

MEDIDA DE LA ACCESIBILIDAD PARA UNA RED DE TRANSPORTE

Carlos Cartes, Grupo de Sistemas Complejos, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas
Universidad de los Andes, carlos.cartes@miuandes.cl

Resumen:

En este trabajo proponemos crear una medida de la accesibilidad, que nos permite estimar cuan fácil es moverse dentro de una ciudad, como una función de la posición dentro de la misma. Esta medida depende de la red de transporte público de dicha ciudad y de cuanto está dispuesto a caminar el hipotético usuario de dicha red.

Utilizando esta medida, calculamos la accesibilidad de la red de buses del sistema de transporte público de Santiago, Transantiago, además de analizar una red aleatoria con características similares a la anterior. A partir de los casos anteriores realizamos diferentes medidas estadísticas que nos permitieron caracterizar y en parte explicar como se distribuye la accesibilidad en ambas redes.

Palabras clave: Accesibilidad, Transporte Público, GIS

Abstract:

In this work we propose a measure of accessibility which allows us to quantify how easy is to move inside a city, as function of the position. This quantity depends on the public transport network of the city in question and the distance the passenger willing to walk.

Using this measure we compute the accessibility of the public bus network of Santiago, we also analyzed a similar random network. From those examples we performed several statistical analysis which allowed us to characterize them and to explain, to certain extent, how the accessibility is distributed.

Key words: Accesibility, Public Transport, GIS

1. Introducción

Con el fin de medir que tan fácil es moverse dentro de una ciudad, utilizando únicamente la red de transporte público, proponemos una medida de la accesibilidad. Similares métricas se han propuesto, por ejemplo, para la red de trenes de Europa [Spiekermann and Wegener, 1996], pero consideramos que es relevante crear una formulación lo suficientemente general y flexible, de modo que pueda ser aplicada en cualquier red de transporte sin muchos problemas. Esta formulación nos permitirá entender cómo está distribuida espacialmente la accesibilidad dentro de la ciudad y como ésta distribución se ve afectada si se realizan cambios en la red de transporte. Para calcular la accesibilidad introducimos el concepto de red extendida, basada en la idea de cuanta superficie alrededor de una parada de transporte público es accesible a los potenciales pasajeros, cantidad ligada directamente a la distancia que éstos están dispuestos a caminar para acceder al sistema de transporte público. Esta idea es una aplicación simplificada del trabajo desarrollado a partir de conceptos mas generales [O'Neill et al., 1992] y en particular [Biba et al., 2014], que se basan en cuantificar la superficie, alrededor de cada parada de buses, que es accesible a los usuarios. Con esta idea general podemos calcular la superficie accesible desde cada línea de buses y a su vez la superficie cubierta por toda la red, cantidad que llamamos tamaño de la red extendida. La fracción de esta red extendida accesible al usuario, tomando solo un bus, desde su posición geográfica en particular es la cantidad que llamamos accesibilidad. Esta cantidad está ligada al concepto de accesibilidad potencial [Handy and Niemeier, 1997] ya que depende de la ubicación espacial de las líneas de buses y de la forma en que éstas se conectan entre sí, cae en la categoría de las *location based accessibility measures* [Geurs and Van Wee, 2004], porque es una medida macro que toma en cuenta la fracción de superficie a la que se puede acceder inmediatamente, desde una posición en particular. El resultado, tomando los factores anteriores en cuenta, es una distribución bidimensional la cual nos muestra la accesibilidad dentro de la ciudad.

Utilizando la metodología anteriormente propuesta, calculamos la accesibilidad de la red de buses del sistema de transporte público de Santiago. Además analizamos una red de buses con una disposición de paradas aleatoria y características similares a la anterior, que utilizamos como base de comparación. A partir de esos casos realizamos diferentes análisis estadísticos, que nos permitieron caracterizar las redes y encontramos, en ambos casos, que la distribución de accesibilidad es aproximadamente exponencial, también descubrimos que es mas fácil moverse dentro de la red aleatoria, debido a que su valor típico de accesibili-

dad es aproximadamente el doble que en la red de buses de Transantiago. Esto es debido, principalmente, a que la separación promedio entre paradas de buses en la red aleatoria es bastante mayor, lo que incrementa la superficie promedio cubierta por sus líneas.

