



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SOFTWARE DE CÁLCULO Y VISUALIZACIÓN DE PERFILES DE CARGA PARA BUSES DE TRANSANTIAGO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL EN
COMPUTACIÓN

RICHARD RODRIGO IBARRA RAMÍREZ

SANTIAGO DE CHILE

MAYO 2012



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SOFTWARE DE CÁLCULO Y
VISUALIZACIÓN DE PERFILES DE CARGA PARA BUSES DE
TRANSANTIAGO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL EN
COMPUTACIÓN

RICHARD RODRIGO IBARRA RAMÍREZ

PROFESOR GUÍA

MARCELA ADRIANA MUNIZAGA MUÑOZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

NANCY VIOLA HITSCHFIELD KAHLER

ROMAIN ROBBES

SANTIAGO DE CHILE

MAYO 2012

Resumen

Transantiago es el nombre del sistema de transporte público de Santiago, Chile, puesto en marcha en Febrero del año 2007. La oferta del sistema está compuesta por una red de servicios de buses y el metro; y cuenta con un único sistema de pago que utiliza la tarjeta de prepago bip!. Todas las transacciones hechas con la tarjeta bip! son guardadas en una gran base de datos. Una semana tiene del orden de 35 millones de transacciones bip!. Además cada bus cuenta con un equipo GPS que informa su posición cada 30 segundos, esto permite conocer la ruta efectiva realizada por cada bus del sistema.

La Universidad de Chile y la Subsecretaría de Transportes acordaron un convenio para analizar la información de las diversas componentes de Transantiago utilizando el desarrollo e implementación de metodologías de procesamiento de datos. Hasta ahora este análisis se ha realizado utilizando mediciones en terreno con un alto costo en recursos humanos o mediante software con metodologías globales que consiguen resultados con gran margen de error. Esto significa altos costos monetarios y baja confiabilidad de la información requerida para la toma de decisiones.

El objetivo del presente trabajo de título es diseñar e implementar un software que permita calcular y visualizar los perfiles de carga de los buses de Transantiago. Un perfil de carga sintetiza información de la cantidad de usuarios que se encuentra arriba de un bus a lo largo de la ruta que recorre. Para ello se cuenta con la información de las subidas de pasajeros de acuerdo al uso de la tarjeta bip! y una estimación de la bajada de esos pasajeros. La estimación de bajada es realizada mediante una metodología diseñada por profesionales del área de Ingeniería en Transportes. Esta metodología se basa en analizar la siguiente transacción realizada por el usuario para así encontrar una posible bajada. Esta estimación es posible de realizar en cerca de un 80 % de las transacciones bip!

El resultado de este trabajo de título ayudará a la toma de decisiones con información precisa y de bajo costo. Esta información permitirá ajustar variables que determinan la oferta de buses para el sistema. Esto permite optimizar los recursos utilizados y ayudar a la descongestión de la ciudad. Es esperable que estas decisiones permitan disminuir los costos del funcionamiento del sistema y así mejorar la calidad de vida de los usuarios.

Agradecimientos

A mi madre por enseñarme que el esfuerzo es la base para cumplir cualquier meta, por ser mi pilar principal y por su amor incondicional.

A mi familia y en especial a mis hermanos por ser mi cable a tierra.

A mi sobrino Javier porque con sus alegrías y llantos me da la energía necesaria para despertar cada día.

A mis amigos de la Universidad, de la pega y de la vida por acompañarme en cada momento de este camino.

Índice general

1. Introducción	10
2. Antecedentes	13
2.1. Zonas y Servicios	13
2.2. Rutas	14
2.3. Paradas	15
2.4. Tipos de vías	17
2.5. Operadores	18
3. Revisión Bibliográfica	19
3.1. Matrices Origen-Destino	19
3.2. Factores de expansión	21
3.3. Perfiles de Carga	23
4. Análisis	27
4.1. Requerimientos	27
4.2. Metodología de cálculo de perfiles de carga	31

5. Diseño e implementación	34
5.1. Arquitectura del software	34
5.2. Bases de datos	36
5.3. Software de cálculo de perfiles de carga	39
5.4. Visualización	41
5.5. Herramientas de apoyo	42
6. Resultados	45
6.1. Perfil de carga por usuarios y paradas	45
6.2. Tasa de ocupación de buses servicio y horario	50
6.3. Flujo de usuarios por paraderos	52
7. Conclusiones	56
Anexos	58

Índice de figuras

1.1. Tarjeta bip!	10
1.2. Validador Tarjeta bip!	11
2.1. División de zonas Transantiago	14
2.2. Red Transantiago	15
2.3. Parada local y troncal	16
2.4. Estación transbordo	16
2.5. Estación de intercambio modal	16
2.6. Vía segregada	17
2.7. Vía exclusiva	17
2.8. Pista sólo buses	17
3.1. Metodología estimación de bajada.	20
3.2. Evolución evasión Transantiago	22
3.3. Función de densidad continua	23
3.4. Función de densidad acumulada continua para subidas y bajadas	24
3.5. Función volumen de pasajeros acumulada continua	25
3.6. Función discreta de densidad de subidas y bajadas	26
3.7. Función discreta de volumen de pasajeros	26

4.1. Casos de uso	28
4.2. Metodología de trabajo	30
4.3. Metodología cálculo de perfil de carga por bus	32
4.4. Metodología cálculo de perfil de carga agrupado por media hora	32
5.1. Arquitectura del software	35
5.2. Ejemplo parámetros	40
5.3. Arquitectura MVC	42
5.4. Herramientas de apoyo	44
6.1. Visualización expedición servicio 506l	46
6.2. Visualización expedición servicio 405l	47
6.3. Visualización servicio 506l entre las 07:00 y 08:00	48
6.4. Visualización escala de colores para servicio 506l	49
6.5. Visualización indicadores por servicio	51
6.6. Visualización Google Maps 06:30-07:30	53
6.7. Visualización Google Maps 07:30-08:30	54
6.8. Visualización Google Maps 18:00 18:30	55
7.1. Velocidad corredor Santa Rosa	57

Índice de Tablas

2.1. Operadores del Transantiago	18
3.1. Matriz origen-destino de viajes para día laboral normal	20
5.1. Tabla paradas de buses	36
5.2. Tabla uso de tarjeta bip!	37
5.3. Tabla posicionamiento	38
5.4. Tabla asignación de servicio	38
5.5. Archivo de parámetros	39

Capítulo 1

Introducción

Hoy en día el transporte público en Santiago se propone como una opción eficiente en términos de uso de energía y del espacio urbano, sin embargo, no es la opción elegida por todas las personas. Las razones para elegir un modo u otro son variadas: comodidad, tiempos de viaje, caminata, tiempos de espera, etc. Actualmente muchas personas son usuarios de transporte público y es importante para el gobierno es que esto se mantenga.

Transantiago es un sistema de transporte público que opera a través de distintas empresas operadoras. Una de las características que distingue este sistema de otros es la forma de pago de los usuarios la cual consiste en el uso de una tarjeta personal RFID¹ llamada tarjeta bip! (Figura 1.1). La tarjeta bip! puede ser cargada con dinero por el usuario en centros de pago proporcionados por Transantiago. Cada vez que el usuario sube a un bus o estación de metro existen dispositivos llamados validadores (Figura 1.2) donde se acerca la tarjeta bip! para realizar la transacción de pago y autorizar el acceso.



Figura 1.1: Tarjeta bip!

Transantiago recibe y almacena los datos generados automáticamente por la operación del sistema. Estos datos consisten principalmente en las transacciones bip! y las posiciones GPS de los buses cada 30 segundos.

¹Identificación por radiofrecuencia



Figura 1.2: Validador Tarjeta bip!

La Universidad de Chile y la Subsecretaría de Transportes realizó un convenio para generar investigación y desarrollo utilizando los datos descritos anteriormente. Este acuerdo consiste en la entrega de datos y horas de especialista de Transantiago, y la investigación y desarrollo por parte de la Universidad. Actualmente se investigan variados temas, tales como: velocidades de los servicios [1], matriz de origen destino [8] y otros.

Dentro del marco de este alianza, durante el año 2011 se dio inicio a un estudio cuyo objetivo es estudiar los perfiles de carga de los buses del Transantiago en base a la información del uso de tarjetas bip! y las estimaciones de las bajadas de los pasajeros. Este trabajo consiste en la investigación y el desarrollo realizados para construir una herramienta capaz de determinar el perfil de carga de los buses de carga de servicio y la posterior visualización de esta información.

El objetivo general de este trabajo de título es diseñar, implementar y validar el software que permita calcular y visualizar los perfiles de carga del sistema de Transantiago.

Los objetivos específicos son :

- Consolidar la información existente del uso de tarjeta bip!, paraderos de buses de Transantiago y zonificaciones de Santiago.
- Diseñar e implementar software que permita el cálculo de perfiles de carga de Transantiago
- Estudiar la bibliografía existente de visualización de sistemas de transportes públicos.
- Implementar las visualizaciones que permitan identificar información clave de los perfiles de carga de los buses del Transantiago de acuerdo a diversas agrupaciones y zonificaciones.

- Generar y validar la documentación del software que permita reutilizar el trabajo para futuras investigaciones y desarrollos.

Una de las principales características que define este Trabajo de Título es su metodología de desarrollo. En este caso se utilizó un modelo de desarrollo iterativo incremental. Cada semana se realizaron reuniones con los expertos de la División Transportes para mostrar los avances, definir nuevos requerimientos o redefinir otros para mejorar calidad de los cálculos o idear nuevas formas de visualización de la información.

Las reuniones de trabajo estuvieron, en general, compuestas por un profesor de la División Transportes, tres representantes de Transantiago y un Ingeniero Civil Computación. Estos profesionales se encargaban de entregar retroalimentación respecto a los desarrollos hechos y velar que la información resultante fuera de utilidad para su posterior análisis de parte de los especialistas de Transantiago.

Cada iteración se compone de la investigación necesaria, desarrollo y posterior aprobación de parte de los expertos. Por cada iteración se desarrolló un prototipo simple que consistió en un pequeño software que realiza todas las operaciones necesarias para calcular los perfiles de carga y genera archivos de salida que luego son cargadas en una base de datos.

La estructura del presente documento es como sigue: en el capítulo 2 se presentan los antecedentes necesarios para entender el funcionamiento de Transantiago, en el capítulo 3 se comenta la bibliografía que se revisó para entender las metodologías asociadas, en el capítulo 4 se detalla el proceso de toma de requisitos y los algoritmos necesarios para el cálculo de perfiles de carga, en el capítulo 5 se presenta el diseño e implementación del software desarrollado y por último en el capítulo 6 se presentan los resultados obtenidos.

Capítulo 2

Antecedentes

En este capítulo se detalla el contexto que rodea a Transantiago y este documento. La sección 2.1 explica la zonificación utilizada en Transantiago y el concepto de servicio o recorrido, en la sección 2.2 se define el concepto de ruta de un servicio, la sección 2.3 detalla los distintos tipos de paradas existentes, en la sección 2.4 se muestran los distintos tipos de vías existentes por donde circulan los buses y por último, en la sección 2.5 se explica el concepto de operador y se nombran los actuales existentes en el sistema.

Transantiago se define como un proyecto que busca mejorar la cobertura del transporte público de Santiago disminuyendo el número de transbordos, bajando los tiempos de espera y aumentando la oferta de recorridos ¹.

Este sistema comenzó a operar en Febrero del año 2007 con una serie de dificultades. Estos problemas se han ido solucionando a lo largo del tiempo y a grandes rasgos se pueden hablar de un sistema regularizado con problemas aislados [4].

2.1. Zonas y Servicios

El sistema está compuesto por servicios de buses y metro. Este sistema se organiza en base a zonas y rutas. La figura 2.1 muestra cómo se distribuyen las distintas zonas de la ciudad de Santiago. Allí también se aprecian los colores identificativos de cada zona y los tipos de servicio existentes.

Los servicios troncales conectan una zona con otra cruzando los ejes importantes de la ciudad. El metro de Santiago también opera como un servicio troncal más de Transantiago. Los troncales se

¹<http://www.transantiago.cl>

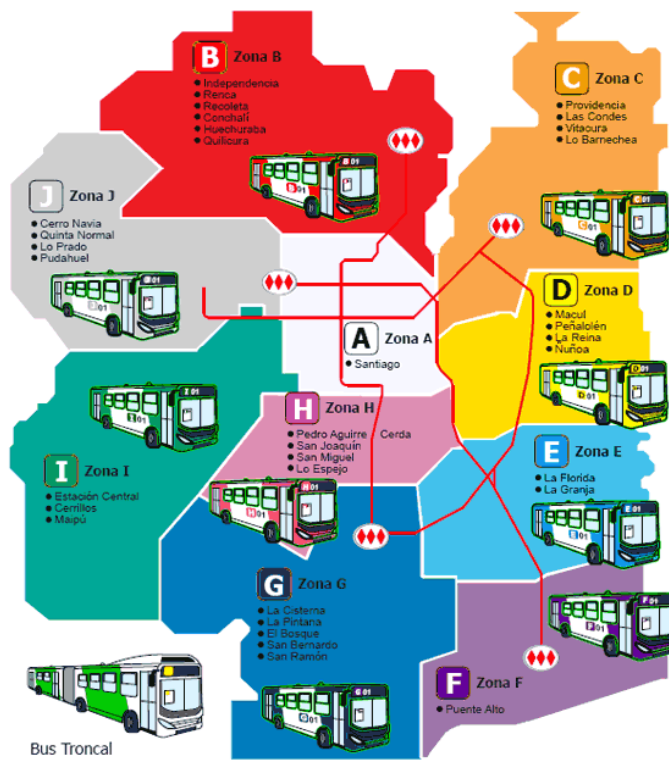


Figura 2.1: División de zonas Transantiago

identifican como buses blancos con franjas verdes en sus costados y tienen un número asignado de tres dígitos (210, 506, etc.).

Los servicios locales son recorridos específicos dentro de cada zona de servicio. La finalidad de estos servicios es acercar a los lugares de accesos de un servicio troncal. Estos servicios se identifican con el color de su zona y su nombre se compone con la letra de la zona donde realiza su servicio y un número de dos dígitos (C01, E12, etc.).

