



Recomendaciones de modos de transporte público para ciudades pequeñas y medianas de Chile

UN ENFOQUE DE OPTIMIZACIÓN

Paul Basnak
Ricardo Giesen
Juan Carlos Muñoz

CCIT, SANTIAGO, 7/10/2019

Motivación: modos de transporte público en ciudades pequeñas y medias



Google Earth®



¿Qué modo(s) minimiza(n) los costos sociales?

Contenido

1. Estado del arte: recomendaciones para STP en ciudades pequeñas y medias
2. Modelos de optimización: grilla uniforme y circular monocéntrico
3. Aplicación a ciudades de Chile: modelo Probit ordinal
4. Conclusiones y futuros pasos

Estado del arte

RECOMENDACIONES DE MODOS DE TRANSPORTE PÚBLICO PARA CIUDADES PEQUEÑAS Y MEDIANAS

Estado del arte: recomendaciones de modos de TP

2 enfoques básicos

Pautas para la selección de modos (umbrales de **población**) según **casos de estudio**

- BRT: >650.000 habitantes (*TRB, 2006*)
- Metro: > 1 millón (*Lehner, 1975*), >5 millones (*Loo & Cheng, 2010*)

Modelos de optimización (minimización de costo, maximización de bienestar)

en **redes** (*Daganzo, 2010; Saidi, 2016; Fielbaum et al., 2017*) o **corredores** (*Byrne, 1975; Tirachini et al., 2014*)

Combinar lo mejor de ambos

- **Sencillez**
- **Bajo requisito de información**

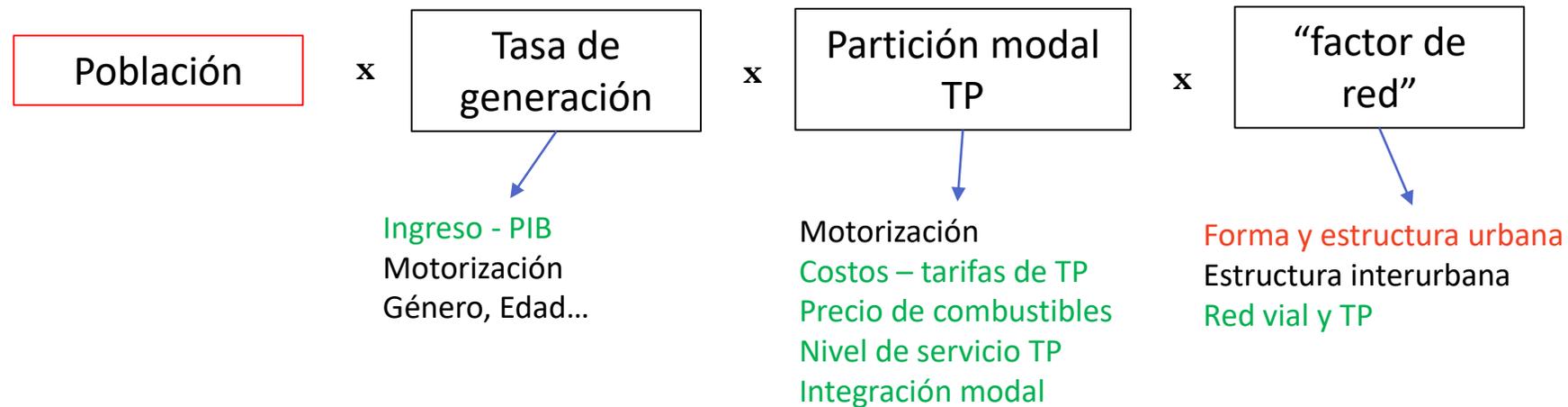
- **Variables omitidas**
- **Umbrales imprecisos, variabilidad**

- **Rigurosidad**
- **Requisito moderado de información**

- **Dependencia de matriz OD** (no siempre conocida)
- **Aplicación "caso a caso"**
- **Omisión de factores en funciones de utilidad/costo**

Estado del arte: determinantes del uso de TP

La demanda de transporte público en un corredor puede representarse como:

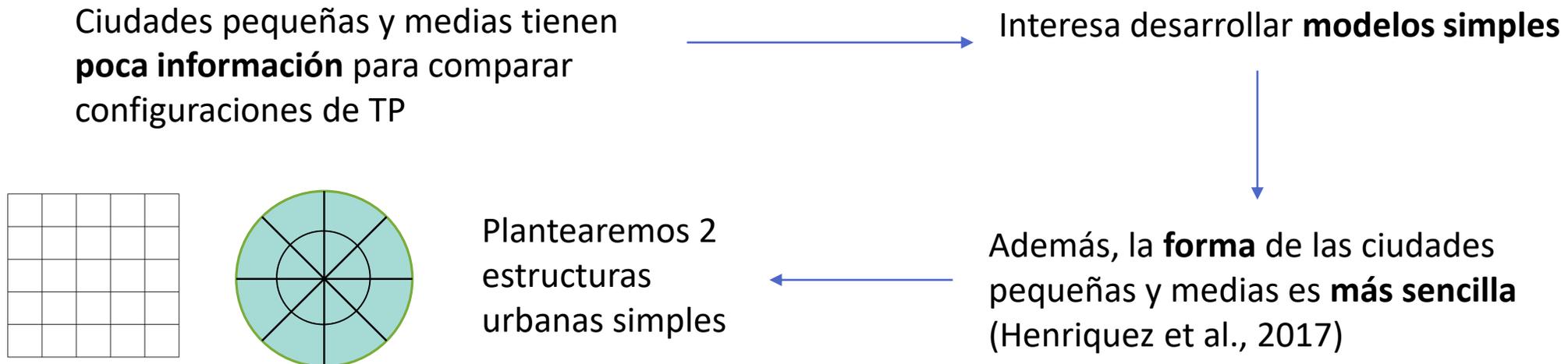


¿Cómo tener en cuenta estas variables en un modelo sencillo y aplicable a distintos tipos de ciudad?

Fuente: Boisjoly et al (2014), Crane (2000), Muñoz et al. (2008), Ortúzar & Willumsen (2011)

Metodología: modelos para ciudades pequeñas y medias

La mayoría de los modelos de optimización son para ciudades grandes (matriz OD conocida), en algunos casos existen modelos estratégicos (ESTRAUS, VIVALDI) que pueden ser utilizados para predecir costos en escenarios específicos



Modelos

OPTIMIZACIÓN PARA CIUDADES EN GRILLA Y CIRCULAR MONOCÉNTRICA

Modelos: hipótesis iniciales

- Por el momento, supondremos:
- **Usuarios homogéneos** en valoración del tiempo
 - Se busca **minimizar costo social total**: $CT = T \cdot C_{op} + N \cdot C_{us}$
 - Partición modal (**demanda** de TP) **fija** para cada ciudad

Desglosando cada componente del costo:

$$\min_{T,Q} [CT = T \cdot \underbrace{(C_f + d \cdot C_d)}_{\text{operación}} + N \cdot \underbrace{(C_{acc} + C_{esp} + C_{via} + C_{trasb})}_{\text{Etapas de viaje}}]$$

Sujeto a: oferta \geq demanda (restricción de capacidad)

Modelos: grilla de densidad uniforme

6 configuraciones:

- Sin transporte público (todos caminan)
- Taxis básicos
- Taxis colectivos (línea única, grilla de servicios)
- Buses (línea única, grilla de servicios)

Sin transporte público (todos caminan)

$$C = \left(\frac{2}{3} * \frac{L}{v_{\text{cam}}} \right) * VST_{\text{cam}} * N$$

Taxis básicos



Estrategia dominante: esperar viaje siguiente en destino anterior

Modelos: grilla de densidad uniforme

Taxis básicos

d(pickup) depende del número de taxis que están disponibles:

$$T_D = T \cdot \left(1 - \frac{t_{\text{viaje}} + t_{\text{pickup}}}{1h}\right) \quad d_{\text{pickup}} = 0,69 \cdot L \cdot T_D^{-0,505}$$

$$C_{\text{us}} = C_{\text{acc}} + C_{\text{esp}} + C_{\text{via}} = VST_{\text{acc}} \cdot \frac{1}{30 \cdot v_{\text{acc}}} + VST_{\text{esp}} \cdot \frac{0,69L}{v} \cdot T_D^{-0,505} + VST_{\text{via}} \cdot \frac{2 \cdot L}{3 \cdot v}$$

