otras palabras, hoy en día son los taxis quienes compiten bajo una modalidad similar al colectivo, y se ocupan de realizar los trayectos cortos antes mencionados, a una tarifa un poco mayor, pero bastante inferior a la que cobrarían en un servicio normal, y levantan más gente en el camino,

compartiendo de este modo el transporte con más pasajeros. Así, la gente consigue evitar trasladarse a pie, y los taxistas consiguen obtener un mayor rédito de su servicio.

5.1.b: Características de la ciudad

La ciudad analizada se encuentra sobre la costa marítima y, por lo tanto, tiene una geografía similar a la que se describió como longitudinal, a lo largo de la costa. Sumado a esto, además, tiene una zona céntrica en uno de los extremos de la costa, extendiéndose luego la zona residencial tanto de manera longitudinal como transversal, tierra adentro. Esta estructura surge a partir del crecimiento que tuvo históricamente la ciudad, cuya evolución en las últimas décadas puede observarse en la figura 5.1 que aparece a continuación. En la misma puede notarse que, para 1960, toda la zona céntrica ya había sido desarrollada, junto con otros pequeños barrios a lo largo de las rutas principales. Luego, en la siguiente década, se siguió un proceso de aglomeración entre varios de estos barrios, y un crecimiento hacia la parte superior de la ciudad. Ya para 1980 se vio acentuado el crecimiento en dirección transversal antes mencionado, consiguiendo una geometría que semeja a una “T” invertida. Por último, entre 1990 y 2000 se terminó de unir todos los barrios de la ciudad, para terminar de conformar la geometría que ostenta hoy en día.

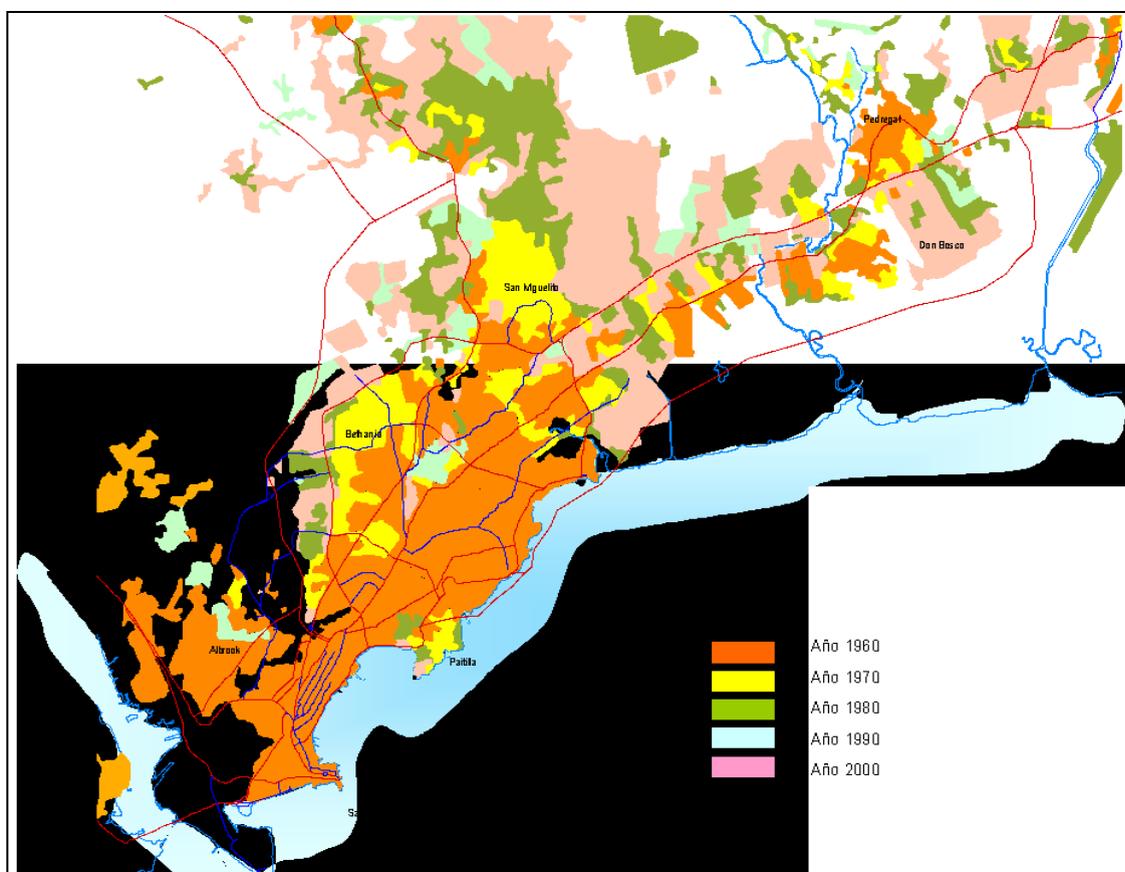


Figura 5.1: evolución histórica del crecimiento de la ciudad. Extraído del *Estudio de Transporte Público Integrado de la ciudad* [4].

La ciudad tiene, asimismo, dos aeropuertos, que se ubican en cada extremo de la misma, y se conectan a partir de un corredor o autopista que bordea toda la costa, y que sirve como una de las principales vías de salida del centro hacia la zona más oriental de la ciudad. Además, también hay otro corredor que sale del primer aeropuerto y que termina su recorrido en la naciente de una ruta provincial, sobre la cual se extiende la ciudad de manera transversal.

Además de estos dos corredores, existen cuatro avenidas principales, que parten de la zona céntrica hacia la zona de menor densidad demográfica, siendo dos de ellas orientadas hacia el origen de la ruta provincial y otras dos hacia el segundo aeropuerto, donde nace otra ruta provincial, sobre la cual hoy en día se observa un crecimiento considerable en la población. Luego, existen otras avenidas de menor importancia, que cruzan a estas cuatro rutas transversalmente.

Si hacemos un esquema, entonces, de la ciudad, tendremos tres puntos principales, que son los dos aeropuertos y el cruce entre el segundo corredor y la ruta provincial. Entre estos puntos se forma un triángulo, que contiene la región de mayor importancia de la ciudad, siendo las regiones exteriores barrios de menor densidad de los cuales solamente llega gente a la mañana y se retiran al finalizar el día. En consecuencia, a la hora de realizar un análisis en profundidad, se exceptuarán estas zonas, y sólo se las tendrá en cuenta como una causa externa de alimentación de las líneas urbanas céntricas.

En la figura 5.2 se puede ver un esquema de la ciudad, junto con sus rutas principales y los principales centros de atención. En color verde oscuro se pueden ver las zonas de aeropuertos, en negro se ven los corredores, y en rojo y azul las cuatro avenidas troncales (en rojo la zona céntrica y azul ya la región de menor densidad). Además, se observan en rojo oscuro los principales centros comerciales, en naranja las universidades y con triángulos los demás centros educativos. Por último, se diferencian las zonas de acuerdo a su funcionalidad: en verde claro, la región de parques, en violeta las regiones industriales y en amarillo claro las zonas residenciales.

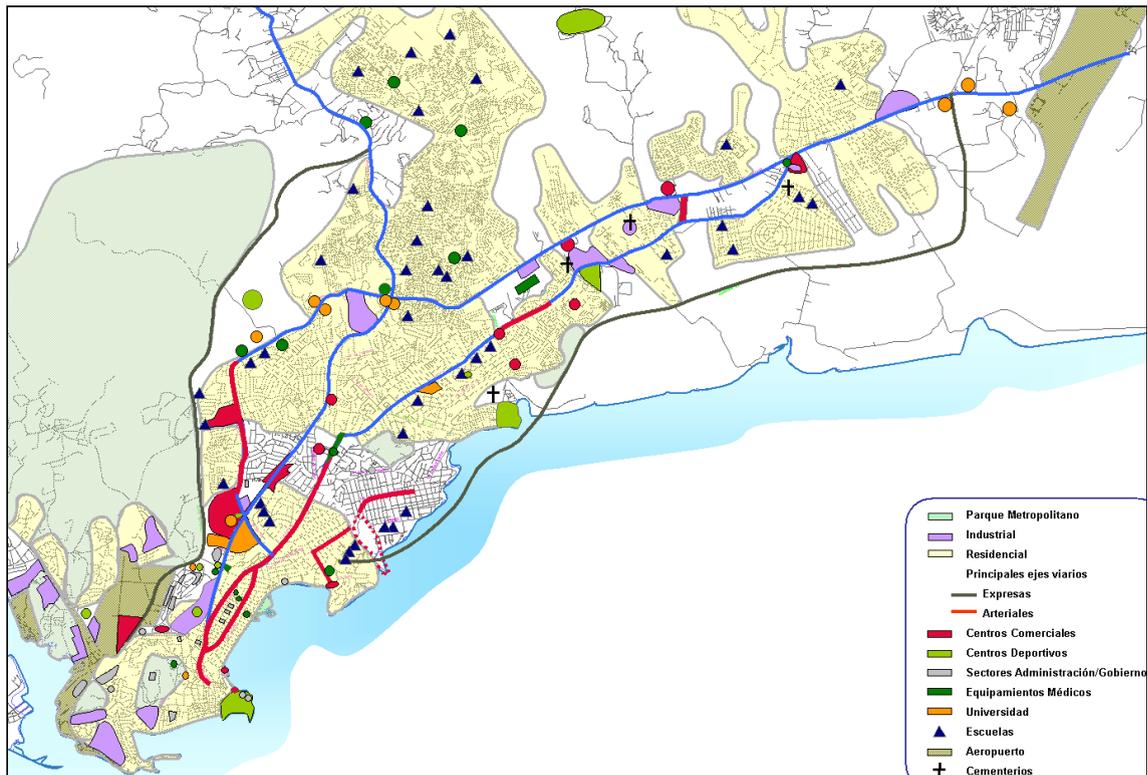


Figura 5.2: esquema de la ciudad analizada en el caso de estudio. Extraído del *Estudio de Transporte Público Integrado de la ciudad* [4].

Finalmente, en la figura 5.3 se puede ver una esquematización de los distintos flujos principales de gente a lo largo de la ciudad, de acuerdo a la información demográfica y geográfica disponible. En este caso, quedan en clara evidencia la región céntrica de la ciudad (donde se ve una actividad mixta, tanto comercial como de negocios), de donde hay dos tipos de flujos principales: hacia el este, sobre el aeropuerto, y hacia el norte, tierra adentro (estos dos destinos se cumplen tanto por avenidas internas como por los corredores antes mencionados).