Cada operador de servicio realiza varias expediciones durante el día. Una expedición corresponde al trayecto que realizar un bus a lo largo de la ruta correspondiente al servicio. La cantidad de expediciones al día depende de los planes de operación de Transantiago.

2.2. Rutas

Todos los servicios existentes conforman una compleja red de transporte público que se puede observar globalmente en la figura 2.2. Cada servicio tiene asignada una ruta, la cual puede variar según horario, dado que existen calles como (Portugal o Irrarázaval) que varían el sentido de

tránsito en las horas de mayor congestión, y otras que cambian algunos días debido a la existencia de ferias libres, arreglos en las calles u otros motivos.

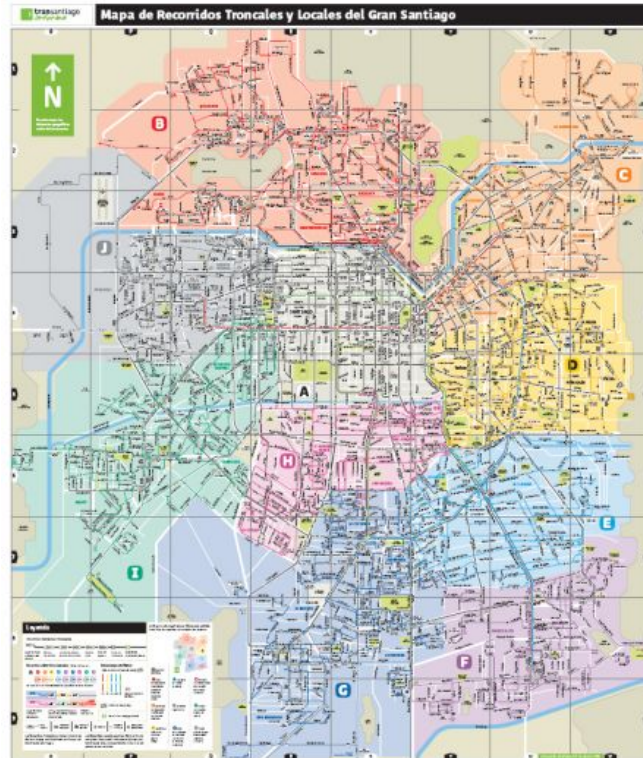


Figura 2.2: Red Transantiago

2.3. Paradas

Las paradas corresponden a los lugares en que los usuarios pueden subir o bajar de los buses del Transantiago. Estos lugares se dividen en tres tipos:

Paradas locales y troncales. Corresponden a puntos autorizados para que los usuarios puedan subir o bajar de los buses. Una misma parada puede ser utilizada indistintamente para servicios troncales o locales. Estas paradas cuentan con una señal con los datos de la parada y los recorridos que se detienen en ese punto. En el caso de las paradas que cuentan también con refugio, existen paneles de información que contienen información relevante para los usuarios. La figura 2.3 muestra una de estas paradas y la señalética utilizada.



Figura 2.3: Parada local y troncal

Estaciones de transbordo. Corresponden a puntos para facilitar y hacer más expedita la transferencia de pasajeros entre los distintos servicios, ya sea entre buses troncales o con el metro. Actualmente en Santiago hay 36 estaciones de transbordo y cada una está compuesta por una o más paradas con la señalética de los servicios disponibles. La figura 2.4 muestra una de estas imágenes y un esquema de cómo están conformadas.

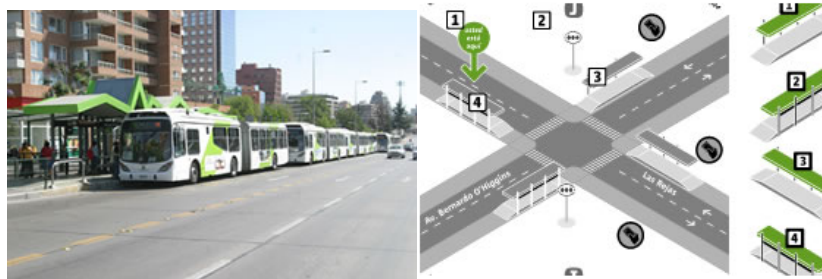


Figura 2.4: Estación transbordo

Estación de intercambio modal. Corresponde a la estación donde es posible hacer transbordo entre los distintos medios de transporte público: buses, metro, taxis, colectivos y otros. Esta estación está ubicada en la comuna de La Cisterna. La figura 2.5 muestra una fotografía de la estación intermodal junto a su esquema.



Figura 2.5: Estación de intercambio modal

2.4. Tipos de vías

Dentro del sistema no todas las vías por donde recorren los buses tienen las mismas características. Esto es de suma importancia porque estas características definen las condiciones de tránsito que deben enfrentar los buses. Existen tres tipos de vías:

Vías segregadas. Estas vías son pistas para el uso de buses que se encuentran físicamente separadas del resto de calle a través de barreras de concreto.



Figura 2.6: Vía segregada

Vías exclusivas. Estas vías son ejes exclusivos para la circulación de buses del Transantiago durante los días hábiles entre las 07:30 y 10:00 horas.



Figura 2.7: Vía exclusiva

Pistas sólo buses. Estas vías corresponden a ejes de la ciudad donde se demarcan pistas en las cuales sólo pueden circular buses del Transantiago.



Figura 2.8: Pista sólo buses

2.5. Operadores

Cada uno de los servicios que participan en el sistema es operado por una empresa concesionaria la cual recibe el nombre de operador.

La tabla 2.1 muestra cada uno de los operadores del sistema actual con el número de buses y servicios con el que participan en el sistema. La distribución de buses no es homogénea dado que depende de la demanda de las zonas en la cual operan.

Operador	Zona / Troncal	Nº Buses	Nº Servicios
A5	Zona G	137	100
Buses Gran Santiago S.A.	Troncal 3	805	141
Buses Gran Santiago S.A.	Zona B	274	114
Buses Metropolitana S.A.		493	44
Comercial Nuevo Milenio S.A.	Zona I	397	95
Comercial Nuevo Milenio S.A.	Zona J	230	130
Express de Santiago Uno S.A.		897	169
Inversiones Alsacia S.A.		615	51
Redbus Urbano S.A.		286	83
STP Santiago S.A.	Zona D	193	55
STP Santiago S.A.	Zona F	274	126
Subus Chile S.A.		792	166
Testing Sonda		4	0
Transantiago		505	243
Trans Araucaria S.A.		164	38
Unión de Transporte S.A.		180	42

Tabla 2.1: Operadores del Transantiago
Fuente <http://www.transantiago.cl>

Capítulo 3

Revisión Bibliográfica

En este capítulo se sintetiza la revisión bibliográfica realizada como parte de este estudio. La sección 3.1 explica el concepto de matrices origen-destino y cómo se construyeron en este caso, la sección 3.2 define el término factor de expansión y justifica por qué es necesario calcularlo, y por último, la sección 3.3 explica lo que es un perfil de carga desde un punto de vista metodológico.

3.1. Matrices Origen-Destino

Una matriz origen-destino sintetiza información de como se distribuyen los viajes entre diversas zonas de una ciudad [5]. En esta matriz, tanto las filas como columnas de la matriz representan las zonas consideradas de la red de transporte, siendo representados en las filas los posibles orígenes y en las columnas los posibles destinos. En cada celda de la matriz se indica la cantidad de usuarios que circulan desde tal origen hasta tal destino. De esta forma, es posible conocer a partir de una representación esquemática todos los flujos existentes entre los nodos de la red de transporte.

La obtención de las matrices origen destino (OD), puede realizarse mediante diferentes técnicas. La más tradicional corresponde a la realización de encuestas a los usuarios de la red de transporte. El problema de estas encuestas es su alto costo económico y humano, es por esto, que la cantidad de usuarios que pueden ser considerados es bastante baja.

La encuesta Origen Destino realizada en Santiago el año 2001 consideró una muestra de 15.000 hogares entrevistando a todas las personas del hogar [10]. Los resultados de esta encuesta se pueden observar en la tabla 3.1. Si bien a este nivel de agregación se obtienen resultados razonables, esta información no es suficiente cuando se requiere que sea desagregada a niveles más pequeños como una intersección de calles o una parada de buses.

Sector Origen	Sector Destino								Total (miles)
	Norte	Occidente	Oriente	Centro	Sur	Sur Oriente	Externo	Sin info	
Norte	1462,7	94,2	112,5	163,4	60,2	53,1	2,6	100,5	2049,2
Occidente	97,3	2212,2	157,7	283,1	115,0	59,2	3,5	124,3	3052,3
Oriente	110,8	151,6	1809,4	244,9	112,6	280,0	5,2	89,8	2804,3
Centro	162,1	286,3	229,9	685,5	190,3	147,8	0,9	34,5	1737,3
Sur	57,3	117,5	119,2	188,6	2453,8	186,6	6,0	137,6	3266,6
Sur-Oriente	55,4	58,0	277,8	147,1	186,4	1891,7	4,7	112,2	2733,3
Externo	3,3	3,7	5,3	1,0	4,8	3,7	0,3	0,5	22,6
Sin info	100,6	126,5	92,0	35,6	138,7	111,2	0,2	13,6	618,4
Total	2049,5	3050,0	2803,8	1749,2	3261,8	2733,3	23,4	613,0	16284,0

Tabla 3.1: Matriz origen-destino de viajes para día laboral normal
Fuente [10]

3.1.11. Estimación de bajada

Para estimar la bajada de los pasajeros se observa la posición de la siguiente transacción bip! asumiendo que es posterior a la bajada y a la siguiente transacción. En el caso de la última transacción del día se asume que el destino es cercano a la primera transacción hecha durante el día, es decir, que el origen y destino son el mismo al inicio y fin del día [9, 2, 8].

La figura 3.1 explica gráficamente la metodología de estimación de paradero de bajada. Esta metodología se puede aplicar sólo cuando ambas transacciones tienen la información de la ubicación geográfica donde ocurrieron.

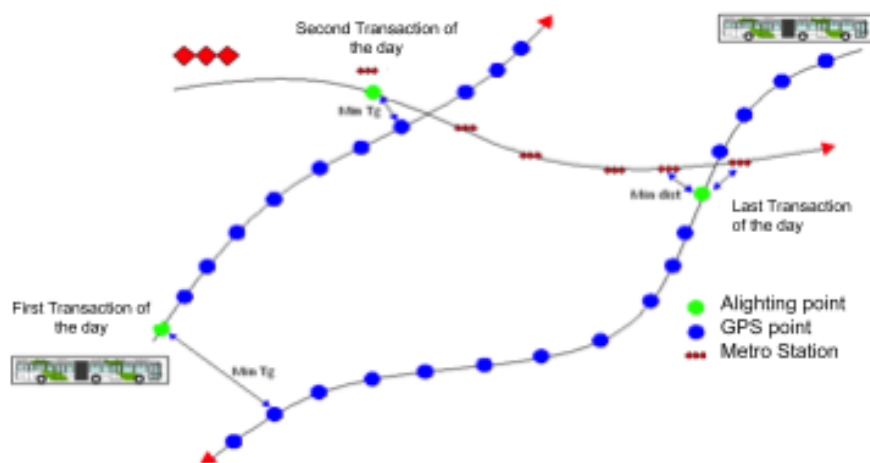


Figura 3.1: Metodología estimación de bajada.
Fuente [8]

3.2. Factores de expansión

Dado que no todos los viajes son identificados con esta metodología, es necesario construir factores de expansión para considerar los viajes no observados [5, 2, 8]. Existen tres casos identificados que requieren tratamiento particular [8]:

1. Viajes asociados a una tarjeta bip! donde el origen es conocido pero no el destino

Corresponde al conjunto de casos donde es posible determinar donde se realizó la transacción bip!: bus, metro o zona paga, sin embargo, no es posible determinar un destino para el usuario. Un ejemplo de esto es aquel usuario que realiza sólo una transacción en el día, dado que no es posible determinar una posible bajada al no contar con transacción en la cual realizó el viaje de vuelta. Un caso particular de este comportamiento son aquellos usuarios que utilizan Transantiago en un sentido y algún otro medio en el sentido contrario de viaje.

Para este caso se asume que la distribución de los viajes con destino desconocido es la misma que aquellos viajes con el mismo origen. El factor expansión para una zona de origen i en el período t queda determinado por la razón entre la cantidad viajes con origen i en el período t y la cantidad de viajes con destino conocido y origen i en el período t . El factor de expansión queda determinado por la siguiente expresión:

$$f_{it} = \frac{\text{Total de viajes con origen en } i, \text{ período } t}{\text{Total de viajes con estimación de bajada con origen en } i, \text{ período } t}$$

2. Viajes asociados a una tarjeta bip! donde no se conoce ni el origen ni el destino

Corresponde al conjunto de casos donde no es posible determinar donde se realizó la transacción bip! ni el destino del viaje. Un ejemplo de esto es cuando se encuentran transacciones en un bus que no tiene un servicio asignado, correspondiendo esto a un error en los datos de entrada. Si bien la cantidad de casos que tiene este problema ha ido disminuyendo a lo largo del tiempo, es un problema que sigue existiendo al día de hoy.

En este caso se asume que estos viajes se distribuyen uniformemente a lo largo de las distintas zonas para un período t . El factor de expansión para un período queda determinado por la razón entre la cantidad total de viajes y el producto entre los viajes con destino y origen conocido y su respectivo factor de expansión, por tanto, tiene la siguiente forma:

$$f_i = \frac{\text{Total de viajes en período } t}{\text{Total de viajes con estimación de bajada en período } t \text{ ponderado por factor expansión}}$$

3. Viajes no detectados: evasión

En este caso se debería realizar un tratamiento similar a los casos anteriores, sin embargo, para ello se debe contar con información adicional y de calidad. La evasión no es homogénea a lo largo de la ciudad, por tanto, hacer falsas suposiciones puede llevar a subestimar la matriz OD o inducir errores al sistema ¹.

Para poder construir factores de expansión consistentes e insesgados se debe contar con datos de evasión de cada servicio. Realizar mecanismos que permitan estimar estos datos tiene un alto costo monetario. Hasta que no se cuente con esta información, no es posible construir factores de expansión que consideren este caso.

