



Modelo Estocástico de Asignación de Viajes de Transporte Público Estimado con Datos Pasivos de Santiago de Chile

Cristián E. Cortés (Universidad de Chile, Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería ISCI)

Pedro Donoso (Universidad de Chile)

Leonel Gutiérrez (Universidad de Chile)

Daniel Herl (Universidad de Chile)

Diego Muñoz (STP Santiago)

Octubre 2019

Outline



fcfm

Ingeniería Civil
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

stp
SANTIAGO

ISCI
INSTITUTO
SISTEMAS COMPLEJOS DE INGENIERÍA

- Motivación y objetivos
- El modelo: Stochastic Transit Equilibrium (STE)
- Calibración de Parámetros
- Aplicación del modelo a Santiago



fcfm

Ingeniería Civil
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

stp
SANTIAGO

ISCI
INSTITUTO
SISTEMAS COMPLEJOS DE INGENIERÍA

Motivación y objetivos

Objetivos de la investigación



Plantear y resolver un modelo estratégico de asignación de viajes en transporte público adaptado para modelar cada decisión tomada por los usuarios al momento de realizar un viaje:

- La elección del paradero o estación de Metro al cual ir desde el origen.
- Elección del servicio a abordar.
- Decisiones de bajarse o continuar en un mismo servicio.
- Decisión de transbordar o dirigirse a destino.

Calibrar el modelo resultante con los datos pasivos y estimaciones de ADATRAP (información completa del estado del sistema de TP en un cierto período)

¿Para qué sirve?



Ingeniería Civil
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



Tomar **decisiones informadas de inversión, financiamiento y asignación de recursos**, estimando la demanda que sirven y el nivel de servicio que entregan todos los servicios que define el usuario

Es útil para:

1. Evaluar futuras concesiones y preparar licitaciones.

2. Planificar y optimizar las operaciones de los servicios en una concesión adjudicada

Entrega estimaciones del **nº de usuarios del sistema Red de Santiago y del nivel de servicio** que reciben por:

Unidad de negocio, línea de transporte público (buses, Metro y Metrotren), tramo de línea entre paradas (para estimar perfil de carga), parada y destino de viaje, en las épocas y días del año y períodos del día donde se haya calibrado el modelo

Pueden estimarse los cambios en estas variables ante **variaciones** de:

1. Los niveles de **demanda** de los pares origen-destino de viaje en Santiago.

2. Los **servicios de un operador**: Nº de servicios, recorridos, paraderos, tamaño y composición de la flota, programas de operación, etc.



fcfm

Ingeniería Civil
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

stp
SANTIAGO

ISCI
INSTITUTO
SISTEMAS COMPLEJOS DE INGENIERÍA

El modelo: Stochastic Transit Equilibrium (STE)

Referencias:

Cortés C.E., Jara-Moroni P., Moreno E., Pineda C. (2013). Stochastic transit equilibrium, *Transportation Research Part B*, 51, 29-44.

Pineda C., Cortés C.E., Jara-Moroni P., Moreno E. (2016). Integrated traffic-transit stochastic equilibrium model with park-and-ride facilities, *Transportation Research part C*, 71, 86-107.

Stochastic Transit Equilibrium (STE)



Ingeniería Civil
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

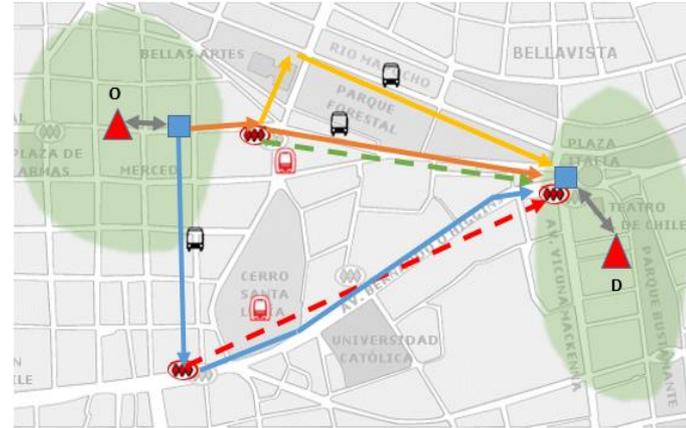


- El modelo STE (Cortés et al. 2013), captura los efectos de la información incompleta con la que cuentan los usuarios para realizar sus (modelo estocástico de asignación de TP).
- La asignación y equilibrio del flujo de pasajeros resulta ser más dispersa en la red que en modelos deterministas, reflejando la variabilidad y percepción que tienen los pasajeros sobre la operación del sistema de transporte público.
- En este trabajo se adapta el modelo STE considerando las características propias de la operación de buses, Metro y Metrotren en Santiago,
- Objetivo final es poder predecir de forma acertada el comportamiento de los usuarios que utilizan cada día el sistema de TP en la ciudad.
- Modelo se construye de forma de poder usar los datos pasivos y estimaciones de ADATRAP para su calibración.

Características principales del modelo ST



- La demanda que asigna a la red de servicios es una **matriz OD de viajes entre zonas de un período y tipo de día**.
- Las rutas de viaje **más cargadas** son las que proveen **más utilidad (o menos costo)** al usuario y esta utilidad (costo) se modela.
- Como los usuarios y el modelador enfrentan **incertidumbre**, se emplean **modelos probabilísticos de decisión de los usuarios** y no reglas determinísticas.
- En cada arco de una ruta el usuario decide cómo continúa su viaje a su destino. Este **esquema de ruteo se basa en arcos** y no en rutas completas, con lo cual no es necesario enumerar todas las rutas posibles por par OD, como ocurre en la mayoría de los modelos existentes.
- Se considera la **interdependencia entre los servicios y la congestión en los paraderos y vehículos**.



Stochastic Transit Equilibrium (STE)



Ingeniería Civil
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



- El modelo planteado debe ser tal que cumpla con la conservación de flujo:

$$g_{id} + \sum_{a \in A_i^-} v_{ad} = \sum_{a \in A_i^+} v_{ad}, \quad \forall d \in D, i \neq d,$$

donde g_{id} es la demanda desde el nodo $i \in N$ a un destino $d \in D \subseteq N$ y v_{ad} es el flujo de pasajeros que pasa por el arco a con dirección al destino d .

- En consecuencia, tendremos que el flujo total por arco es:

$$w_a = \sum_{d \in D} v_{ad}, \quad \forall a \in A,$$

Stochastic Transit Equilibrium (STE)



Ingeniería Civil
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



- Los tiempos de espera en paradero pueden crecer debido a la capacidad limitada de los servicios, que pueden llegar a generar congestión en los paraderos. Este fenómeno se puede modelar utilizando una función de frecuencia efectiva $f_a(w)$, tal que $f_a \rightarrow 0$ cuando $w_a \rightarrow \bar{w}_a$, siendo \bar{w}_a la capacidad total del servicio.
- Para representar los costos del sistema se emplea un enfoque por arcos, donde el tiempo total de la ruta a partir de un nodo i se separa en dos componentes:
 - 1) el tiempo del arco a , t_a , que une el nodo i con el nodo j_a .
 - 2) El tiempo de viaje esperado desde el nodo j_a al destino d , denotado $\tau_{j_a d}$.

Decisiones del usuario modeladas en ST

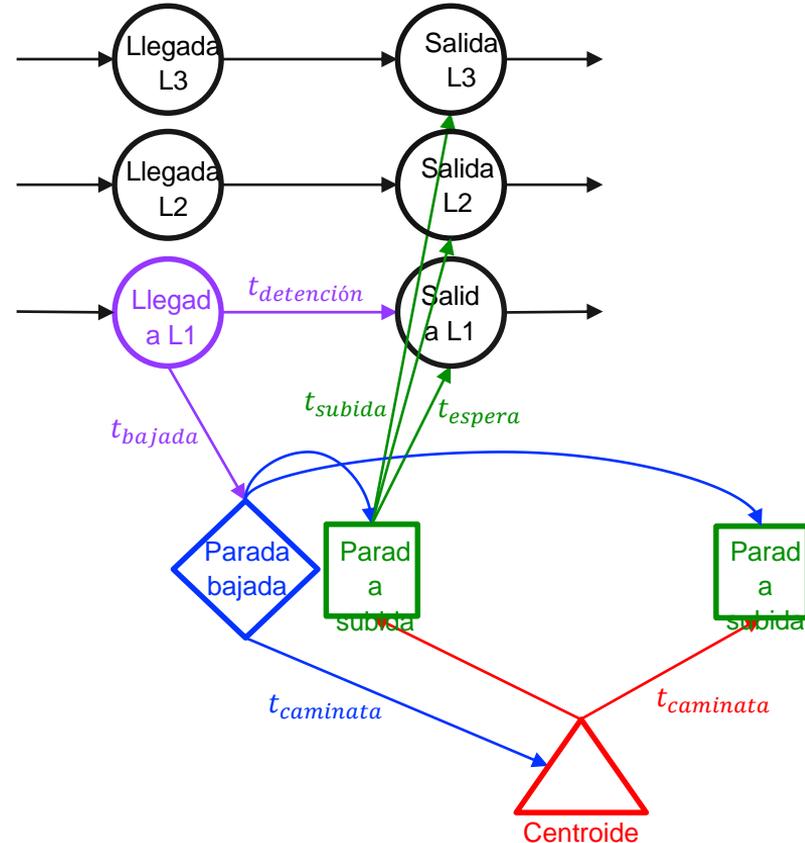


Modelo de elección de la parada de subida desde el origen (centroide de zona).