Otra cosa que se puede notar en esa figura es la existencia de dos grandes nodos, uno en la zona del centro y otro en el cruce entre las vías que siguen hacia el interior y aquellas que acompañan la dirección de la costa.

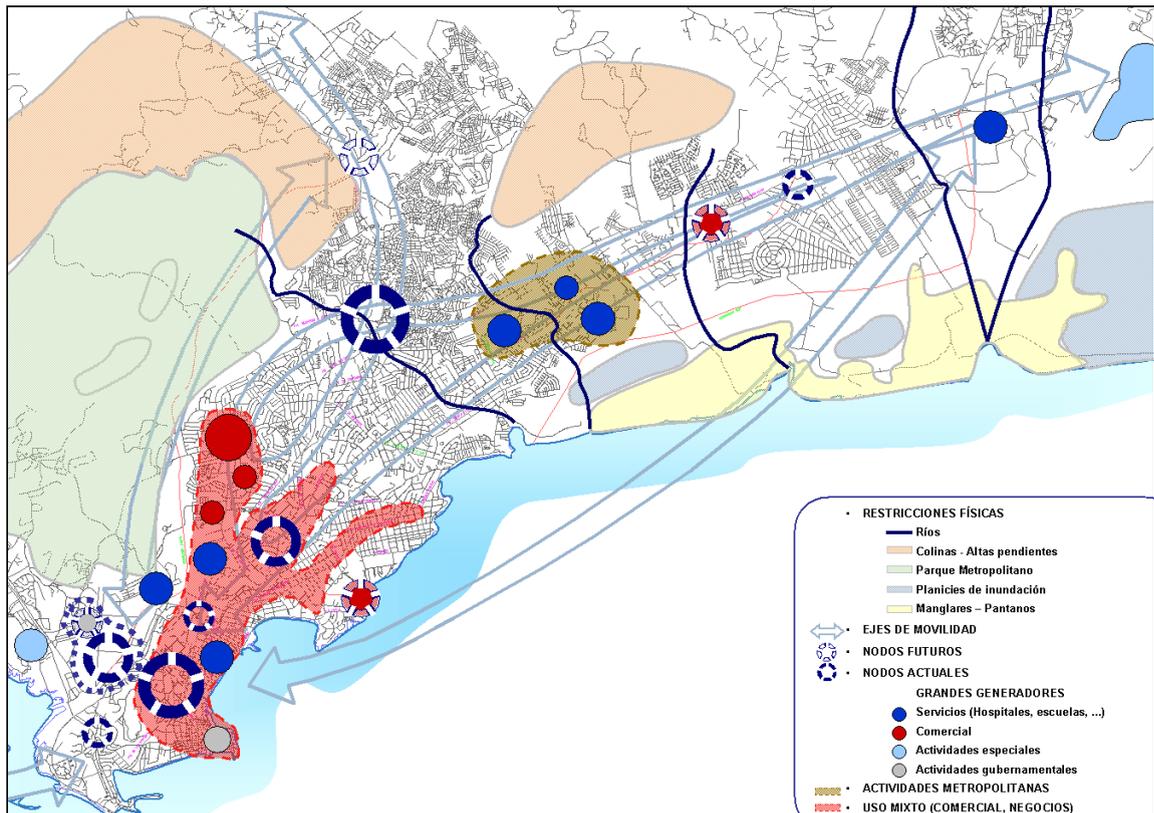


Figura 5.3: esquema de flujos. Extraído del *Estudio de Transporte Público Integrado de la ciudad* [4].

5.1.c: Flujo de pasajeros, Matriz OD y frecuencia de llegada a paradas

Tal como se vio en la última parte del inciso anterior, el flujo de pasajeros tiene una serie de direcciones definidas como principales, y existen otras rutas que sirven de alimentadoras hacia estas rutas, que pueden denominarse rutas troncales. Además, se puede determinar tres grandes destinos, tanto como destinos finales como puntos de transferencia, que son los que aparecen en la figura 5.4. De este modo, los flujos tienen como destino principal el punto A, y luego se diferencian dos grupos de ramales: los que van al punto N y los que van al punto E, en cada una de las rutas correspondientes (salvo los corredores, cada uno a un punto en particular).

Como también se dijo anteriormente, entre estos tres puntos se encuentra el sistema simulado en el análisis, y la región que excede a estos límites se tiene en cuenta como un efecto externo que alimenta a las paradas terminales como un flujo de gente que hace trasbordo a partir de rutas alimentadoras. Esto mismo puede notarse claramente en la figura, siendo que las rutas troncales aparecen en color verde, mientras las alimentadoras son de color rojo. Sumado a estas, existen otras tres rutas transversales, que se dibujaron en color naranja.

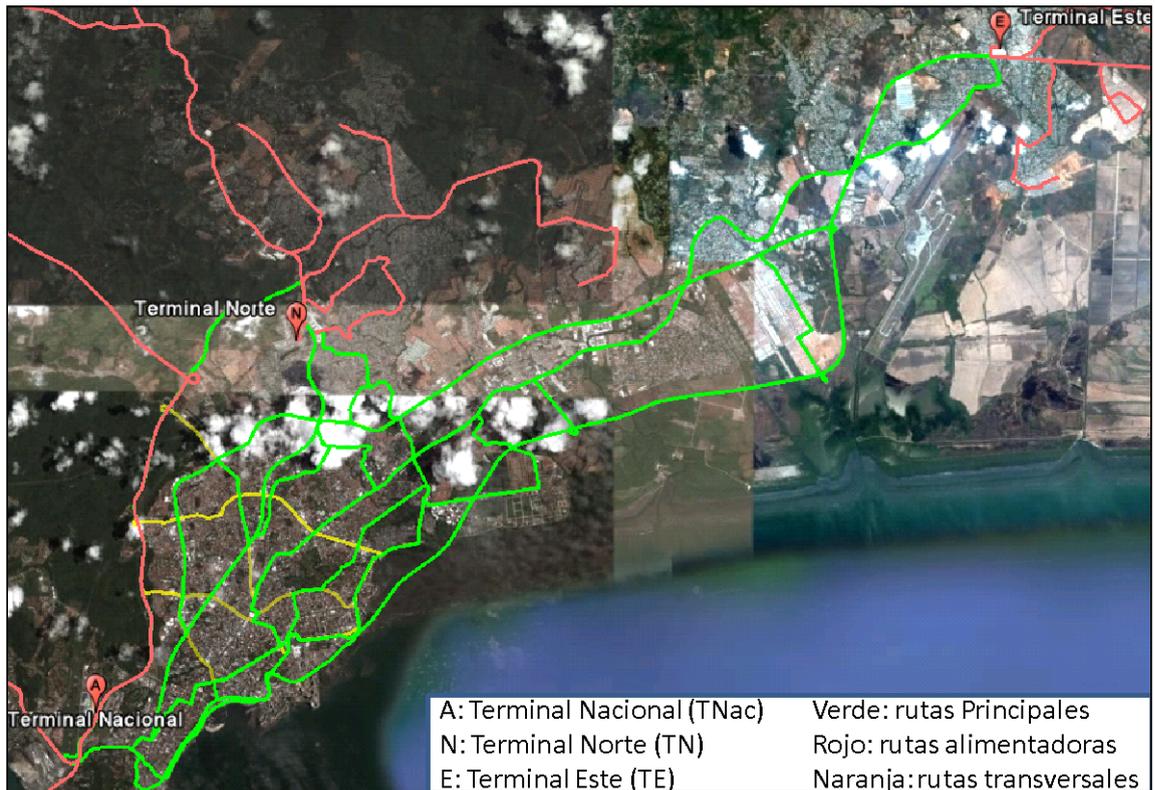
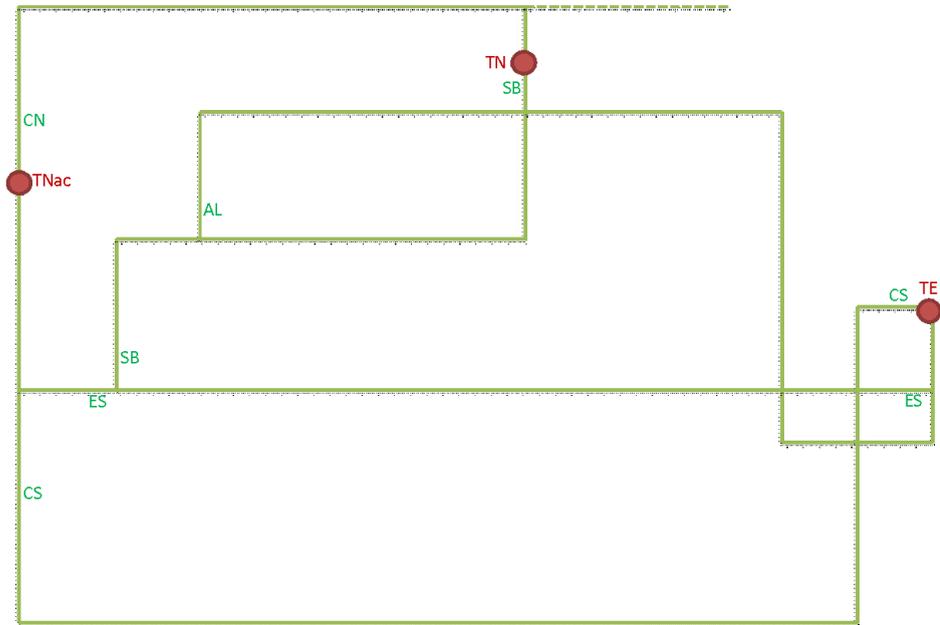
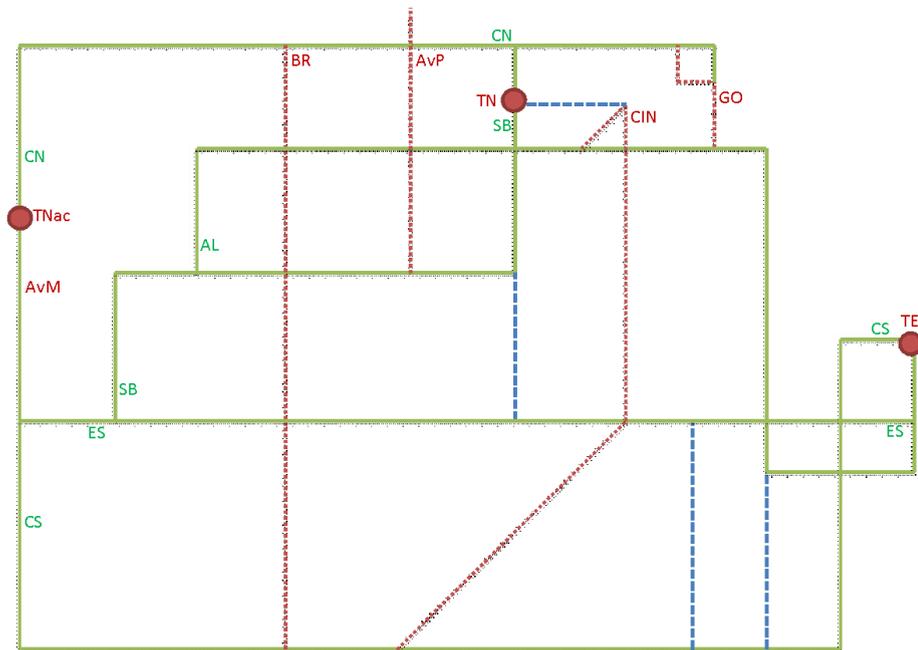


Figura 5.4: puntos terminales y principales rutas.

