DISEÑO DE RUTAS EXPRESO PARA REDUCCIÓN DE CONGESTIÓN EN BUSES EN CORREDORES BRT.

CASO DE ESTUDIO: TRANSMILENIO BOGOTÁ

Daniel Jaramillo Ramírez

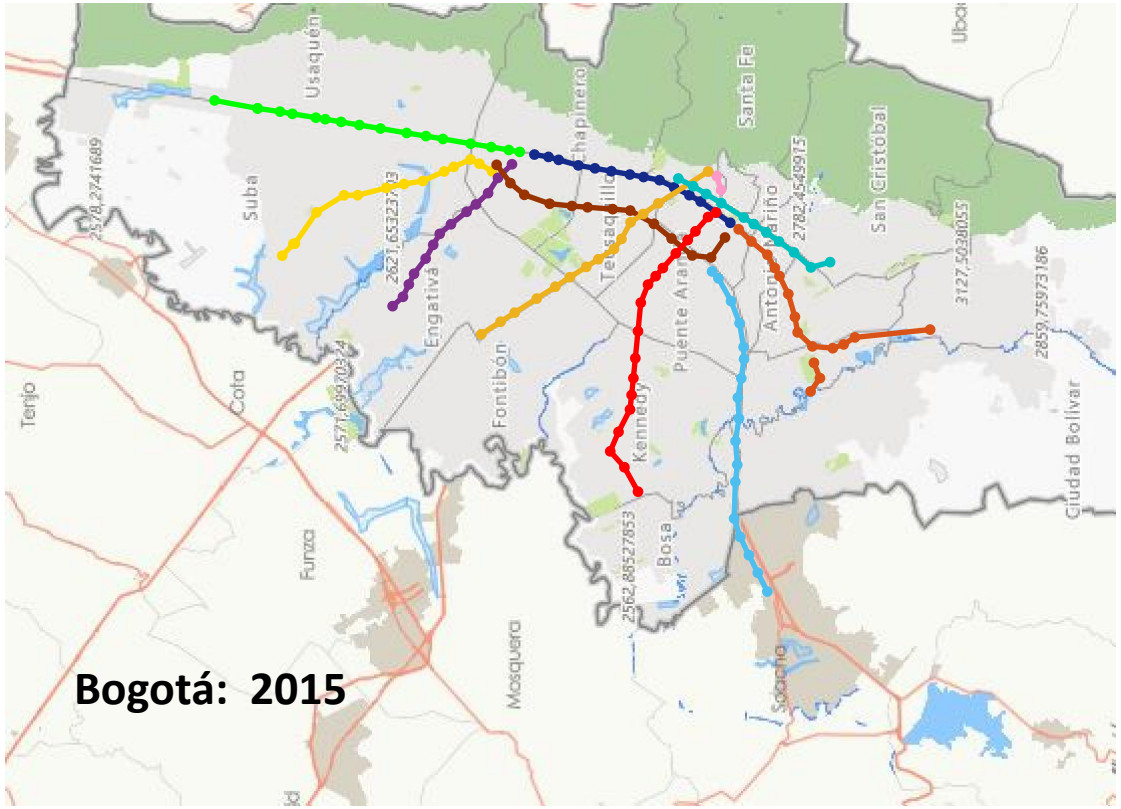
Andrés Felipe García Albarracín

Motivación: Bogotá y Transmilenio

http://www.blogdelaautoescuela.com/america/graves-problemas-de-movilidad-en-cartagena/

http://images.cdn-eltiempo.com/bogota/la-evolucion-de-la-avenida-caracas/14135255

Red BRT: ¿cuántos servicios deben operar?



Bogotá: 2015

- ¡Los BRT evitan transbordos!
- ¡Los BRT tienen servicios expreso!