Modelo de elección del servicio para subirse

Modelo de elección de la parada de bajada (o continuar en el vehículo)

Modelo de elección de la parada para transbordar o del destino



Modelo de elección de la parada desde origen

Elección de parada de subida para nodos $i \in \mathcal{C}$, con \mathcal{C} el conjunto de centroides:

$$\tau_{id} = \sum_{a \in A_i^+} P_{a/di} \cdot (t_a + \tau_{j_a d}), \quad P_{a/di} = \frac{\exp\left(-(\alpha_C t_a + \alpha_{C,\tau-a} \tau_{j_a d} + cost_a)\right)}{\sum_{a' \in A_i^+} \exp\left(-(\alpha_C t_{a'} + \alpha_{C,\tau-a} \tau_{j_{a'} d} + cost_{a'})\right)}$$

| Parámetro | Descripción |
|---------------------|---|
| α_C | Ponderación del tiempo de arco t_a para arcos de acceso. |
| $\alpha_{C,\tau-B}$ | Ponderación del tiempo esperado de viaje τ para arcos de acceso donde j_a es un paradero de bus normal (no ZP) |
| $\alpha_{C\tau-M}$ | Ponderación del tiempo esperado de viaje τ para arcos de acceso donde j_a es una estación de Metro |
| $\alpha_{C\tau-ZP}$ | Ponderación del tiempo esperado de viaje τ para arcos de acceso donde j_a es una ZP |
| $acc_{metroComb}$ | Constante específica de acceso a estación de Metro de combinación |
| $acc_{metroNorm}$ | Constante específica de acceso a estación de Metro normal |
| acc_{ZP} | Constante específica de acceso a ZP |
| acc_{OS} | Constante específica de acceso a paradero de bus con sólo un servicio |

Modelo de elección de subida



Elección de servicio al cual subirse para nodos $i \in S_s$, con S_s el conjunto de paradas de subida es:

$$\tau_{id} = \frac{1}{\sum_{a \in A_i^+} f_a(w) q_{a/di}(\tau)} + \sum_{a \in A_i^+} P_{a/di} \cdot (t_a + \tau_{jad}), \quad P_{a/di} = \frac{f_a(w) q_{a/di}(\tau)}{\sum_{a' \in A_i^+} f_{a'}(w) q_{a'/di}(\tau)}$$

donde la función de frecuencia efectiva, $f_a(w)$, es:

$$f_a(w) = \begin{cases} \mu_a \left(1 - \left(\frac{w_a}{\mu_a c_a - (w_{a'} - w_a)} \right)^\beta \right) & \text{si } \mu_a c_a \geq w_{a'} \\ 0 & \text{si no} \end{cases}$$

Con $w_{a'}$ como el flujo que permanece en el arco de línea luego de que el vehículo deja la zona de parada, μ_a como la frecuencia nominal del arco y c_a su capacidad.

Modelo de elección del servicio a subir



Las probabilidades de subirse o no al servicio representado por arco a , $q_{a/di}(\tau)$, dependen endógenamente del nodo-destino y cambian dependiendo del cálculo de los τ :

$$q_{a/di}(\tau) = \frac{1}{1 + \exp(\theta t_a + \theta_{\tau_{j_a}} \tau_{j_a}^d - \theta_{\tau_i} \tau_i^d + cost_i)}$$

| Parámetro | Descripción |
|-----------------------|---|
| θ | Ponderación del tiempo de arco t_a para arcos de abordaje. |
| $\theta_{\tau_{j_a}}$ | Ponderación del tiempo esperado de viaje τ para arcos de abordaje donde j_a es un nodo departure |
| θ_{τ_i} | Ponderación del tiempo esperado de viaje τ desde la parada i |
| $board_{metroComb}$ | Constante específica de abordaje desde estación de Metro de combinación |
| $board_{metroNorm}$ | Constante específica de abordaje desde estación de Metro normal |
| $board_{zP}$ | Constante específica de abordaje desde ZP |
| $board_{oS}$ | Constante específica de abordaje desde paradero de bus con sólo un servicio |
| $board_{MS}$ | Constante específica de abordaje desde paradero de bus con más de un servicio |

Modelo de elección de parada de bajada



Modela la elección entre descender en parada de bajada o continuar en el bus para nodos $i \in A$, con A el conjunto de nodos de llegada:

$$\tau_{id} = \sum_{a \in A_i^+} P_{a/di} \cdot (t_a + \tau_{jad}), \quad P_{a/di} = \frac{\exp\left(-(\alpha_B t_a + \alpha_{B,\tau-a} \tau_{jad} + cost_a)\right)}{\sum_{a' \in A_i^+} \exp\left(-(\alpha_B t_{a'} + \alpha_{B,\tau-a} \tau_{jad} + cost_{a'})\right)}.$$

| Parámetro | Descripción |
|---------------------|--|
| α_B | Ponderación del tiempo de arco t_a para arcos de descenso/línea. |
| $\alpha_{B,\tau-B}$ | Ponderación del tiempo esperado de viaje τ para arcos de descenso/línea donde j_a es un nodo alightingStop/departure y el nodo arrival corresponde a un servicio de bus |
| $\alpha_{ar\tau-M}$ | Ponderación del tiempo esperado de viaje τ para arcos de descenso/línea donde j_a es un nodo alightingStop/departure y el nodo arrival corresponde a un servicio de Metro |
| $al_{metroComb}$ | Constante específica de descenso a estación de Metro de combinación |
| $al_{metroNorm}$ | Constante específica de descenso a estación de Metro normal |
| al_{ZP} | Constante específica de descenso a ZP |
| al_{OS} | Constante específica de descenso a paradero de bus con sólo un servicio |
| al_{MS} | Constante específica de descenso a paradero de bus con más de un servicio |

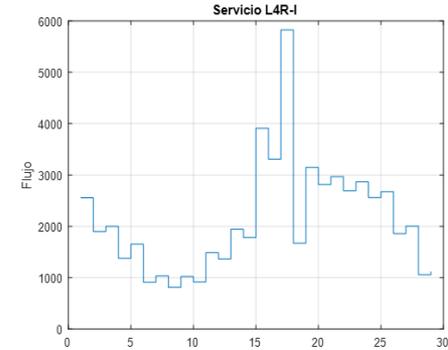
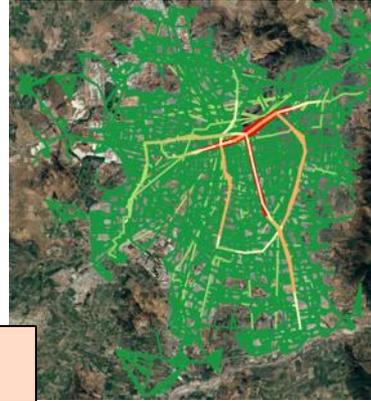
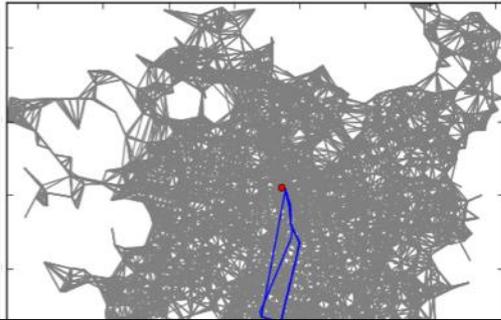
Modelo de elección de parada para transbordo o destino

Elección de parada de subida o destino para nodos $i \in S_b$, con S_b el conjunto de paradas de bajada:

$$\tau_{id} = \sum_{a \in A_i^+} P_{a/di} \cdot (t_a + \tau_{jad}), \quad P_{a/di} = \frac{\exp(-(\alpha_{PB}t_a + \alpha_{PB,\tau-a}\tau_{jad} + cost_a))}{\sum_{a' \in A_i^+} \exp(-(\alpha_{PB}t_{a'} + \alpha_{PB,\tau-a}\tau_{j_{a'}d} + cost_{a'}))}$$

| Parámetro | Descripción |
|-----------------------|---|
| α_s | Ponderación del tiempo de arco t_a para arcos de transbordo/conexión a destino. |
| $\alpha_{PB,\tau-B}$ | Ponderación del tiempo esperado de viaje τ para arcos de transbordo donde j_a es un nodo boardingStop correspondiente a un paradero de buses (incluye ZP). |
| $\alpha_{PB,\tau-M}$ | Ponderación del tiempo esperado de viaje τ para arcos de transbordo donde j_a es un nodo boardingStop correspondiente a una estación de Metro (incluye combinación). |
| $trans_{B-metroComb}$ | Constante específica de transbordo desde paradero de bus a estación de Metro de combinación |
| $trans_{B-metroNorm}$ | Constante específica de transbordo desde paradero de bus a estación de Metro normal |
| $trans_{B-ZP}$ | Constante específica de transbordo desde paradero de bus a ZP |
| $trans_{B-OS}$ | Constante específica de transbordo desde paradero de bus a paradero con sólo un servicio |
| $trans_{B-MS}$ | Constante específica de transbordo desde paradero de bus a paradero con más de un servicio |
| $trans_{M-ZP}$ | Constante específica de transbordo desde Metro a ZP |
| $trans_{M-OS}$ | Constante específica de transbordo desde Metro a paradero de bus con sólo un servicio |
| $trans_{M-MS}$ | Constante específica de transbordo desde Metro a paradero de bus con más de un servicio |

Información de entrada del modelo STE



Entradas

- N° de viajes entre pares de zonas.
- Tiempos de caminata (acceso, egreso y trasbordo).
- Tiempos de viaje en vehículo entre paradas.
- Programa de operación de cada línea.
- Capacidad de cada línea-sentido.

STE

Salidas

- Afluencia a los paraderos
- Subidas, bajadas y perfiles de carga de los servicios
- Tiempos de espera y de viaje
- Rutas de viaje más cargadas con sus etapas
- N° de viajes que trasbordan hacia y desde metro

Algoritmo de solución del modelo STE



Ingeniería Civil
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



Resolución de un problema matemático no lineal de gran tamaño

- 1: Inicializar las entradas del algoritmo (g_i^d, μ_a, c_a, t_a) , parámetros $(\theta, \alpha, \beta, cost)$, y condiciones iniciales (τ_{id}^0, w_a^0) . Iteraciones $k = 0$.
- 2: Repetir mientras $\|w_a^{k+1} - w_a^k\| / \|w_a^{k+1}\| < \epsilon$
- 3: $k = k + 1$.
- 4: Calcular frecuencias efectivas en arcos de abordaje $f_a(w) = \mu_a \left(1 - \left(\frac{w_a}{\mu_a c_a - (w_a' - w_a)} \right)^\beta \right)$
- 5: Obtener $\tau_{id} = \gamma(t_a, \tau, \theta, \alpha, \beta, cost)$.
- 6: Computar probabilidades $P_{a/di} = \psi(t_a, \tau, \theta, \alpha, \beta, cost)$
- 7: Calcular flujos esperados en nodo x^d usando $[I - (P)^T]x^d = g^d$ (Conservación de Flujo)
- 8: Obtener flujos en arco a con destino d , $v_{ad} = x_{id}P_{a/di}$.
- 9: Calcular flujos totales inducidos $\tilde{w}_a^{k+1} = \sum_{a \in A} v_{ad}$.
- 10: Emplear MSA: $w_a^{k+1} = w_a^k - \alpha_k [w_a^k - \tilde{w}_a^{k+1}]$.
- 11: Fin



fcfm

Ingeniería Civil
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

stp
SANTIAGO

ISCI
INSTITUTO
SISTEMAS COMPLEJOS DE INGENIERÍA

Calibración de parámetros

La calibración del modelo se realiza en base a los datos pasivos de RMM:

- Transacciones BIP en buses y Metro/Metrotren.
- Datos de localización generados por los GPS de los buses.
- Complementariamente, obtenemos estimaciones de paraderos de bajada, de subida en zonas pagas y de tiempos de viaje en cada etapa del viaje realizadas por ADATRAP.