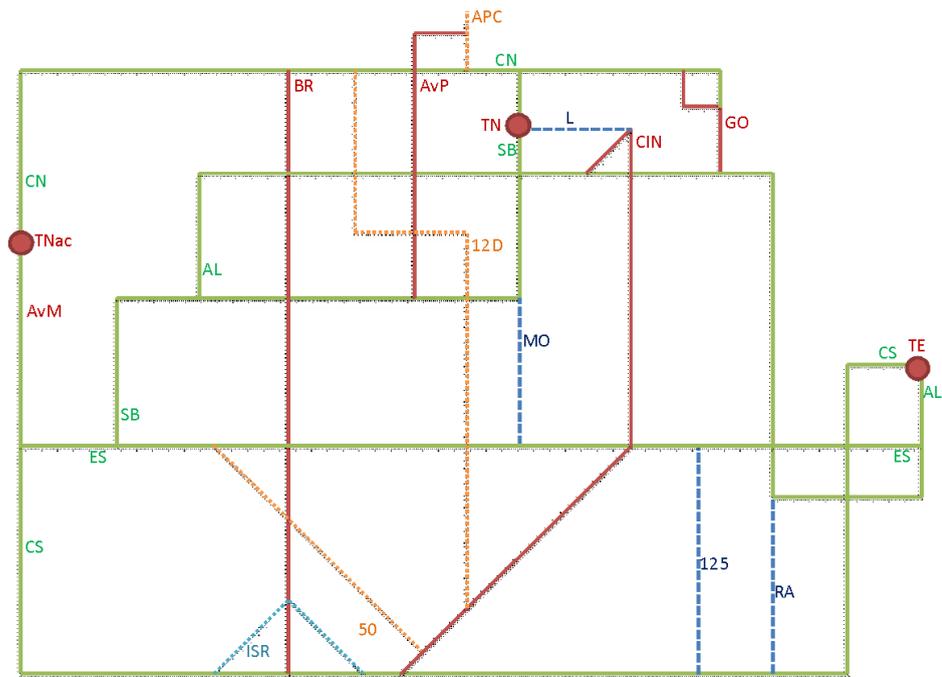
En conjunto con lo visto en estos mapas, de la intersección de las avenidas principales se obtiene la red de tramos que aparece en la figura 5.5. En este caso, se pueden diferenciar cuatro niveles de importancia en las avenidas: (a) en primer nivel, las rutas principales; (b) en segundo nivel, las avenidas principales que las intersecan transversalmente; (c) un tercer nivel de otras avenidas de menor importancia que cruzan transversalmente y; (d) en último nivel, aquellas rutas que no son principales, pero que son importantes para conectar distintos tramos de rutas que no pueden conectarse a partir de las avenidas antes mencionadas.



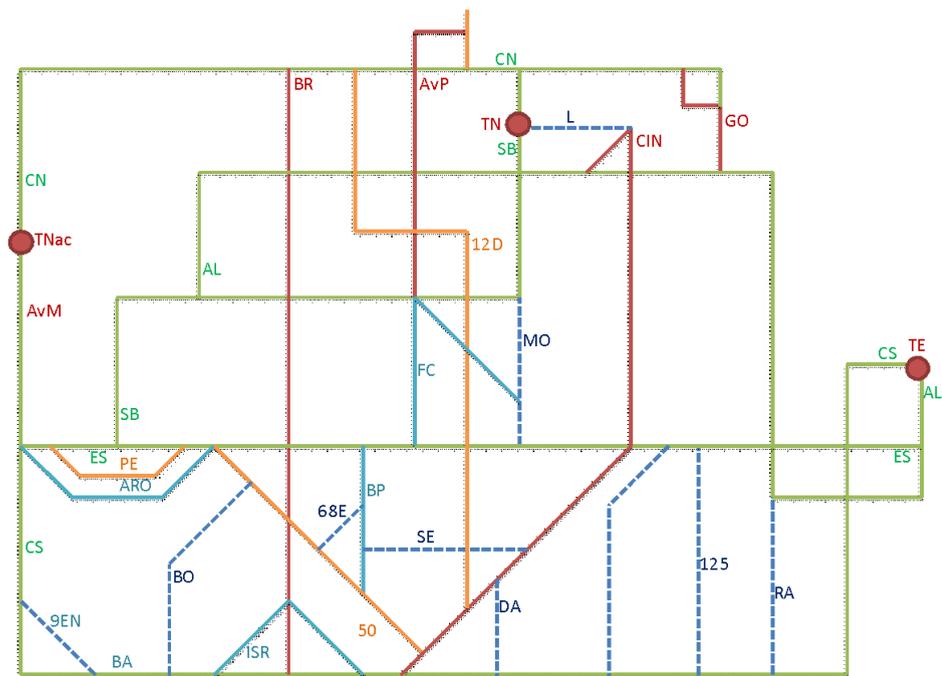
(a) Rutas principales



(b) Avenidas principales



(c) Avenidas secundarias



(d) Rutas conectoras

Figura 5.5: diagrama de red de tramos de la ciudad.

Con este diagrama de red se representó luego cada uno de los recorridos y líneas a tener en cuenta dentro de la ciudad, como combinación de tramos. La numeración de cada tramo se realizó siguiendo cada una de las rutas principales, y puede verse con detalle en la figura 5.6. De este modo, por ejemplo, se podía decir que una línea – la 3 – pasaba por los tramos 1 al 6 y

finalizaba en la terminal TN, y bajo este mismo análisis se pudo determinar el flujo total de gente en cada tramo, y cuánta demanda podía haber en cada línea nueva diseñada.

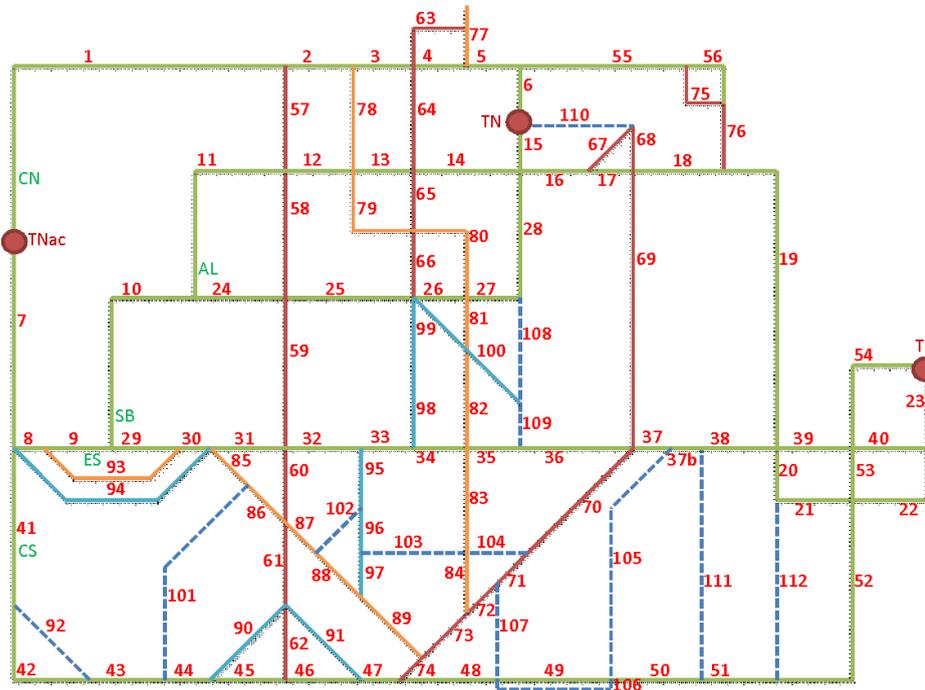


Figura 5.6: numeración de tramos.

Esta relación de tramos con cada línea se puede ver con claridad en la tabla 5.1: cada fila representa a una de las líneas, y cada columna se corresponde a cada uno de los tramos. En la celda de intersección, cada número representa el orden en que se suceden los tramos. De esta forma, la celda con el número 1 representa al primer tramo que se recorre en la línea, sucedido por el número 2 de la misma fila, y luego el 3, hasta llegar al último tramo. En esta tabla también aparecen otras tres columnas que se corresponden a las distintas terminales (TNac, TN y TE), que funcionan como cabeceras de las distintas líneas.

Ruta\tramos	TNac	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	14	15	16	17	18	19	20	21	23	24	25	26	27	28	TN	TE	
1	0							1																			14	
1a	0							1						13												12	16	
2	0							1										13	14									17
2a	0							1																				15
2b	0							1											13	14	17							18
3	0	1	2	3	4	5	6																				7	
4	0							1																				16
4a	0							1																				16
4b	0							1												14								17
5	0							1	2	3	4		10									5	6	7	8	9		11
5a	0							1	2	3	4	9	10									5	6					11
5b	0							1	2	3	4		11									5	6					12
6	0							1	2	3	4			10	11	12	13	14	15			5	6	7	8	9		18
6a	0							1	2	3	4			10	11	12	13	14	15	18		5	6	7	8	9		19
6b	0							1	2	3	4			10	11	12	13					5	6	7	8	9		16

Tabla 5.1: correspondencia de tramos con líneas.