Supongamos que queremos tener 1 corriente y 2 expresos entre cada terminal…

$$S = 3\binom{T}{2} = 3\frac{T!}{(T-2)!\,2!}$$

$T \rightarrow Terminales$

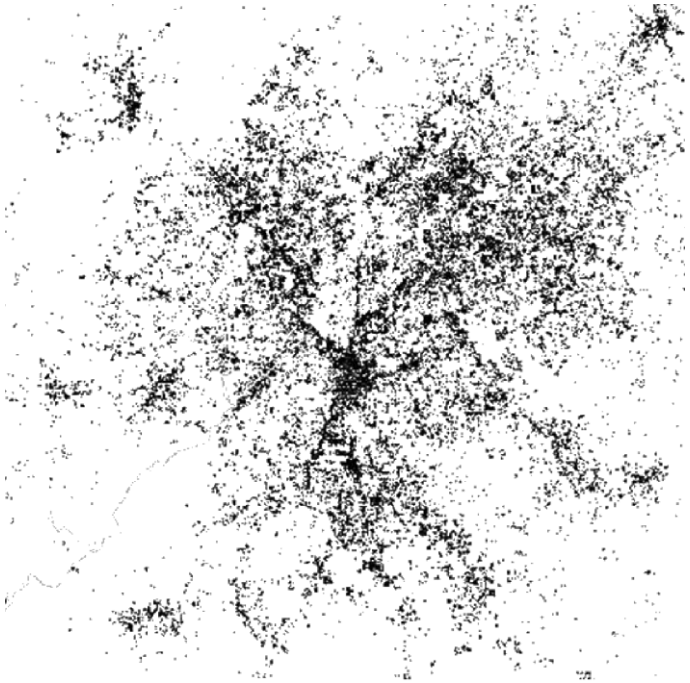
$S \rightarrow Servicios$

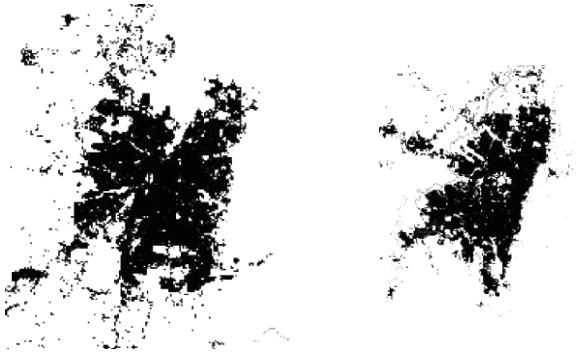
- Si hay 4 terminales: $S = 18$
- Si hay 15 terminales: $S = 315$

Transmilenio (2019): 98 servicios (90 expresos)

(Minimizando tiempos y costos)

Comparación: áreas metropolitanas





Elaboración propia a partir de:
EOC Geoservice Map – Global Urban Footprint

Una ciudad muy densa
=
Mucha congestión

Atlanta
Pob: ~5 M
(21935 px)
228 hab/px

Buenos Aires
Pob: ~15.6 M
(15671 px)
996 hab/px

Santiago
Pob: ~6.5 M
(6018 px)
1080 hab/px

Bogotá
Pob: ~8.5 M
(3190 px)
2665 hab/px

Red BRT: ¿cuántos servicios deben operar?

Transmilenio (2019): 98 servicios (90 expresos)

- Imposibilidad de altas frecuencias
- Varios servicios por puerta (obstrucción/fricción de pasajeros)
- Exceso de demanda en servicios expreso
- Dificultad de uso del sistema para el pasajero
- Dificultad de control y despacho para el operador

¿Cuántos servicios debemos ofrecer para pasar de un BRT a un BRRT?
(Bus Reliable Rapid Transit)

Servicios expreso (SE): cuándo, dónde…

Los servicios expresos traen más beneficios cuando:

- Mayores tiempos de parada
- Mayor número de viajes
- Mayor concentración de viajes en pocos pares OD.
- Mayor carga máxima
- Menor capacidad de vehículos

(Larraín & Muñoz 2016)

… y para qué

El diseño de servicios expresos se ha enfocado normalmente en:

- **Reducir costos y tiempos.**

Proponemos diseñar SE para
reducir congestión en los buses.

¿Podemos tener un sistema de transporte donde todos vayamos sentados?

Diseño de servicios expreso (SE) para reducción de congestión en bus

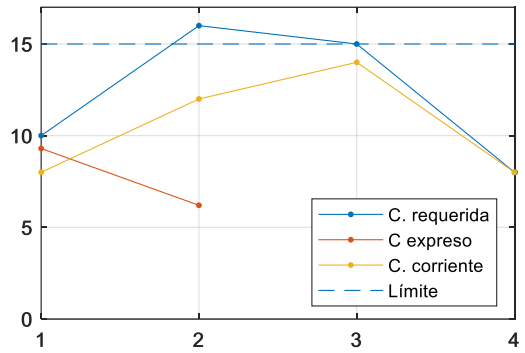
(García Albarracín & Jaramillo-Ramírez 2019)

Para un servicio corriente

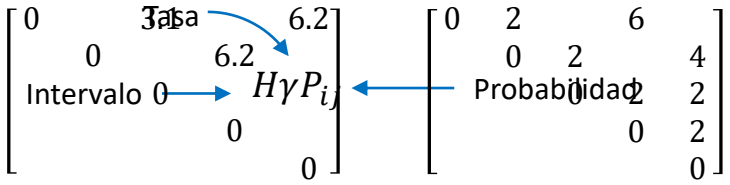
Matriz OD

(Psj promedio / Intervalo)

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 \\ & 0 & 1 & 4 & 2 \\ & & 0 & 1 & 1 \\ & & & 0 & 1 \\ & & & & 0 \end{bmatrix}$$



Para un expreso y un corriente



Sin aumentar la flota, diseñemos un servicio expreso para reducir el pico de carga.