La principal dificultad para calibrar el modelo STE radica en la endogeneidad de sus variables, puesto que las probabilidades dependen de las frecuencias efectivas y los tiempos de viaje esperados y a la vez estas variables dependen de las mismas probabilidades a estimar.

Se propone aproximar los valores del tiempo esperado de viaje τ y los valores de frecuencia efectiva, de tal manera que las probabilidades del STE queden dependientes sólo de los parámetros que se quieren estimar.

Probabilidades y flujos observados



Ingeniería Civil
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



Denotando v_{ad}^{obs} los flujos por arco-destino observados, decimos que es posible replicar las proporciones observadas de los viajes por decisión y lugar, obteniendo las probabilidades observadas $P_{a/di}^{obs}$ con que los usuarios optan por una estrategia tomando un arco a para ir a destino d .

Suponiendo que las frecuencias efectivas son similares a las nominales ($f_a = \mu_a$), y reescribiendo la ecuación de $q_{a/di}(\tau)$ como:

$$q_{a/di}(\tau) = \frac{P_{ad}^{obs} f_{\bar{a}}}{P_{\bar{a}d}^{obs} f_a} q_{\bar{a}/di}, \quad q_{\bar{a}/di} = 1 \quad \forall i_a \in S_s$$

donde \bar{a} se selecciona en cada nodo $i \in S_s$ tal que,

$$\frac{P_{\bar{a}d}^{obs}}{f_{\bar{a}}} \geq \frac{P_{ad}^{obs}}{f_a} \quad \forall a \in A_i^+ \neq \bar{a}.$$

Tiempo esperado de viaje a destino



Ingeniería Civil
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



Con lo anterior, las ecuaciones de τ se pueden reescribir como sigue

$$\tau_i^d = \begin{cases} \sum_{a \in A_i^+} P_{ad}^{obs}(t_a + \tau_{j_a}^d), & i \in C, S_b, A \\ \frac{1}{\sum_a \frac{P_{ad}^{obs} f_{\bar{a}}}{P_{\bar{a}d}^{obs}}} + \sum_{a \in A_i^+} P_{ad}^{obs}(t_a + \tau_{j_a}^d), & i \in S_b' \end{cases}$$

donde todas los componentes de la ecuación son conocidas, y este sistema puede ser resuelto directamente.

Calibración de parámetros



Ingeniería Civil
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



Una vez aproximado el valor de τ , las ecuaciones de probabilidades Logit de las decisiones de acceso, descenso y transbordo; y la ecuación correspondiente a la decisión de subida, dependen únicamente de sus parámetros, siendo cada sub-modelo independiente uno del otro, permitiendo ser calibrados por separado. Para esto se plantea el siguiente problema de optimización para cada decisión:

$$\min_{\Omega} \sum_{a,d} \left(v_{ad}^{obs} - v_{ad}^{mod}(\Omega) \right)^2,$$

donde Ω representa todos los parámetros de cada sub-modelo $(\theta, \alpha, \beta, cost)$ y v_{ad}^{mod} son los flujos modelados que dependen directamente de las probabilidades propuestas.



fcfm

Ingeniería Civil
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

stp
SANTIAGO

ISCI
INSTITUTO
SISTEMAS COMPLEJOS DE INGENIERÍA

Aplicación del modelo a Santiago

1. Calibración del modelo
2. Predicción usando el modelo

Datos usados para calibrar el modelo



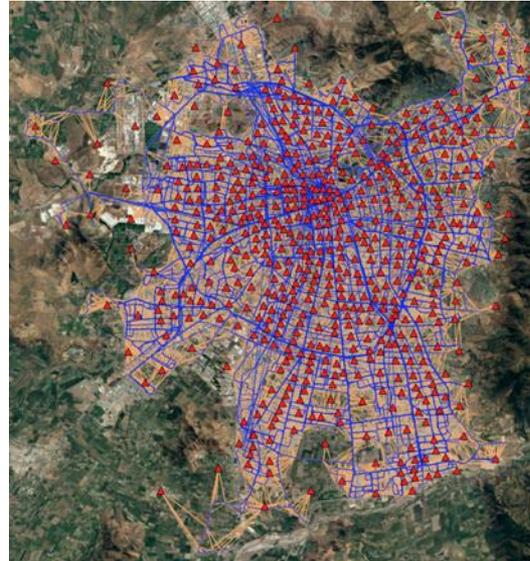
Todos los viajes y etapas de viaje del sistema Red en día laboral de mayo de 2018, del periodo Punta mañana, entre 7:00 y 9:00 h (información de ADATRAP).

Demand

| | |
|----------------------------|---------|
| Nº de viajes | 777.449 |
| Nº de zonas O-D de viajes | 782 |
| Nº de pares O-D con viajes | 100.377 |

Servicios y paradas

| | |
|-----------------------------|--------|
| Nº de servicios | 742 |
| Nº de expediciones de buses | 13.076 |
| Nº de paradas con subidas | 11.263 |
| Nº de paradas con bajadas | 11.239 |



Red de transporte público

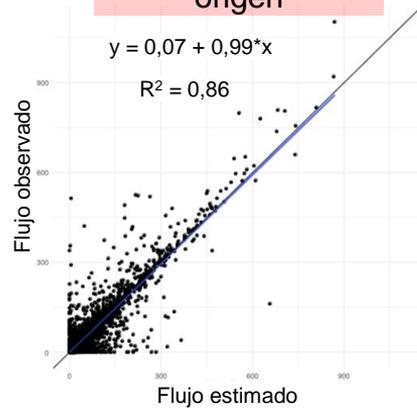
| | |
|---|----------------|
| Nº de nodos | 92.264 |
| Nº de arcos | |
| de centroide a parada y de parada a centroide | 22.502 |
| de conexión entre paradas | 18.769 |
| de subida a servicios en paradas | 34.490 |
| de bajada de servicio en paradas | 34.490 |
| de viaje en vehículo | 68.238 |
| Total | 178.489 |

Bondad de ajuste de los modelos internos

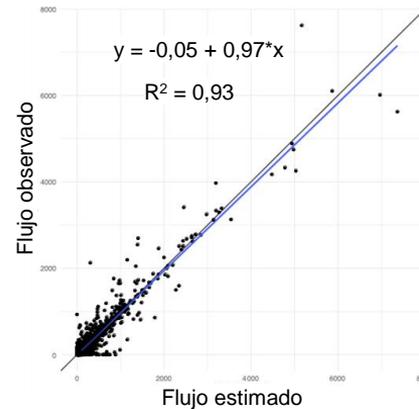


Flujos por arco de elección y destino de viaje, según tipo decisión del usuario

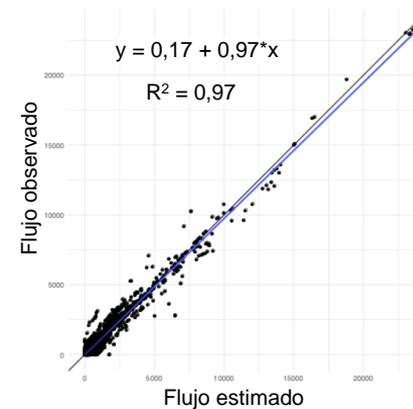
Elección de la parada desde origen



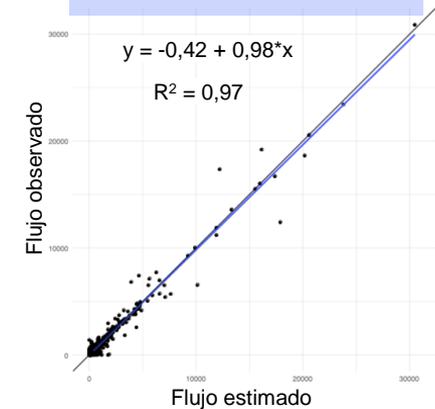
Elección del servicio para subirse



Elección de la parada de bajada



Elección de la parada de transbordo o del destino



Demanda a atender y servicios existentes en los cortes temporales de predicción: Nov 2018 y Abril 2019

| | Mayo 2018 | Nov. 2018 | | Abril 2019 | |
|-------------------------------------|-----------|-----------|------|------------|--------|
| Nº de viajes | 777.449 | 755.790 | -3% | 827.830 | 6% |
| Nº de pares O-D con viajes | 100.377 | 98.341 | -2% | 100.349 | -0,03% |
| Nº de servicios | 742 | 748 | 1% | 752 | 1% |
| Nº de kilómetros de los recorridos | 12.761,5 | 12.792,8 | 0,2% | 12.850,3 | 1% |
| Capacidad de los servicios de buses | 1.269.945 | 1.250.518 | -2% | 1.251.311 | -1% |
| Capacidad de todos los servicios | 2.248.660 | 2.234.269 | -1% | 2.339.283 | 4% |
| Nº de expediciones de buses | 13.076 | 12.927 | -1% | 12.909 | -1% |

Variaciones porcentuales c/r a Mayo 2018

| | Nov 2018 | | Abril 2019 | |
|---|------------|-------------|------------|-------------|
| Servicios eliminados que existían en Mayo 2018 | 26 | | 80 | |
| | Nov 2018 | | Abril 2019 | |
| Nº de servicios iguales a los que existían en Mayo 2018 | 495 | 66% | 349 | 46% |
| Nº de servicios con cambios c/r a los que existían en Mayo 2018 | 221 | 30% | 313 | 42% |
| Servicios nuevos | 32 | 4% | 90 | 12% |
| Total | 748 | 100% | 752 | 100% |