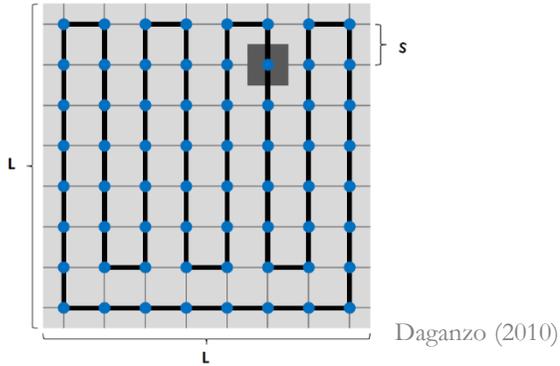
operando:

$$\min_T \left[CT = T \cdot C_f + N \cdot \left(\frac{2L \cdot C_d}{3 \cdot v} \cdot \left(\frac{2 \cdot L}{3} + 0,69 \cdot L \cdot T_D^{-0,505} \right) + VST_{\text{acc}} \cdot \frac{1}{30 \cdot v_{\text{acc}}} + VST_{\text{esp}} \cdot \frac{0,69L}{v} \cdot T_D^{-0,505} + VST_{\text{via}} \cdot \frac{2 \cdot L}{3 \cdot v} \right) \right]$$

$$\text{s.a. } \frac{N}{T} * \left(\frac{2 \cdot L}{3} + 0,69 \cdot L \cdot T_D^{-0,505} \right) < 1/v \quad (\text{proporción del tiempo en movimiento} < 1)$$

Modelos: grilla de densidad uniforme

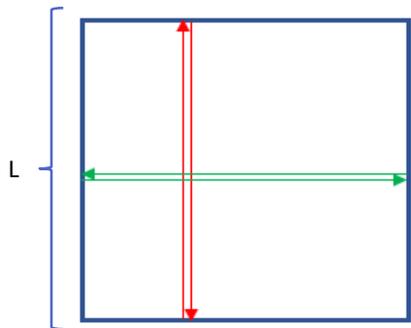
Colectivos (buses) línea única



$$\min(T, s) \left[CT = T \cdot (C_f + v \cdot C_d) + N \cdot \left[VST_{acc} \cdot \frac{2 \cdot s/4}{v_{acc}} + VST_{esp} \cdot \frac{L^2}{s \cdot v \cdot T} \cdot [f(\mathbf{z})] + \left(VST_{via} \cdot \frac{L^2}{4 \cdot v \cdot s} \right) \right] \right]$$

$$\text{s.a.} \quad T * s \geq N * \frac{L^2}{v+4+2,5}$$

Colectivos (buses) líneas paralelas



$$\min(T, Q) \left[CT = T \cdot (C_f + v \cdot C_d) + N \cdot \left(VST_{acc} \cdot \frac{L}{3 \cdot Q \cdot v_{acc}} + VST_{esp} \cdot \frac{2 \cdot L \cdot Q \cdot (1 + n_T)}{T \cdot v} \cdot [f(\mathbf{z})] + VST_{via} \cdot \frac{d_{via}(Q)}{v} + \Delta \cdot n_T \right) \right]$$

$$\text{s.a.} \quad T * \geq N * \frac{(1+n_T(Q)) * d_{via}(Q)}{5 * v}$$

Modelos: circular monocéntrico

Ciudad circular de radio R, dos zonas:

- Zona interna, de radio “r” y densidad constante.
- Zona externa que rodea a la anterior, con densidad inversamente proporcional al radio.

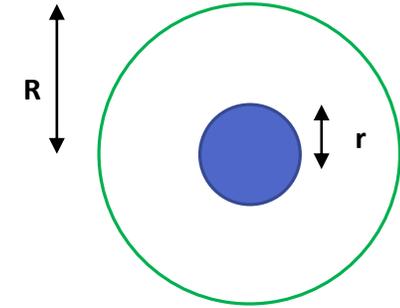
Red vial de densidad infinita

4 configuraciones:

- Sin transporte público (todos caminan)
- Taxis básicos (optimización flota)
- Taxis colectivos líneas radiales (optimización flota, densidad)
- Buses líneas radiales (optimización flota, densidad, paraderos)