- ¿En qué estaciones parar?
- ¿Cómo repartir la flota?

Para un corriente y un expreso

Suposiciones

- Muy alta frecuencia ($0.5 < H < 3$ min)
- Usuario: Si puede tomar el expreso, lo toma (comportamiento determinístico)

Problema

- Minimizar el pico de carga entre corriente y expreso

Resultados

- Capacidad requerida: **-[10%, 40%]**
- Tiempo de viaje: **+ [5, 15%]**

(Respeto a tener solo un servicio corriente)

Problema de optimización

$$C^* = \min_{\{F_C, F_d, F_e\}, \{\eta_d, \eta_e\}} \{\max\{C_k^c, C_k^d, C_k^e\}\}$$

Combinaciones de flota Pares de rutas expreso

Para una ruta dada, el problema se convierte en

$$C^* = \min_{\{F_C, F_d\}} \left\{\max\left\{\frac{\alpha_{k*}^c}{F^c}, \frac{\alpha_{k*}^d}{F^d}, \frac{\alpha_{k*}^e}{F - F^c - F^d}\right\}\right\}$$

El mínimo del máximo necesariamente aparece cuando las 3 capacidades son iguales.

Por lo tanto, hay una forma cerrada para la repatición de la flota $[F^C, F^d, F^e]$

Comportamiento del usuario

- El usuario informa su viaje al sistema
- El sistema indica la ruta de menor tiempo
- El sistema verifica la ruta (*beacons Wi-Fi* en buses y estaciones)
- Si el usuario no sigue la ruta, su viaje vale más.

El sistema siempre asigna la ruta de menor tiempo.

Algoritmo Sub-óptimo

1. Calcular matriz demanda *x* distancia:

Prob. de cada para OD ← PQ → Distancia de cada par OD

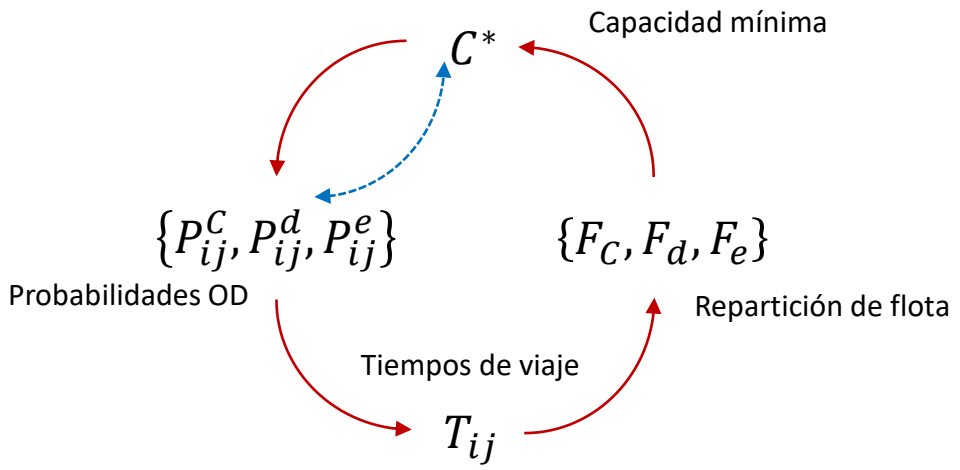
2. Hacer un *ranking* de los pares OD con mayor producto PQ.

3. Incluir las estaciones en la ruta expreso una a una en orden del *ranking*.

4. Calcular la capacidad mínima.

5. Volver al paso 3 hasta agotar todas las estaciones.

Para calcular la capacidad mínima, se requieren las probabilidades de cada servicio…



Asignamos unas probabilidades iniciales → Minimizamos la capacidad → Calculamos las nuevas probabilidades (Iteramos).

Cuando las probabilidades no cambien, **se encuentra la solución**.

Búsqueda semi-exhaustiva

1. Buscamos las 10 estaciones de mayor producto demanda *x* distancia.

2. Realizamos la búsqueda exhaustiva sobre todas las posibles combinaciones de pares de rutas expreso en esas 10 estaciones.

3. Para cada par de rutas, calculamos la mínima capacidad, evaluado todas las combinaciones de flota (en números múltiplos de 8).
   - Para calcular la capacidad debe seguirse el proceso de balanceo de carga descrito en el algoritmo sub-óptimo.