Una vez obtenida esta información, se prosiguió a armar la **matriz de flujos** y la de **origen y destino**. En el primer caso, se distribuyó la cantidad de gente a subir y a bajar entre todas las líneas que pasan a través de un tramo (por ejemplo, en el tramo 7 se ve que pasan una gran cantidad de líneas, mientras que en el tramo 14 hay una sola línea). Luego, en el segundo caso se partió de esto para determinar la probabilidad de bajarse por cada tramo. A estas informaciones de subidas y bajadas, luego, se las distribuyó uniformemente entre las paradas correspondientes a cada tramo, distribuidas, a su vez, de manera uniforme a lo largo del recorrido, con un espaciado de 500 metros entre cada una.

Ahora bien, esta distribución de subidas y bajadas se ve influenciada, en buena parte, por la cantidad de líneas que circulan por cada tramo, en especial para los casos en los que esta cantidad es inferior a 3 líneas. En estos casos, se realizó un análisis puntual tramo a tramo, modificando la distribución en los casos en que se consideró necesario. Asimismo, se incluyó un efecto adicional, para disminuir la inestabilidad tramo a tramo, haciendo que la ocupación de una línea en un tramo se vea influenciada también por los tramos anterior y posterior. De este modo, se representó de mejor manera el comportamiento de los pasajeros, dado que la mayoría de los viajes son largos, atravesando más de tres tramos¹⁴. Luego, este parámetro de “amortiguamiento” se ajustó a partir de los datos obtenidos, a fin de que la cantidad de viajes totales sea equivalente y representativa de la realidad.

5.1.d: Modelo de simulación. Condiciones particulares

El modelo de simulación no tuvo grandes diferencias respecto a lo detallado en el capítulo anterior. Sin embargo, se realizaron una serie de simplificaciones propias del caso en particular, que serán explicadas a continuación.

En la función de la **competencia** tenemos la primer simplificación, desactivando su efecto. En este caso en particular, el análisis se realizó para la totalidad de las líneas en una ciudad, con lo cual la competencia era entre líneas de la misma empresa, y la diferencia de demanda entre distintas líneas no representaba una gran variación a la hora de analizar la cantidad de servicios a brindar en las mismas. Aun así, se realizaron los análisis correspondientes para verificar este dato, ajustando la información de entrada en los casos más significativos.

La otra simplificación es en el **tiempo máximo de espera**. Esta función fue desactivada, porque el análisis que se llevó a cabo fue, precisamente, a fin de determinar el tiempo de espera de los pasajeros en la parada. Al no haber

¹⁴ Otro efecto representado a partir de este parámetro es la posibilidad de que una persona camine una cierta cantidad de cuadras desde la parada más cercana de una línea, en vez de hacer trasbordo con otra línea que pase por la parada que tiene como destino final.

grandes competencias, y bajo la premisa de ser el principal medio de transporte (e incluso, en gran parte de los recorridos, el único medio de transporte para la población que utiliza el servicio), se decidió desactivar la posibilidad de irse de la parada luego de un tiempo de espera, y se incluyó a la cantidad de pasajeros con una espera superior a 15 minutos dentro de la función objetivo a optimizar. Una vez hecho esto, quedó en evidencia la inutilidad de este comportamiento, y de ahí su desactivación.

Con respecto a los **tiempos de demora en las paradas**, se realizó una aproximación a partir de datos obtenidos en otra red urbana. Al no contar con la misma modalidad de pago que la que se pretende brindar en la red analizada, comparado con la que actualmente se encuentra en servicio, se decidió incluir tiempos propios de la nueva red. Si bien los tiempos no se corresponden a la población a analizar, se supone que no habrá grandes diferencias con la red de la cual se tomaron los datos. En el caso de los **tiempos de viaje**, por el contrario, sí se contó con información de campo para los recorridos a analizar y, si bien en algunos casos puntuales se realizaron aproximaciones de acuerdo a la velocidad promedio del servicio, la mayoría de los datos fueron en base a un relevamiento de campo consistente. En consecuencia, se tomaron como válidos los mismos.

Teniendo en cuenta todas las condiciones aquí mencionadas, se prosiguió a utilizar el **modelo de optimización**, utilizando en el mismo una serie de ensayos de 200 corridas cada uno, seguido de un ajuste manual de los parámetros para luego repetir un nuevo ensayo de optimización definitivo. Finalmente, una vez obtenidos los parámetros, se prosiguió a validar esos datos a partir del simulador base y, en caso de existir alguna eventualidad, se repitió el mecanismo. Esto se realizó para cada una de las líneas por separado, comparando a su vez los valores de las líneas más similares a fin de resaltar causas especiales en caso de existir alguna, y poder corregirlas.

5.1.e: Indicadores

Al hablar de los indicadores antes mencionados, podemos separar el análisis en una serie de partes. Por un lado, diferenciamos los resultados obtenidos a partir del modelo de simulación base del modelo de optimización. Del primero obtuvimos más información del comportamiento de las líneas a lo largo del día, mientras del segundo obtuvimos, en particular, la cantidad de internos y de servicios necesarios para cumplir con la demanda establecida.

Además de esto, otra información surge como relación entre las distintas líneas, al armar la totalidad de la red de transporte. De este modo obtuvimos, por ejemplo, la totalidad de internos que necesitaremos para toda la ciudad, así

como también la cantidad de pasajeros total que se transportarán en los mismos.

El **tiempo de espera promedio** de los pasajeros fue variando, dependiendo de cada línea. Tal como se dijo anteriormente, se evitó la posibilidad de que los pasajeros se retiren de la parada a partir de cierto tiempo de espera, a fin de poder calcular el valor máximo de dicha espera. Lo que se pudo conseguir es un tiempo de espera inferior a los 15 minutos. Sin embargo, en algunos casos la variación en los datos hacía que una pequeña modificación en la cantidad de servicios afectara considerablemente este tiempo de espera. En consecuencia, en esos casos se realizó un análisis con mayor profundidad, a partir del modelo de simulación base, y se determinó la cantidad de internos y servicios a partir de una nueva condición, de que menos del 5% de los pasajeros tenga un tiempo de espera mayor al deseado. De este modo, el servicio resultaba más competitivo a un menor costo.

La idea de tener un tiempo de espera menor a 15 minutos, sobre la base de que un colectivo pasa cada 5 minutos en promedio, significa que el pasajero no debe dejar pasar a más de dos internos antes de subirse a su vehículo, en el horario de mayor demanda, conformando de este modo un servicio de excelencia.

El único inconveniente, en este caso, es la **cantidad de internos** necesarios. Al priorizar la satisfacción del cliente por sobre todas las cosas, el número de vehículos a disponer se vio incrementada en gran medida. En consecuencia, en algunas líneas fue necesario, tal como sucedió en los casos en que había gran variabilidad en el resultado, un ajuste más fino sobre la cantidad de internos y servicios, con un pequeño porcentaje de tolerancia en el tiempo de espera del pasajero.

En concreto, luego, se consiguió como resultado final una necesidad para la red de un total de **940** internos, repartidos en un total de **29** líneas, lo cual da un promedio de **32** vehículos por cada línea. Este mismo dato, desde un cálculo básico, nos permite calcular una frecuencia en promedio de **12** vehículos por hora por línea o, lo que es igual, una diferencia de **5** minutos entre cada colectivo.

Ahora bien, esta frecuencia nos estaría dando un total de **82** pasajeros en promedio por viaje, siendo esto un número bastante bajo. Cabe destacar que este cálculo fue realizado bajo la condición de que todo vehículo se encuentre en servicio durante todo el día, caso que difiere significativamente de la realidad. Para explicar mejor esto, se toma como base lo visto en la simulación, y los datos de entrada para la misma, donde se ve claramente que el limitante de la cantidad de servicios y de vehículos a tener en cuenta para cada línea es,

en la mayoría de los casos, el horario pico de la mañana. Luego, en los casos excepcionales, existe también un pico significativo a la tarde, cuando la gente vuelve a sus casas, pero no es lo habitual, y se refleja también en el modelo de optimización en el caso de usar la segunda o tercer función objetivo, que también optimiza el número de servicios por franja. Más aún, se observa en algunos casos que el valle del mediodía representa una baja en el flujo de pasajeros bastante grande, donde también pueden observarse movimientos en espacios internos de las líneas, sin una dirección definida como ocurre en los picos de mañana y tarde (a la mañana, el flujo es entrante hacia el centro de la ciudad, y a la tarde saliente). En consecuencia también se ven reducidas las frecuencias de servicios para el horario valle del mediodía, y mucho más aún para los primeros horarios de la mañana y última hora de la noche.

En concreto, se observa que el pico de la mañana representa el **40%** de los viajes, mientras el de la tarde representa un **25%** (que sería un **63%** en relación con el pico de la mañana), el valle del mediodía menos de un **20%** y las horas nocturnas (suma de noche y de mañana) un **10%**¹⁵. Esto se puede ver gráficamente en la figura 5.7.

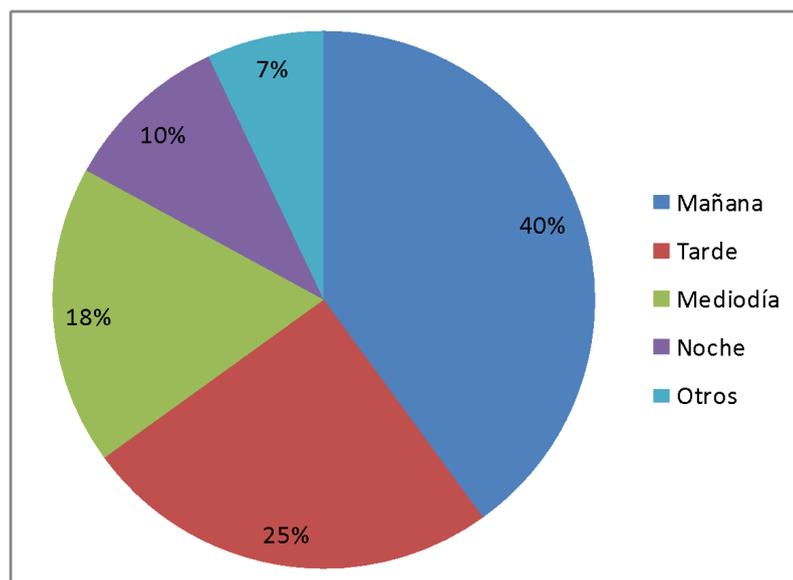


Figura 5.7: distribución de los pasajeros a lo largo del día

Respetando, entonces, este comportamiento, se reduce la cantidad de servicios en un **40%** en promedio para todas las líneas, para obtener, finalmente, un promedio de **135** pasajeros por viaje. Esto representaría una mejora del **65%** en cantidad de pasajeros por viaje. Algunos de estos valores pueden observarse en las tablas 5.2 y 5.3. En la primera hay un listado de las

¹⁵ Se puede verificar que, entre todos los porcentajes, no se suma 100%. Esto es debido a que los valores son aproximados y, además, existen un par de horas intermedias que no se incluyeron en ninguna de las franjas aquí mencionadas, y que suman alrededor de un 5% de la totalidad de viajes.

frecuencias más importantes para cada línea, y en la segunda un detalle mayor con la duración del recorrido, su longitud y la flota total a tener en cuenta para cada una de dichas líneas¹⁶.