Los servicios pueden variar en sus paradas y/o programas de operación

Predicciones del N° de subidas por Unidad de Negocio

| Unidad de negocio | Mayo 2018 | | | Nov 2018 | | | Abril 2019 | | | | |
|----------------------------------|------------|-----------|----------------|------------|-----------|----------------|------------|---------------------|-----------|---------------------|----------------|
| | Observadas | Simuladas | Error relativo | Observadas | Simuladas | Error relativo | Observadas | Variación Nov-Abril | Simuladas | Variación Nov-Abril | Error relativo |
| U1: Inversiones Alsacia S.A. | 59.684 | 63.717 | 7% | 32.954 | 34.038 | 3% | | | | | |
| U2: Subus Chile S.A. | 92.999 | 98.519 | 6% | 84.106 | 90.470 | 8% | 83.283 | -1% | 86.534 | -4% | 4% |
| U3: Buses Vule S.A. | 96.654 | 99.350 | 3% | 97.950 | 99.905 | 2% | 103.561 | 6% | 106.961 | 7% | 3% |
| U4: Express de Santiago Uno S.A. | 84.736 | 92.530 | 9% | 97.856 | 106.986 | 9% | 100.737 | 3% | 110.239 | 3% | 9% |
| U5: Buses Metropolitana S.A. | 95.741 | 98.477 | 3% | 97.923 | 99.192 | 1% | 111.859 | 14% | 113.147 | 14% | 1% |
| U6: RedBus Urbano S.A. | 53.428 | 53.842 | 1% | 51.740 | 51.619 | 0% | 58.078 | 12% | 59.024 | 14% | 2% |
| U7: STP Santiago S.A. | 40.908 | 42.346 | 4% | 39.249 | 40.855 | 4% | 47.787 | 22% | 49.960 | 22% | 5% |
| Metro | 859.687 | 880.794 | 2% | 854.705 | 875.052 | 2% | 972.896 | 14% | 1.003.699 | 15% | 3% |
| Metrotren | 12.714 | 14.801 | 16% | 14.663 | 16.445 | 12% | 16.979 | 16% | 18.944 | 15% | 12% |
| Total | 1.396.550 | 1.444.376 | 3% | 1.371.145 | 1.414.561 | 3% | 1.495.181 | 9% | 1.548.508 | 9% | 4% |

Los errores relativos de las predicciones de Nov2018 y Abril2019 se mantienen bajos como en el corte de calibración de Mayo2018

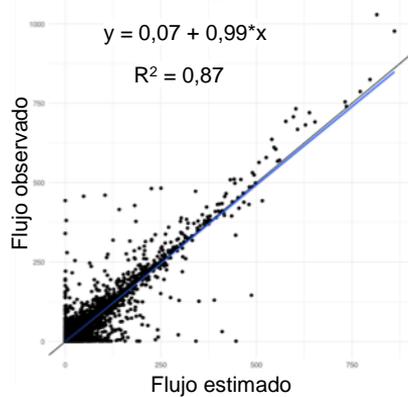
El modelo predice correctamente las variaciones entre Nov 2108 y Abril 2019

El modelo predice correctamente que Subus es el único operador cuya demanda servida disminuye entre Nov2108 y Abril2019

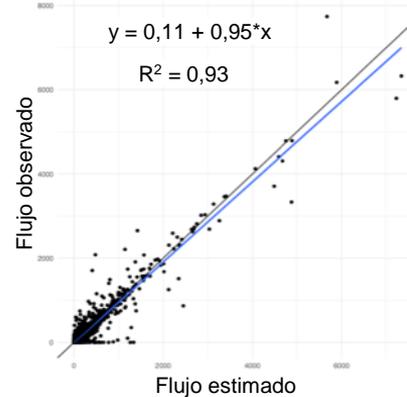
Bondad de predicción de la simulación de Nov 2018

Flujos por arco de elección y destino del viaje, según tipo decisión del usuario

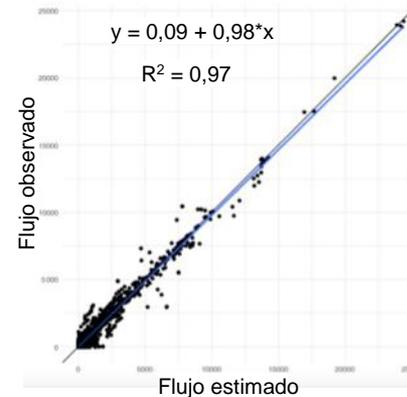
Elección de la parada desde origen



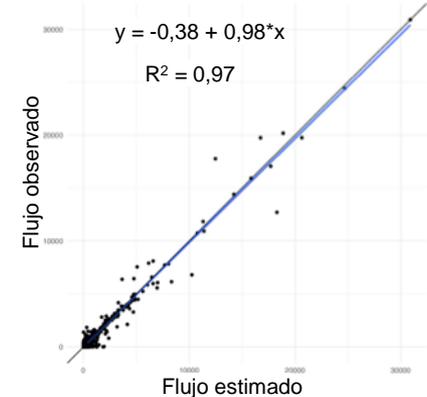
Elección del servicio para subirse



Elección de la parada de bajada

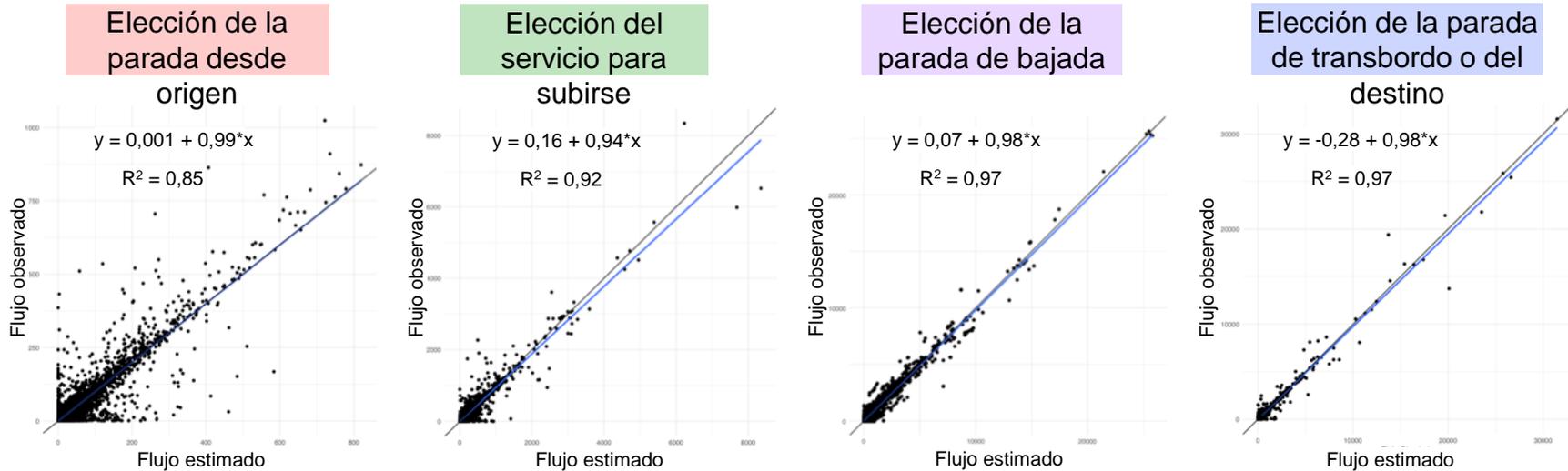


Elección de la parada de transbordo o del destino



Bondad de predicción de la simulación de Abril 2019

Flujos por arco de elección y destino del viaje, según tipo decisión del usuario



Predicciones del N° de subidas en algunos servicios de STP Santiago

| Servicio | Noviembre 2018 | | | | | Abril 2019 | | | | | |
|--------------|----------------|---------------|--------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------------|---------------|----------------|----------------|
| | Observadas | Participación | Estimadas | Error relativo | Error absoluto | Observadas | Participación | Variación Nov-Abril | Estimadas | Error relativo | Error absoluto |
| T102 00I | 978 | 10% | 996 | 2% | 18 | 627 | 5% | -36% | 620 | 1% | -7 |
| T102 00R | 1.190 | 12% | 1.115 | 6% | -75 | 1.025 | 9% | -14% | 1.118 | 9% | 93 |
| T104 00I | 39 | 0,4% | 28 | 28% | -11 | 30 | 0% | -24% | 22 | 27% | -8 |
| T104 00R | 2.713 | 28% | 2.721 | 0% | 8 | 4.209 | 37% | 55% | 4.262 | 1% | 53 |
| T104 01I | 820 | 8% | 975 | 19% | 155 | 1.312 | 11% | 60% | 1.331 | 1% | 19 |
| T114 00I | 251 | 3% | 308 | 22% | 56 | 430 | 4% | 71% | 499 | 16% | 69 |
| T114 00R | 1.002 | 10% | 810 | 19% | -192 | 1.018 | 9% | 2% | 935 | 8% | -82 |
| T212 00I | 96 | 1% | 96 | 1% | 1 | 85 | 1% | -11% | 99 | 16% | 14 |
| T212 00R | 1.968 | 20% | 1.743 | 11% | -225 | 2.083 | 18% | 6% | 2.037 | 2% | -46 |
| T212 01I | 722 | 7% | 868 | 20% | 146 | 615 | 5% | -15% | 703 | 14% | 88 |
| Total | 9.778 | 100% | 9.659 | | | 11.435 | 100% | 17% | 11.627 | | |

