

Diseño Óptimo de Transporte Público considerando el Efecto sobre la Estructura Urbana

Leonardo J. Basso (Universidad de Chile)

Hugo Silva (Universidad Católica)

Nicolás Esperguiel (Universidad de Chile)

Contenido

1. Motivación
2. Modelo
3. Estructura Urbana y Transporte Público
4. Diseño Óptimo
5. Conclusiones

1. Motivación

- Daniels y Warnes (1980)

A comienzos del siglo XIX:

- El modo predominante era la caminata
- Ciudades eran compactas con altas densidades y calles estrechas

El desarrollo de la tecnología de transporte:

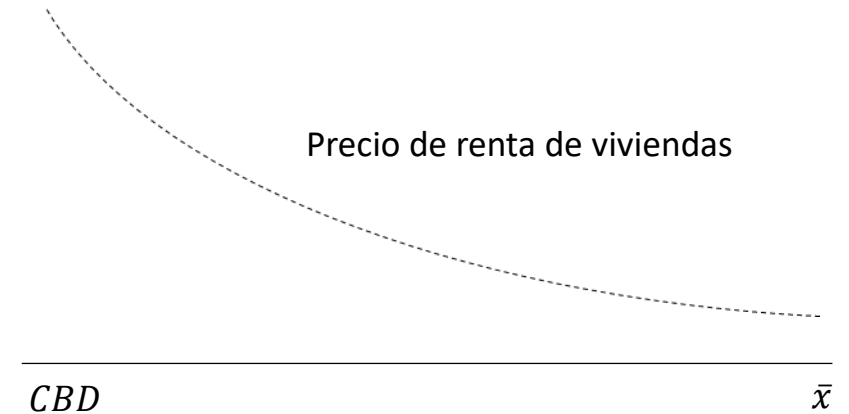
- Permite viajar largas distancias sin gastar un mayor tiempo
 - Alienta la expansión urbana
- Rae (1968): “La metrópolis moderna es un producto de la tecnología de transporte”

1. Motivación

- Gibbons y Machin (2005) → Precio de viviendas aumenta cuando la distancia a una estación disminuye
- Agostini y Palmucci (2008) y Sagner (2009) → Estudian el efecto en el precio de las viviendas inducido por las líneas de Metro en Santiago
- Baum-Snow (2006) → Autopistas explican una parte importante de la descentralización de la población urbana.

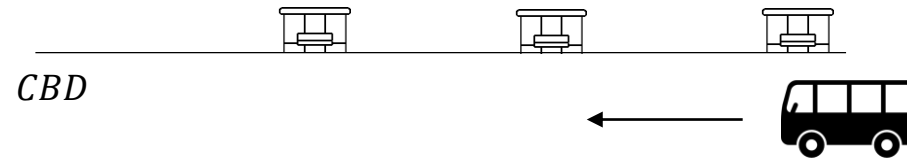
1. Motivación

- Alonso (1964), Mills (1967) y Muth (1969):
 - Trade-off entre el precio de las viviendas y el costo de viaje
- Análisis microeconómico de transporte público
 - Corredores aislados
 - Estructura espacial
 - Estructuras urbanas dadas



2. Modelo

- Ciudad monocéntrica lineal con estaciones de transporte público



- Actores relevantes:
 - Residentes (consumidores)
 - Desarrolladores inmobiliarios
 - Dueños de terrenos ausentes
 - Operador de Transporte público
 - Planificador urbano

2. Modelo

2.1 Residentes (consumidores)

- Problema del consumidor:

$$\begin{array}{ll} \max & U(c, q) \\ \text{s. a} & I = c + pq + \rho \end{array}$$

- CPO:

$$\frac{\partial U(I - pq - \rho, q) / \partial q}{\partial U(I - pq - \rho, q) / \partial c} = p$$

- Condición de equilibrio espacial

$$V(I - pq - \rho, q) = u$$

2. Modelo

2.2 Desarrolladores Inmobiliarios (Oferta de viviendas)

- Beneficio del productor:

$$\Pi = p \cdot H(\kappa, L) - i\kappa - rL$$

$$\Pi = L \cdot (p \cdot H(\kappa/L, 1) - i\kappa/L - r)$$

- CPO:

$$ph'(S) = i$$

- Condición de beneficio nulo:

$$ph(S) - iS = r$$

2. Modelo

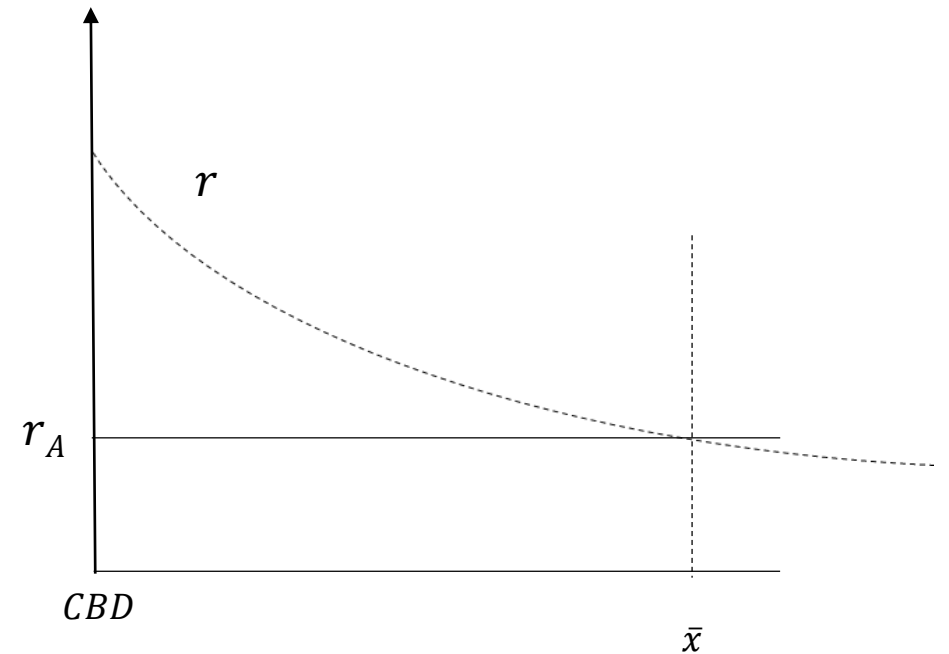
2.3 Límite Urbano

$$r(\bar{x}, I, \rho, u) = r_A$$

$$\int_0^{\bar{x}} D(x) dx = \Omega$$

- Densidad poblacional:

$$D = \frac{h(S)}{q}$$



2. Modelo

2.4 Costo generalizado de viaje

- Residentes que caminan al CBD

$$w \cdot \frac{x}{\mu}$$

- Usuarios de Transporte Público

$$e + w \frac{(x - nd)}{\mu} + \frac{w}{2f} + w \left(\frac{nd}{v} + n(t_a + t_d) + t_b \frac{(\Omega - \int_0^{\bar{x}_0} D(x) dx)}{2\eta f} + t_s \frac{\int_0^{\bar{x}_{n-1}} D(x) dx}{\eta f} \right)$$

2. Modelo

2.5 Transporte Público

- Máximo número de estaciones:

$$N = \left\lceil \frac{\bar{x}}{d} \right\rceil$$

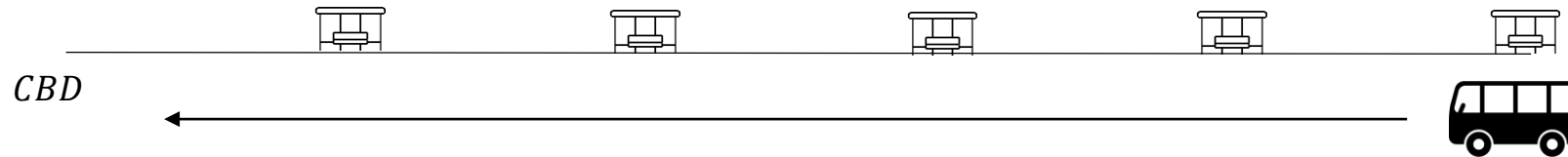
- Demanda

$$Y = \frac{\int_{\bar{x}_0}^{\bar{x}} D(x) dx}{\eta}$$

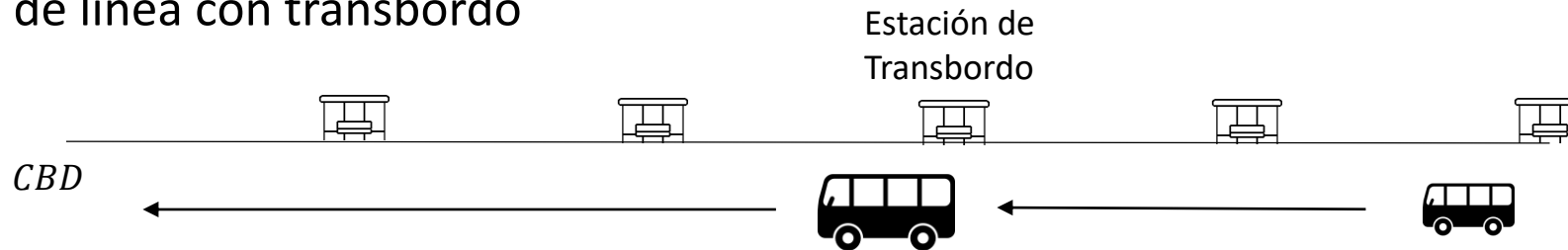
2. Modelo

2.5 Transporte Público

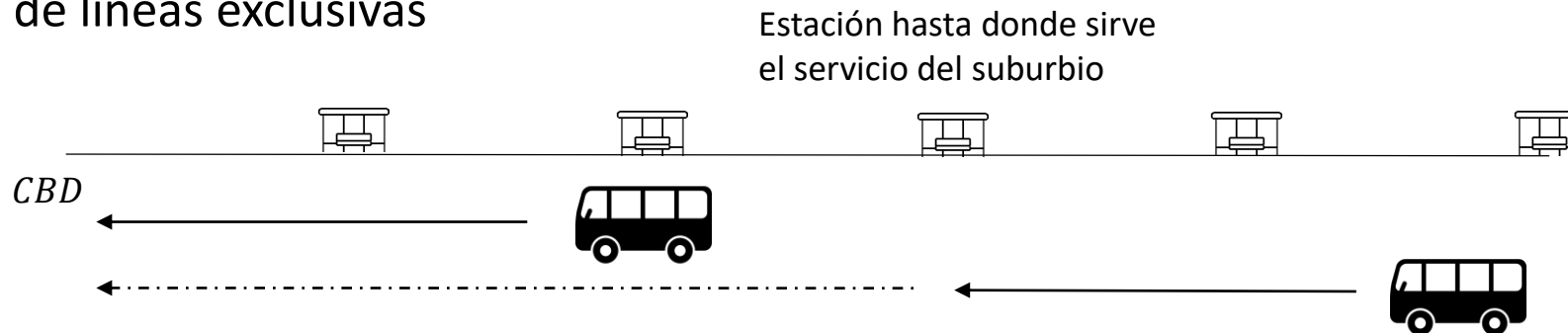
- Estructura de línea única



- Estructura de línea con transbordo



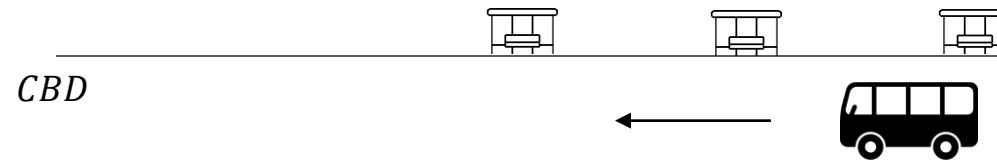
- Estructura de líneas exclusivas



2. Modelo

2.5 Transporte Público

- Espaciamiento entre estaciones variable según distancia al CBD



$$\hat{d}(n) = \phi + \gamma (n - 1)^\delta$$

- Permite romper la equidistancia entre estaciones de transporte público

2. Modelo

2.5 Transporte Público

- Costos de personal y de capital (\$/veh-h):

$$c_{cp} = c_{10} + c_{11}K$$

- Costos de operación (\$/veh-km):

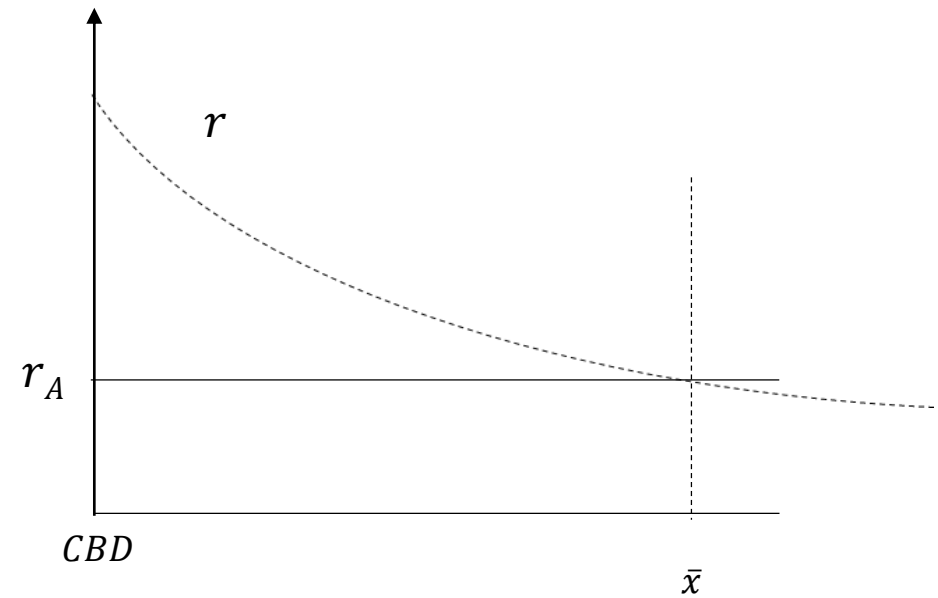
$$c_{op} = c_{20} + c_{21}K$$

- Costo de infraestructura estación (\$/estación-h) $\rightarrow c_N$
- Costos de terreno e infraestructura (\$/km-h) $\rightarrow c_L$

2. Modelo

2.6 Bienestar social

- Beneficio de los residentes
- Beneficios de Transporte Público
- Rentas de terrenos



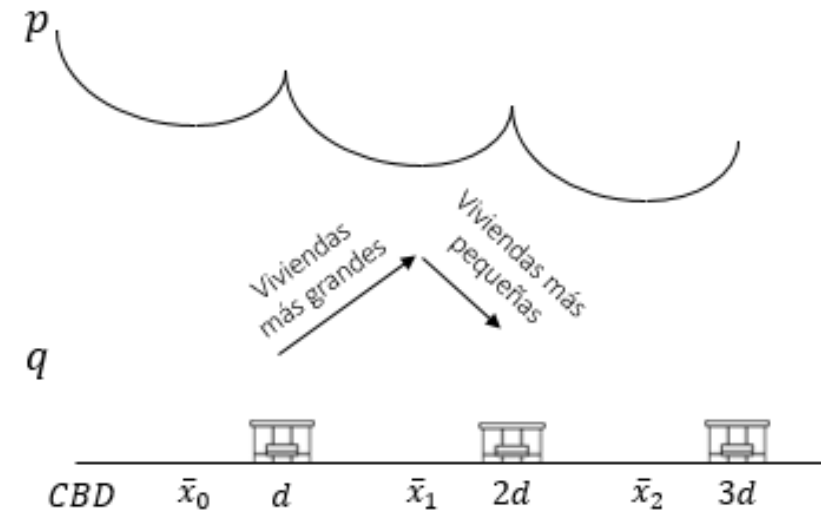
3. Estructura Urbana y Transporte Público