A pesar de esto, se han realizado estudios que permiten determinar la evasión total del sistema mediante inspectores distribuidos a lo largo de la ciudad. La figura 3.2 muestra la evolución de la evasión promedio de todo el sistema desde la implementación de Transantiago.

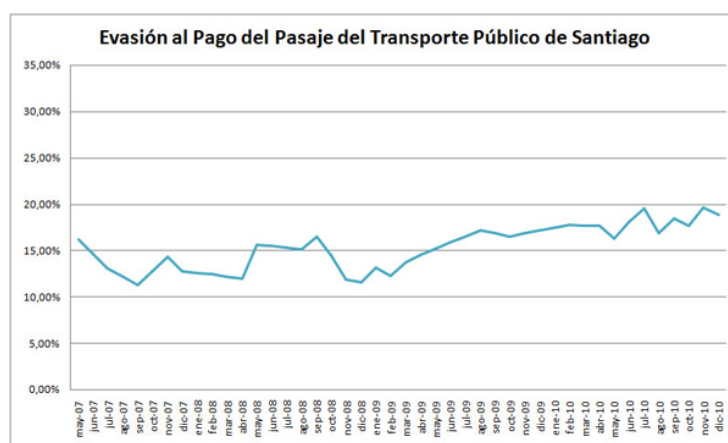


Figura 3.2: Evolución evasión Transantiago
Fuente <http://www.transantiago.cl>

Asimismo, Transantiago ha determinado que es posible identificar 2 tipos de evasores:

- a) Evasores permanentes. Son aquellos usuarios que no validan en ninguna de sus etapas. Estos usuarios son aquellos que provocan un mayor daño económico al sistema, dado que no aportan a los recursos reunidos por concepto de pago por el uso del sistema de transporte público.
- b) Evasores casuales. Son aquellos usuarios que por alguna razón no validan en alguna de sus etapas. Un ejemplo de estos usuarios, podría ser aquel que no cuenta con saldo suficiente para pagar en la primera etapa (posiblemente un bus alimentador), pero

¹<http://www.coordinaciontransantiago.cl>

puede cargar su tarjeta bip! una vez que se acerca a un lugar donde le sea posible, validando en su segunda etapa de viaje.

La evasión por si solo es un tema complejo de estudiar. Sin embargo, existen campañas que apuntan a minimizar su práctica mediante la educación de los usuarios del sistema.

3.3. Perfiles de Carga

El diseño de un servicio de transporte público debe considerar la demanda a lo largo de las rutas de cada servicio así como el nivel de servicio que se quiera otorgar [13].

La demanda de un servicio puede expresarse como el flujo de pasajeros (pasajeros por unidad de tiempo) o volumen de pasajeros (pasajeros por bus). Ambos conceptos representan el número de pasajeros que viajan desde un punto hacia una dirección por unidad de tiempo.

Los viajes de los pasajeros en una ruta pueden modelarse teóricamente como sigue. Primero, si se asume que los pasajeros pueden entrar o salir de un bus en cualquier punto de su ruta, la cantidad de pasajeros que abordan y descienden de un bus se puede como una función de densidad continua, usando generalmente la notación $b(s)$ para las subidas y $a(s)$ para las bajadas, donde s representa la distancia de la ruta. Ambas funciones tienen unidad de cantidad de personas por distancia o cantidad de personas por unidad de tiempo.

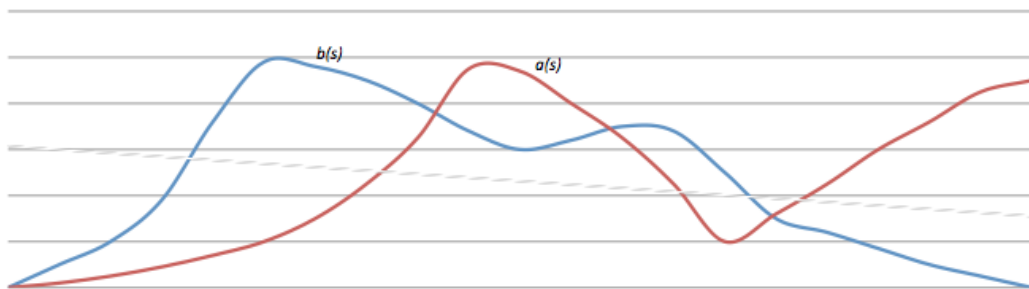


Figura 3.3: Función de densidad continua
Fuente. Elaboración propia

Del mismo modo, es posible definir las funciones $B(s)$ y $A(s)$ que representan las densidades acumuladas de subidas y bajadas respectivamente, como siguen:

$$B(s) = \int_0^s b(s)ds$$

$$A(s) = \int_0^s a(s)ds$$

La Figura 3.4 muestra cómo se vería una trayectoria teórica para un bus.

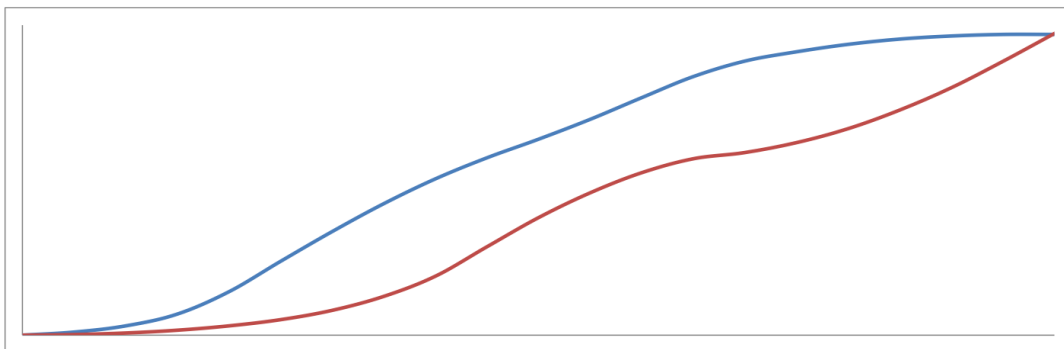


Figura 3.4: Función de densidad acumulada continua para subidas y bajadas
Fuente. Elaboración propia

Usando las definiciones anteriores el volumen de pasajeros a largo de la ruta queda definido de la siguiente forma:

$$P(s) = \int_0^s b(s)ds - \int_0^s a(s)ds = B(s) - A(s)$$

La Figura 3.5 muestra un volumen de pasajeros teórico.

Los puntos máximos y mínimos de la función $P(s)$ ocurren cuando:

$$\frac{dP(s)}{ds} = 0 \Rightarrow b(s) = a(s)$$

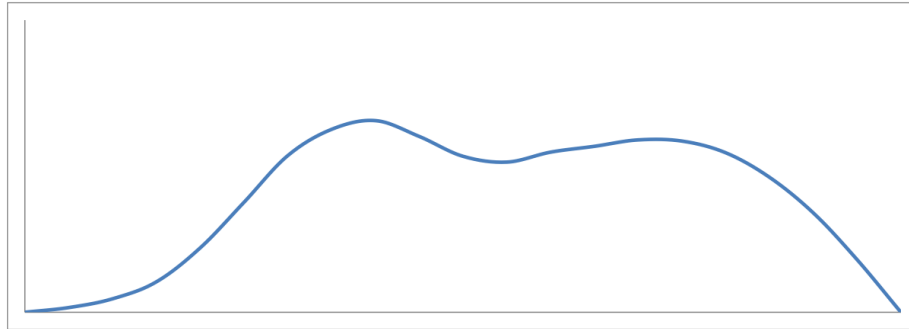


Figura 3.5: Función volumen de pasajeros acumulada continua
Fuente. Elaboración propia

Es decir, los puntos máximos y mínimos ocurren cuando las funciones de densidad de subida y bajada se intersectan. Si existe más de un punto que cumpla esta condición como muestra la Figura 3.5 , todos estos valores deben ser comparados para encontrar el punto de carga máxima de la ruta: $\max(P)$. Este punto es de importancia crítica al momento de considerar la operación y programación de un sistema de transporte.

Cuando se quiere pasar de este modelo teórico a la práctica lo primero que se debe considerar es que, en la mayoría de los casos, los pasajeros sólo pueden abordar y descender de los buses en ciertos puntos, tales como paraderos, estaciones de transbordo y otros, es decir, una cantidad finita de puntos a lo largo de la ruta. Con esto en mente, la demanda de pasajeros debe ser calculada para un conjunto de puntos existentes y que deben ser conocidos. Análogamente al caso teórico, podemos definir el volumen de pasajeros para alguna sección k de la ruta como:

$$P_k = B_k - A_k = \sum_{i=1}^k b_i - \sum_{i=1}^k a_i$$

La Figura 3.6 muestra un ejemplo de una distribución discreta de subidas y bajadas a lo largo de una ruta y la figura 3.7 el respectivo perfil de carga.

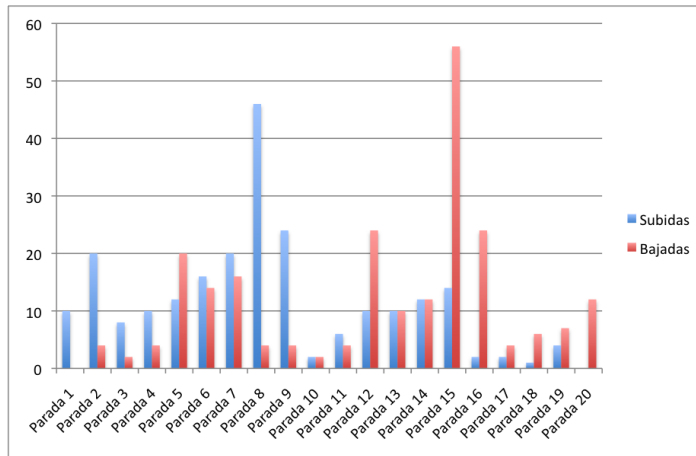


Figura 3.6: Función discreta de densidad de subidas y bajadas
Fuente. Elaboración propia

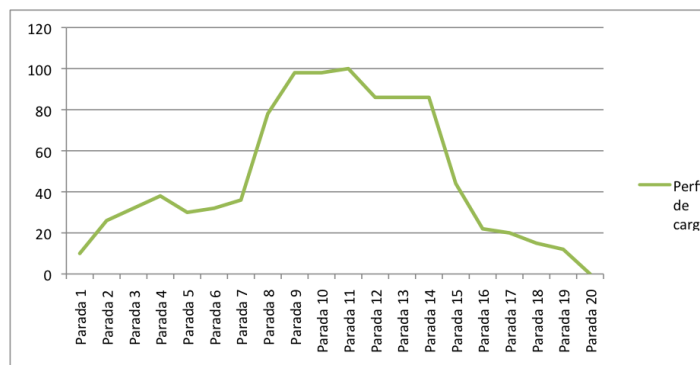


Figura 3.7: Función discreta de volumen de pasajeros
Fuente. Elaboración propia

Al igual que en el caso anterior teórico, es posible encontrar el punto máximo de carga de la línea P_{max} donde la cantidad de pasajeros es la máxima para la ruta. En este caso el punto corresponde a la parada 11.

Capítulo 4

Análisis

En este capítulo se analizan los requerimientos necesarios del software a realizar y los algoritmos necesarios de diseñar.

4.1. Requerimientos

Las reuniones con el equipo de expertos permitió definir los requerimientos necesarios para el software de cálculo de perfiles de carga. El detalle de los requerimientos que se determinaron se encuentra en los Anexos.

De acuerdo a los requerimientos obtenidos de las reuniones con el conjuntos de expertos se determinaron que se necesitaba implementar las siguientes funcionalidades:

1. Obtención de base de datos de perfiles de carga
2. Visualización de perfil de carga de una expedición
3. Visualización de perfil de carga promedio para un servicio en algún período
4. Visualización de perfil de carga promedio a lo largo del día
5. Visualización de perfil de carga usando algún sistema de geolocalización

Cabe destacar que el total de los requerimientos fue cumplido. El detalle de los resultados obtenidos de puede apreciar en el capítulo 6.

Los usuarios del sistema son los expertos y el personal técnico de Transantiago y de la Universidad de Chile, los primeros sólo interactúan con los datos mediante las visualizaciones que se determinaron necesarias, los últimos usan todas las funcionalidades del sistema. La figura 4.1 resume las interacciones en el sistema mediante un diagrama de casos de uso.

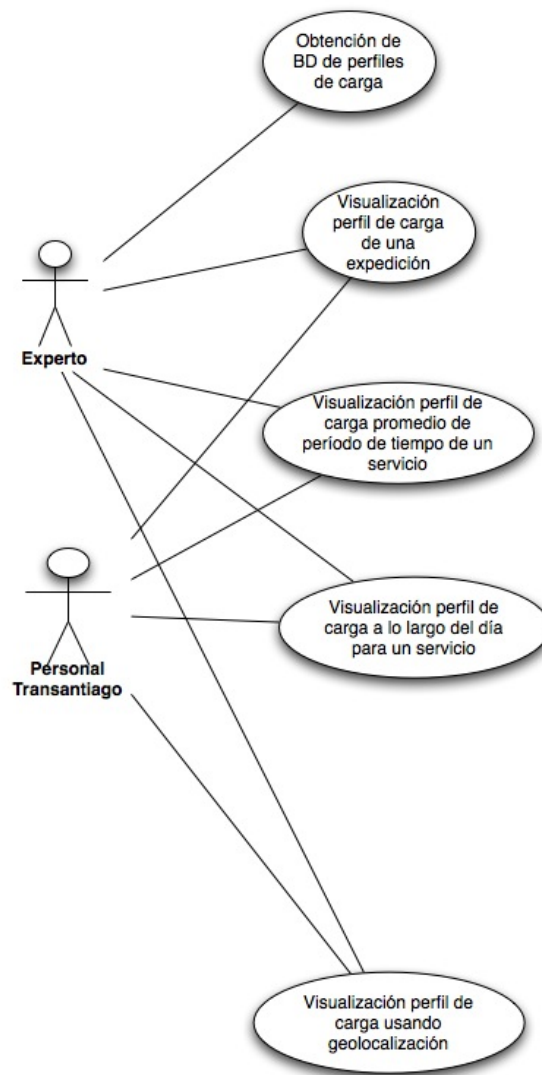


Figura 4.1: Casos de uso

Los atributos de calidad que se determinaron necesarios fueron los siguientes:

1. Modular. De manera que se pueda cambiar alguna de las componentes del sistema sin afectarlo en su totalidad.

2. Extensible. De manera que permita integrar nuevas visualizaciones o nuevas formas de calcular perfiles de carga de forma sencilla.
3. Uso de herramientas gratuitas. De manera que permita agilizar la implementación del software en las oficinas de Transantiago.
4. Portabilidad de la Visualización entre diversas plataformas y browsers. Para permitir que las visualizaciones sean visibles desde diversos sistemas operativos o browsers.
5. Usabilidad. Para facilitar su uso de parte los expertos y personal técnico.