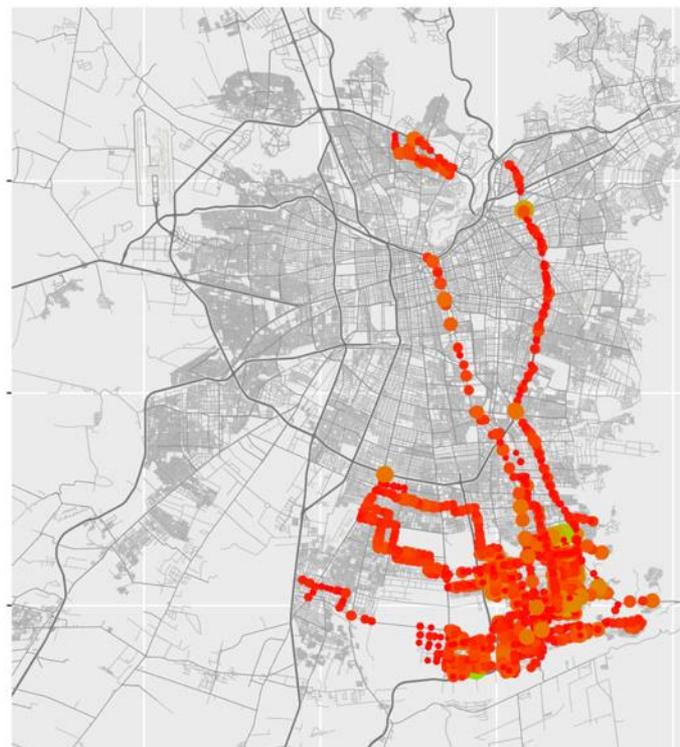
Los servicios con la mayor demanda tienen errores relativos bajos

Los servicios con los errores relativos más altos tienen errores absolutos bajos porque sirve a una demanda baja

Los servicios que presentaron la mayor variación entre Nov 2018 y Abril 2019 tienen:

- errores relativos muy bajos cuando tienen una alta demanda o
- errores absolutos bajos cuando atienden una demanda baja

Nº de subidas observadas y estimadas: STP Santiago (Noviembre 2018)

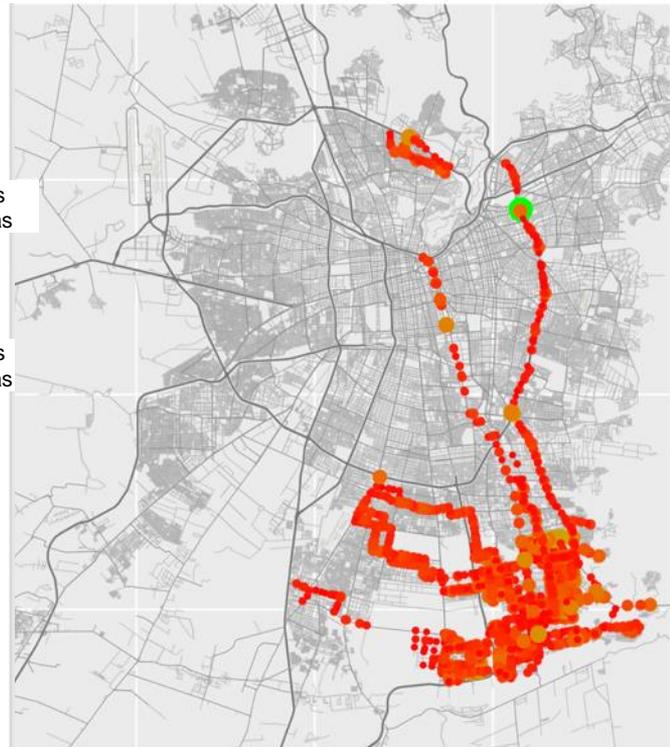
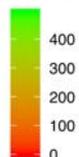


ADATRAP

Nº subidas
observadas

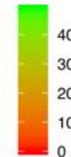


Nº subidas
observadas



Simulación STE

Nº subidas
estimadas



Nº subidas
estimadas



Nº de subidas observadas y estimadas: Metro (Noviembre 2018)



ADATRAP



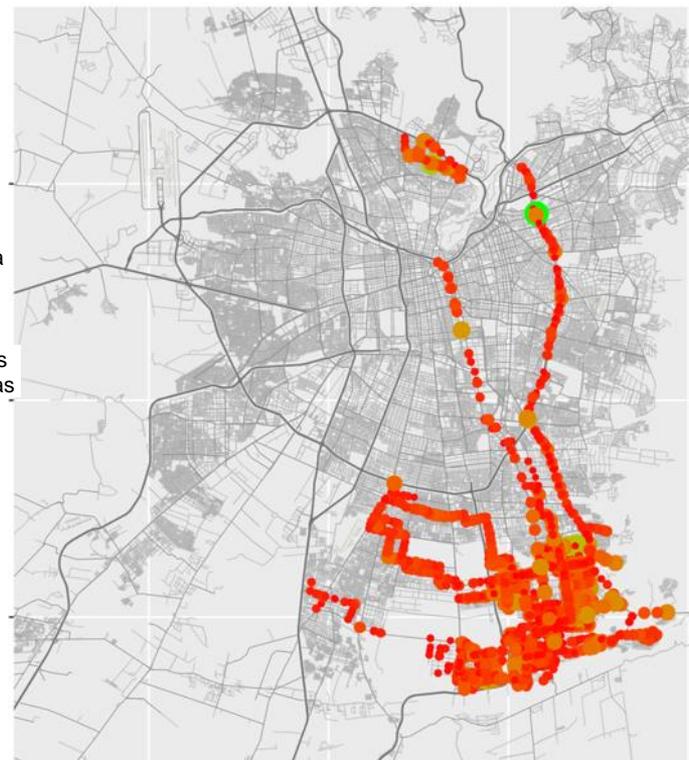
Simulación STE



Nº de subidas observadas y estimadas : STP Santiago (Abril 2019)

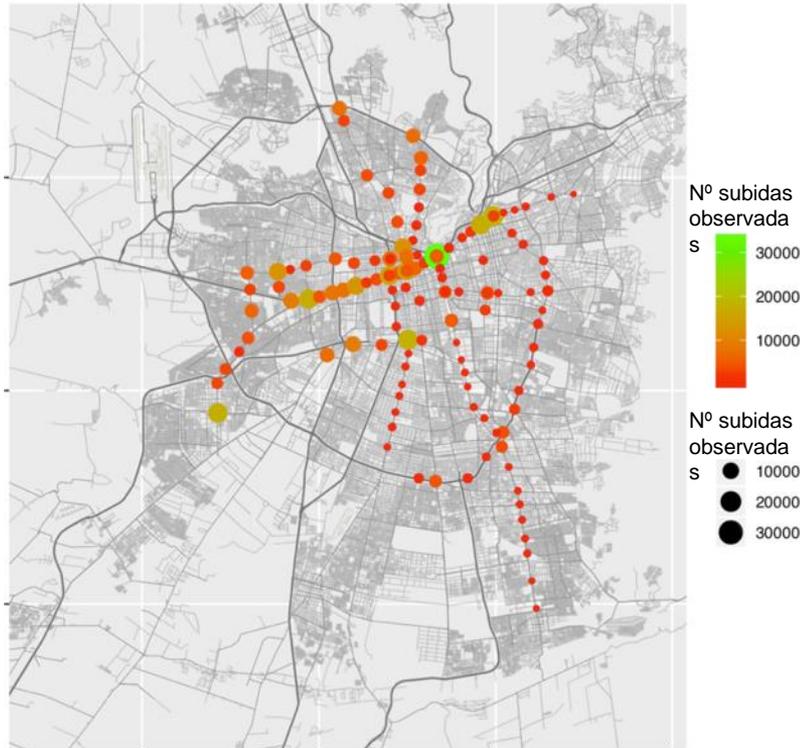


ADATRAP

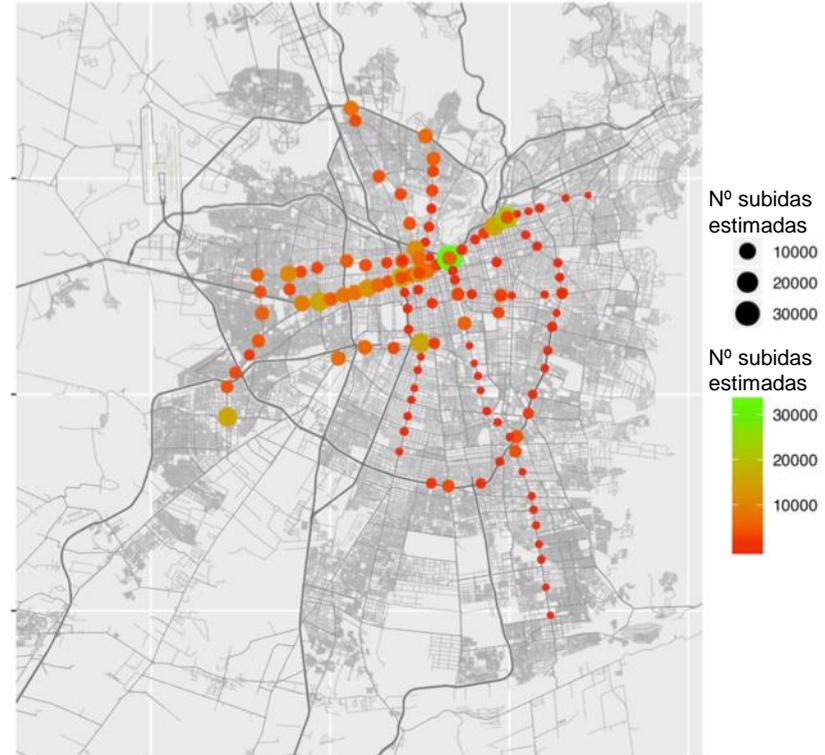


Simulación STE

Nº de subidas observadas y estimadas: Metro (Abril 2019)



ADATRAP



Simulación STE

Comentarios y conclusiones



Ingeniería Civil
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE



- Se ha implementado un modelo estocástico de asignación de usuarios de transporte público, basado en formulaciones con sustento teórico comprobado científicamente.
- Se ha logrado un proceso exitoso de calibración del modelo para una red detallada de los arcos del Sistema RMM de Santiago.
- La calibración utiliza primordialmente los datos pasivos y estimaciones de ADATRAP.
- El modelo es capaz de predecir en cortes futuros de forma bastante certera la asignación de flujos de pasajeros de TP en la punta mañana. Actualmente, estamos experimentando con otros periodos.
- Lo anterior le entrega un poder dinámico de calibración al modelo, la que puede sistematizarse y realizarse de manera más periódica que la de típicos modelos estratégicos de asignación.