4. Se selecciona la combinación con menor capacidad.

El número de combinaciones de rutas crece como $O(2^{2(S-1)})$.

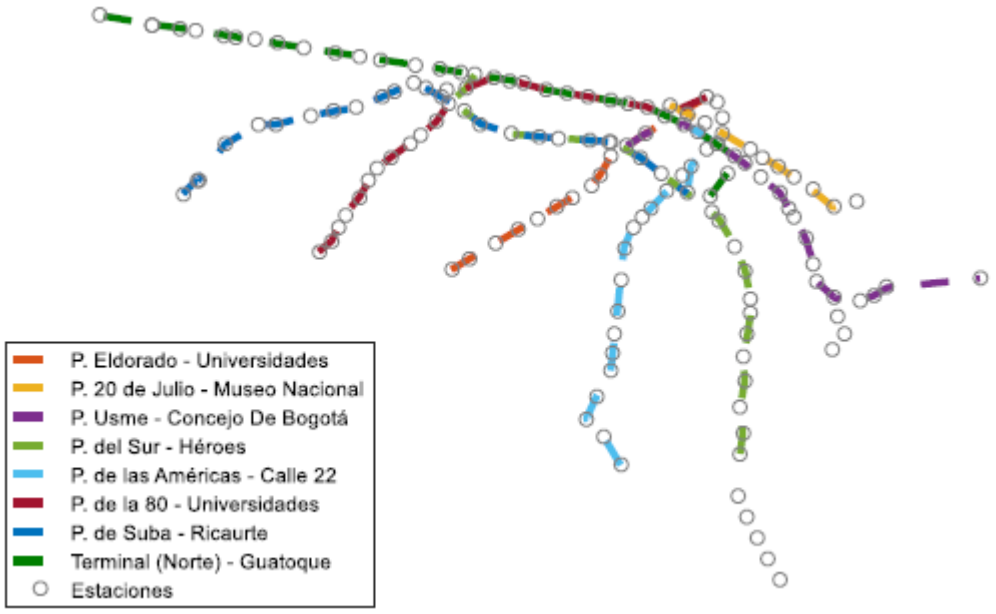
Solución exhaustiva
Para un corredor de 10, 20 y 30 estaciones, el número de posibles soluciones es:

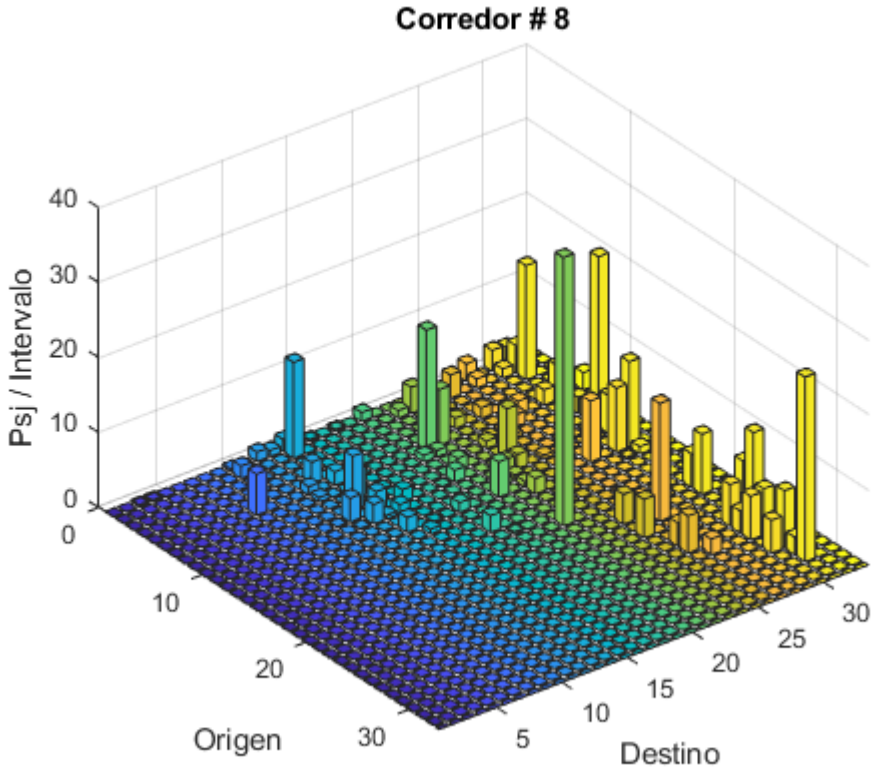
$$N \sim [10^5, 10^{11}, 10^{17}] \times 10^3.$$