En términos globales es posible dividir el trabajo en 3 etapas. La primera constituida por la validación de datos iniciales necesarios para los cálculos; la segunda compuesta por el proceso de los datos mediante el software que calcula los perfiles de carga y la información adicional necesaria; y por último, la tercera etapa que consiste en la visualización de esta información de manera facilitar la lectura e interpretación de la información. La validación de los datos iniciales corresponden a:

- Relación entre los datos de las expediciones de los buses y a que existan transacciones asociadas al bus en ese período.
- Secuencia de paraderos completa

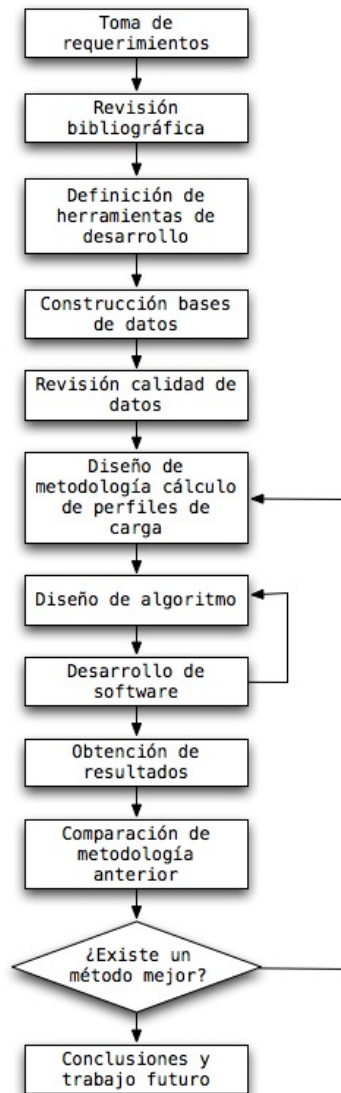


Figura 4.2: Metodología de trabajo

La Figura 4.2, describe las etapas que componen la metodología de trabajo en este Trabajo de Título. La etapa inicial compuesta por la toma de requisitos, revisión bibliográfica, definición de herramientas que se utilizaron, la validación de los datos provistos de manera de facilitar su posterior proceso. La etapa media en donde se desarrolló la metodología con que se calculan los perfiles de carga, y por último la etapa final donde se analiza esta información y se ve cómo se puede mejorar a futuro.

4.2. Metodología de cálculo de perfiles de carga

En esta sección se detalla la metodología usada para calcular los perfiles de carga.

Cada bus de Transantiago realiza periódicamente expediciones de acuerdo a sus programas de operaciones. Cada expedición genera subidas y bajadas a lo largo de la ruta asignada al servicio realizado. Generalmente estas subidas y bajadas están asociadas a un paradero de la ruta. Cada subida y bajada debe ser multiplicada por el factor de expansión de esa transacción, es decir, la carga que representa ese usuario dentro del sistema de transporte público.

Del conjunto de transacciones bip! asociadas a una expedición, se debe filtrar aquellas que no tienen estimación de bajada. Esto es necesario dado que el perfil de carga debe ser nulo al final de la ruta, dado que no existen pasajeros sobre el bus una vez que éste termina de realizar una expedición. Es necesario agregar que aquellas transacciones sin estimaciones de bajada son consideradas en los factores de expansión, por tanto, no representan una subvaloración de los usuarios que utilizaron el bus.

El conjunto de transacciones bip! resultante de este filtro, es agrupado de acuerdo al paradero de subida y bajada de los usuarios. Con esto definimos la función (expandida) de densidad continua de subidas (\hat{a}_i) y bajadas (\hat{b}_i) como sigue:

$$\hat{a}_i = \sum_{j \in T_a(i)} f_j \quad 0 \leq i < |S|$$

$$\hat{b}_i = \sum_{j \in T_b(i)} f_j \quad 0 \leq i < |S|$$

El conjunto S representa los paraderos para un servicio. La función $T_a(i)$ representa aquellas transacciones de la expedición analizada y que tiene subida en el paradero i de la ruta, similarmente la función $T_b(i)$ representa aquellas transacciones que tienen bajada estimada en el paradero i . El valor f_j representa el factor de expansión de la transacción j .

Con la función de densidad es posible calcular el perfil de carga de la expedición. El perfil es definido 0 al comienzo de la ruta, el bus parte vacío, y por definición su valor será 0 también al final de la ruta. Con esto el perfil a lo largo de la ruta queda definido como sigue:

$$L_i = \left\{ \begin{array}{l} i = 0 \\ i > 0 \end{array} \begin{array}{l} 0 \\ \sum_{0 < j < i} \hat{a}_j - \hat{b}_j = L_{i-1} + \hat{a}_i - \hat{b}_i \end{array} \right\}$$

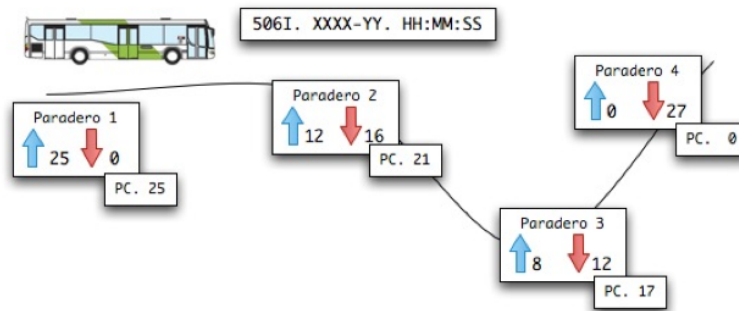


Figura 4.3: Metodología cálculo de perfil de carga por bus

En la figura 4.3, se explica gráficamente cómo se calcula el servicio para una expedición.

Al analizar obtenidos de esta forma se observó que los perfiles para algunos servicios eran en los puntos de mayor carga era mucho más alto de lo esperado (detalle en 6.1). Esto tiene sentido dado que los factores de expansión sólo tienen sentido al ser agregado en períodos de tiempo de al menos media hora. Esto llevó a cambiar la metodología de cálculo de perfiles de carga, si bien el proceso inicial es el mismo, el cambio es que se debe agrupar en la menos media hora considerando un promedio entre las distintas expediciones realizadas durante el período. Esto se puede apreciar gráficamente en 4.4.

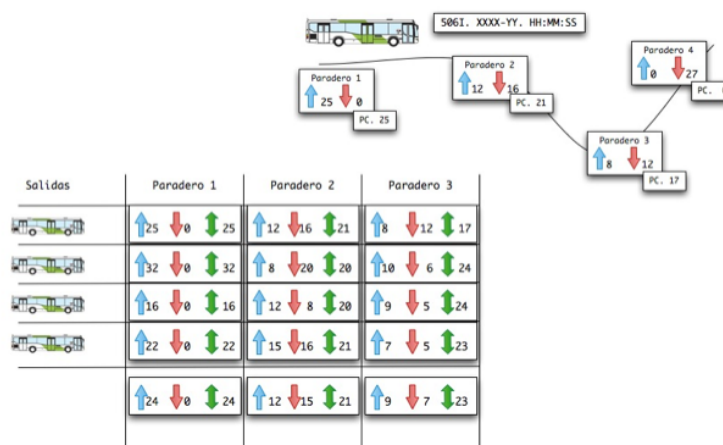


Figura 4.4: Metodología cálculo de perfil de carga agrupado por media hora

Es importante destacar que experimentalmente se detectaron dos situaciones anómalas. La primera corresponde a que se detectaron casos donde se producen subidas en paraderos que no

corresponden a la secuencia de paraderos del servicio; esto puede deberse a desvíos que realizan los servicios por problemas viales o alguna otra razón. La segunda corresponde a casos donde la estimación de bajada da como resultado un lugar que no es un paradero o que es un paradero pero no corresponde a uno de la ruta.

Para el primer caso es posible reasignar estas bajadas al paradero más cercano de la ruta de un servicio. El segundo caso depende exclusivamente de la calidad de los datos provistos por Transantiago, las gestiones han permitido disminuir estos casos pero no eliminarlos por completo. Ninguno de estos casos son considerados en esta metodología, por tanto, la carga se encuentra subvalorada en este sentido.

El software se validó utilizando datos de los meses junio 2010 y abril 2011. Se calcularon los perfiles de carga para cerca de 500 servicios existentes en cada período. Este proceso fue realizado en un computador iMac con procesador Intel i5 a 2.7Ghz y 4Gb de memoria RAM. El proceso tomó cerca de 45 minutos por cada período. Es de conocimiento que dada la forma del algoritmo es altamente paralelizable, sin embargo, no se realizaron pruebas al respecto para mejorar el rendimiento. Esto no corresponde a un problema de rendimiento importante del software dado que los perfiles de carga pretenden ser calculados una vez y no es necesario realizarlo una vez hecho el proceso.

Capítulo 5

Diseño e implementación

En este capítulo se detalla el proceso de toma de requerimientos y el diseño e implementación del software de cálculo de perfiles de carga. Este capítulo se divide en cinco secciones:

1. Arquitectura de software
2. Bases de datos
3. Software de cálculo de perfiles de carga
4. Visualización
5. Herramientas de apoyo

5.1. Arquitectura del software

La figura 5.1 muestra la arquitectura de este software.

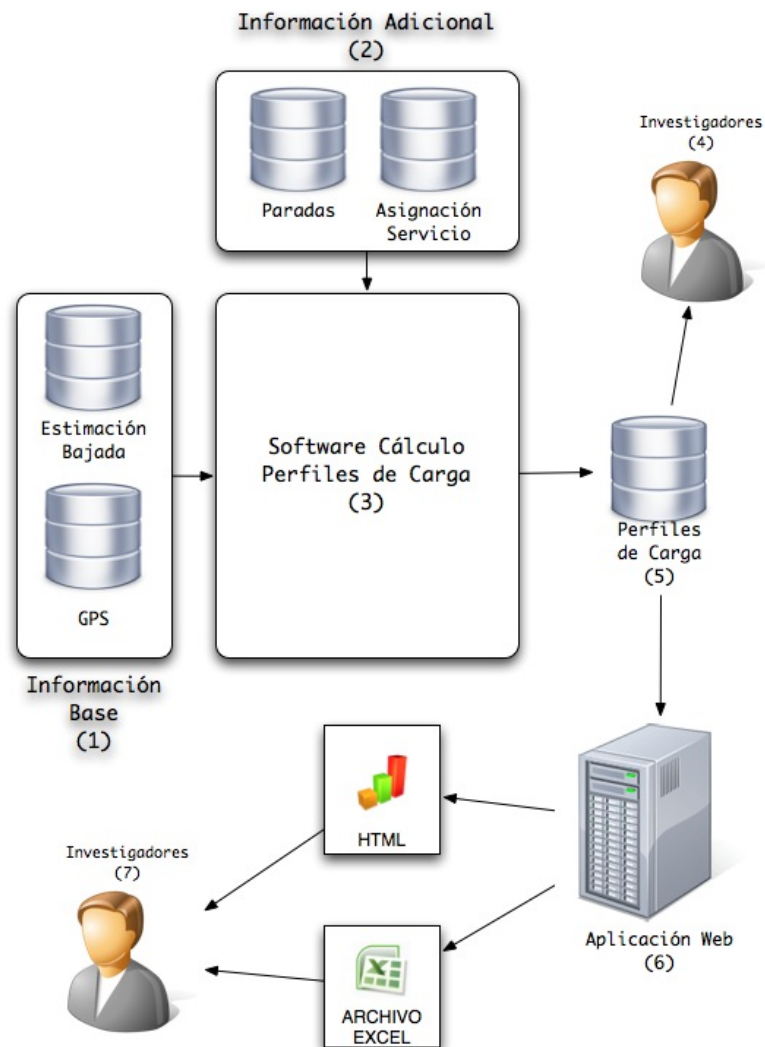


Figura 5.1: Arquitectura del software

Para el cálculo de perfiles de carga son necesarias las tablas de estimación de bajada y posicionamiento (1) además de información adicional tales como las paradas de los servicios y la asignación de los buses a cada servicio (2).

El software de cálculo de perfiles de carga (3) se encarga de generar una nueva base de datos con esta información. En este nivel ya es posible que investigadores usen esta información sin ningún tipo de procesamiento adicional (4), es decir, directamente en la base de datos. Usando la base de datos de perfiles de carga (5) la aplicación web se encarga de procesar esta información de manera de generar diversas visualizaciones o reportes (6). Estos reportes y/o visualizaciones pueden usados por investigadores o otros usuarios (7).

5.2. Bases de datos

A continuación se describen las tablas que son necesarias para el cálculo de perfiles de carga. Estas tablas son las siguientes:

1. Paraderos de buses
2. Transacciones bip!
3. Posicionamiento de buses
4. Asignación de servicios

Paraderos de buses

La tabla de paraderos contiene las paradas de los buses del Transantiago de acuerdo al plan de operación correspondiente. El plan de operación corresponde a los recorridos existentes y sus respectivas paradas en un corte temporal. Este plan de operación ha cambiado a lo largo de tiempo en base a los ajustes que se deben realizar sobre el Transantiago para obtener un mejor funcionamiento. A la fecha de hoy han existido cerca de 100 distintos planes de operaciones desde la puesta en marcha en Febrero del 2007.