2. Accesibilidad

Consideremos una red de transporte público formada por n_b líneas de buses. La posición geográfica de cada parada de buses y su línea expandida serán representadas en matrices independientes, de tamaño $n_x \times n_y$, para cada línea de buses. Los conjuntos de matrices utilizadas para representar las redes de buses y expandidas serán nombradas por b y e respectivamente. Cada elemento perteneciente a dichas matrices tendrá un valor de 1 o 0, éste valor será determinado de la siguiente manera: si en la línea k , donde $k = 1, \dots, n_b$, tiene una parada en la posición (i, j) luego el valor de la correspondiente línea de buses tendrá un valor de 1 (sería 0 de otra forma), en nuestra notación esto se escribiría como $b_{i,j}^{(k)} = 1$. Asociada a esa línea de buses en particular, tenemos la red extendida que es definida a través de la siguiente manera: si $b_{i,j}^{(k)} = 1$ luego los elementos de la red extendida $e^{(k)}$, asociada a la línea de buses k , tendrán el valor de 1 en la posición (i, j) y su vecindad, luego

$$e_{i,j}^{(k)} = e_{i+1,j}^{(k)} = e_{i,j+1}^{(k)} = e_{i-1,j}^{(k)} = e_{i,j-1}^{(k)} = 1 \quad (1)$$

de la definición anterior puede verse que la red extendida forma un patrón en forma de cruz alrededor de cada parada de buses, esta forma en particular fué elegida por su simpleza y facilidad de implementación, pero cualquier otra forma arbitraria puede ser utilizada para generar la red extendida, sin cambiar en forma significativa ninguna característica cualitativa de la accesibilidad. En las Figuras 1 (a) y (b) se puede ver un ejemplo de una red de buses muy simple y de su red expandida asociada.

Utilizando las definiciones anteriores la red expandida total puede escribirse como la suma de todas las redes extendidas

$$R_{i,j} = \mathcal{P} \left[\sum_{k=1}^{n_b} e_{i,j}^{(k)} \right], \quad (2)$$

donde \mathcal{P} representa un operador que actúa sobre cada elemento de la matriz

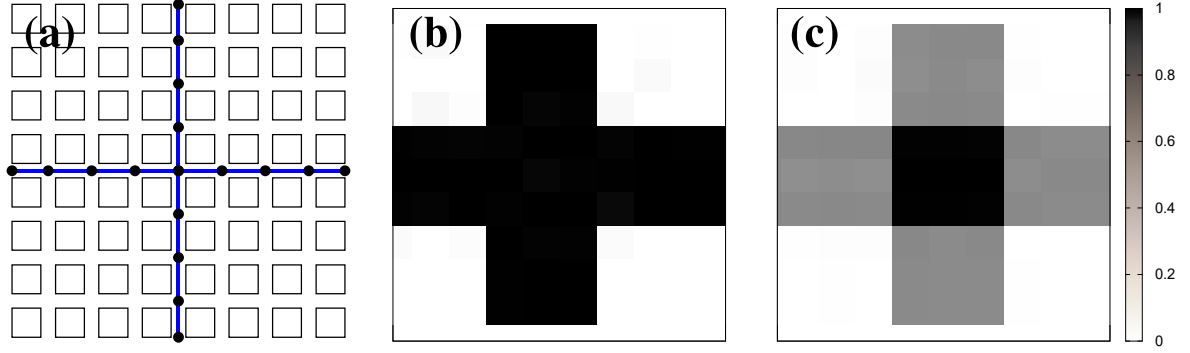


Figura 1: Ejemplo de una red de transporte compuesta por dos líneas de buses que se intersectan en el centro del pueblo, las paradas de los buses están representadas por puntos negros (a). Red expandida (b), notar que tiene la misma forma de cruz que la red de buses. Mapa de la accesibilidad (c) de la red de transporte, notar el punto de alta accesibilidad en el centro del pueblo.

$\sum_{k=1}^{n_b} e_{i,j}^{(k)}$, con la siguiente definición

$$\mathcal{P}[a] = \begin{cases} 1 & \text{if } a > 0, \\ 0 & \text{if } a \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

este operador es usado para normalizar los elementos de $R_{i,j}$ con el fin de no contar dos veces en las posiciones, donde las distintas redes extendidas se traslapan. Usando la ecuación (2) podemos calcular el tamaño total de la red extendida al sumar todos sus elementos

$$N_t = \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_y} R_{i,j}. \quad (4)$$

También podemos definir la región del espacio accesible desde la posición (i, j) , como la matriz

$$f_{l,m}^{(i,j)} = \mathcal{P} \left[\sum_{k=1}^{n_b} e_{i,j}^{(k)} e_{l,m}^{(k)} \right] \quad (5)$$

el producto de los elementos de las matrices e es realizada de modo que solo se consideren las redes expandidas que poseen elementos no nulos en la posición

(i, j) , además cada elemento es normalizado a 1 de modo de no contar más de una vez en las regiones donde se traslapan las redes.