Plan de Prestación de Servicios

Servicio	Frecuencia Pico de la Mañana (Bus/hs)	Frecuencia Valle (Bus/hs)	Frecuencia Pico de la Tarde (Bus/hs)	Frecuencia Nocturna (Bus/hs)
001A	18.25	6.14	7.23	5.19
003	13.25	12.05	13.27	5.07
004	13.25	5.75	7.29	4.87
004A	11.25	5.00	6.40	4.13
005	18.75	8.73	10.69	6.96
005B	19.00	7.33	8.34	6.37
006	20.25	9.29	11.51	6.51
006A	19.25	9.14	11.10	6.16
006B	17.75	8.20	10.07	6.55
010C	7.50	4.16	4.55	2.82
T1	14.75	12.54	13.26	5.67
T2a	9.13	7.19	7.26	3.47

Tabla 5.2: Tabla de frecuencias en horarios picos y valles por línea

Plan de determinación de tamaño y composición de Flota

Servicio	Frecuencia Máxima (Bus/hs)	Longitud (ida y regreso) (Km)	Tiempo de Ciclo (ida y regreso) (min) *	Velocidad Comercial (Km/hs)	Flota de Reserva (por tipo de vehículo) (Bus)	Flota Total (por tipo de vehículo) (Bus)
001A	18.25	40	147	16	3	48
003	14.29	26	54	29	1	13
004	13.25	65	145	27	2	34
004A	11.25	68	159	26	2	32
004B	12.50	70	165	25	2	37
005	18.75	30	86	21	2	29
005B	19.00	31	94	20	2	32
006	10.25	62	155	24	3	56
006A	19.25	62	154	24	3	53
006B	17.75	63	154	25	3	49

¹⁶ Al no considerarse relevante mostrar aquí la totalidad de las líneas, se nombran algunas de las mismas a modo representativo, siendo las restantes de un comportamiento similar.

010C	7.50	81	203	24	2	28
------	------	----	-----	----	---	----

* Se refiere al tiempo requerido para completar una vuelta en el horario en que se ofrece la frecuencia máxima

Tabla 5.3: Tabla de informaciones relevantes por línea

5.2: Análisis y discusión de resultados

Si bien algunos de los resultados ya fueron discutidos en el inciso anterior, aquí pasaremos a hacer un análisis un poco más general de los mismos.

Uno de los puntos más negativos de lo visto anteriormente, pero que excede a nuestro campo de dominio, tiene que ver con la disponibilidad, en buena parte del día, de una gran **capacidad ociosa**. Esto, como puede notarse, se debe, en buena medida, a la marcada diferencia en cantidad de viajes que se registra entre los picos de la mañana y, parcialmente, de la tarde con respecto al resto de los horarios. Más aún, se registra una muy baja utilización del servicio urbano en horarios nocturnos. Todo esto nos lleva a la reducción del 40% en la cantidad de servicios en el día, indicando, en otras palabras, que los internos estarán inutilizados en un 40%. Sin embargo, esta reducción nos permite elevar la cantidad de pasajeros por viaje considerablemente, a un valor superior a 130 pasajeros por viaje, lo cual es un indicador de rendimiento muy positivo.

Por otro lado, el **horario nocturno** es, en nuestro caso, una franja desfavorable. En la misma, y en la totalidad de las líneas, la frecuencia se encuentra en valores mínimos, o muy cercanos a la condición de 4 vehículos por hora (equivalente a un colectivo cada 15 minutos). Esto muestra claramente que la gente no tiene la costumbre de utilizar la red de transporte urbano en horarios nocturnos, y esto puede explicarse a partir de dos razones: la primera, una condición propia de la gente, con poca actividad nocturna en la ciudad analizada y con un efecto negativo de la inseguridad. La segunda, que la red de transporte de hoy en día no ofrece un adecuado servicio nocturno, y esto hizo que la gente utilice otros medios de transporte en esos horarios.

A partir de esta condición de demanda considerablemente inferior a la de los horarios diurnos, nuestros indicadores de ocupación se ven afectados de manera negativa. Sin tener en cuenta estas franjas horarias, se puede notar que el indicador de subidas promedio de las otras horas sube a más de 157 pasajeros por viaje. Si tomamos un valor de referencia de 140 subidas por viaje como un indicador de buen rendimiento, podemos notar que, a lo largo de todo el día, respetando los 15 minutos máximos de espera del pasajero, incluso en horario nocturno, estamos cerca de este rendimiento, y a lo largo del día superamos ampliamente el mismo, demostrando así el atractivo del negocio.

La condición de tener un **tiempo máximo de espera** de 15 minutos fue una restricción determinante a la hora de definir el número de internos necesarios para la red. Tal como se dijo anteriormente, y a partir de la frecuencia que se obtuvo como óptima en los horarios de mayor demanda, este tiempo de espera equivale a decir que se tolera un máximo de dejar pasar entre 2 y 3 vehículos llenos, antes de subirse a un coche. Si se parte de la base de que, hoy en día, hay personas que dejan pasar a más de 5 coches antes de poder subirse, se puede notar claramente una mejora en el servicio brindado.

El hecho de poner una nueva condición de que el 95% de las personas tengan un tiempo de espera menor a 15 minutos nos permite trabajar de una mejor manera con las probabilidades en el modelo de simulación. Esto ocurría con casos en los que la media del tiempo de espera era inferior a los 10 minutos, pero se contaba con un desvío en estos tiempos que permitían obtener valores superiores a los 15 minutos, aún cuando el servicio brindado era, ya de por sí, de gran calidad. Un 5% de personas que superan los 15 minutos de espera reduce considerablemente el número de internos necesarios, y no afecta considerablemente en la media, con lo cual el grueso de la población no encuentra grandes diferencias con respecto al nivel de servicio brindado por la empresa.

Con respecto a los **tiempos** requeridos para llevar a cabo el análisis tomado como caso de estudio, a partir de esta metodología, se listan los siguientes hitos principales, y la duración de los tiempos en cada uno de los mismos:

- Tiempo de **recolección de datos** de la ciudad: para nuestro caso se tuvo en cuenta estudios anteriores, con lo cual se redujo considerablemente este tiempo, siendo necesarias unas 4 semanas para la recopilación total de los datos, y 2 semanas adicionales para la verificación en campo de los mismos. En este proceso se trabajó con 3 personas.
- Tiempo de registro de **coches testigos** y de **paradas** importantes: una vez se concluyó con el punto anterior y, de hecho, con cierta superposición temporal, se relevaron los coches testigo y las paradas de mayor importancia, lo cual requirió de aproximadamente otras 4 semanas de trabajo. Para esto fue necesario contar con la asistencia de un grupo de 6 personas a cargo de realizar dichos relevamientos.
- Tiempo de **desarrollo y validación del modelo de simulación**: el modelo se fue realizando a la par que se trabajaba en los otros procesos, requiriendo un total de 4 semanas para su desarrollo y 2 semanas para su validación. En este modelo trabajaron 2 personas.
- Tiempo de ensayo y análisis de **escenarios**, utilizando el modelo como soporte: se trabajó durante otras 4 semanas tomando como base la

información del modelo, para determinar el número total de internos necesarios, con todas las condiciones hasta aquí detalladas.

En total, estos tiempos sumaron tres meses de trabajo, siendo esto considerablemente inferior a otros estudios de similares características, y con un costo más bajo que éstos.

6. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

6.1: Recomendaciones en base al proyecto

Como principal recomendación, cabe destacar que este proyecto fue evaluado en base a un caso de estudio en particular, el cual puede diferir en mayor o menor medida con otros casos de diferente naturaleza. En especial, hay que entender que cada red urbana tendrá un comportamiento particular y debe ser analizado como tal. En consecuencia, lo que aquí aparece como resultado debe entenderse como un concepto, y se debe resaltar la metodología de resolución sobre los resultados.

Por otro lado, debe entenderse que la metodología aquí desarrollada sirve para la primera fase del proceso de planificación de la red de transporte, y no entra en el detalle de aspectos más operativos, necesarios a la hora de poner en funcionamiento a la misma. Debido a esto, de seguir esta metodología, se la debe complementar con un posterior proceso de diagramación e implementación adecuado.

Partiendo de estas dos aclaraciones, se presentaron los resultados obtenidos para el caso de estudio descrito en el capítulo 5. A partir de los mismos, y teniendo en cuenta todas las posibles limitaciones en el análisis realizado, se pudo reforzar la información disponible, para facilitar así el proceso de decisión y planificación de la red de transporte tratada, cumpliendo de este modo con la tarea encomendada.

En concreto, pudo notarse una gran ventaja en contar con el modelo de simulación, principal herramienta de diferenciación frente a otras metodologías de planificación. El mismo nos permitió desarrollar distintas estrategias frente a distintos escenarios, y poder de este modo estimar la flota requerida en proyección para los próximos años, a fin de cumplir con la demanda con el mismo nivel de servicio que se pretende brindar hoy en día. De este modo, la recomendación de cómo renovar la flota a lo largo de los años se realizó sobre una base consistente, y la misma contó con una serie de alternativas para cada caso posible.

6.2: Conclusiones del proyecto

El presente trabajo tenía como objetivo principal desarrollar una metodología de planificación estratégica de una red de transporte urbano, que se diferencie de las metodologías hasta hoy utilizadas. Siguiendo este objetivo, se arribaron a una serie de conclusiones que serán desarrolladas en este apartado.