Solución semi-exhaustiva
Para cualquier corredor, el número de posibles soluciones **se reduce a**:

$$N \sim 10^5 \times 10^1$$

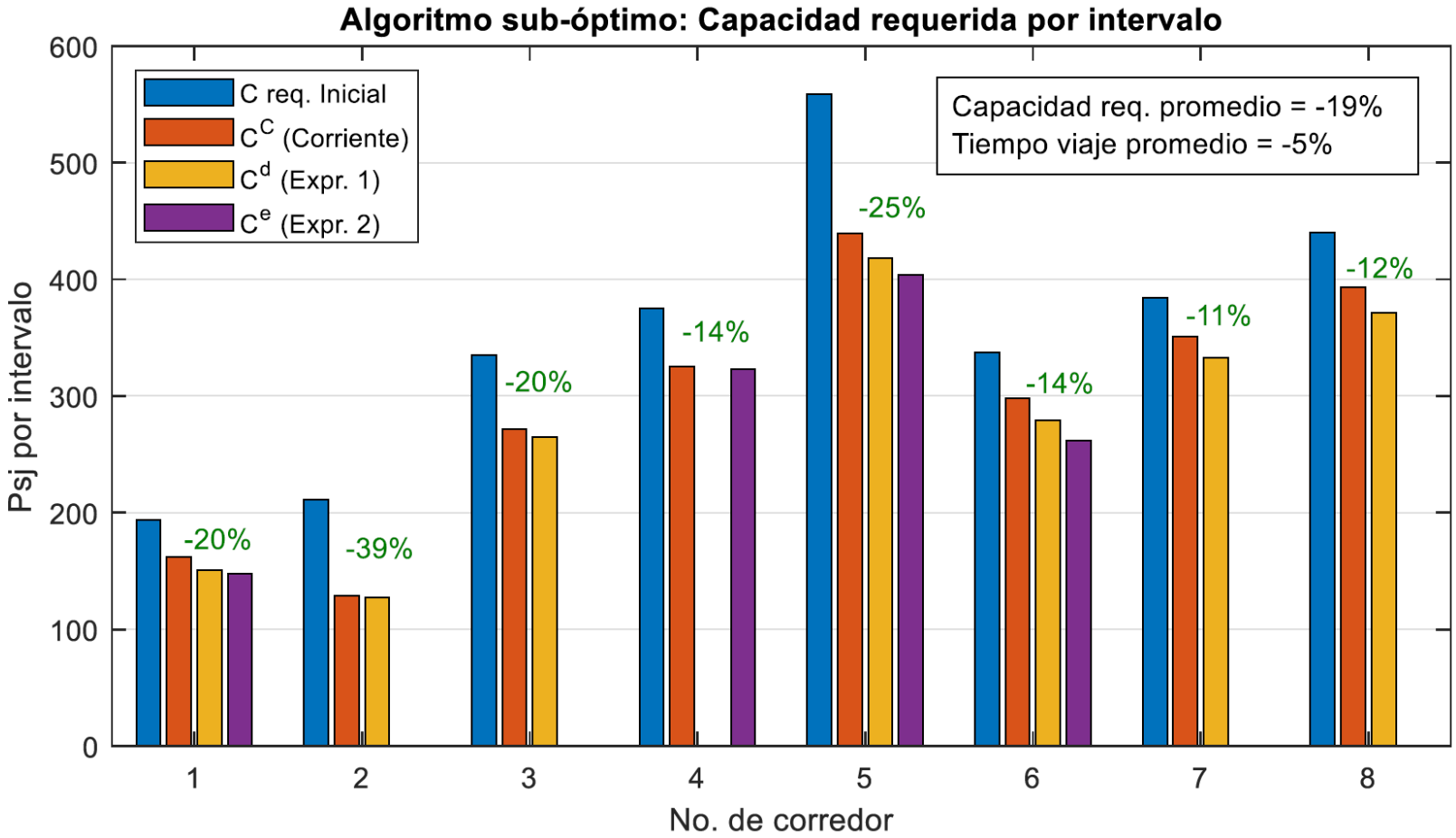
Datos utilizados



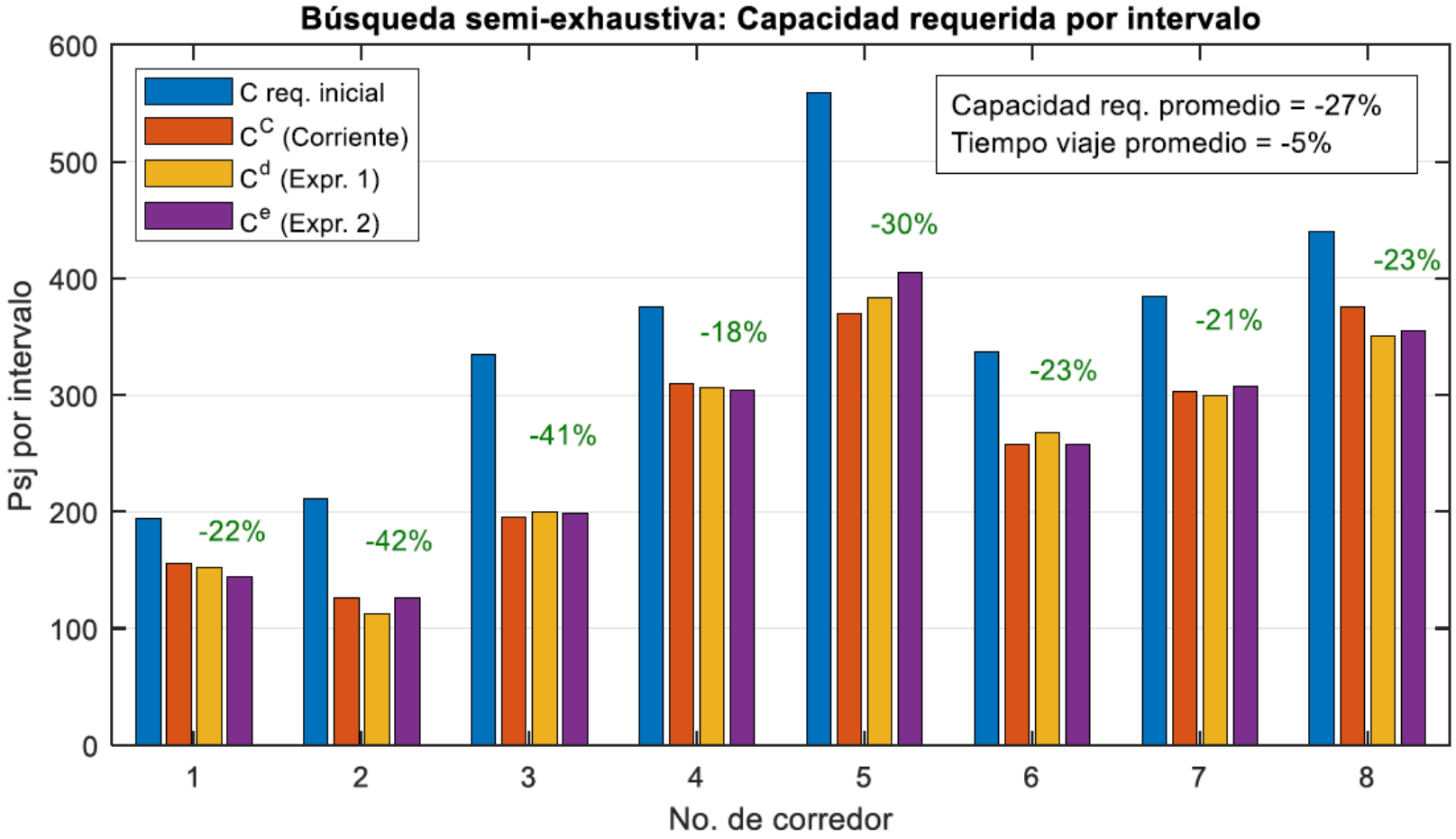


- Matriz OD obtenida de encuesta de movilidad 2015
- Carga de los corredores obtenida de información de torniquet

Resultados: Aloritmo Sub-óptimo



Resultados: Búsqueda Semi-exhaustiva



Resumen / Conclusiones / Discusión

Reducción de capacidad requerida

$[\ 19\%,\quad 27\%\ ]$

A. Sub-óptimo - B. Semi-exh

¡Sin aumentar costos!

En $1/5$ de los corredores reducciones mayores al 33%

¡Mayoría de pasajeros sentados!

Necesidad de múltiples servicios expreso:

El 2° expreso aparece en

$[\ 50\%,\quad 100\%\ ]$

A. Sub-óptimo - B. Semi-exh

A. Sub-óptimo y B. semi-exhaustiva:
reducción de complejidad pero:
¿qué tan lejos están de la solución óptima?

A mayor número de estaciones:

B. semi-exhaustiva $>$ A. Sub-óptimo.

Reducción de tiempo de viaje en $15/16$ soluciones (respecto a toda la flota en servicio corriente).