Modelo Estocástico de Asignación de Viajes de Transporte Público Estimado con Datos Pasivos de Santiago de Chile

Cristián E. Cortés (Universidad de Chile, Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería ISCI)

Pedro Donoso (Universidad de Chile)

Leonel Gutiérrez (Universidad de Chile)

Daniel Herl (Universidad de Chile)

Diego Muñoz (STP Santiago)

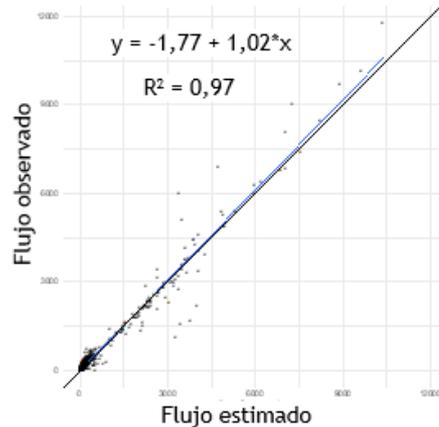
Octubre 2019

Anexos

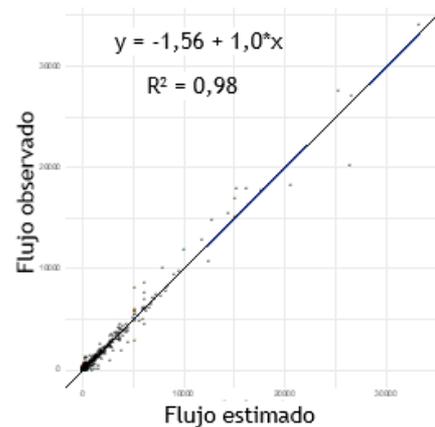
Bondad de predicción de la simulación de Nov 2018

Flujos por arco de elección, según tipo decisión del usuario

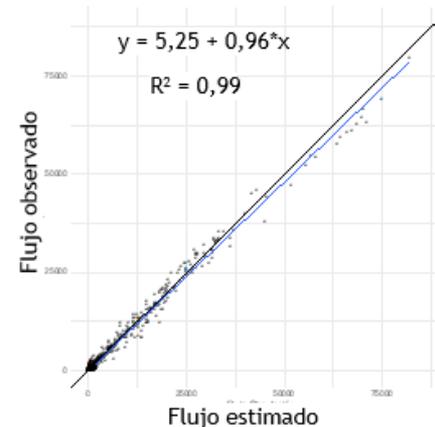
Elección de la parada desde origen



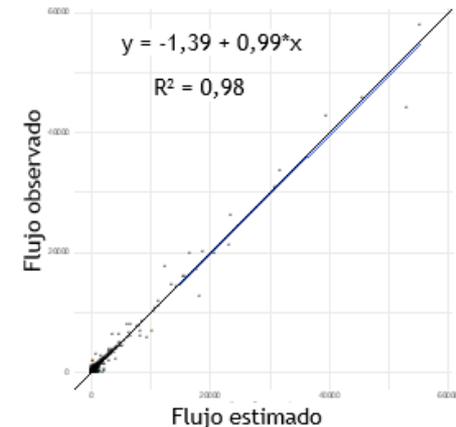
Elección del servicio para subirse



Elección de la parada de bajada



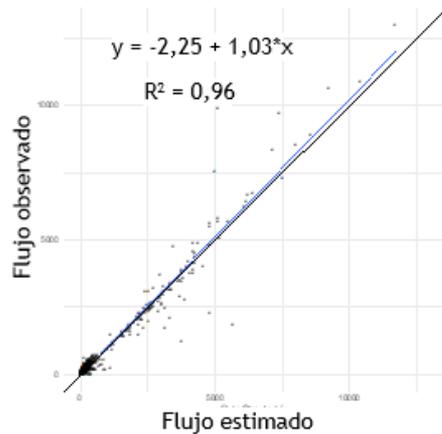
Elección de la parada de transbordo o del destino



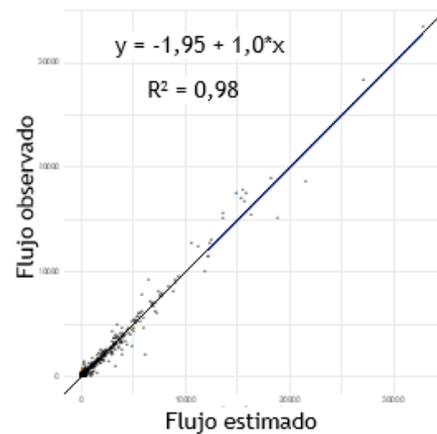
Bondad de predicción de la simulación de Abril 2019

Flujos por arco de elección, según tipo decisión del usuario

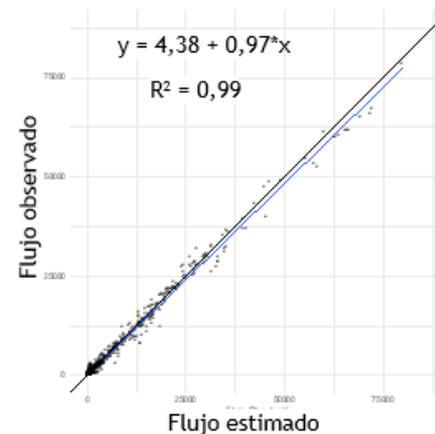
Elección de la parada desde origen



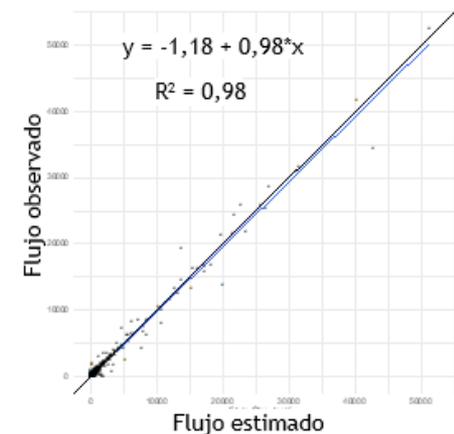
Elección del servicio para subirse



Elección de la parada de bajada



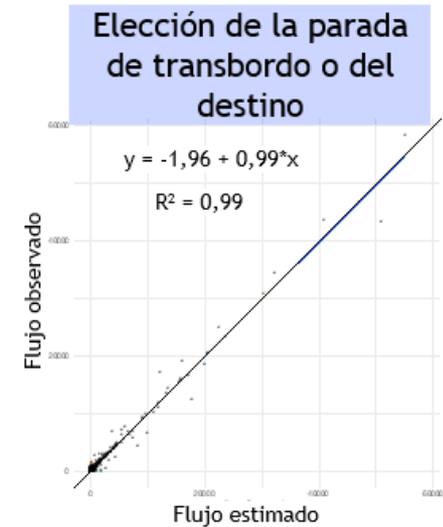
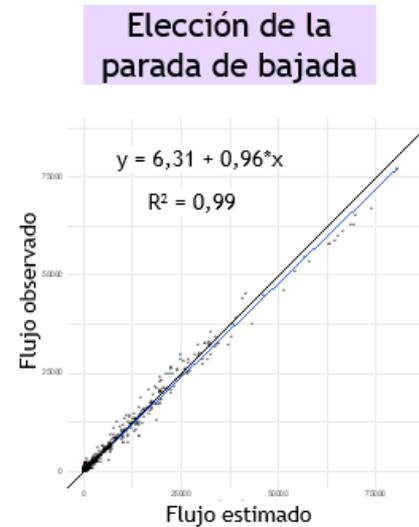
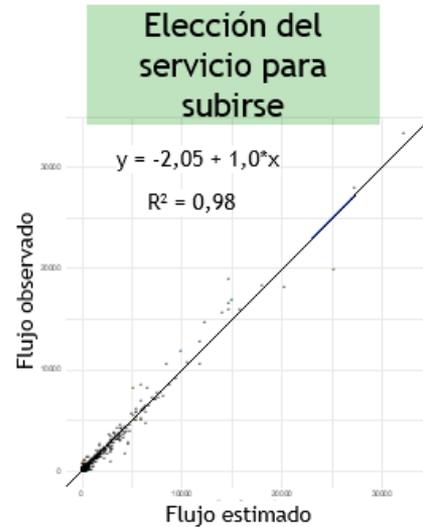
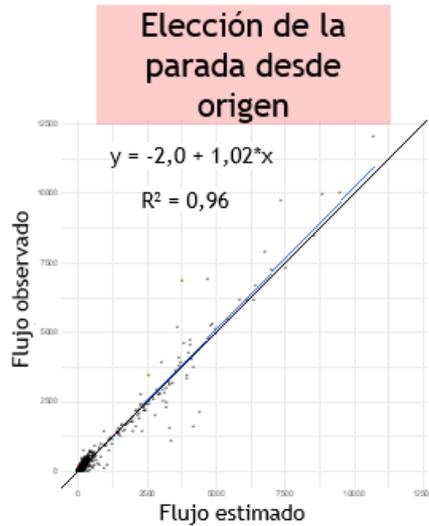
Elección de la parada de transbordo o del destino