Sin transporte público (todos caminan)

$$C = \left(\frac{1}{2} * \frac{r + R}{v_{cam}} \right) * VST_{cam} * N$$



Todo anillo de espesor “dr”
genera igual cantidad de viajes

Modelos: circular monocéntrico

Taxis básicos

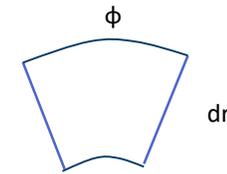


Distribución de taxis es tal que el beneficio promedio para cualquier ubicación es el mismo:

$$B(r) = I - C = cte$$

Enfoques de modelación:

Sistema M/M/1 (1 vehículo por zona, FIFO) (Daganzo y Ouyang, 2019)



Anillos con múltiples vehículos, se atiende el viaje más cercano

→ Densidad de taxis decrece con el radio, cantidad de taxis / dr crece con el radio

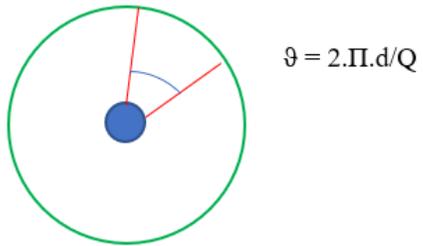
$$d_{pickup} = \alpha \cdot R \cdot T_D(r)^{-\beta} \quad \text{Donde } \alpha, \beta \text{ dependen de la relación } r/R$$

$$\rightarrow \min_T \left[CT = T \cdot C_f + N \cdot \left(C_d \cdot (R + r + \alpha \cdot R \cdot T_D^{-\beta}) + VST_{esp} \cdot \frac{\alpha \cdot R}{v} \cdot T_D^{-\beta} + VST_{via} \cdot \frac{(r + R)}{2 \cdot v} \right) \right] \quad \text{s.a. } t_{esp}(T_D) \geq 0$$

Modelos: circular monocéntrico

Taxis colectivos

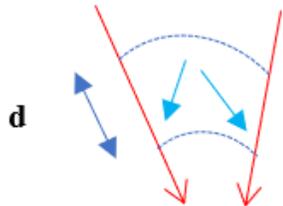
$$\min(T, \vartheta) \left[CT = T \cdot (C_f + v \cdot C_d) + N \cdot \left[VST_{acc} * \frac{\pi(r + R)}{3Q \cdot v_{acc}} + VST_{esp} * \left(\frac{RQ}{vT} * P + \frac{3RQ}{vT} * (1 - P) \right) + VST_{via} * \frac{r + R}{2 \cdot v} \right] \right]$$



$$s.a. \quad 3,3 * T * \frac{v}{2R} \geq N$$

Buses

$$\min(T, \varphi, d) \left[CT = T \cdot (C_f + v \cdot C_d) + N \cdot \left[\frac{VST_{acc}}{v_{acc}} * \left(\frac{\pi(r + R)}{3Q} + \frac{d}{2} \right) + VST_{esp} * \left(\frac{RQ}{vT} * P + \frac{3RQ}{vT} * (1 - P) \right) + VST_{via} * \frac{r + R - d}{2 \cdot v} \right] \right]$$