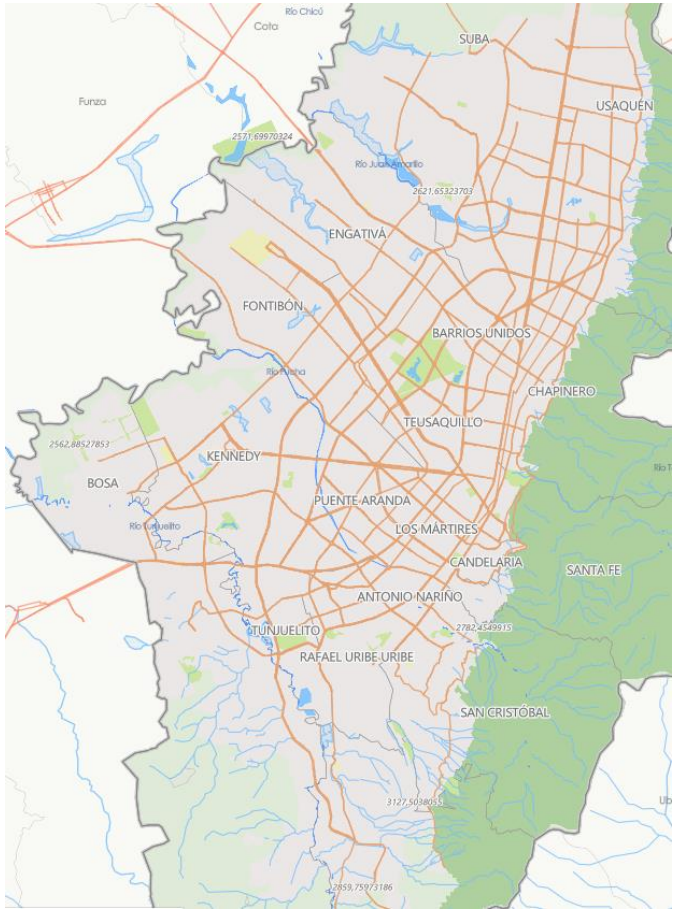
Reducción promedio 5%

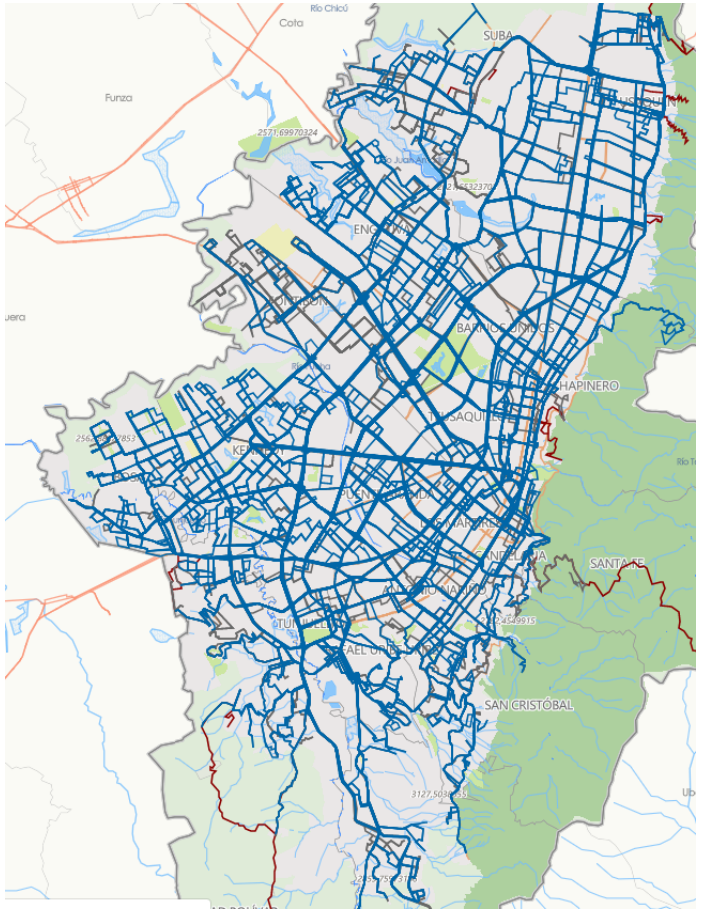
¿Preguntas?...