En primer lugar, uno de los principales fuertes en la metodología utilizada reside en la posibilidad de utilizar a la misma como una **herramienta de apoyo**

consistente en la toma de decisiones. El hecho de disponer de datos reales como información de entrada, y de contar con un modelo de simulación que conforma un marco para el análisis de escenarios, sienta las bases para el ensayo de distintas estrategias que, de no contar con este soporte, sería difícil de estudiar. Lo que se quiere destacar, en este punto, es que el resultado obtenido en un primer análisis no se toma como una solución única ni definitiva; sino que surge como un resultado ante un escenario determinado, y puede variar dependiendo de cada criterio de decisión que sea considerado.

El segundo aspecto a destacar está asociado con la **metodología** en sí. Una de las cosas a favor que se encuentran, tal como se mencionó anteriormente, es que la forma de obtener los datos iniciales no difiere en gran medida a las utilizadas hoy en día, con lo cual se puede disponer de los mismos operarios y relevadores con quienes se contaba anteriormente, y con dichos datos se pueden practicar una cantidad mucho mayor de escenarios, extendiendo en gran medida el análisis. En contrapartida, esta misma condición hace que la actualización de los datos sea difícil, y a la hora de proyectar los valores a futuro se debe partir de aproximaciones en base a crecimientos teóricos, que pueden diferir considerablemente con la realidad. Sin embargo, no hay que olvidarse que se pueden simular infinidad de casos teóricos futuros, sin prácticamente costo alguno más que el tiempo para realizar las corridas, con lo cual esta desventaja (de no contar con datos reales del crecimiento proyectado) puede cubrirse a partir del análisis de múltiples escenarios.

Extendiendo aún más el análisis enfocado en la metodología utilizada, consideramos relevante mencionar la especial utilidad de la misma desde otro punto de vista: el **esquema de la ciudad**. En el caso analizado en el punto 5, se trataba de una combinación de distintos esquemas, a partir de un crecimiento irregular de la ciudad a lo largo de los años. Este caso constituye uno de los de mayor dificultad en el análisis, y es esto último lo que resalta el valor de la metodología propuesta: el hecho de haber basado el proyecto en la idea de la descentralización, hace que la metodología se destaque en este tipo de esquemas, justificando así la complejidad de su desarrollo.

Si nos remitimos a lo que se vio en el capítulo 4.2.b y, más puntualmente, en la figura 4.6, podemos decir que, a mayor complejidad en el diseño de la ciudad, mayor utilidad tiene esta metodología: un esquema de cuadrícula no presenta grandes complicaciones a la hora de planificar, y en las mismas el proceso de planificación suele ser por cobertura de área, antes que por demanda. Lo mismo ocurre con los esquemas radiales, diferenciando las rutas entre radiales y circulares. Si bien en esta diferenciación pueden surgir algunos comportamientos particulares, no suelen contemplarse a la hora de brindar el

servicio. De este modo, los tres esquemas hasta aquí mencionados pueden tratarse bajo un criterio de planificación centralizado.

En el caso de un crecimiento longitudinal, ya comienzan a aparecer alternativas diferentes, en especial cuando el crecimiento no se realiza uniformemente a lo largo del camino. Sin embargo, la planificación suele concentrarse en la ruta principal, donde suele aparecer la mayor demanda de pasajeros, disminuyendo gradualmente a medida que uno se aleja de dicho camino central. Las complicaciones aquí comienzan a aparecer cuando se trabaja con más de una ruta principal, siendo necesario entonces analizar la demanda por cada una de las rutas existentes. Aquí podría entrar en juego la metodología de evaluación multicriterio. Aun así, todavía puede planificarse adecuadamente sin necesidad de un modelo de simulación u otra herramienta de apoyo alternativa.

No ocurre lo mismo con los casos de esquemas con rutas troncales y alimentadoras, o en los casos combinados. En éstos últimos dos, llevar a cabo un análisis línea por línea exigiría de un gran esfuerzo de interpretación, con una base de datos demasiado extensa, y con una serie de simplificaciones que harían muy difícil llegar a un resultado final definitivo y consistente. Es aquí donde se requiere de otro tipo de enfoque, tal como el visto en este proyecto, evitando la centralización, y haciendo el análisis desde el punto de vista del pasajero para, a partir del mismo, ir armando la red de atrás para adelante, hasta llegar al comportamiento esperado en cada una de las líneas y en la red como un conjunto.

Otra gran temática a tratar a modo de conclusión está relacionada con la visión de la red como un gran **Sistema Complejo**. Trabajar dentro del ámbito del transporte ya de por sí tiene un alto grado de complejidad, que se ve incrementado cuando se trabaja en toda una red urbana, y más aun cuando se incluye, en el análisis, al comportamiento de las personas involucradas. En consecuencia, el enfoque a tener en cuenta debe basarse en una visión sistémica, que englobe todos los efectos posibles dentro del sistema, respetando la existencia de relaciones complejas entre las variables allí presentes.

La metodología aquí propuesta toma como base este pensamiento, y su desarrollo sienta las bases para un enfoque cada vez más inclusivo y abarcativo. Si bien todavía no se incluyen algunos aspectos, tales como el comportamiento de los pasajeros en una etapa anterior y posterior a su viaje, se crea un marco en el cual se puede desarrollar a las mismas en una futura línea de investigación. Tal como se comentó en la introducción, y respetando esta idea, se analizó al pasajero como un agente con criterio de decisión

personal y con un comportamiento descentralizado, como uno de los tantos integrantes del sistema aquí mencionado.

Este concepto, sin embargo, no pudo ser tenido en cuenta a la hora de llevar a cabo el proceso de **optimización**. En el mismo, se tuvo en cuenta uno de los aspectos mencionados, priorizando el beneficio del pasajero, en desmedro del beneficio de la empresa y, en consecuencia, alejándose del óptimo del sistema como un todo. Para poder analizar al sistema en su totalidad, deberían considerarse más aspectos de los que se tienen en cuenta en este proyecto, tales como los económicos, entrando así en otra etapa del proceso de planificación. Esta idea forma parte de las futuras líneas de investigación, que se nombran en un capítulo posterior. Igualmente, vale la pena mencionar que la metodología aquí desarrollada conforma la base sobre la cual se puede desarrollar este aspecto económico, con una mayor facilidad y precisión que la que podría obtenerse mediante otros métodos.

Con respecto a los **arquetipos** descritos en el capítulo 1.3, se puede afirmar que este proyecto marca una línea de operación que permite resolver o, al menos reducir el efecto reflejado en los mismos. En el caso del *límite del crecimiento*, con esta herramienta se consigue ampliar el límite de acción, al permitir analizar situaciones que exceden a la situación actual, en límites que serían imposibles de practicar con las condiciones actuales, pero que en la simulación sí se permite. Por otro lado, en el *desplazamiento de la carga*, la planificación estratégica realizada de forma seria y ordenada de por sí ya constituye una solución fundamental a la problemática de una adecuada red de transporte urbano. La metodología aquí propuesta, tal como se dijo anteriormente, permite reducir las demoras en la implementación de dicha solución y, de este modo, consigue disminuir las posibilidades de entrar en una solución sintomática de implementación en el corto plazo. Al reducir los tiempos e, inclusive, los costos de aplicar la solución fundamental, se evita entrar en el lazo vicioso de los efectos laterales, haciendo que el sistema como un todo mantenga un nivel de servicio competente en el largo plazo y pueda también evolucionar a tiempo, para elevar aún más sus límites de crecimiento.

Sin embargo, no hay que dejar de lado en este último caso la posibilidad de caer en otro comportamiento arquetípico: el *desplazamiento de la carga hacia la intervención*. En este tipo de comportamiento, el problema reside en solucionar un síntoma a partir de intervenciones externas y dejar de lado las soluciones internas, reduciendo, en el largo plazo, las capacidades de resolución de las personas involucradas en el análisis. Hay que entender que esta metodología no representa una solución absoluta, ni mucho menos, sino que conforma uno de los caminos posibles de resolución, que será modificado

dependiendo de cada caso en particular, y que puede servir como pie a otras investigaciones y desarrollos más elaborados.

6.3: Evaluación del éxito del proyecto

Para poder determinar si el proyecto fue exitoso, nos tenemos que remitir a lo que se tomó como condiciones de éxito en el capítulo 1.6. De este modo, podemos decir lo siguiente:

- Con respecto a la condición propia de la **identificación del problema**, junto con la necesidad de una nueva metodología eficiente de planificación estratégica, el proyecto fue exitoso. Las herramientas utilizadas en la etapa anterior al desarrollo del modelo son lo suficientemente generales como para poder aplicarlas en lugares distintos sin grandes problemas; y la verificación del modelo permite adaptar el mismo a cualquier otro escenario. De este modo, entonces, se cumple todo el primer ítem de los criterios de éxito.
- Lo mismo ocurre con el segundo punto: si bien se contó con una serie de simplificaciones en nuestro caso en particular, como son el tiempo máximo de espera y los tiempos de demora en las paradas, el modelo permite tener estos factores en cuenta, siendo de este modo representativo del **comportamiento** de cada uno de los agentes incluidos en la simulación. Asimismo, se evitó entrar en detalle, en nuestro caso, con respecto a la inclusión de servicios fraccionados o diferenciales. Esto forma parte de una segunda etapa del proceso de planificación de la red de transporte, y excede a los límites de nuestro análisis. Aun así, se incluyeron en el modelo estas dos variables, con lo cual las mismas podrían tenerse en cuenta en caso de ser necesarias, reforzando de este modo la solvencia del modelo.
- En cuanto a la **validación** del modelo, se observó que el modelo se ajustaba muy bien a lo observado en la realidad y, tras algunos ajustes, se llegó a una representación con una validez sumamente satisfactoria. En particular, esto puede notarse a través de los indicadores del total de pasajeros transportados y del tiempo de espera de los pasajeros: en el primer caso, se obtuvo un valor final de pasajeros transportados equivalente al que se publicó en otro estudio realizado en la ciudad, y las aproximaciones a partir del análisis de campo respaldan también estos valores. En el segundo caso, al trabajar en el modelo con la cantidad de servicios que se brindan hoy en día, se obtienen tiempos de espera similares a los observados en el relevamiento de paradas, lo cual sirve para demostrar las mejoras que se están logrando en el servicio a partir de nuestra planificación.
- Con respecto a las etapas de **implementación y evaluación**, tal como se dijo en los criterios de éxito, no fueron llevadas a cabo en el transcurso de este proyecto, con lo cual no pudo verificarse si las mismas fueron exitosas

o no. Sin embargo, se llegó a un resultado final que facilita en buena medida los procesos de implementación y evaluación aquí mencionados, con lo cual puede suponerse que la probabilidad de éxito en estos campos hubiese sido alta. Sin embargo, no tenemos ningún fundamento real que respalde esta posición.