- Curvas ya no son monótonicamente crecientes o decrecientes

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{1}{q} \frac{\partial \rho}{\partial x}$$

$$\frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x} \left(\frac{\partial(V_q/V_c)}{\partial q} \right)^{-1}$$

(-)



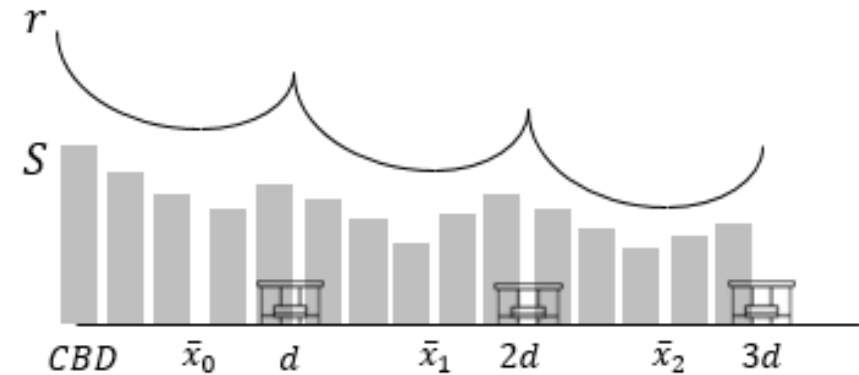
Fuente: Basso et al (2019)

3. Estructura Urbana y Transporte Público

- Curvas ya no son monótonicamente crecientes o decrecientes

$$\frac{\partial r}{\partial x} = h(S) \frac{\partial p}{\partial x}$$

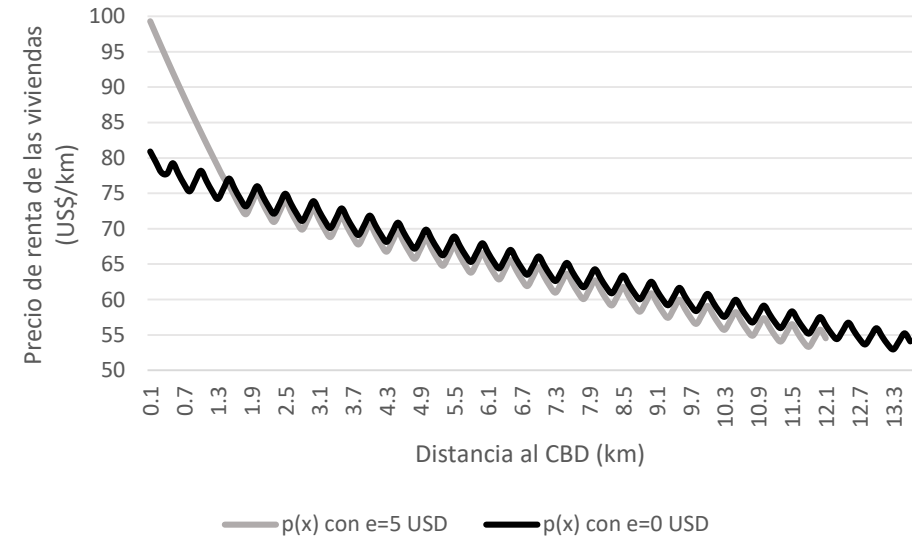
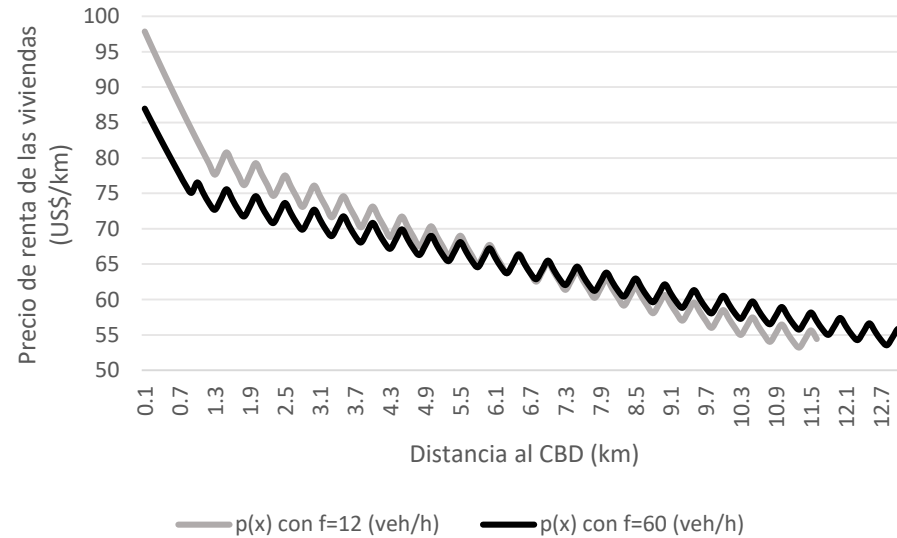
$$\frac{\partial S}{\partial x} = - \frac{\frac{\partial p}{\partial x} h'(S)}{p h''(S)}$$