Finalmente podemos calcular el valor numérico de la accesibilidad para la posición (i, j) como la fracción de la red total expandida, a la que se puede alcanzar desde dicha posición

$$A^{(i,j)} = \frac{1}{N_t} \sum_{l=1}^{n_x} \sum_{m=1}^{n_y} f_{l,m}^{(i,j)}, \quad (6)$$

en la Figura 1 (c) se puede ver la accesibilidad del ejemplo de una red de transporte muy simple. Se debe hacer notar que, por definición, la accesibilidad es cero para cualquier elemento de la matriz que esté fuera de la red extendida.

3. Aplicaciones

3.1. Transantiago

En esta sección analizaremos los datos provenientes de la red de buses del sistema de transporte público de Santiago: Transantiago. Los datos de las líneas de buses y paradas con sus respectivas coordenadas provienen del sitio oficial: www.transantiago.cl y son válidas a Diciembre del 2015.

Para usar nuestra formulación de la accesibilidad utilizamos una grilla discretizada donde la distancia entre los puntos de colocación es de 254 m, entonces cualquiera dentro de la red extendida se encontrará a una distancia de 381 m o menos de la parada de bus más cercana. Utilizamos esta distancia ya que corresponde aproximadamente a una caminata de 10 minutos, definida como la distancia óptima [Tyler, 2002] para los usuarios del transporte público. Evidentemente la grilla puede ser modificada sin mucha dificultad para trabajar con cualquier distancia predefinida, sin que el carácter cualitativo de los resultados cambie mucho. Debido a esta restricción de distancia y la geometría de la ciudad de Santiago, nuestra grilla tiene dimensiones 140×155 . Usando esta discretización conseguimos una red compuesta por 371 líneas distintas, 5309 paradas individuales y una red extendida compuesta por 9377 elementos. Para obtener la posición de cada parada de bus dentro de la grilla, discretizamos sus coordenadas geográficas y si dos o mas paradas coinciden en el mismo elemento de la matriz, esas paradas son contadas como sólo una, en la generación de la red extendida. En la Figura 2 (a) se tienen el número de líneas diferentes que pueden ser tomadas desde una posición geográfica en particular (el máximo es 40 líneas distintas), luego en la Figura 2 (b)

se muestra la red expandida total de la ciudad y finalmente en la Figura 2 (c) se muestra un mapa de la distribución de la accesibilidad en función de la posición.

En las Figuras 2 (a) y (c) se pueden observar regiones aisladas para el número de líneas de bus disponibles también, como es esperable, la accesibilidad es mas o menos reflejada por esos puntos particulares.

Mirando las estadísticas asociadas a las líneas de bus disponibles para una posición dada, en la Figura 3, encontramos que ésta sigue aproximadamente una distribución exponencial, de la misma forma que la accesibilidad donde su valor mas frecuente es $\sim 0,05$. Esto significa que el usuario típico de Transantiago tiene acceso a alrededor de un 5 % de la superficie total de la red expandida. Además encontramos que el valor máximo de la accesibilidad es 0,45 por lo tanto, desde esa región en particular, un usuario del transporte público puede alcanzar casi la mitad de la red expandida. Notamos también que los valores mas altos de accesibilidad están principalmente localizados en el eje Este–Oeste, esto es producto de la forma en la que Santiago fué fundado y evolucionó: un pueblo centralizado que fué extendiendo su superficie a medida que la población crecía. Junto con este eje central concentrado encontramos algunos puntos aislados con una accesibilidad de valor intermedio de 0,3 que corresponden a los centros cívicos de antiguos pueblos vecinos, que fueron absorbidos a medida que la ciudad fué creciendo.

Otro parámetro útil para analizar la red de transporte es el *agrupamiento* τ_k de la línea k que es definido como

$$\tau_k = \frac{E_k}{S_k} \quad (7)$$

donde E_k es el tamaño de la red expandida asociada a la línea de buses k y S_k es el número de paradas de buses pertenecientes a la misma línea. Los diferentes valores de τ según la configuración de paradas de buses son mostradas en la Figura 4. En la Figura 5 podemos ver las estadísticas del agrupamiento, el valor más frecuente de esta cantidad es $\tau = 2,77$, es evidente que las paradas de bus están bastante aglomeradas y que la distancia promedio entre ellas es menor a 254 metros, también en la Figura 5 (b), podemos ver que las paradas de bus mas separadas entre sí corresponden a las líneas de buses mas cortas (con 40 paradas o menos). Pero para la mayor parte de las líneas (incluyendo las mas largas) este valor es bastante pequeño. Esto significa que, para una línea de buses en particular, las paradas pueden ubicarse de forma mas separada, por lo tanto incrementando la red expandida y mejorando la accesibilidad relativa de dicha línea o también pueden suprimirse algunas paradas, manteniendo la misma red expandida y accesibilidad. Este cambio haría disminuir el tiempo de viaje mejorando el servicio