Finalmente, al hablar del proyecto en general, se puede decir que el mismo fue sumamente exitoso. Tal como se viene diciendo, se pudo reducir el tiempo de análisis a tres meses, sin necesidad de contar con un gran número de personas para realizar el análisis, ni requerir de grandes inversiones de dinero para conseguir la información necesaria. Sí fue necesario, por razones obvias, contar con el apoyo de personal para realizar los relevamientos de campo, pero las nuevas líneas pudieron representarse de manera adecuada a partir del modelo. Es aquí donde se encuentra la principal razón de éxito del proyecto: un proceso que, de realizarse en el campo, requeriría de más de tres meses adicionales de análisis, requirió de menos de un mes de ensayos con un costo mínimo de operación.

6.4: Futuras líneas de investigación

Si bien el proyecto puede considerarse exitoso desde las circunstancias en las que se desarrolló, deja varios campos en los cuales se puede desarrollar aún más la investigación.

En primer lugar, un sector en el que se debería profundizar el análisis sería en el **aspecto económico**, para analizar qué combinación de servicios resultaba ser la óptima para la empresa a cargo de brindar el servicio. En nuestro caso en particular, este beneficio se veía supeditado a las necesidades de los pasajeros, bajo la condición de no esperar más de 15 minutos en la parada.

Por otro lado, sería sumamente interesante extender los **criterios de decisión de los pasajeros** hacia los niveles que no fueron tenidos en cuenta en el modelo de simulación propiamente dicho. En nuestro caso, como ya se explicó, los dos primeros niveles de decisión se analizaron en primera instancia para deducir el número de pasajeros netos a transportar. Luego, éstos fueron incluidos en el modelo bajo su tercer nivel de decisión. Al incluir aspectos propios de las personas, tales como la interacción entre vehículos y peatones, permitiría obtener un modelo mucho más ajustado a la realidad.

Desde el mismo enfoque, y nuevamente ajeno a nuestro caso de estudio en particular, debería poder realizarse el análisis en un caso en donde exista una **competencia real**. Esto fue tenido en cuenta a la hora de armar el modelo, pero luego no se profundizó en el análisis por razones obvias.

Otra línea de investigación que puede requerir de atención es la relación de competencia entre las **distintas líneas** de una misma empresa. Por cómo se realizó este modelo en particular, esta competencia sólo podía considerarse como un factor externo, y no se tenía dominio sobre las mismas. El hecho de poder trabajar con varias líneas en simultáneo, y poder ver la interacción entre las mismas, permitiría una optimización incluso mayor dentro de la red, con un mayor poder de adaptarse ante cambios bruscos en la demanda en regiones particulares de la red diseñada.

Finalmente, se deberían llevar a cabo los últimos procesos dentro del ciclo de modelización, de **implementación y evaluación**. Esto permitiría terminar de validar lo visto hasta este punto. Además, poder contar con esta información permitiría desarrollar nuevas funciones y controles dentro del modelo, para que el mismo sirva como herramienta de soporte en las etapas de planificación táctica y operativa del proyecto.

7. BIBLIOGRAFÍA

7.1: Bibliografía general

- [1] Resnick, M. 2001. **Tortugas, Termitas y Atascos de Tráfico: exploraciones sobre micromundos masivamente paralelos**. Editorial Gedisa. ISBN 8474328349.
- [2] Senge, P. 2010. **La Quinta Disciplina: el arte y la práctica de la organización abierta al aprendizaje**. Editorial Granica. ISBN 9789506414306.
- [3] Sterman, J. 2003. **Business Dynamics: Systems Thinking and Modelling in a Complex World**. Editorial McGraw-Hill. ISBN 9780072389159.

7.2: Documentos técnicos específicos

- [4] Banco Interamericano de Desarrollo. 1999. **Estudio de Transporte Público Integrado de la ciudad**.
- [5] Cuéllar, M. 2008. **Participación del Banco Mundial en el Sector del Transporte Urbano. Seminario internacional: Experiencias, Retos y Desafíos para el Desarrollo del Metro de Bogotá**. Banco Mundial.
- [6] Hurtado Tarazona, A. **Portales de Transmilenio: revitalización de espacios e integración social urbana**. Trabajos de grado CIDER. U de los Andes, Bogotá.
- [7] Izquierdo, L.R. y otros. 2008. **Modelado de Sistemas Complejos mediante Simulación basada en Agentes y mediante Dinámica de Sistemas**. EMPIRIA. Revista de Metodología en Ciencias Sociales. ISSN 11395737.
- [8] Meignan, D. 2007. **Simulation and Evaluation of Urban Bus Networks Using a Multiagent Approach**. Belfort.
- [9] Mesalles, R.P. 2003. **El Rol del Transporte Urbano en el Desarrollo Económico y Social de la Ciudad**. Lima.
- [10] Methorst, R; Damen, M. 1999. **Footsteps in the Snow**. Amsterdam.
- [11] Munizaga, M. 2006. **Comportamiento de usuarios del sistema de transporte**. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- [12] Project for Public Spaces. 2003. **What Makes a Great Place?**
- [13] U.S. Department of Transportation. 2006. **The Transportation Planning Process – Key Issues. A Briefing Book for Transportation Decisionmakers, Officials, and Staff**. Federal Transit Administration, U.S. Department of Transportation. Washington.
- [14] Willumsen, L.G. 2005. **Bus Rapid Transport and Urban Development**. Londres.

- [15] Zobel, R. 2001. **A Personal History of Simulation in the UK and Europe, 1964-2001**. Departamento de Ciencias de la Computación, Universidad de Manchester.

7.3: Otras fuentes de información*

- [16] Santamarina, R. A. **Las Simulaciones como recursos de Aprendizaje**. Learning Review.
<http://www.learningreview.com/formacion-y-desarrollo/innovacion-en-capacitacion-y-desarrollo/casos-de-estudio/1083-las-simulaciones-como-recursos-de-aprendizaje>.
- [17] Wikipedia. **El Origen de las especies**.
http://es.wikipedia.org/wiki/El_origen_de_las_especies.
- [18] Wikipedia. **La Riqueza de las Naciones**.
http://es.wikipedia.org/wiki/La_riqueza_de_las_naciones.
- [19] Wikipedia. **Relación de indeterminación de Heisenberg**.
http://es.wikipedia.org/wiki/Relaci%C3%B3n_de_indeterminaci%C3%B3n_de_Heisenberg.
- [20] Wikipedia. **Teoremas de Incompletitud de Gödel**.
http://es.wikipedia.org/wiki/Teorema_de_G%C3%B6del.
- [21] Wikipedia. **Simulación**.
<http://es.wikipedia.org/wiki/Simulaci%C3%B3n>.
- [22] Wikipedia. **Dinámica de Sistemas**.
http://es.wikipedia.org/wiki/Din%C3%A1mica_de_sistemas.
- [23] Wikipedia. **Simulación por eventos discretos**.
http://es.wikipedia.org/wiki/Simulaci%C3%B3n_por_eventos_discretos.
- [24] Wikipedia. **Modelo basado en agente**.
http://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_basado_en_agente.

*Todas las páginas web aquí mencionadas se encuentran vigentes al día 2 de julio de 2010.

8. ANEXOS

8.1: El Origen de las Especies

“**El origen de las especies** (título original en inglés: *On the Origin of Species*) es un libro de Charles Darwin publicado el 24 de noviembre de 1859, y considerado uno de los trabajos seminales de la historia de la literatura científica y el fundador de la biología evolutiva.

Su título completo de la primera edición fue *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life* (El origen de las especies por medio de la selección natural, o la preservación de las razas favorecidas en la lucha por la vida). En su sexta edición de 1872, su título corto fue modificado a *The Origin of Species*.

En esta obra Charles Darwin (1809-1882) propuso el mecanismo de la selección natural como explicación para el origen de las especies. Haciendo un paralelismo con la selección artificial realizada por el ser humano en plantas o ganado, Darwin creó el concepto de **selección natural**, en el cual la naturaleza selecciona a las poblaciones más aptas para la supervivencia en determinado ambiente y descarta a las menos aptas.

Aunque en las primeras ediciones Darwin no empleó el término «evolution» («evolución»), sí lo haría desde la 5ª, y así aparece en la 6ª de 1876, la última corregida y revisada por él mismo. Por lo demás, en ningún momento centra su explicación en la especie humana.”¹⁷

¹⁷ Wikipedia: El Origen de las especies [17].

8.2: La Riqueza de las Naciones

“Una investigación sobre la naturaleza y causas de la riqueza de las naciones (originalmente en inglés: *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*), o, sencillamente **La riqueza de las naciones**, es la obra más célebre de Adam Smith. Publicada en 1776, es considerada el primer libro moderno de economía.

Smith expone su análisis sobre el origen de la reciente prosperidad de determinados países, como Inglaterra o los Países Bajos. Desarrolla teorías económicas sobre la división del trabajo, el mercado, la moneda, la naturaleza de la riqueza, el «precio de las mercancías en trabajo», los salarios, los beneficios y la acumulación del capital. Examina diferentes sistemas de economía política, en particular el mercantilismo y la fisiocracia y desarrolla también la idea de un orden natural, el «sistema de libertad natural», como resultado del interés individual hacia el interés general en la solución del juego de la libre empresa, de la libre competencia y del libre comercio.

La riqueza de las naciones es hoy una de las obras más importantes de esta disciplina, para Amartya Sen, “el libro más grande jamás escrito sobre la vida económica”. Es el documento fundador de la economía clásica y, sin duda, del liberalismo económico.”¹⁸

¹⁸ Wikipedia: La Riqueza de las Naciones [18].