Fuente: Basso et al (2019)

3. Estructura Urbana y Transporte Público

3.1 Efecto de frecuencia y tarifa

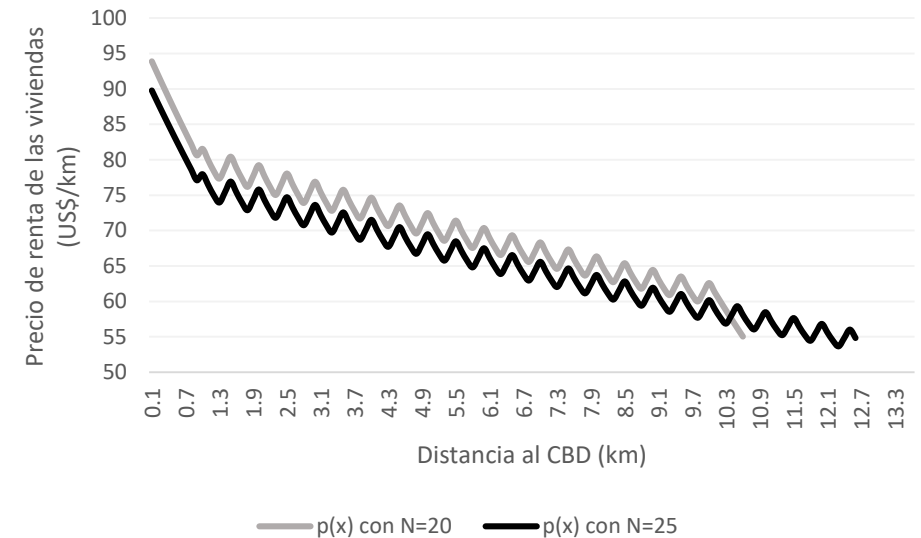


- Frecuencia y tarifa pueden conllevar un extensión del límite urbano
- Cambio en la estructura interna de la ciudad

3. Estructura Urbana y Transporte Público

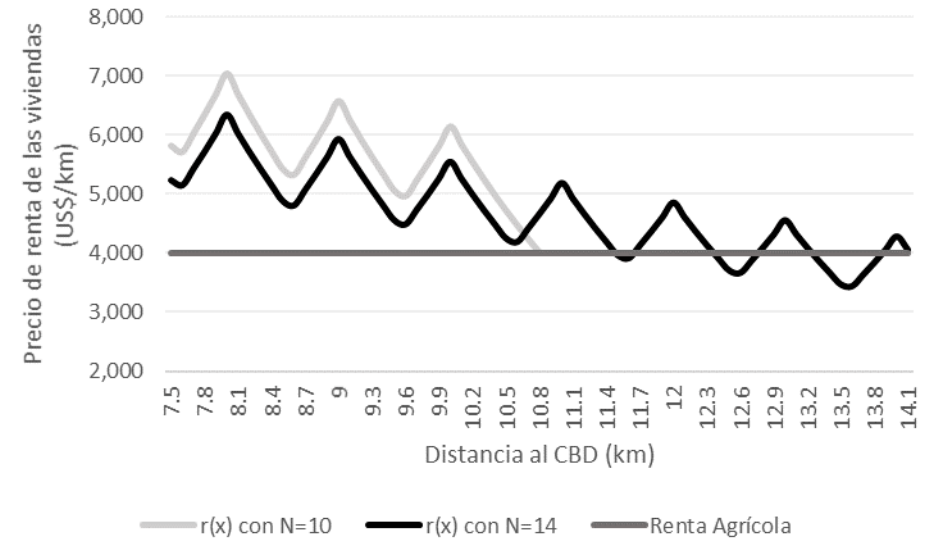
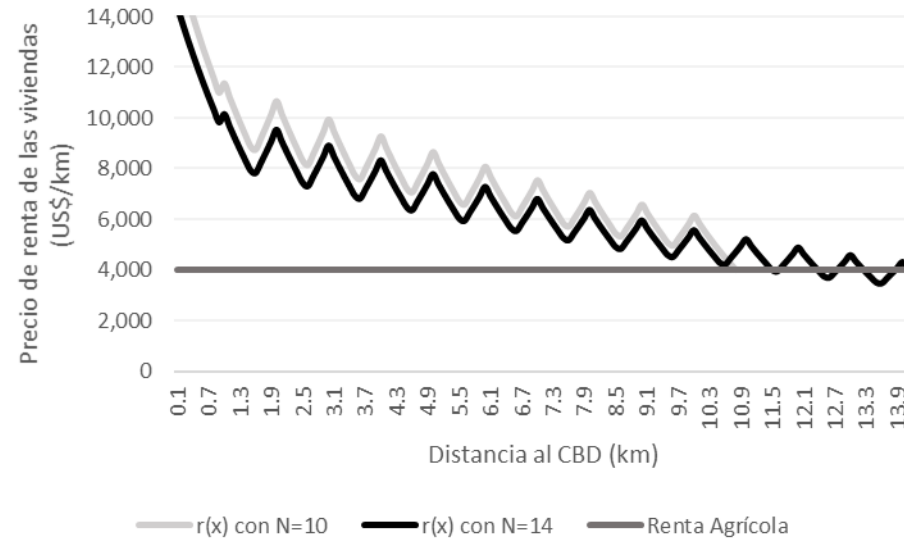
3.2 Efecto del número de estaciones

- Un menor número de estaciones comprime el límite urbano.
- Se eleva el precio de renta de las viviendas a lo largo de la ciudad.
- Un menor número de estaciones induce una ciudad más densa tanto estructural como poblacionalmente.