$$s.a. \quad 33 * T * \frac{v}{2R} \geq N$$

Aplicación a ciudades de Chile

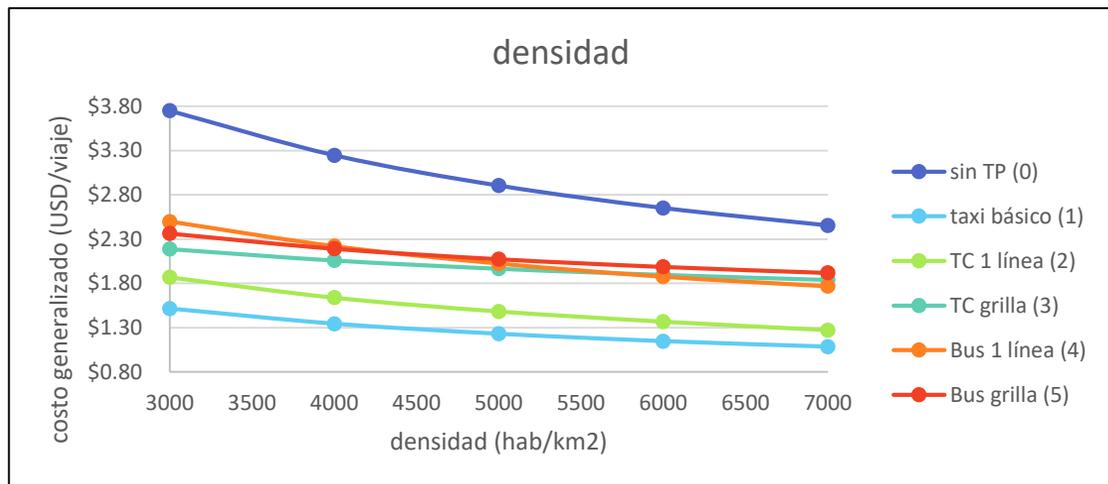
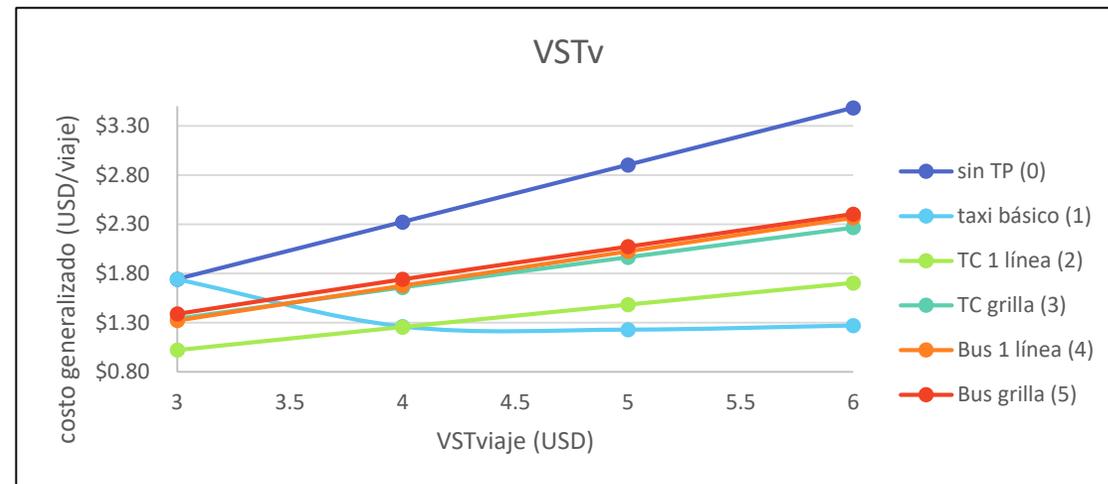
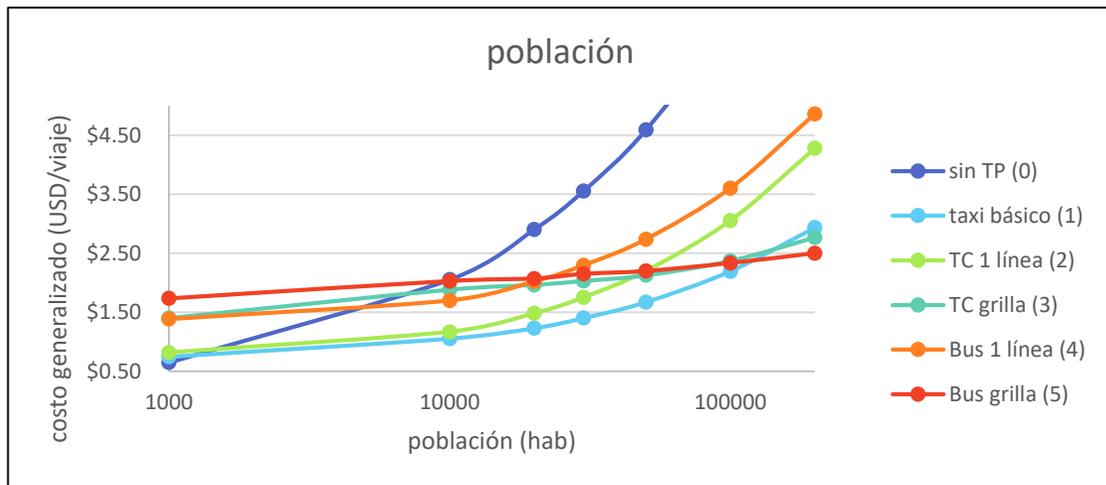
CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS DE TRANSPORTE PÚBLICO Y MODELO PROBIT ORDINAL

Escenarios: hipótesis adicionales

Muestra: 54 localidades de Chile (300 – 187.000 hab)