Para el período de una semana de Junio 2010 esta tabla cuenta con el orden de 16.000 registros correspondiente a aproximadamente 700 servicios-sentidos. Estos servicios están compuestos tanto por servicios troncales como alimentadores distribuidos en todo Santiago.

La tabla 5.1 muestra las columnas relevantes de esta tabla.

Columna(s)	Descripción
servicio	Código del servicio que realiza el bus
correlativo	Correlativo de la parada
paradero	Identificador único de la parada
nombre	Nombre de la parada
x, y	Ubicación de la parada

Tabla 5.1: Tabla paradas de buses

Durante el desarrollo del software fue posible notar errores en los datos de entrada. Uno de ellos es que existen paradas sin posición geográfica asignada, esto impide que se pueda realizar estimaciones de bajada sobre estas paradas. También se encontraron paradas muy cercanas entre sí, lo cual se trata probablemente de un error. Estos errores en los datos de entrada han ido disminuyendo a lo largo del tiempo gracias a las gestiones realizadas por el equipo de Transantiago.

Transacciones bip!

La tabla de transacciones bip! contiene el uso de cada una de las tarjetas bip! con su respectiva parada de subida y estimación de parada de bajada.

Para el período de una semana de Junio 2010 esta tabla cuenta con aproximadamente 35 millones de registros. Este número corresponde a la cantidad de transacciones bip! realizadas en una semana en Transantiago. Dada la magnitud de los registros a consultar, fue necesario construir índices adecuados para realizar las consultas necesarias. El detalle de los índices creados se encuentra en los Anexos.

La tabla 5.2 muestra las columnas relevantes de esta tabla.

Columna(s)	Descripción
tiempo	Instante en que fue realizada la transacción
id	Identificador de la tarjeta bip!
pago	Cobro de la transacción
ntt	Correlativo de transacción por tarjeta
contrato_num	Tipo de contrato (escolar, adulto, otros)
x, y	Ubicación donde se realizó la transacción
sitio	Lugar donde se realizó la transacción (bus, metro, zona paga)
capacidad	Capacidad del bus
x, y_bajada	Ubicación estimada de bajada
sitio_bajada	Id paradero de bajada estimado

Tabla 5.2: Tabla uso de tarjeta bip!

Posicionamiento

La tabla de posicionamiento contiene la información de los GPS de los buses que hicieron algún recorrido durante el corte temporal. Esta información es obtenida de los dispositivos con que está equipado cada uno de los buses del sistema. Cada bus de Transantiago emite pulsos GPS cada 30 segundos cuando se encuentra en movimiento y cada 5 minutos cuando se encuentra detenido. Empíricamente se ha comprobado que la precisión de los dispositivos GPS es la necesaria como para realizar el software descrito en este Trabajo de Título e investigaciones anteriores.

Para el período de una semana de Junio 2010 esta tabla cuenta con aproximadamente 70 millones de registros.

La tabla 5.3 muestra las columnas relevantes de esta tabla.

Columna(s)	Descripción
tiempo	Instante en que fue emitido el pulso GPS
patente	Patente del bus
latitud, longitud	Lugar donde se fue emitido el pulso GPS

Tabla 5.3: Tabla posicionamiento

El posicionamiento de los buses es necesario para saber en qué momento estuvo un bus detenido en cada paradero. Con esta información es posible saber el perfil de carga efectivo en cada posición geográfica.

Asignación de servicio

Esta tabla contiene la información sobre el servicio que está realizando cada uno de los buses en cierto período de tiempo. Esto es necesario dado que un operador puede decidir ocupar sus buses en varios servicios de acuerdo a sus necesidades, por tanto, un bus puede realizar más de un servicio en períodos de tiempo distintos.

Para el período de una semana de Junio 2010 esta tabla cuenta con aproximadamente 600 mil registros. Este número representa la cantidad de expediciones que se hacen en una semana promedio para la operación del Transantiago.

La tabla 5.4 muestra las columnas relevantes de esta tabla.

Columna(s)	Descripción
tiempo inicio, fin	Instante en que inicia / finaliza el servicio
servicio	Servicio realizado
patente	Patente del bus que realiza el servicio
capacidad	Capacidad del bus que realiza el servicio

Tabla 5.4: Tabla asignación de servicio

Durante la implementación del software se encontraron dos problemas en la tabla de asignación de servicio:

1. Falsos positivos. Corresponden a asignaciones de servicio que indican que un bus realiza cierto recorrido pero el conjunto de pulsos GPS indica que realizó efectivamente otro. Esto supone un error de parte del operador que ingresó los datos, por algún desvío en la ruta o por otras razones de logística (por ejemplo, el terminal de buses queda lejos de la última parada del servicio).

2. Falsos negativos. Corresponden a buses que no tienen asignado un servicio pero efectivamente lo realizaron. Esto supone un error en el dispositivo GPS que impide saber qué recorrido realizó un bus.

Ambos problemas son conocidos el día de hoy por Transantiago. Esto llevó a generar iniciativas para implementar las mejoras correspondiente en el sistema para minimizar el error. En el último corte temporal estudiado, Abril 2011, el error en la asignación de servicio es cercano al 3%.

5.3. Software de cálculo de perfiles de carga

En esta sección se describirá el software de cálculo de perfiles de carga.

Al usar como entrada la información descrita en la sección 5.2 es posible calcular los perfiles de carga según la metodología definida en la sección 4.2.

Este software parte por leer una serie de parámetros para determinar qué período será estudiado. Estos parámetros son leídos desde un archivo en formato JSON¹. Este formato permite representar objetos de forma simple y ligera. Se escogió este formato ya que puede modificar rápidamente desde cualquier editor de texto. Otra razón a favor de este formato es que existen un sinfín de librerías que permite leer o modificar su contenido desde diversos lenguajes de programación.

Este archivo de parámetros se describe en la tabla 5.5. Un ejemplo de archivo de configuración se puede apreciar en la figura 5.2.

Parámetro	Significado
corte	Período a analizar, generalmente una semana.
bips	Tabla donde se encuentra las transacciones bips y estimación de bajada
posicion	Tabla donde se encuentra los pulsos GPS de los buses
asignacion servicio	Tabla donde se encuentra la asignación de servicio para el período
paradas	Tabla donde se encuentran las paradas de los servicios
laboral	Valor booleano que indica si se debe usar toda la semana o solo laborales
troncales	Valor booleano que indica si se deben considerar servicios troncales
alimentadores	Valor booleano que indica si se deben considerar servicios alimentadores

Tabla 5.5: Archivo de parámetros

¹<http://en.wikipedia.org/wiki/JSON>

```

param_jun2010.json
corte: junio 2010
bips: tb8_jun_2010
posicion: pos3_jun_2010
asignacion servicio: as_jun_2010
paradas: par2_ser13_po
laboral: 0
troncales: 1
alimentadores: 1

```

Figura 5.2: Ejemplo parámetros

Una vez seleccionado el período a estudiar se procede a analizar cuáles son los servicios existentes. Esto es posible de realizar fácilmente mediante la tabla de asignación de servicios. Una vez obtenido el listado de servicios existentes se procede a obtener todas las expediciones realizadas para el período a estudiar. Acá es importante considerar que se podría querer analizar toda la semana o sólo la semana laboral. Se debe además obtener el listado de paraderos de este servicio.

Por cada expedición es necesario obtener todas las transacciones bip! asociadas. Por cada transacción se obtiene un paradero de subida y su estimación de paradero de bajada. Si ambos existen significa que es posible usar ese registro. Con el identificador del paradero de subida y bajada se procede a buscar en el listado de paraderos del servicio. Si el resultado de esta búsqueda es nulo, indica que el paradero no corresponde a la ruta por tanto, no se debe considerar en el cálculo del perfil de carga.

Una vez realizado este proceso para cada transacción bip! se procede a guardar en disco duro el resultado. Actualmente esta persistencia se realiza mediante un archivo separado por comas, CSV². Este archivo CSV permite ser cargado como una planilla de cálculo o una base de datos. Ambos casos fueron usados: la planilla de cálculos usada por los investigadores de la División de Transportes, y la base de datos para las visualizaciones que permiten sintetizar la información.

A continuación se presenta el algoritmo que resume el proceso de cálculo del perfil de carga.

```

services = find_services() // encontrar servicios válidos
for service in services: //
    stops = stops_for_service(service) // encontrar paradas del servicio
    trips = find_trips(service) // encontrar expediciones del servicio
    for trip in trips: //
        bips = bips_for_trip(trip) // encontrar bips de esta expedicion
        load = {} // inic. carga
        for bip in bips: //
            aboard = stops.index_for_stop(bip.stop_aborad) // indice de parada de subida

```

²<http://en.wikipedia.org/wiki/CSV>


```

    align = stops.index_for_stop(bip.stop_alight) // indica de parada de bajada
    if aboard > 0 AND align > 0:                // si ambas existen
        load[aboard] += bip.expansion_factor    // sumar al subir
        load[align] -= bip.expansion_factor     // restar al bajar
        save(load)                             // grabar perfil de carga
    endfor
endfor
endfor
endfor

```

A simple vista es posible determinar que el orden del algoritmo será $O(|servicios|*|expediciones|*|bips|)$

5.4. Visualización

Parte de este trabajo de título corresponde a diseñar e implementar el software que permita obtener visualizaciones adecuadas de esta información. A grandes rasgos se identificaron las siguientes visualizaciones necesarias:

1. Perfil de carga por servicio y paradas

Esta visualización corresponde al nivel más desagregado de información disponible. Dada una expedición se procede a buscar el perfil de carga a lo largo de la ruta de un servicio. Esto corresponde a obtener la función continua de densidad de la carga. El primer nivel de agregación que aparece en forma inmediata corresponde a agrupar un conjunto de buses por período de tiempo. El tiempo de cálculo de esta visualización dependerá de la cantidad de paraderos del servicio.

2. Tasa de ocupación de buses servicio y horario

Esta visualización pretende indicar en forma gráfica cuáles son los servicios que presentan problemas de carga durante toda la ruta para algún período horario. Si un servicio presenta un mal comportamiento durante todo el día posiblemente se deba mejorar su oferta.

3. Flujo de usuarios por paraderos u otra zonificación

Esta visualización permite determinar geográficamente cuáles son lugares de Santiago donde con mayor o mejor servicio.

Este módulo del software fue realizado usando una arquitectura MVC³. En esta arquitectura se pretende separar la capa de presentación del acceso a la base de datos y las operaciones hechas

³http://en.wikipedia.org/wiki/Model_view_controller

sobre ella. Esta arquitectura se detalla en la figura 5.3. Por un lado el controlador usando el modelo se encarga de procesar la información requerida para las visualizaciones entregandola en una formato estándar, JSON. Este archivo es procesado por la vista para mostrar los gráficos correspondientes. El proceso para mostrar un gráfico usando Protovis se detalla en los Anexos.

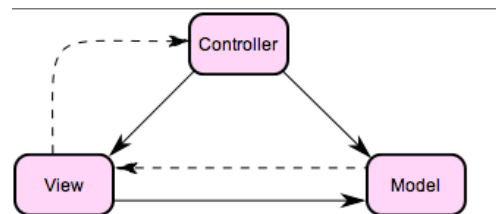


Figura 5.3: Arquitectura MVC

En el capítulo 6 se muestra el resultados de estas visualizaciones.

5.5. Herramientas de apoyo

Como sistema operativo de desarrollo se usó Linux Ubuntu 9.04 dado que posee licencia gratuita y una variedad de herramientas de desarrollo, además de eso utilizó Mac OSX Leopard para el desarrollo dado que es la máquina con que se contaba para realizar este Trabajo de Título.

El lenguaje de programación utilizado para el desarrollo del software fue Java [14]; este lenguaje de gran versatilidad permite la portabilidad del código a todos los sistemas operativos masivos y posibilita la paralelización del código en forma simple.

Como entorno de desarrollo (o IDE por su sigla en inglés) se utilizó Eclipse⁴, esto porque posee varias características que facilitan la tarea de programación y posterior depuración de errores.

La base de datos original fue procesada usando el motor PostgreSQL 9.0⁵ [7], en conjunto con el software de administración pgAdminIII⁶. Para conectar Java con PostgreSQL se utilizará el JDBC⁷ estándar. En los Anexos se describe el código Java que permite realizar una consulta simple a PostgreSQL.

Para la presentación de los perfiles de carga se utilizó un servidor Apache⁸ usando el lenguaje de programación PHP⁹. Sobre PHP se usó el framework CodeIgniter [12]; este framework provee una

⁴<http://www.eclipse.org>

⁵<http://www.postgresql.org>

⁶<http://www.pgadmin.org>

⁷Es una API que permite la ejecución sobre bases de datos desde el lenguaje de programación Java.

⁸http://en.wikipedia.org/wiki/Apache_server

⁹<http://en.wikipedia.org/wiki/Php>

arquitectura MVC, Modelo - Vista - Controlador. Una arquitectura MVC es aquella que pretende separar el modelo (datos) de las operaciones que se realizan sobre él (controlador) y de cómo se presentan (vistas).

Como motor de base de datos en el servidor web se utilizó MySQL [6]. Se escogió este motor por sobre PostgreSQL, dado que MySQL es más liviano y permite instalarlo sin mayores complicaciones, no así PostgreSQL que es recomendado cuando se quiere manejar volúmenes de información de mayor orden de magnitud y por varios usuarios.

Para la interacción con el cliente se utilizó el lenguaje de programación Javascript. Este lenguaje permite ejecutar código en el browser del usuario de manera de hacer interactiva una página web una vez que ésta ha sido cargada. Este lenguaje de programación soporta los paradigmas imperativo, orientado a objetos, funcional.

Para la visualización de gráficos y diagramas se utilizó la librería Protovis. Esta librería provee una serie de herramientas para la creación de diversas visualizaciones de información [3]. Esta librería usa el lenguaje Javascript y gráficos vectoriales de manera de crear visualizaciones nativas en el browser sin la necesidad de instalar ningún tipo de plugin adicional. En los Anexos se muestra el código necesario para crear una visualización simple.