Bondad de ajuste de los modelos intern



Flujos por arco de elección, según tipo decisión del usuario

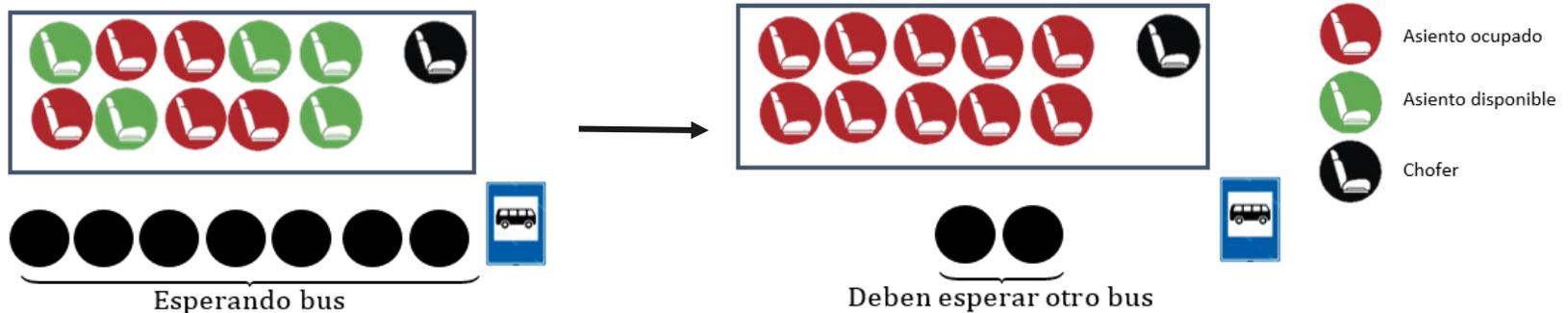


Breve historia

- 2013** **Artículo científico:** **“Stochastic transit equilibrium”**
Revista: Transportation Research Part B.
Autores: Cristián E. Cortés, Pedro Jara-Moroni, Eduardo Moreno y Cristóbal Pineda.
- 2013** **Artículo científico:** **“Modelo de equilibrio estocástico para asignación conjunta de transporte público y privado”**
Revista: XVI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte.
Autores: Cristián E. Cortés, Pedro Jara-Moroni, Eduardo Moreno y Cristóbal Pineda.
- 2014** **Tesis:** **“Formulación de un Modelo de Equilibrio Estocástico para Asignación de Pasajeros en Sistemas de Transporte Público”**
Especialidad: Tesis de Magister en Ingeniería de Transporte.
Autor: Cristóbal Pineda.
- 2016** **Artículo científico:** Integrated traffic-transit stochastic equilibrium model with park-and-ride facilities.
Revista: Transportation Research Part C.
Autores: Cristóbal Pineda, Cristián E. Cortés, Pedro Jara-Moroni y Eduardo Moreno.
- 2016-2018** **Proyecto de Investigación:** **Fondef D10E1002: “Software de Tecnología Avanzada para Ciudades del Futuro”**
Productos: Modelo, software e implementación de una versión básica de este modelo para Santiago.
Responsables: Marcela Munizaga, Cristián Cortés y Pedro Donoso.

Sub-modelo interno de frecuencia efectiva del servicio percibida por el usuario, según el modelo STE

- Define la cantidad de buses a los que el usuario se puede subir de entre los que pasan.
- Determina el tiempo de espera del usuario en las paradas.
- Se modela la frecuencia efectiva como una función de la frecuencia nominal del servicio, capacidad del bus, su carga y cuánta gente quiere subir en la parada.



Modelos estocásticos calibrados para Santiago usando datos pasivos de ADATRAP

| Access Model | Boarding Model | Alighting Model | Transfer Model |
|--|---|--|--|
| $p_a^d = \frac{\exp(-(\alpha_c t_a + \alpha_{cr} \tau_{j_a}^d + cost_a))}{\sum_{b \in A_i^+} \exp(-(\alpha_c t_b + \alpha_{cr} \tau_{j_b}^d + cost_b))}$ | $q_a^d = \frac{1}{1 + \exp(\theta t_a + \theta_{\tau_{j_a}} \tau_{j_a}^d - \theta_{\tau_i} \tau_i^d + cost_a)}$ | $p_a^d = \frac{\exp(-(\alpha_{ar} t_a + \alpha_{art} \tau_{j_a}^d + cost_a))}{\sum_{b \in A_i^+} \exp(-(\alpha_{ar} t_b + \alpha_{art} \tau_{j_b}^d + cost_b))}$ | $p_a^d = \frac{\exp(-(\alpha_s t_a + \alpha_{st} \tau_{j_a}^d + cost_a))}{\sum_{b \in A_i^+} \exp(-(\alpha_s t_b + \alpha_{st} \tau_{j_b}^d + cost_b))}$ |
| $\alpha_c = 0.0627$ | $\theta = 0.4552$ | $\alpha_{ar} = 2.1910$ | $\alpha_s = 0.0126$ |
| $\alpha_{cr} = 0.0025$ | $\theta_{\tau_{j_a}} = 1.1892$ | $\alpha_{art} = 0.1387$ | $\alpha_{st-B} = 0.2686$ |
| $\alpha_{cr-M} = 0.0598$ | $\theta_{\tau_i} = 1.2147$ | $\alpha_{art-M} = 0.3399$ | $\alpha_{st-M} = 0.0727$ |
| $\alpha_{cr-ZP} = 0.0744$ | | | |
| $cost_a = acc_{metroComb} = -5.8728$ | $cost_a = board_{metroComb} = 3.8681$ | $cost_a = al_{metroComb} = -1.0482$ | $cost_a = cost_{B-metroComb} = 5.0245$ |
| $cost_a = acc_{metroNorm} = -5.2148$ | $cost_a = board_{metroNorm} = -24.6087$ | $cost_a = al_{metroNorm} = -0.5134$ | $cost_a = cost_{B-metroNorm} = 5.2142$ |
| $cost_a = acc_{ZP} = -4.9622$ | $cost_a = board_{ZP} = -1.6602$ | $cost_a = al_{ZP} = 1.9006$ | $cost_a = cost_{B-ZP} = 2.4417$ |
| $cost_a = acc_{OS} = 0.3031$ | $cost_a = board_{OS} = -0.7936$ | $cost_a = al_{OS} = 3.2247$ | $cost_a = cost_{B-OS} = 1.5266$ |
| | $cost_a = board_{MS} = -100.5127$ | $cost_a = al_{MS} = 1.9893$ | $cost_a = cost_{B-MS} = 2.3632$ |
| | | | $cost_a = cost_{M-ZP} = 1.6708$ |
| | | | $cost_a = cost_{M-OS} = 3.6478$ |
| | | | $cost_a = cost_{M-MS} = 4.1305$ |
| | | | |

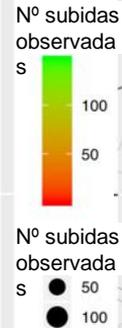
Bondad de predicción del N° de subidas por arco de elección y Unidad de Negocio

| Unidad de negocio | Nov 2018 | | Abril 2019 | |
|----------------------------------|---------------------------------------|----------------|---------------------------------------|----------------|
| | Regresión | R ² | Regresión | R ² |
| U1: Inversiones Alsacia S.A. | $y = 4,17 + 0,76*x$ | 0,77 | | |
| U2: Subus Chile S.A. | $y = 8,80 + 0,52*x$ | 0,50 | $y = 4,57 + 0,74*x$ | 0,69 |
| U3: Buses Vule S.A. | $y = 1,07 + 0,93*x$ | 0,80 | $y = 3,90 + 0,78*x$ | 0,67 |
| U4: Express de Santiago Uno S.A. | $y = 8,05 + 0,57*x$ | 0,56 | $y = 8,27 + 0,57*x$ | 0,52 |
| U5: Buses Metropolitana S.A. | $y = 3,44 + 0,84*x$ | 0,74 | $y = 3,03 + 0,86*x$ | 0,71 |
| U6: RedBus Urbano S.A. | $y = 3,07 + 0,85*x$ | 0,45 | $y = 2,23 + 0,88*x$ | 0,58 |
| U7: STP Santiago S.A. | $y = 1,22 + 0,91*x$ | 0,80 | $y = 1,35 + 0,90*x$ | 0,82 |
| Metro | $y = -98,96 + 1,01*x$ | 0,98 | $y = -146,9 + 1,01*x$ | 0,98 |
| Metrotren | $y = -66,23 + 0,96*x$ | 0,97 | $y = -91,8 + 0,98x$ | 0,95 |

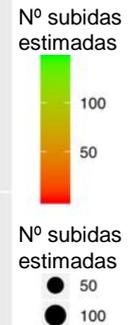
Nº de subidas observadas y estimadas: Servicio T102 00R (Noviembre 2018)



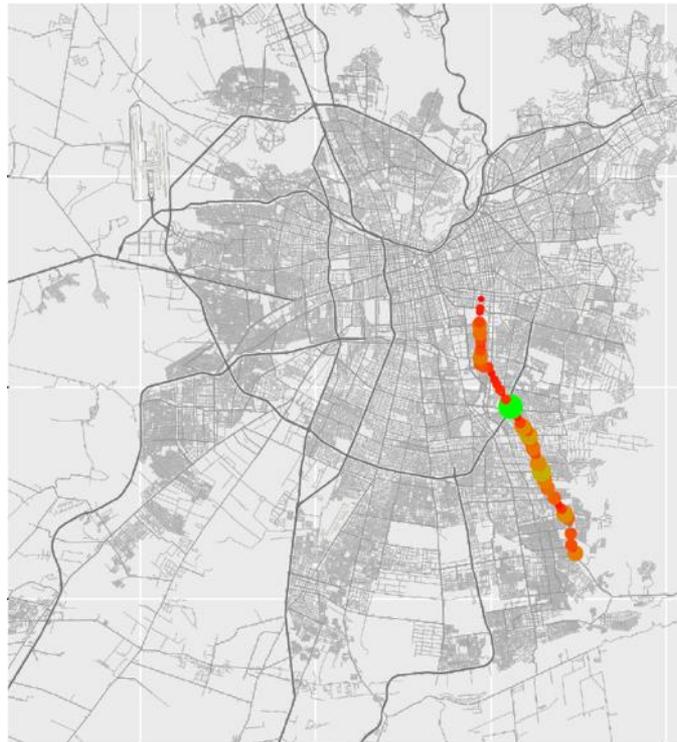
ADATRAP



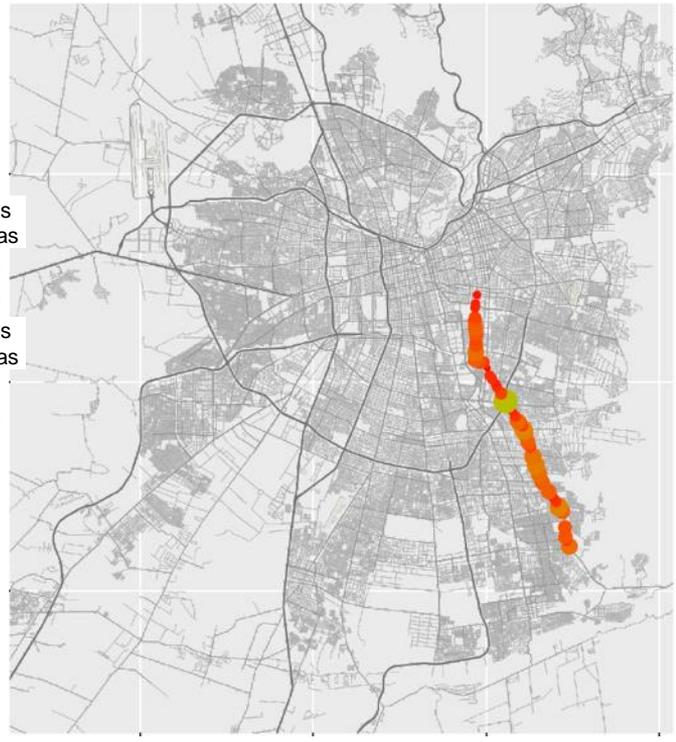
Simulación STE



Nº de subidas observadas y estimadas: Servicio T114 00R (Noviembre 2018)