Parámetros tecnológicos				Parámetros socioeconómicos		
	TC	Bus	Taxi			fuelle:
v0 (km/h)	25	25	30	tasa de generación	2.85	<i>promedio encuestas OD - Sectra</i>
va (km/h)	5	5	5	viajes HP_AM (%)	14%	<i>promedio encuestas OD - Sectra</i>
CO_fijo (USD/h)	8	15	8	partición modal TP (%)	variable	<i>encuestas OD Sectra (regresión lineal)</i>
CO_d (USD/km)	0.2	0.4	0.2	VST_viaje (USD/hora)	variable	
cap	4	40		multiplicador VST espera	1.5	<i>Raveau et al. (2017)</i>
detención (s/pax)	10	3		multiplicador VST acceso	2.2	<i>Raveau et al. (2017)</i>
detención (s/parada)		10		penalización x trasb (min)	10	
tarifa base	0.6	0.5	0.5			
tarifa/km			1			

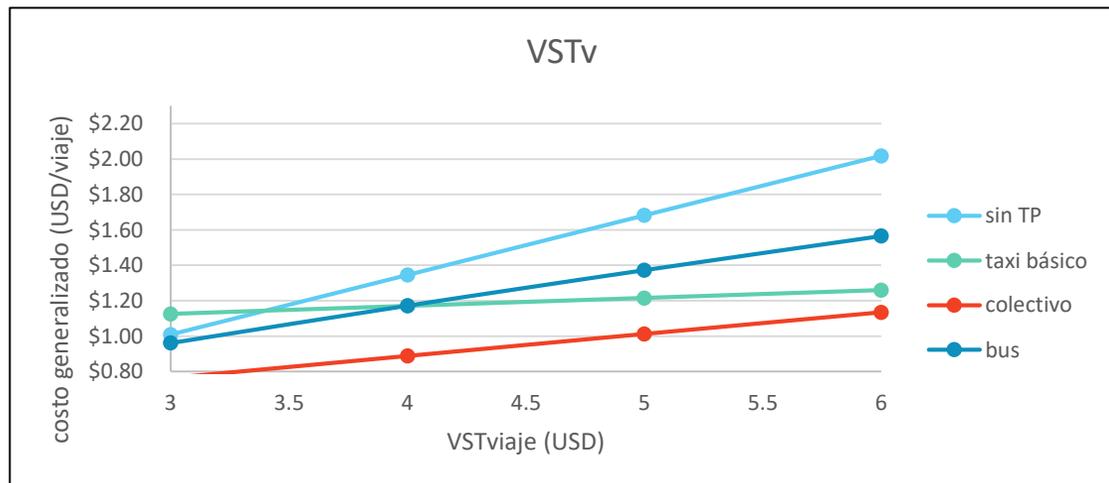
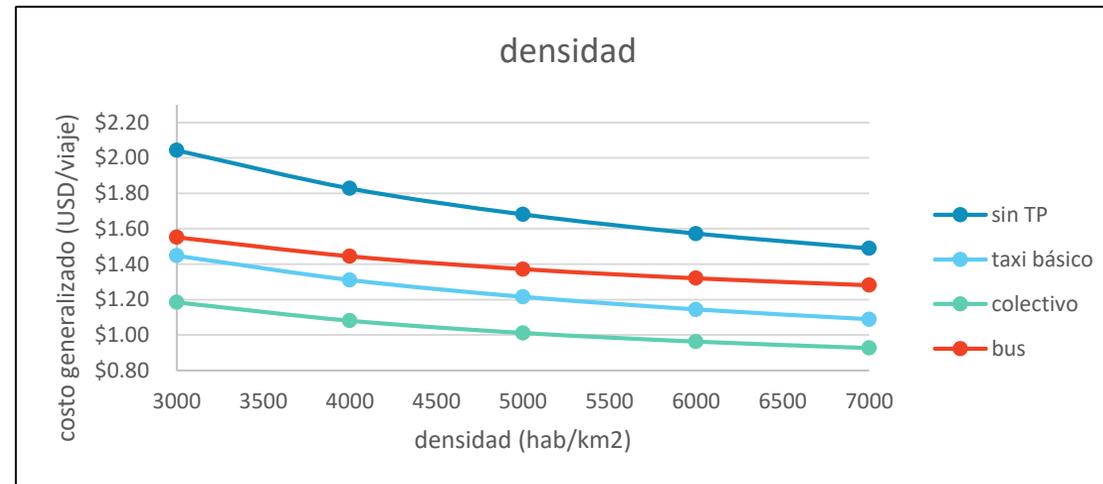
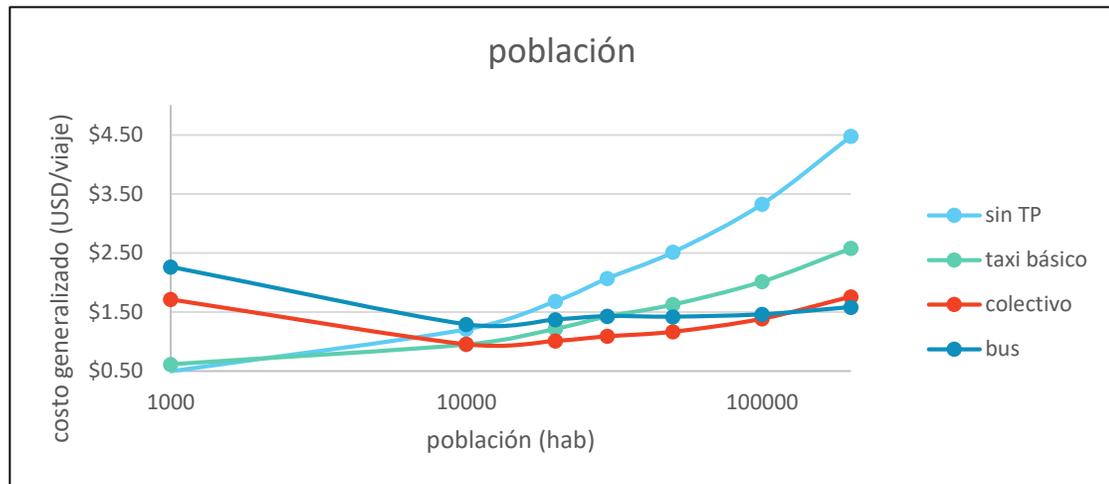
Escenarios: modelo en grilla