8.3: Principio de Incertidumbre de Heisenberg

En mecánica cuántica, la *relación de indeterminación de Heisenberg* o *principio de incertidumbre* afirma que no se puede determinar, simultáneamente y con precisión arbitraria, ciertos pares de variables físicas, como son, por ejemplo, la posición y el momento lineal (cantidad de movimiento) de un objeto dado. En otras palabras, cuanto mayor certeza se busca en determinar la posición de una partícula, menos se conoce su cantidad de movimiento lineal y, por tanto, su velocidad. Esto implica que las partículas, en su movimiento, no tienen asociada una trayectoria bien definida. Este principio fue enunciado por Werner Heisenberg en 1927.

Podemos entender mejor este principio si pensamos en lo que sería la medida de la posición y velocidad de un electrón: para realizar la medida (para poder "ver" de algún modo el electrón) es necesario que un fotón de luz choque con el electrón, con lo cual está modificando su posición y velocidad; es decir, por el mismo hecho de realizar la medida, el experimentador modifica los datos de algún modo, introduciendo un error que es imposible de reducir a cero, por muy perfectos que sean nuestros instrumentos.

No obstante hay que recordar que el principio de indeterminación es una limitación sobre el tipo de experimentos realizables, no se refiere a la sensibilidad del instrumento de medida. No debe perderse de vista que la explicación "divulgativa" del párrafo anterior no se puede tomar como explicación del principio de indeterminación.

Este principio supone un cambio básico en la naturaleza de la física, ya que se pasa de un conocimiento absolutamente preciso en teoría (aunque no en el conocimiento basado sólo en probabilidades).

Ha de tenerse muy en cuenta que, como otros muchos resultados de la mecánica cuántica, esto sólo afecta significativamente a la física subatómica. Debido a la pequeñez de la constante de Planck, en el mundo macroscópico la indeterminación cuántica es completamente despreciable, y los resultados de las teorías físicas deterministas, como la teoría de la relatividad de Einstein, siguen teniendo validez.

Las partículas, en mecánica cuántica, no siguen trayectorias definidas. No es posible conocer exactamente el valor de todas las magnitudes físicas que describen el estado de movimiento de la partícula en ningún momento, sino sólo una distribución estadística. Por lo tanto no es posible asignar una trayectoria a una partícula. Sí se puede decir que hay una determinada probabilidad de que la partícula se encuentre en una determinada región del espacio en un momento determinado.

Comúnmente se considera que el carácter probabilístico de la mecánica cuántica invalida el determinismo científico. Sin embargo, existen varias interpretaciones de la Mecánica cuántica y no todas llegan a esta conclusión. Según puntualiza Stephen Hawking, la mecánica cuántica es determinista en sí misma, y es posible que la aparente indeterminación se deba a que realmente no existen posiciones y velocidades de partículas, sino sólo ondas. Los físicos cuánticos intentarían entonces ajustar las ondas a nuestras ideas preconcebidas de posiciones y velocidades. La inadecuación de estos conceptos sería la causa de la aparente impredecibilidad.¹⁹

8.4: Teoremas de incompletitud de Gödel

En lógica matemática, los **teoremas de incompletitud de Gödel** son dos célebres teoremas demostrados por Kurt Gödel en 1930. Simplificando, el primer teorema afirma:

“En cualquier formalización consistente de las matemáticas que sea lo bastante fuerte para definir el concepto de números naturales, se puede construir una afirmación que ni se puede demostrar ni se puede refutar dentro de ese sistema.”

Este teorema es uno de los más famosos fuera de las matemáticas, y uno de los peor comprendidos. Es un teorema en lógica formal, y como tal es fácil malinterpretarlo. Hay multitud de afirmaciones que parecen similares a este primer teorema de incompletitud de Gödel, pero que en realidad no son ciertas. Éstas se comentan en *Malentendidos en torno a los teoremas de Gödel*.

El segundo teorema de la incompletitud de Gödel, que se demuestra formalizando parte de la prueba del primer teorema dentro del propio sistema, afirma:

“Ningún sistema consistente se puede usar para demostrarse a sí mismo.”

Este resultado fue devastador para la aproximación filosófica a las matemáticas conocida como el *programa de formalización Hilbert*. David Hilbert propuso que la consistencia de los sistemas más complejos, tales como el análisis real, se podía probar en términos de sistemas más sencillos. Finalmente, la consistencia de todas las matemáticas se podría reducir a la aritmética básica. El *segundo teorema de la incompletitud de Gödel* demuestra que la aritmética básica no se puede usar para demostrar su propia consistencia, y por lo tanto tampoco puede demostrar la consistencia de nada más fuerte.²⁰

¹⁹ Wikipedia: Relación de indeterminación de Heisenberg [19].

²⁰ Wikipedia: Teoremas de Incompletitud de Gödel [20].

8.5: Simulación

Simulación es la **experimentación** con un **modelo** de una **hipótesis** o un conjunto de hipótesis de trabajo.

Thomas T. Goldsmith Jr. y Estle Ray Mann la definen así: "Simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos períodos".

Una definición más formal formulada por R.E. Shannon es: "La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias -dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos - para el funcionamiento del sistema"²¹

8.5.a: Dinámica de Sistemas

La **Dinámica de Sistemas** es una herramienta para la creación de modelos de simulación aplicados a la toma de decisiones empresariales, ambientales y sociales. La Dinámica de Sistemas es una herramienta de construcción de modelos de simulación radicalmente diferente al de otras técnicas aplicadas el estudio de sistemas socioeconómicos, como la econometría. Las técnicas econométricas, basadas en un enfoque conductista, emplean los datos empíricos como base de los cálculos estadísticos para determinar el sentido y la correlación existente entre los diferentes factores. La evolución del modelo se realiza sobre la base de la evolución pasada de las variables denominadas independientes, y se aplica la estadística para determinar los parámetros del sistema de ecuaciones que las relacionan con las otras denominadas dependientes. Estas técnicas pretenden determinar el comportamiento del sistema sin entrar en el conocimiento de sus mecanismos internos.²²

8.5.b: Simulación por eventos discretos

La simulación por eventos discretos es una técnica informática de modelado dinámico de sistemas. Frente a su homóloga, la simulación de tiempo continuo, esta se caracteriza por un control en la variable del tiempo que permite avanzar a éste a intervalos variables, en función de la planificación de ocurrencia de tales eventos a un tiempo futuro. Un requisito para aplicar esta técnica es que las variables que definen el sistema no cambien su comportamiento durante el intervalo simulado.

²¹ Wikipedia: Simulación [21].

²² Wikipedia: Dinámica de Sistemas [22].

Estos sistemas se caracterizan por mantener un **estado interno global del sistema**, que puede no obstante estar física o lógicamente distribuido, y que cambia parcialmente debido a la ocurrencia de un evento.

El estado del sistema solo cambia mediante la ejecución de eventos, que se almacenan en un contenedor, y uno o varios procesos dedicados a su ejecución avanzan el tiempo de simulación a medida que se van ejecutando y eliminando los eventos pendientes para el valor de tiempo actual.

La ejecución de un evento puede desencadenar la generación de nuevos eventos futuros. Cada uno está marcado por su tiempo, por lo que el orden de generación puede no coincidir con el orden de ejecución.²³

8.5.c: Simulación basada en Agentes

Un **modelo basado en agentes** (MBA) es un tipo de modelo computacional que permite la simulación de acciones e interacciones de **individuos autónomos** dentro de un **entorno**, y permite determinar qué efectos producen en el conjunto del sistema. Combina elementos de teoría de juegos, sistemas complejos, emergencia, sociología computacional, sistemas multi-agente, y programación evolutiva. Los modelos simulan las operaciones simultáneas de entidades múltiples (agentes), en un intento de **recrear y predecir** las acciones de **fenómenos complejos**. Es un proceso de emergencia desde el nivel más elemental (micro) al más elevado (macro). Supuestamente los agentes individuales actúan según lo que perciben como sus intereses propios, tales como reproducción, beneficio económico, o status social, y su conocimiento es limitado. Los agentes MBA pueden experimentar “**aprendizaje**”, **adaptación** y **reproducción**.²⁴

8.6.d: Sistema Complejo

Un Sistema Complejo está compuesto por **varias partes interconectadas** o entrelazadas cuyos vínculos contienen **información adicional** y oculta al observador. Como resultado de las interacciones entre elementos, surgen propiedades nuevas que no pueden explicarse a partir de las propiedades de los elementos aislados. Dichas propiedades se denominan **propiedades emergentes**.

El sistema complicado, en contraposición, también está formado por varias partes pero los enlaces entre éstas no añaden información adicional. Nos basta con saber cómo funciona cada una de ellas para entender el sistema. En un sistema complejo, en cambio, existen variables ocultas cuyo desconocimiento nos impide analizar el sistema con precisión. Así pues, un sistema complejo, posee más información que la que da cada parte independientemente. Para

²³ Wikipedia: Simulación por eventos discretos [23].

²⁴ Wikipedia: modelo basado en agente [24].

describir un sistema complejo hace falta no solo conocer el funcionamiento de las partes sino conocer como se relacionan entre sí.

8.6: Foro CIVITAS

El Foro CIVITAS está abierto a todas las ciudades deseosas de aprender más sobre la utilidad de las medidas individuales que apoyan el transporte urbano limpio, y la mejor manera de combinarlas e integrarlas a gran escala. Las ciudades participantes deben probar su compromiso político y técnico en la introducción de estrategias integradas y ambiciosas en el ámbito del transporte urbano.

Esto significa específicamente que la ciudad tiene la intención de:

- alcanzar un cambio significativo en la distribución de los modos de transporte, hacia modos de transporte sostenible
- seguir un enfoque integrado, combinando en su política tantas categorías de instrumentos y medidas CIVITAS como sea posible.

Cada ciudad debe comprometerse a introducir políticas ambiciosas de transporte urbano sostenible. Este compromiso debe garantizarse políticamente en la Declaración del Foro CIVITAS mediante la firma de un político local que tenga poder ejecutivo (Concejal o Vice-Alcalde).

Una participación activa en el Foro CIVITAS requiere por otra parte que:

- Un representante de su ciudad asista a las reuniones del Foro CIVITAS
- Usted tenga un planteamiento constructivo y proactivo de la distribución de la información relativa a la Iniciativa CIVITAS, a niveles locales y nacionales
- Usted proporcione un documento que brinde información de fondo referente a su ciudad y a su política de transporte. Este documento debe mencionar las categorías de instrumentos y medidas CIVITAS, y especificar la forma en que éstos se aplican y se integran en su ciudad.²⁵

²⁵ www.civitas-iniciative.org página vigente al 29 de junio de 2010.