3. Estructura Urbana y Transporte Público

3.3 Efecto del número de estaciones y espaciamiento entre éstas

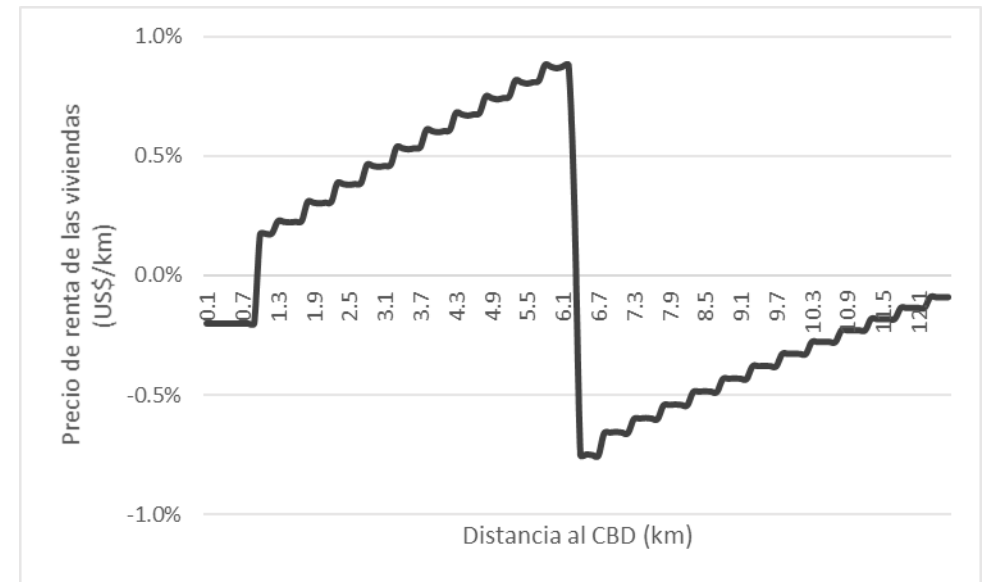


- A mayor número de estaciones y espaciamiento entre éstas es más probable la formación de suburbios desconectados
- Ventaja de menor tiempo de acceso

3. Estructura Urbana y Transporte Público

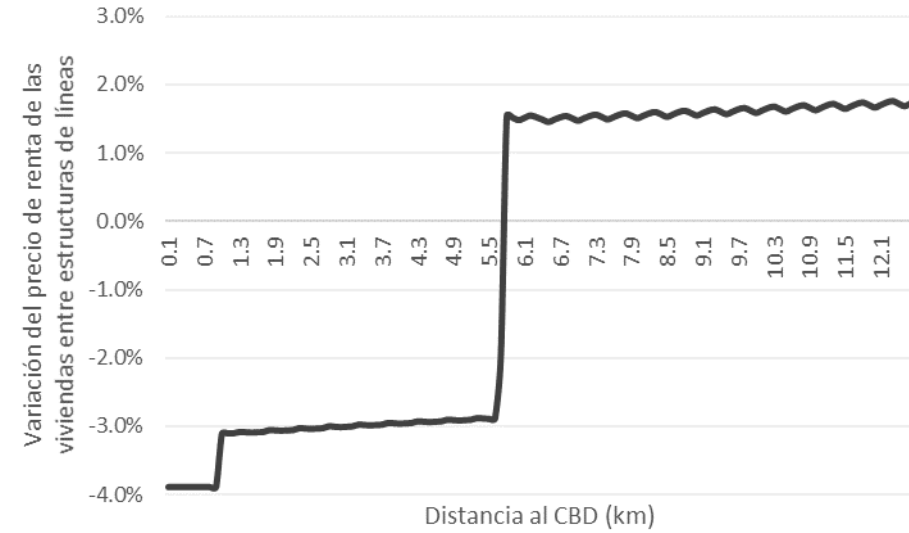
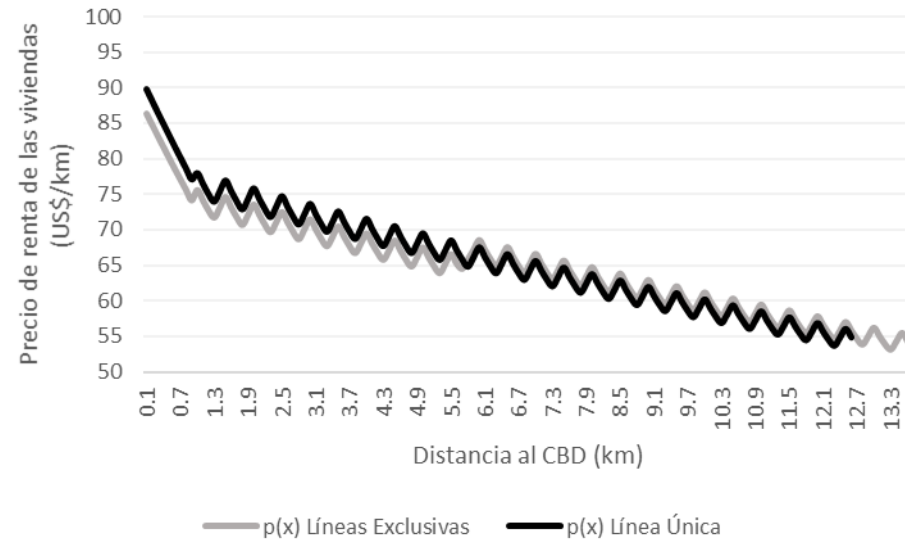
3.4 Efecto de servir a través de un línea con transbordo