Para la visualización geoespacial de resultados se usó Google Maps [11]. Google Maps permite visualizar geográficamente el mapa de cualquier parte del mundo, en especial de Santiago. Esta librería cuenta con API sencilla en el lenguaje Javascript. Esta API permite operaciones tales como dibujar un mapa dado un par latitud longitud, agregar figuras básicas sobre un mapa, etc. Un atributo de calidad importante de esta plataforma es que permite visualizar en los sistemas operativos más usados y en la mayoría de los navegadores. En los Anexos se muestra el código necesario para visualizar un par latitud, longitud usando Google Maps.

La figura 5.4 muestra un resumen de las herramientas utilizadas en este Trabajo de Título.

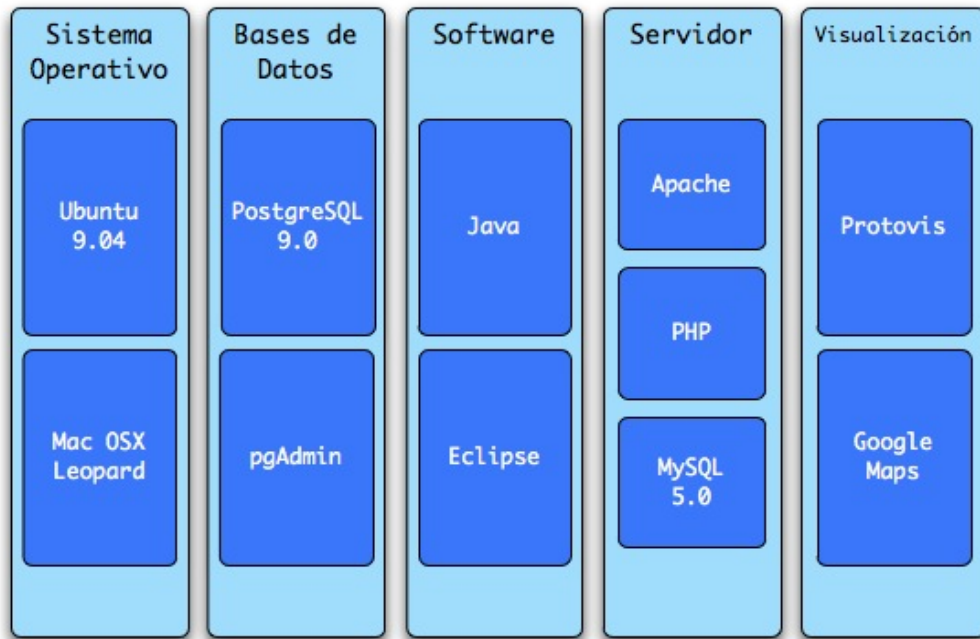


Figura 5.4: Herramientas de apoyo

Capítulo 6

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos.

6.1. Perfil de carga por usuarios y paradas

La figura 6.1 corresponde a la primera visualización construida en este Trabajo de Título. En el eje horizontal se presenta la secuencia de paradas para el servicio 506l separados proporcionalmente de acuerdo a la distancia entre ellos. El eje vertical representa el perfil de carga calculado para esta expedición.

Perfil 506I - BJFB-98 31/05/2010 06:32:03

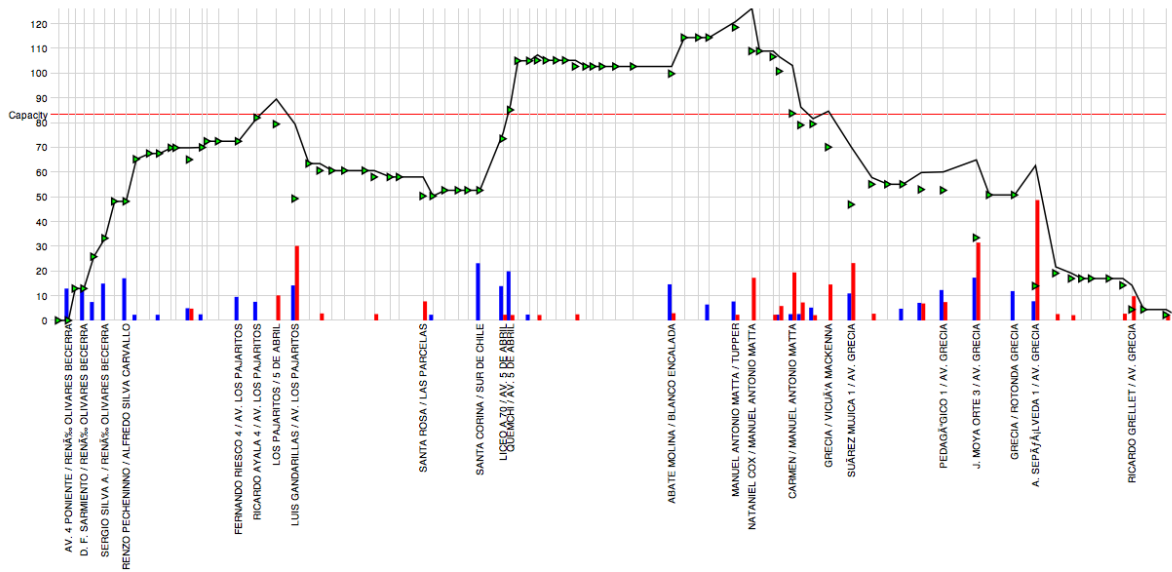


Figura 6.1: Visualización expedición servicio 506I

Llama la atención de que los datos indiquen que este bus estaba siendo usado mucho más allá de su capacidad. La capacidad nominal del bus es cercana a 100 pasajeros, sin embargo, el perfil indica que en el punto de mayor carga hay casi 130 usuarios dentro del bus. Las reuniones con los expertos indicaron que para que factor de expansión tenga sentido es necesario agrupar en al menos media hora para realizar un promedio de la carga en ese período. Esto se debe a que el factor de expansión calculado sólo tiene sentido a nivel agregado y no a nivel de expedición.

La figura 6.2 muestra una situación incluso peor en el servicio 405I. Este servicio inicia su recorrido en Plaza Italia y termina en la comuna de Las Condes. Los resultados indicaban que el perfil de carga en su punto más alto correspondía a casi 300 pasajeros dentro de un bus. Estas observaciones motivaron la construcción de nuevos perfiles de carga que pretenden corregir este fenómeno, entregando un valor más representativo de lo que ocurre realmente en una expedición.

Perfil 405I - BJFF-82 31/05/2010 07:32:08

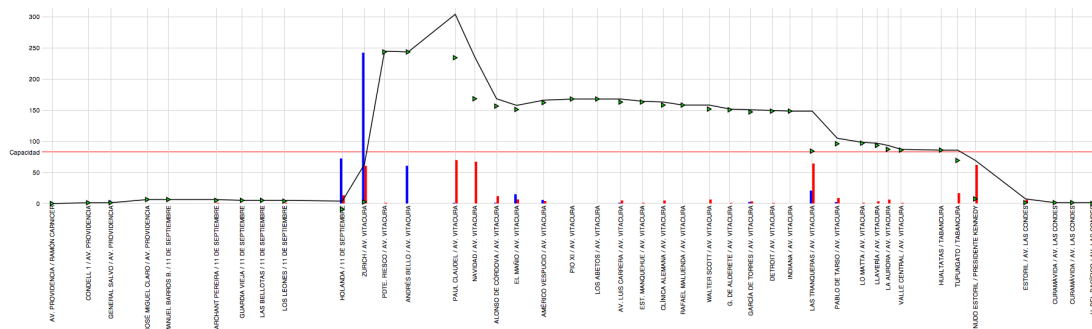


Figura 6.2: Visualización expedición servicio 405I

La figura 6.3 considera la observación hecha por los expertos, de manera de agrupar para el período punta mañana entre las 07:00 a 08:00. En esta figura se puede apreciar una curva mucho más suave y que se asemeja mucho más a lo que se experimentan los usuarios de transporte público día a día. Es posible incluso a partir de esta visualización observar fenómenos esperables, como por ejemplo, que la estación de Metro Parque O'Higgins es uno de los lugares donde muchos pasajeros descienden del bus ya sea para cambiar de modo de transporte o porque llegaron a su destino; de forma similar la estación de Metro Irrarázaval es un lugar donde se produce un gran intercambio de gente, es decir, se produce una gran cantidad de subidas y bajadas de pasajeros.

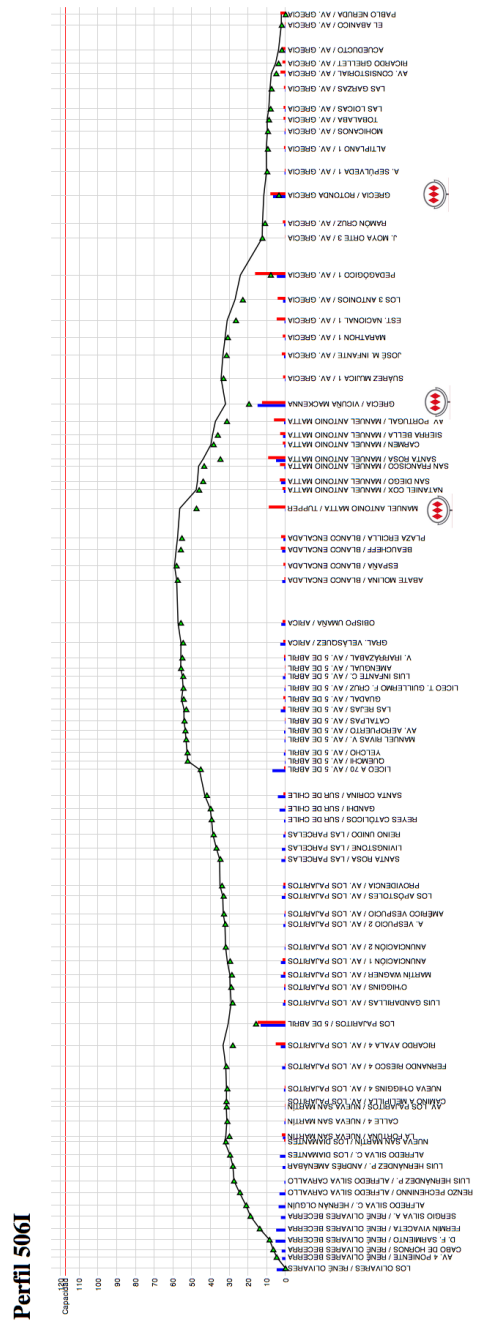


Figura 6.3: Visualización servicio 5061 entre las 07:00 y 08:00

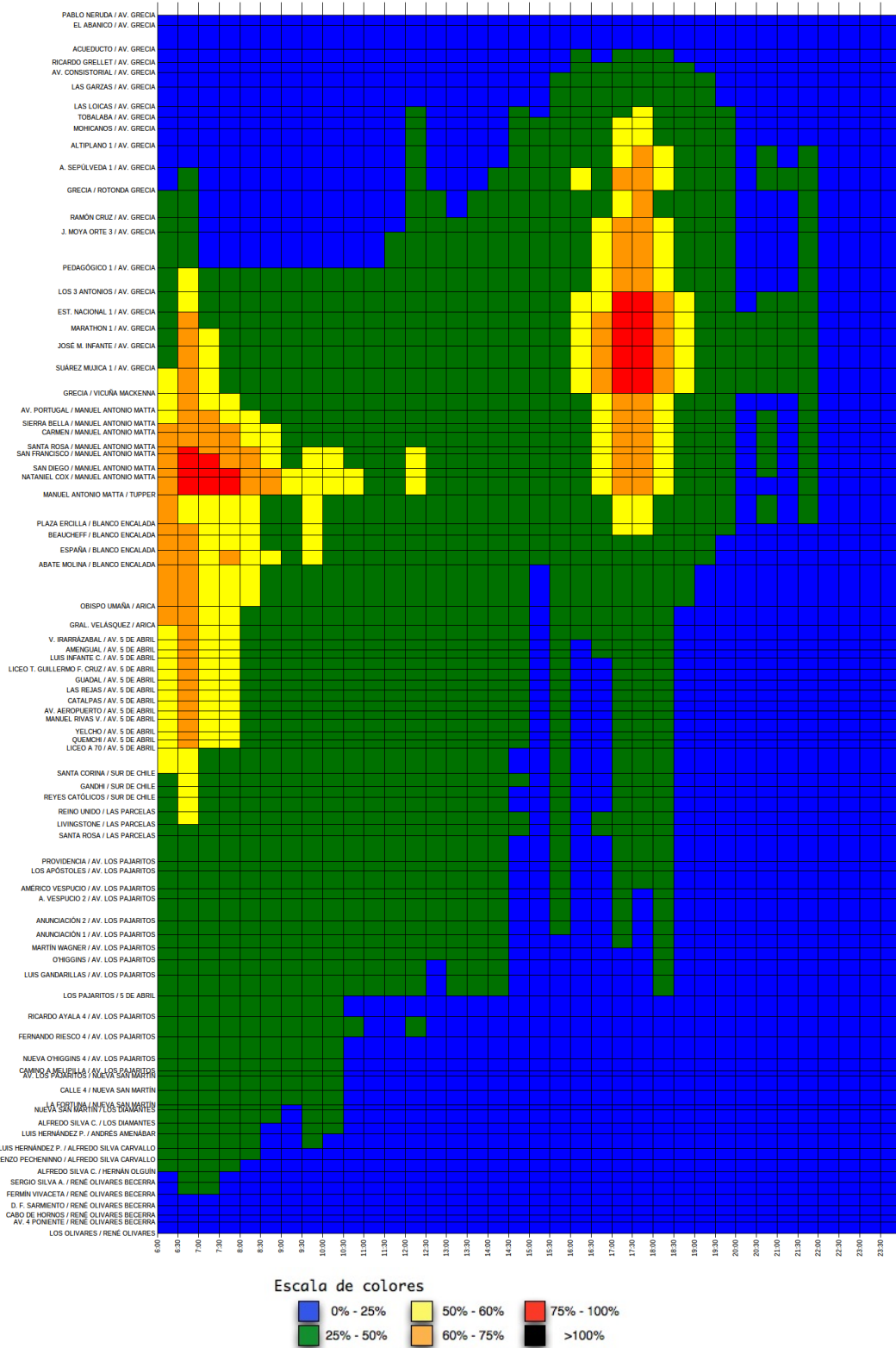


Figura 6.4: Visualización escala de colores para servicio 5061

Luego, fue necesario crear una visualización que sintetizara la información de un servicio a lo largo del día. El resultado se puede apreciar en la figura 6.4. El eje horizontal representa la distribución horaria desde las 06:00 hasta el fin del día, el eje vertical corresponde a las paradas a lo largo de la ruta. La escala de colores representa el factor de carga del bus, es decir, la razón entre el perfil de carga y la capacidad promedio de los buses: la razón entre la demanda y oferta de buses. El color azul indica que se ha ocupado bajo el 25 % de la capacidad, el color verde entre 25 % y el 50 %, el color amarillo entre 50 % y 60 %, el color naranja entre el 60 % y 75 %, el color rojo sobre el 75 % y finalmente se usó el color negro para casos que sobrepasaran el 100 %.