ADATRAP



Simulación STE

Nº de subidas observadas y estimadas: Servicio T104 00R (Noviembre 2018)



ADATRAP

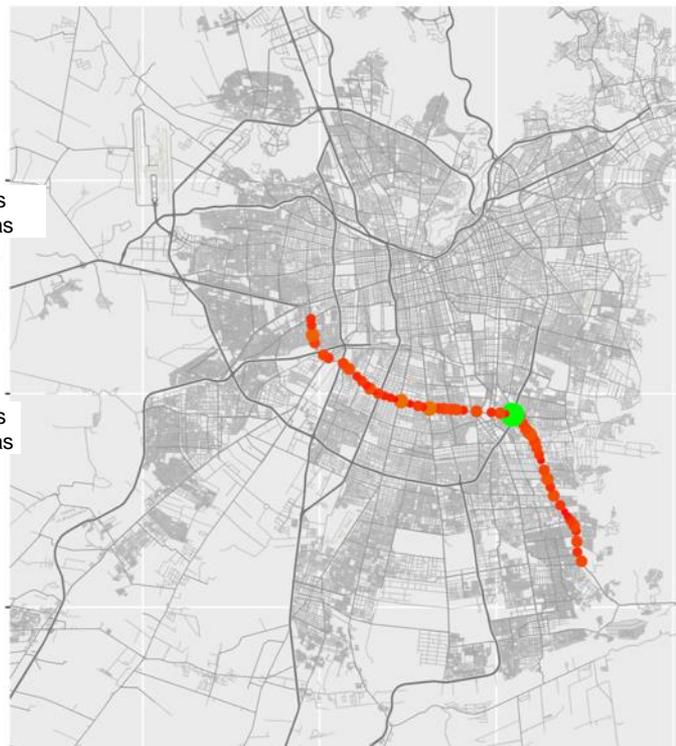


Simulación STE

Nº de subidas observadas y estimadas: Servicio T102 00R (Abril 2019)

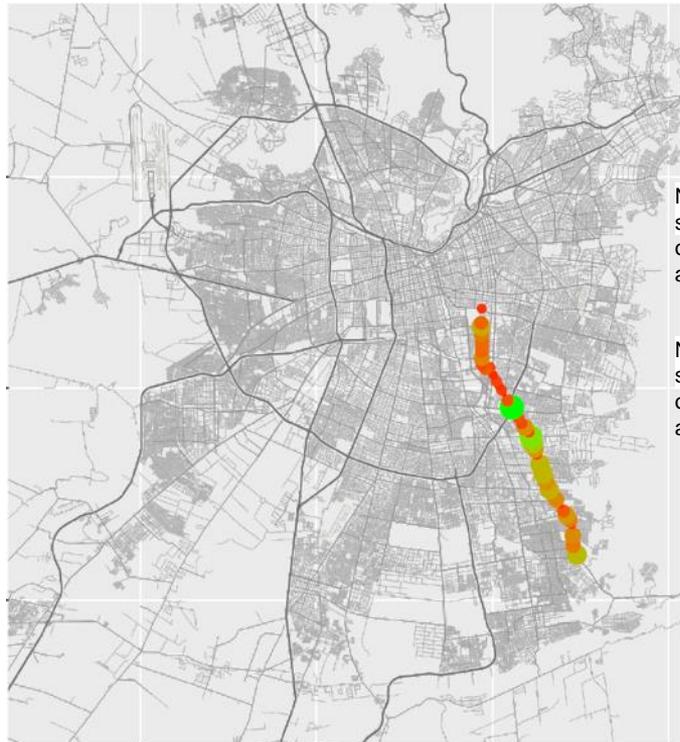


ADATRAP

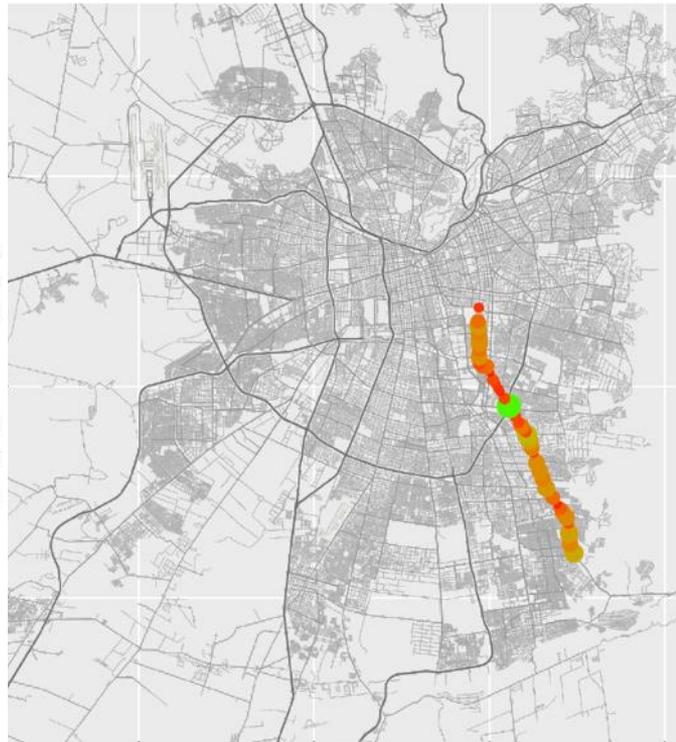


Simulación STE

Nº de subidas observadas y estimadas: Servicio T114 00R (Abril 2019)

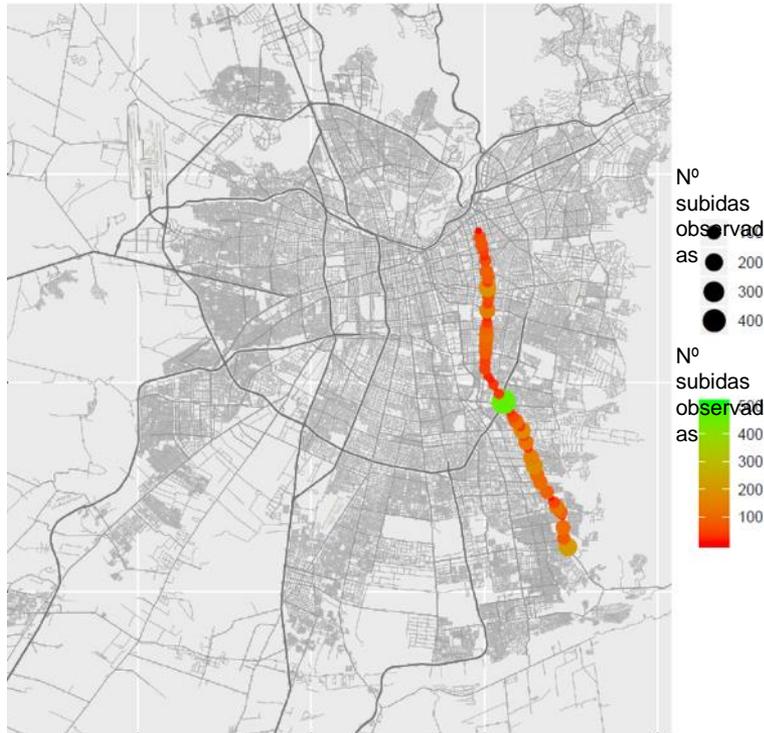


ADATRAP

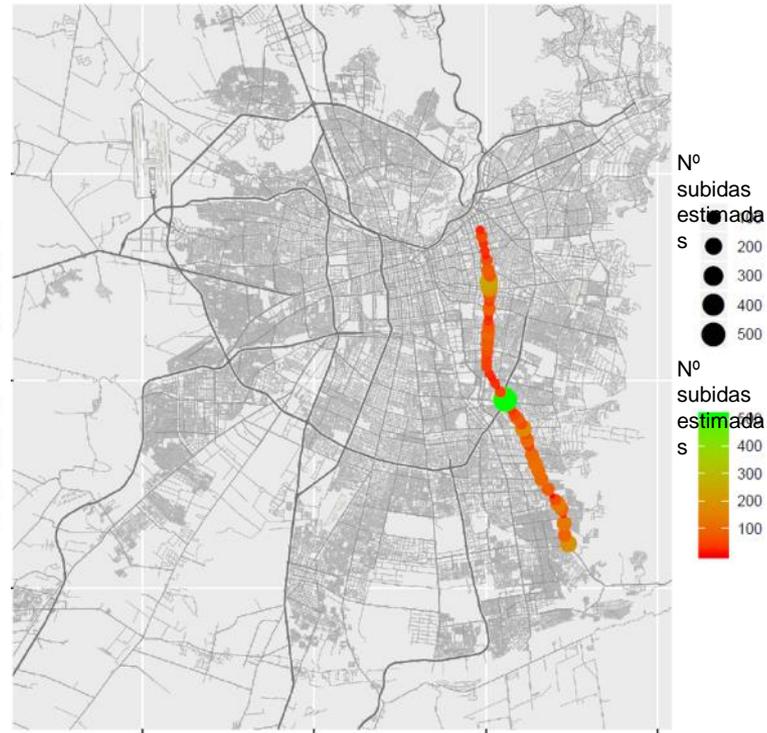


Simulación STE

Nº de subidas observadas y estimadas: Servicio T104 00R (Abril 2019)



ADATRAP



Simulación STE