d-jaramillo@javeriana.edu.co

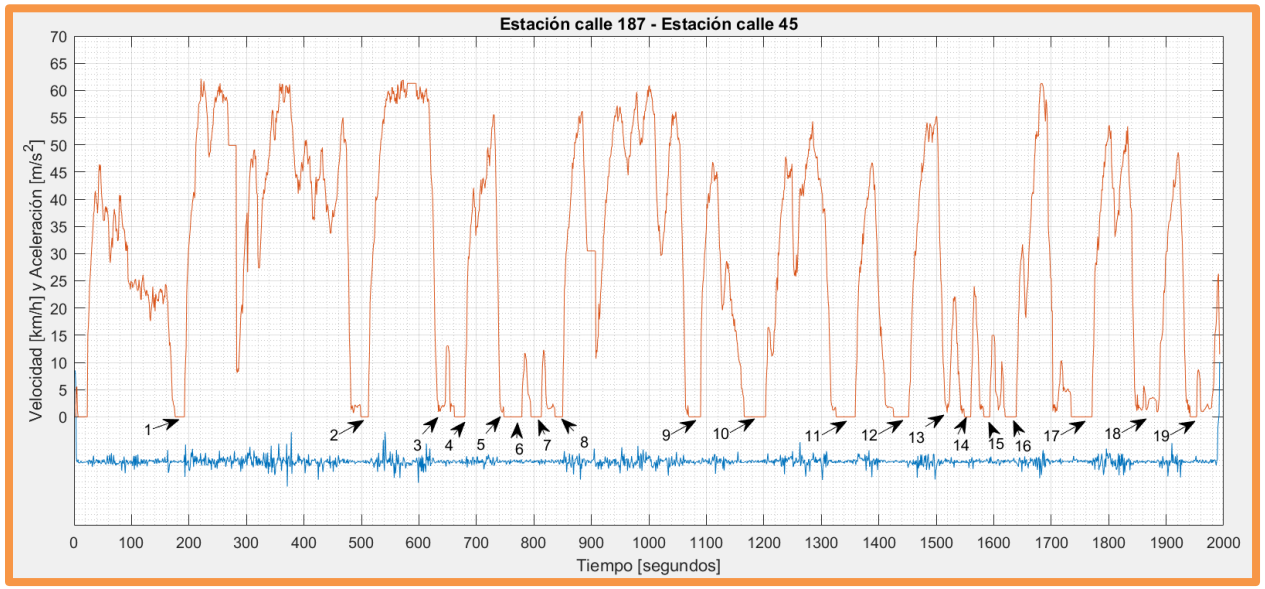
BACKUP

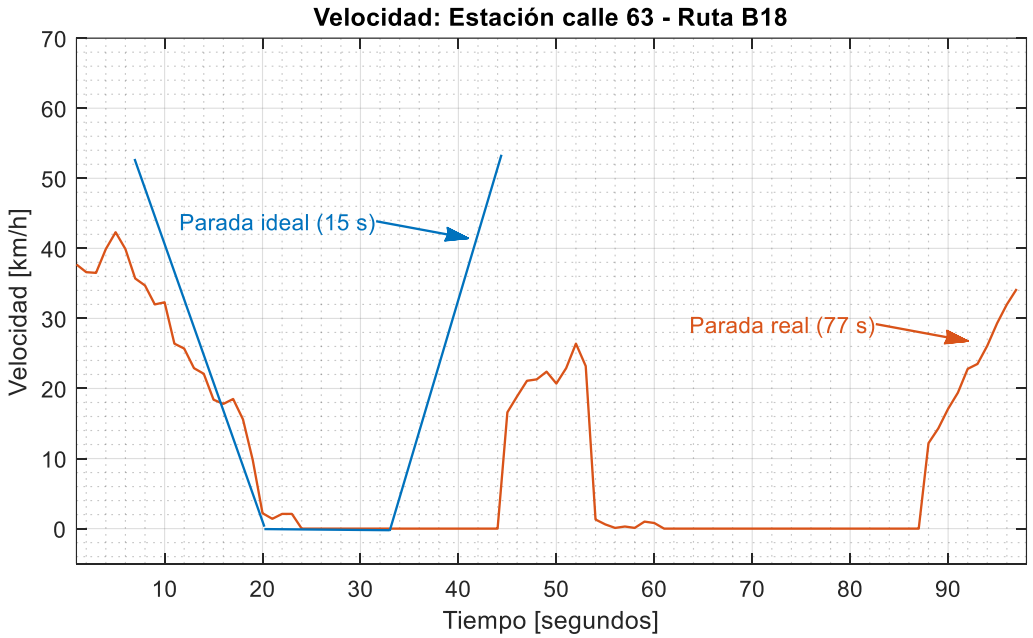
SITP


Río Chicú
Cota
SUBA
Funza
USAQUÉN
ENGATIVÁ
FONTIBÓN
BARRIOS UNIDOS
CHAPINERO
TEUSAQUILLO
KENNEDY
BOSA
PUENTE ARANDA
LOS MÁRTIRES
CANDELARIA
SANTA FE
ANTONIO NARIÑO
TUNJUELITO
RAFAEL URIBE URIBE
SAN CRISTÓBAL


Río Chicú
Cota
SUBA
Funza
CHAPINERO
SANTA FE
SAN CRISTÓBAL

Mediciones: Velocidad de un bus





Perfiles de carga