- Transbordo induce un costo adicional en quienes se encuentran más lejos del CBD
- Precio de viviendas se eleva en las cercanías del CBD y se deprime en los suburbios



3. Estructura Urbana y Transporte Público

3.5 Efecto de servir a través de líneas exclusivas



- Extensión del límite urbano
- Precio de viviendas disminuye en las cercanías del CBD

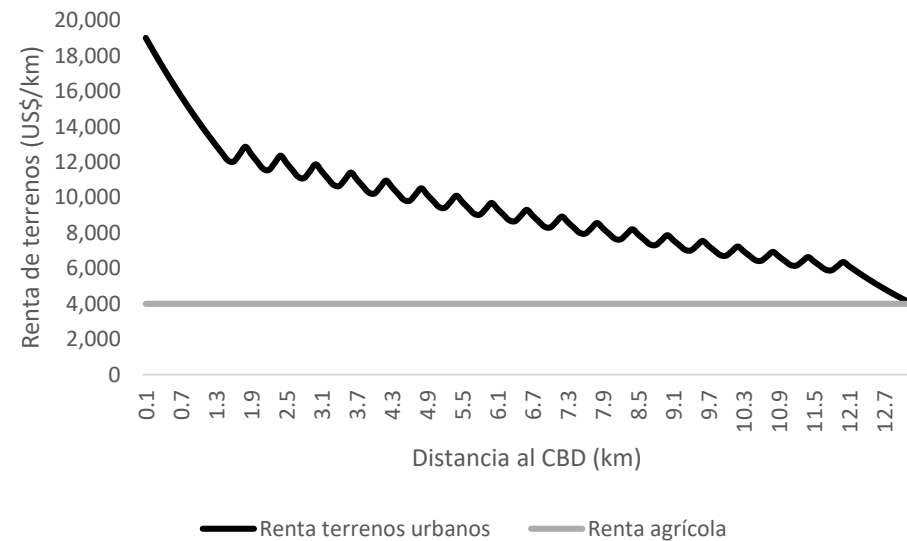
4. Diseño Óptimo

4.1 Estructura con una sola línea

f (veh/h)	d (km)	e (US\$)	K (pax/veh)	N
38	0.6	3.8	57	20

Variables de diseño en el óptimo social

- Límite urbano a 13.1 km del CBD
- Partición modal de TP 86.52%
- No hay presencia de suburbios desconectados
- Corredor de 12 km

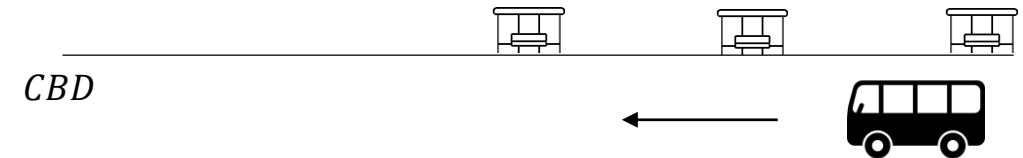


4. Diseño Óptimo

4.1 Estructura con una sola línea

Espaciamiento entre estaciones	Residentes (MUS\$)	Beneficio		
		Operación de transporte público (MUS\$)	Rentas de terrenos (MUS\$)	Beneficio social (MUS\$)
Equidistante	18.2	17.16	68.96	104.32
Variable	18.4	17.23	69.05	104.68

- Se encuentra que es óptimo tener estaciones equidistantes salvo en el caso de la primera estación
- Primera estación se debe encontrar más alejada del CBD



$$\hat{d}(n) = \phi + \gamma (n - 1)^\delta$$

$$\phi = 1.2 \quad \gamma = 0.6 \quad \delta = 1$$

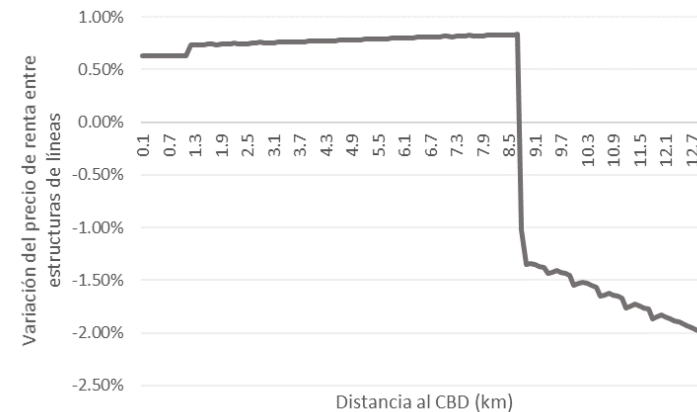
4. Diseño Óptimo

4.2 Estructura de línea con transbordo

f (veh/h)	f' (veh/h)	d (km)	e (US\$)	K (pax/veh)	K' (pax/veh)	N^*	N
40	23	0.6	3.8	54	25	14	20