La figura 6.4 permite identificar los períodos punta en la mañana y en la tarde. Es interesante también notar cómo los puntos críticos cambian geográficamente de acuerdo a si se trata de la punta mañana o de la punta tarde.

6.2. Tasa de ocupación de buses servicio y horario

Luego de probar las visualizaciones anteriores con un par de servicios fue necesario encontrar una manera de poder determinar rápidamente qué servicios debían ser mirados con mayor detalle.

La figura 6.5 apunta en esta dirección. El eje horizontal corresponde a la distribución horaria durante la mayor parte del día y el eje vertical representa a los diversos servicios que fueron probados. La escala de colores es la misma que la usada previamente. Para el subconjunto de servicios seleccionados se produce a agrupar el perfil de carga a lo largo de la ruta ponderado por la distancia entre paraderos. La visualización permitió identificar el servicio 303el como uno que debía ser estudiado con detalle, sin embargo, no permite identificar servicios que en promedio se comportan bien pero no así en los extremos. Es posible encontrar también los casos extremos considerando por ejemplo el máximo o mínimo del perfil de carga a lo largo de la ruta y no el promedio de manera de detectar los casos patológicos.

6.3. Flujo de usuarios por paraderos

Una vez que se desarrollan las visualizaciones anteriores se quiso proveer una forma de visualizar esta información geográficamente. Las figuras 6.6, 6.7 y 6.8 son ejemplos de esta visualización, los círculos rojos representan las distintas paradas del Transantiago y su radio es proporcional al perfil de carga de los buses que las utilizan. De esta visualización es posible apreciar fenómenos en la estructura de la demanda en la punta mañana: de la periferia hacia el centro; y en la punta tarde: del centro hacia la periferia.

En las figuras 6.6 y 6.7 se puede apreciar la evolución del flujo de usuarios desde la periferia hacia el centro de la ciudad durante la mañana (06:30 a 08:30 horas). Esto es esperable dado que la mayor cantidad de actividades largas (laborales, estudiantiles) ocurren en el sector céntrico de Santiago. En la visualización esto se aprecia mediante los círculos rojos de mayor radio que se ubican en la periferia de la ciudad, principalmente en el sector Sur Poniente donde se encuentran comunas de mayor población.

En la figura 6.8 se puede apreciar el efecto inverso durante la tarde (18:00 a 18:30 horas). Durante la tarde los usuarios vuelven a sus hogares alejándose del centro de la ciudad y dirigiéndose hacia la periferia. En la visualización esto se aprecia en la concentración de círculos rojos y de mayor radio en el centro y de menor tamaño en la periferia.

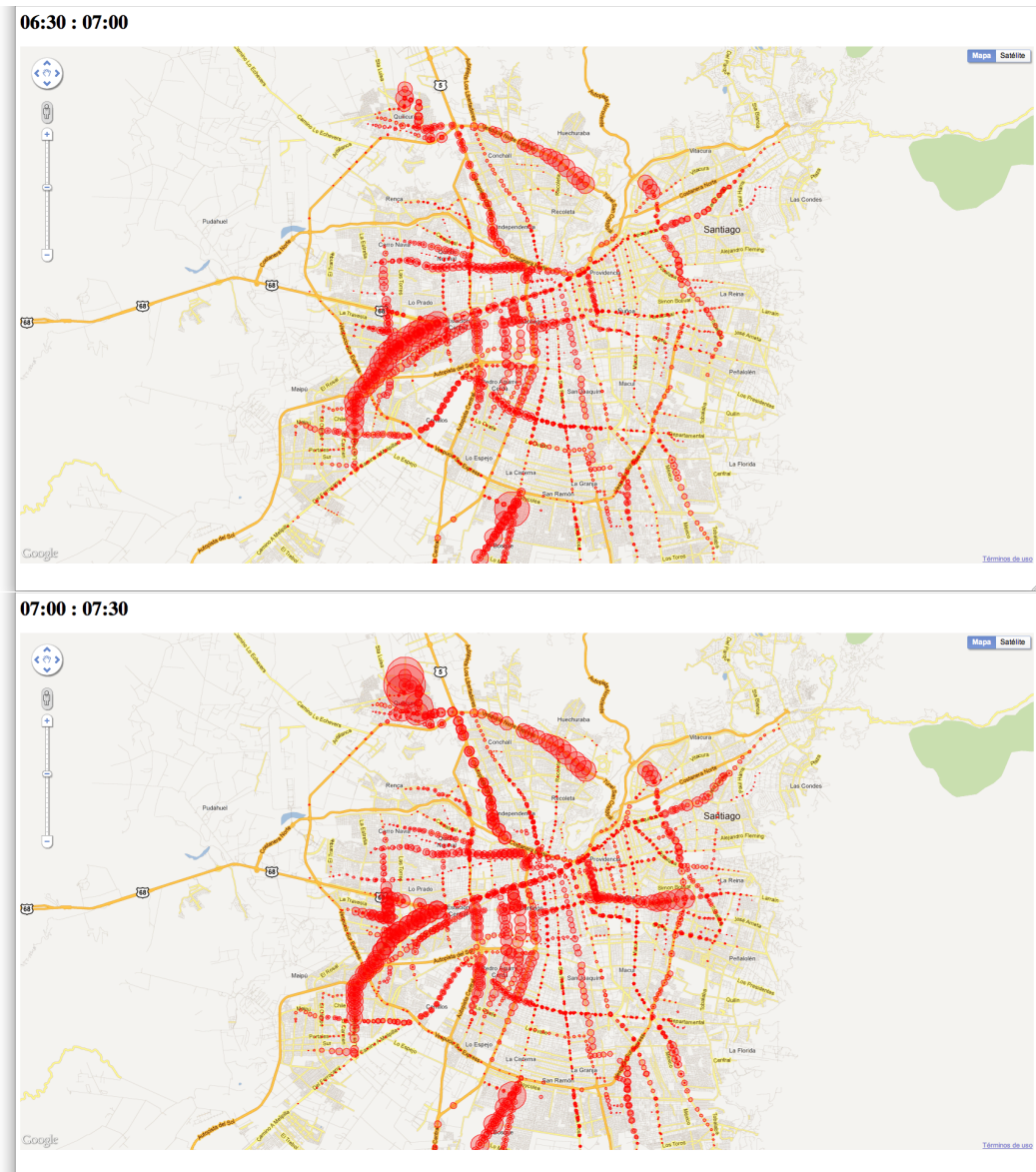


Figura 6.6: Visualización Google Maps 06:30-07:30

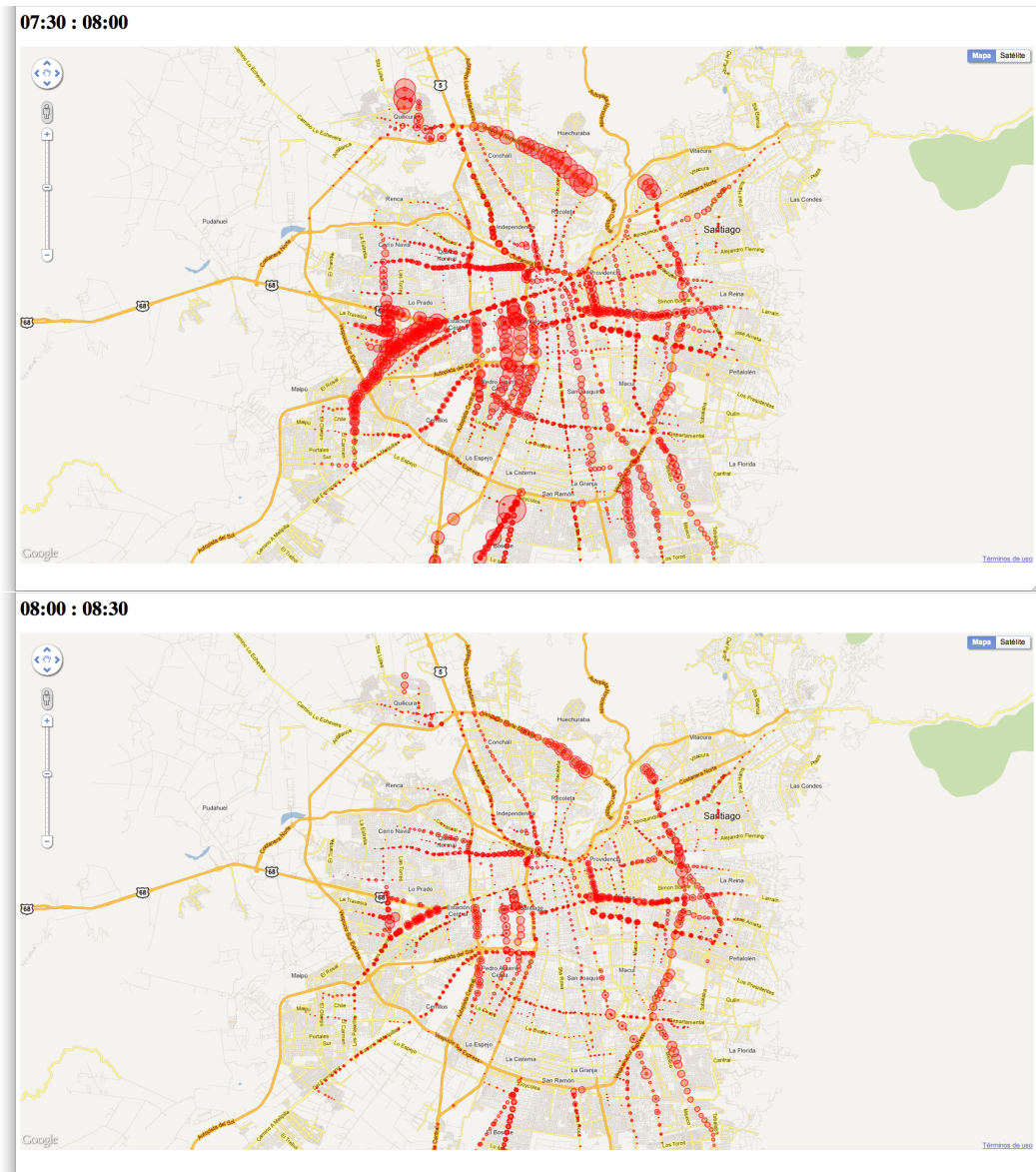


Figura 6.7: Visualización Google Maps 07:30-08:30

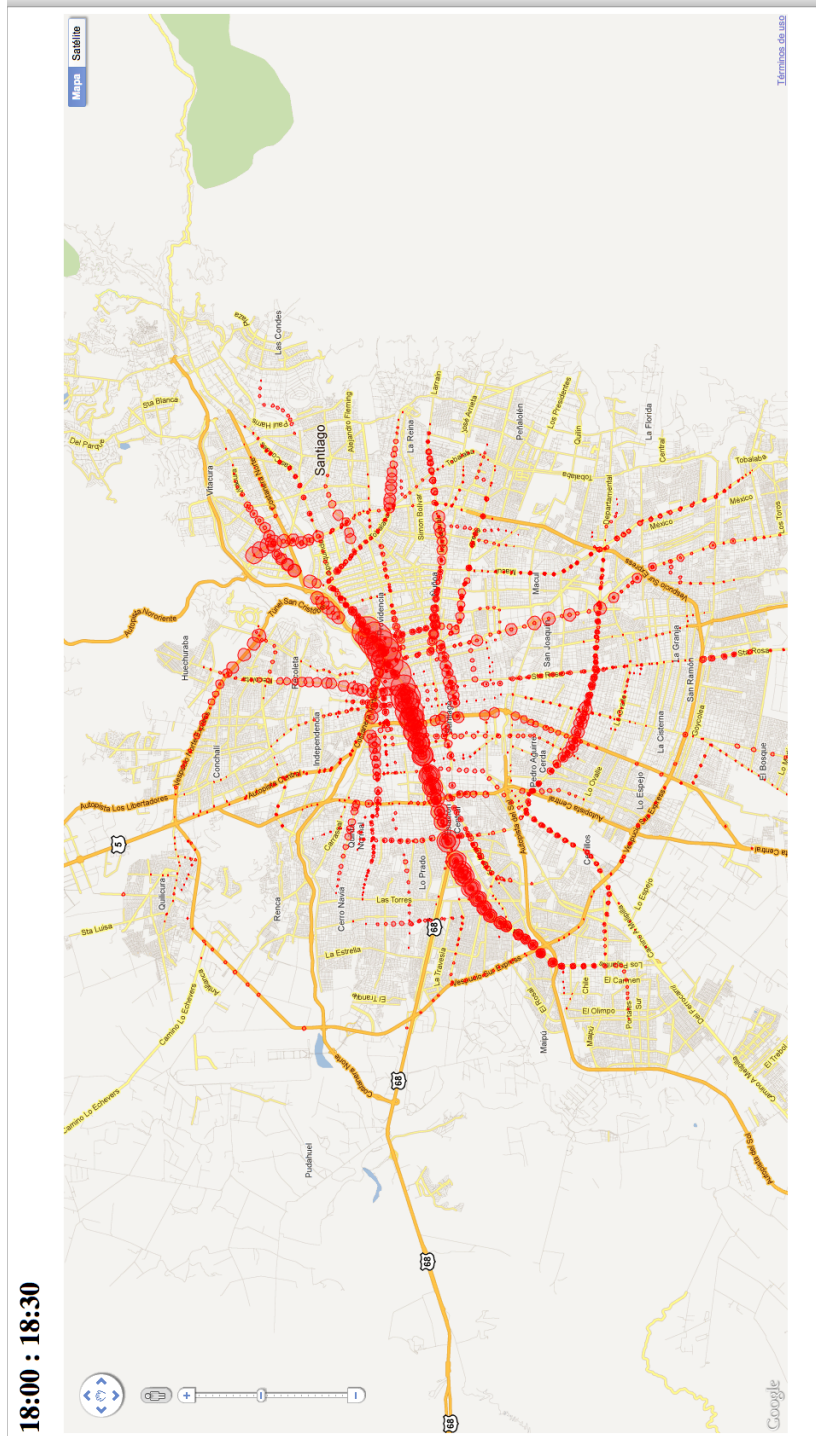


Figura 6.8: Visualización Google Maps 18:00 18:30

Capítulo 7

Conclusiones

La primera conclusión es que es posible calcular perfiles de carga usando datos de estimación de bajada para el Transantiago. Este trabajo permite tener mayor conocimiento acerca del comportamiento del sistema de transporte público.