Mayor capacidad (bus) favorecido con:

- Mayor población
- Menor ingreso
- Menor densidad

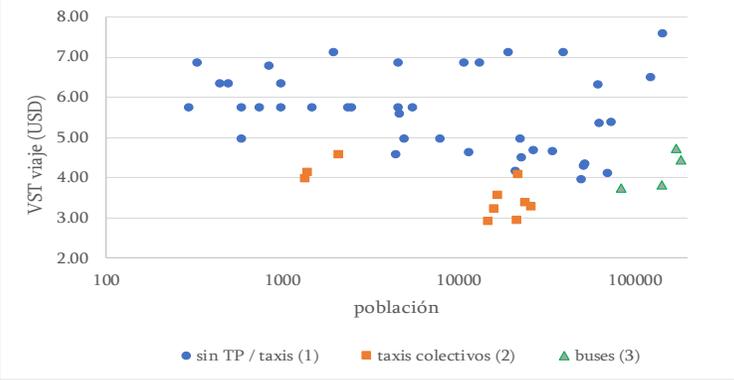
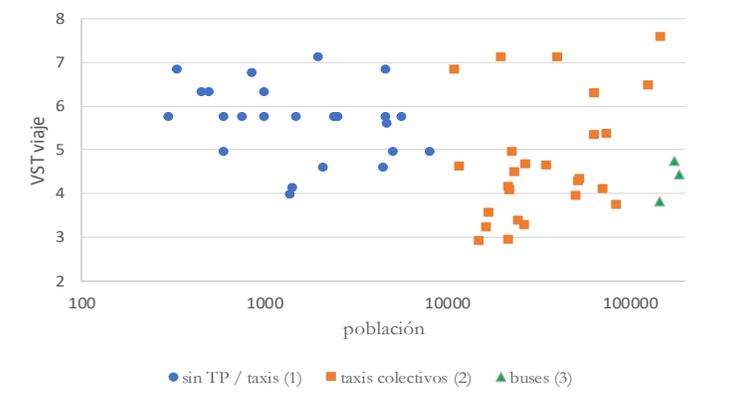
Escenarios: modelo circular



Mayor capacidad (bus) favorecido con:

- Mayor población
- Menor ingreso
- Menor densidad

Sistemas de TP : modos existentes y recomendados

Modelo	Modos recomendados según población y VST de viaje	Modos recomendados y existentes																					
Grilla densidad uniforme		<table border="1" data-bbox="1600 501 1997 694"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2">grilla</th> <th colspan="3">clasificación</th> </tr> <tr> <th>I</th> <th>II</th> <th>III</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="3">tipo ST</th> <th>I</th> <td>24</td> <td>4</td> <td>0</td> </tr> <tr> <th>II</th> <td>6</td> <td>4</td> <td>0</td> </tr> <tr> <th>III</th> <td>11</td> <td>1</td> <td>4</td> </tr> </tbody> </table>	grilla		clasificación			I	II	III	tipo ST	I	24	4	0	II	6	4	0	III	11	1	4
grilla		clasificación																					
		I	II	III																			
tipo ST	I	24	4	0																			
	II	6	4	0																			
	III	11	1	4																			
Circular monocéntrico		<table border="1" data-bbox="1556 896 2033 1243"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2">circular</th> <th colspan="3">clasificación</th> </tr> <tr> <th>I</th> <th>II</th> <th>III</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th rowspan="3">tipo ST</th> <th>I</th> <td>24</td> <td>4</td> <td>0</td> </tr> <tr> <th>II</th> <td>1</td> <td>9</td> <td>0</td> </tr> <tr> <th>III</th> <td>0</td> <td>13</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table>	circular		clasificación			I	II	III	tipo ST	I	24	4	0	II	1	9	0	III	0	13	3
circular		clasificación																					
		I	II	III																			
tipo ST	I	24	4	0																			
	II	1	9	0																			
	III	0	13	3																			

- Sin TP/taxis: I
- Taxis colectivos: II
- Buses: III

Sistemas de TP : modelo Probit ordinal

Población, densidad e ingreso tienen relación ordenada con la capacidad del modo recomendado

Se plantea un modelo **Probit ordinal**, cuya VD es el modo recomendado:

- Sin TP/taxis: I
- Taxis colectivos: II
- Buses: III

Ejemplo (modelo circular monocéntrico):

Sistemas de TP : modelo Probit ordinal (circular monocéntrico)

Una combinación lineal de 3 variables (población, densidad, ingreso) condensa las recomendaciones para todas las localidades de la base de datos:

Parámetros del modelo		Coeficientes de variables	
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
ρ^2	1	β Población (raíz)	1.34
Significancia (Chi-2)	100%	β Densidad (raíz)	-0.93
FC(%)	100%	β Ingreso (raíz)	0.185
EAM (%)	0%	/cut1 (I-II)	-83.8
ECM (%)	0%	/cut2 (II-III)	298.6

$$\text{Score} = 1.34 * \text{raíz}(\text{población}) - 0.93 * \text{raíz}(\text{densidad}) - 0.185 * \text{raíz}(\text{ingreso medio/hogar})$$

< -83.8 : I (sin TP-taxis)

-83.8 a 298.6 : II (colectivos)

> 298.6 III (buses)

Conclusiones y futuros pasos

Conclusiones

En líneas generales, los modelos de optimización reflejan el patrón esperado

- Ciudades más grandes deberían adoptar modos de mayor capacidad
- A mayor ingreso, mayor eficiencia del taxi básico

Probit ordinal permite establecer un criterio simple para recomendar modos, sin análisis “caso a caso”

- Combinación lineal de 3 atributos relevantes y disponibles para cualquier localidad (población, densidad, ingreso)

También existen diversas **oportunidades de mejora**:

Futuros pasos

Hipótesis a relajar en ambas estructuras:

Partición modal variable, usuarios heterogéneos, congestión

Restricciones adicionales al tamaño de flota (rentabilidad en taxis básicos y colectivos, nivel de servicio)

Variantes de forma: rectangular, fracción de círculo (seleccionados por parámetros de forma urbana)

Criterio para definir qué estructura se adapta mejor a cada ciudad...

Si no hay coincidencia entre ambas recomendaciones, debe encontrarse un criterio disponible y consistente (problema: **matriz OD desconocida**)

(40% de la BD no coincide la recomendación)

Índice normalizado de construcción
Zonas climáticas locales
Mediante análisis de imágenes satelitales
(Henriquez et al., en publicación)

Uso de suelo como predictor (Lee S. et al., 2013; Lee & Holme, 2015)

¡Gracias!