Estructura de línea	Beneficio			
	Residentes (MUS\$)	Operación de transporte público (MUS\$)	Rentas de terrenos (MUS\$)	Beneficio social (MUS\$)
Única	18.2	17.16	68.96	104.32
Con transbordo	17.1	18.26	69.38	104.74

- Límite urbano se contrae levemente (13 km)
- Transbordo deprime el beneficio de los residentes
- Beneficio social es mayor por TP y rentas de terrenos



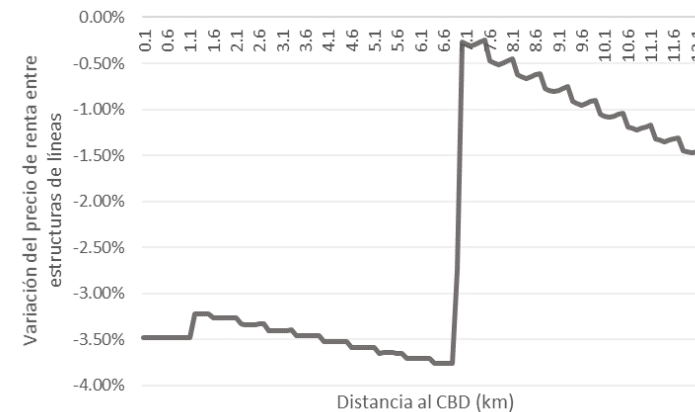
4. Diseño Óptimo

4.3 Estructura de líneas exclusivas

f (veh/h)	f' (veh/h)	d (km)	e (US\$)	K (pax/veh)	K' (pax/veh)	N^*	N
27	18	0.6	3.7	43	57	12	22

Estructura de línea	Beneficio			
	Residentes (MUS\$)	Operación de transporte público (MUS\$)	Rentas de terrenos (MUS\$)	Beneficio social (MUS\$)
Única	18.2	17.16	68.96	104.32
Exclusivas	24.4	18.99	65.31	108.69

- Límite urbano se extiende (14 km)
- Se pierde en rentas de terrenos
- Máximo bienestar social alcanzado



5. Conclusiones

- El diseño del sistema de transporte tienen un importante efecto en la estructura de las ciudades
- Espacialmente conviene tener estaciones alejadas del CBD y espaciadas equidistantemente unas de otras
- Considerando el efecto en la estructura urbana, la líneas exclusivas son la mejor estructura
- Transbordo disminuye el precio de las zonas más alejadas del CBD
- Líneas exclusivas tienden a aumentar el límite urbano

Referencias

Agostini, C., & Palmucci, G. (2008). Capitalización anticipada del metro de Santiago en el precio de las viviendas. **El Trimestre Económico**, 403-431.

Alonso, W. (1964). Location and land use. **Harvard University Press Cambridge**, MA, 1964.

Basso, L., Navarro, M. y Silva, H. (2019). Public Transport and Urban Structure. Working Paper.

Baum-Snow, N. (2007). Did highways cause suburbanization?. *The Quarterly Journal of Economics*, 122(2), 775-805.

Daniels, P. W., & Warnes, A. M. (2013). Movement in cities: Spatial perspectives on urban transport and travel. routledge.

Gibbons, S., & Machin, S. (2005). Valuing rail access using transport innovations. *Journal of urban Economics*, 57(1), 148-169.

Mills, E. S. (1967). An aggregative model of resource allocation in a metropolitan area. **The American Economic Review**, 57(2), 197-210.

Muth, R. F. (1969). Cities and housing: The spatial pattern of urban residential land use. **University of Chicago**, Chicago, 1969, 4, 144-123.

Rae, J. B. (1968). Transportation technology and the problem of the city. **Traffic Quarterly**, 22(3).

Sagner, A. (2009). Determinantes del precio de viviendas en Chile. **Documentos de Trabajo (Banco Central de Chile)**, (549), 1

Anexo

Parámetro	Valor	Descripción
μ	4 km/h	Velocidad de caminata
v	40 km/h	Velocidad crucero del transporte público
I	77.35 US\$/día	Ingreso
r_A	4,000 US\$	Valor del suelo agrícola
Ω	10,000	Población total
w	17.19 US\$/h	Tasa salarial
t_s	2.5 s	Tiempo de subida
t_b	1.42 s	Tiempo de bajada
η	3	Número de períodos
α	0.3	Porcentaje del ingreso gastado en vivienda
β	0.6	Poder de la función de producción
t_a	4.97 s	Penalidad temporal por aceleración
t_d	2.98 s	Penalidad temporal por desaceleración
c_{10}	32.66 US\$/veh-h	Costo fijo de capital y personal
c_{11}	0.15 US\$/veh-h	Costo variable de capital y personal
c_{20}	0.58 US\$/veh-km	Costo fijo de operación
c_{21}	0.0067 US\$/veh-km	Costo variable de operación
c_N	10.72 US\$/estación-h	Costo por estación
c_L	91.84 US\$/km-h	Costo por largo del corredor