En este trabajo de título se logró reunir la información disponible del uso de tarjeta bip!, estimación de bajada de pasajeros y paraderos de buses de Transantiago de manera de poder implementar el software que calcula el perfiles de carga para los buses de este sistema de transporte público. Además se eso se implementaron diversas visualizaciones que permiten facilitar la tarea de los expertos y personal técnico de Transantiago y la Universidad de Chile. Este software se hizo de manera modular de manera de permitir la reutilización del trabajo para futuros desarrollos en el área.

El diagnóstico de situaciones o problemas con los perfiles de carga, ya sea por una oferta demasiado alta o una demanda insatisfecha, puede ser diagnosticado por los expertos el día de hoy rápidamente usando las visualizaciones provistas. La generación de indicadores de equilibrio entre la oferta y demanda permite distinguir rápidamente cuáles son los servicios que requieren una revisión más detallada.

La construcción de este software no sólo cumplió con los objetivos planteados sino que también constituye una nueva plataforma que se complementará a futuro con nuevos módulos útiles para otras investigaciones del área, como velocidades, frecuencias, flujos y otras.

Trabajo relacionado

Dentro del marco del convenio de investigación del DICTRA y Transantiago se han realizado otras líneas de investigación siendo la principal de ellas el cálculo de velocidad comercial de los buses

del Transantiago [1]. La velocidad comercial corresponde a la suma de las distancias recorridos dividido por la suma de los tiempos utilizados para un algún tramo de la ruta en cierto tiempo.

Dentro de esta línea de investigación Mauricio Zuñiga, Ingeniero Civil en Computación del Departamento de Ciencia de la Computación de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile realizó su memoria en el software que permite calcular la velocidad comercial para los buses del Transantiago [15]. Este software genera reportes de la velocidad de cada uno los servicios y varios gráficos que permite analizar el comportamiento de cada uno de ellos.

Este trabajo ha seguido siendo desarrollado y hoy es posible calcular velocidades comerciales de un corredor¹ y no tan sólo de un servicio en especial. La figura 7.1 muestra la visualización de las velocidades del corredor Santa Rosa.

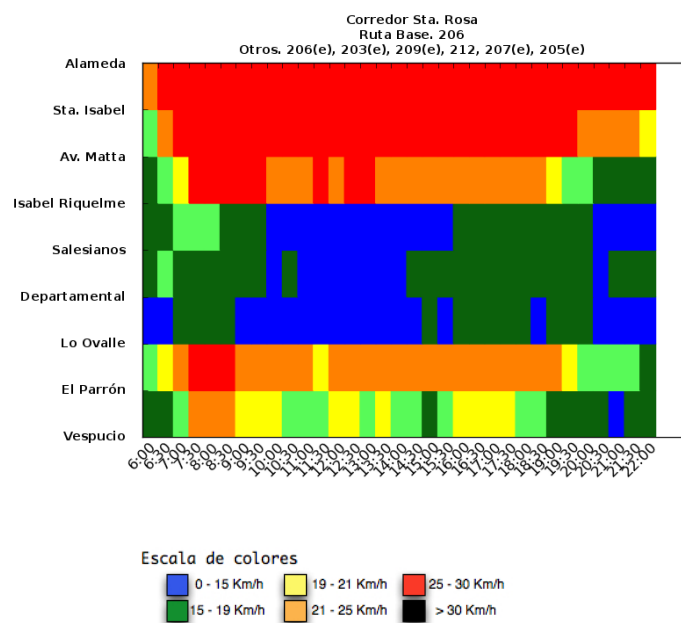


Figura 7.1: Velocidad corredor Santa Rosa

A pesar de que este trabajo corresponde a una línea distinta de desarrollo que la de este trabajo de título, es posible que en un futuro se requiera una consolidación de la ambas líneas para generar información como estudiar las velocidades de acuerdo al flujo de gente asociado.

¹Un corredor corresponde a una vía de interés por donde pueden circular más de un recorrido.

Trabajo futuro

El transporte público en las grandes ciudades corresponde un área de gran interés, tanto de parte del estado para minimizar los gastos involucrados como para la academia para generar nuevas metodologías que permitan maximizar el beneficio de la ciudadanía y usuarios en general.

En esta línea, se proponen las siguientes líneas de investigación a futuro.

1. Cálculo de perfiles de carga por corredor en vez de por servicio. Esto permite entender cómo se comportan las principales avenidas de la ciudad en términos de flujos de gente viajando a través del Transantiago.
2. Generación de índices que permitan determinar la calidad de servicio que ofrecen los diversos operadores en términos de hacinamiento, asientos disponibles y otros.
3. Generación de métricas y visualizaciones comparativas entre diversos cortes temporales.
4. Extensión del software para otros sistemas de transporte público a lo largo del mundo.

Anexos

Definición de requerimientos

ID	1
Descripción	Calcular los perfiles de carga de todas las expediciones de todos los servicios de un período de datos
Módulo	Global
Prioridad	1

ID	2
Descripción	Los perfiles de carga deben ser posibles de agrupar por expedición y por servicio-período
Módulo	Global
Prioridad	1

ID	3
Descripción	La metodología de cálculo de perfiles de carga debe ser consistente con todos los cambios en la metodología de estimación de bajada
Módulo	Global
Prioridad	1

ID	4
Descripción	El software debe ser capaz de entregar resultados gráficos además de los numéricos
Módulo	Visualización
Prioridad	2

ID	5
Descripción	El software debe poder ser configurado para realizar cálculos sobre otros cortes temporales mediante un archivo que indique los datos a usar
Módulo	Cálculo
Prioridad	2

ID	6
Descripción	El software debe ser modular y de fácil extensión
Módulo	Global
Prioridad	3

ID	7
Descripción	El código fuente debe seguir normas de codificación para facilitar el mantenimiento y reutilización
Módulo	Global
Prioridad	3

ID	8
Descripción	El código fuente debe ser documentado
Módulo	Global
Prioridad	2

ID	9
Descripción	Utilización de herramientas gratuitas
Módulo	Global
Prioridad	2

ID	10
Descripción	Visualización debe ser portable
Módulo	Visualización
Prioridad	1

Índices base de datos

El siguiente código describe los índices que fue necesario crear para optimizar las consultas a la base de datos

```
CREATE INDEX tb8_jun_index_serv_un_zp2_tiempo_subida
```

```
ON tb8_jun_2010
```

```
USING btree (serv_un_zp2, tiempo_subida);
```

```
CREATE INDEX tb8_jun_serv_un_zp2
```

```
ON tb8_jun_2010
```

```
USING btree (serv_un_zp2);
```

Conexión a PostgreSQL desde Java

El siguiente código que permite realizar una consulta conectando Java y PostgreSQL.

```
import java.sql.*;
class Test
{
    public static void main(String[] args)
    {
        String driver = "org.postgresql.Driver";
        String connStr = "jdbc:postgresql://localhost:5432/transantiago";
        String user = "postgres";
        String password = "postgres";
        try {
            Class.forName(driver);
            Connection conn = DriverManager.getConnection(connStr, user, password);
            Statement stmt = conn.createStatement();
            ResultSet result = stmt.executeQuery(
                "SELECT * FROM par_ser_10poc4cz ORDER BY servicio, correlativo");
            while(result.next())
            {
                String service = result.getString("servicio");
                double x = result.getDouble("x");
                double y = result.getDouble("y");
                System.out.format("servicio: %s, x: %.2f, y: %.2f\n", service, x, y);
            }
            stmt.close();
            conn.close();
        } catch(Exception e)
        {
            e.printStackTrace();
        }
    }
}
```

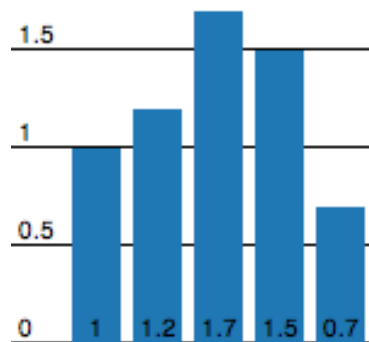
Gráfico de barras usando Protovis

```
var vis = new pv.Panel()
    .width(150)
    .height(150);

vis.add(pv.Rule)
    .data(pv.range(0, 2, .5))
    .bottom(function(d) d * 80 + .5)
    .add(pv.Label);

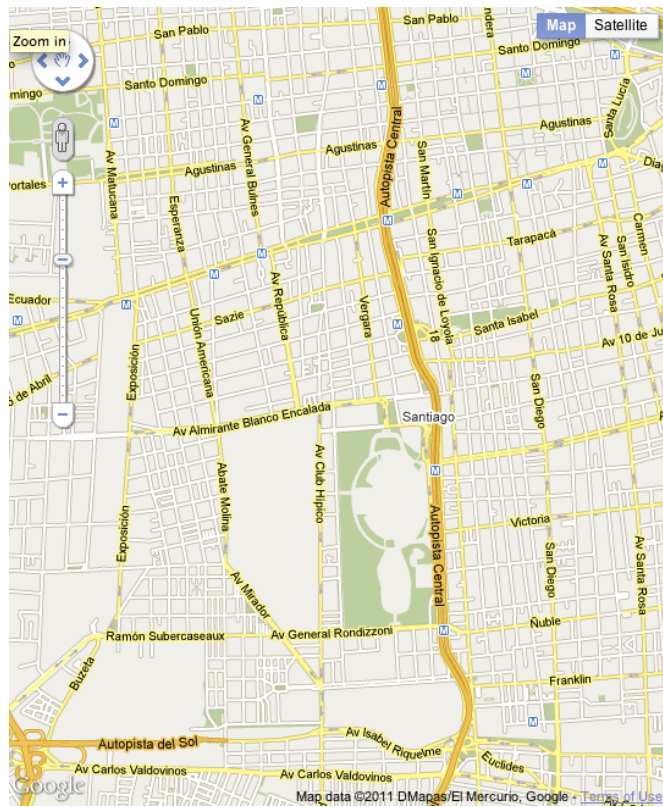
vis.add(pv.Bar)
    .data([1, 1.2, 1.7, 1.5, .7])
    .width(20)
    .height(function(d) d * 80)
    .bottom(0)
    .left(function() this.index * 25 + 25)
    .anchor("bottom").add(pv.Label);

vis.render();
```



Visualización Google Maps

```
<script type="text/javascript">
  var map;
  function initialize() {
    var myOptions = {
      zoom: 8,
      center: new google.maps.LatLng(-32.24, -63.21),
      mapTypeId: google.maps.MapTypeId.ROADMAP
    };
    map = new google.maps.Map(document.getElementById('map_canvas'),
      myOptions);
  }
  google.maps.event.addDomListener(window, 'load', initialize);
</script>
```



Es posible dibujar sobre este mapa usando las clases definidas en la API. En particular un círculo se puede dibujar como sigue:

```
var circle = new google.maps.Circle(  
    map : map,  
    radius: 15,  
    center: new google.maps.LatLng(-32.24, -63.21)  
};
```

Bibliografía

- [1] Cortés C., Gibson J., Gschwender A., Munizaga M. y Zúñiga M. (2011) *Comercial bus speed diagnosis based on gps-monitored data*. Transportation Research C.
- [2] Fischer D. (2010) *Obtención de información para la gestión del transantiago a través de datos operacionales*, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial, Universidad de Chile.
- [3] Heer. J, y Bostock M. (2010) *Declarative language design for interactive visualization*. IEEE Trans. Visualization & Comp. Graphics (Prov. Info Vis).
- [4] Muñoz J., Ortúzar J. de D., y Gschwender A. (2009) *Transantiago: the fall and rise of a radical public transportation intervention*. Travel Demand Management and Road User Pricing: Success, Failure and Reasibility.
- [5] Willumsen L. G., Ortúzar J. de D. (2008) *Modelos de Transporte*. Ediciones de la Universidad de Cantabria.
- [6] Kofler M. (2001) *MySQL*. Apress.
- [7] Momjian B. (2001) *PostgreSQL: Introduction and Concepts*. Addison-Wesley.
- [8] Munizaga M., Palma C. (2011) *Estimation of a disaggregate multimodal public transport OD matrix from passive smart card data from Santiago, Chile*. Submitted to Transportation Research C.
- [9] Mora P. (2010) *Generación de datos de patrones de viaje a partir de transacciones bip*, Memoria para optar el título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- [10] SECTRA (2001) *Encuesta Origen Destino de Viajes*.
- [11] Svennerberg G. (2010) *Beginning Google Maps API 3*. Apress
- [12] Upton D. (2007) *CodeIgniter for Rapid PHP Application Development: Improve your PHP coding productivity with the free compact open-source MVC CodeIgniter framework*. PACKT.
- [13] Vuchic V. (2005) *Urban Transit: Operations, planning and economics*. John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey
- [14] Zukowski J. (2005) *Java 6 Platform Revealed*. Apress
- [15] Zúñiga M. (2010) *Desarrollo de software para estimar velocidades de los buses del Transantiago*. Memoria para optar el título de Ingeniero Civil en Computación, Universidad de Chile.