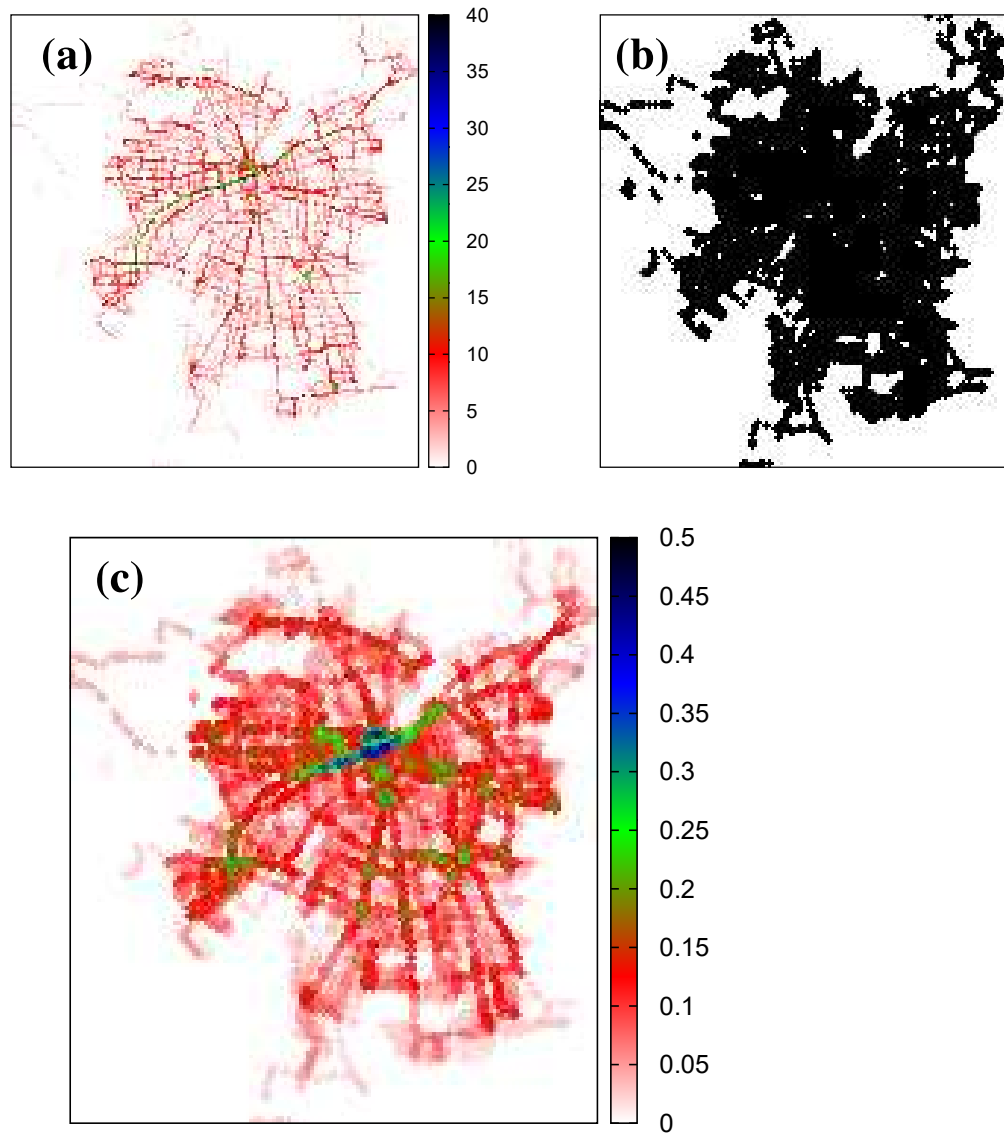


Figura 2: Densidad de líneas de buses disponibles como función de la posición (a). Red expandida total de la ciudad de Santiago (b). Accesibilidad de la ciudad completa, notar los puntos aislados con accesibilidad $\sim 0,25$ (c).

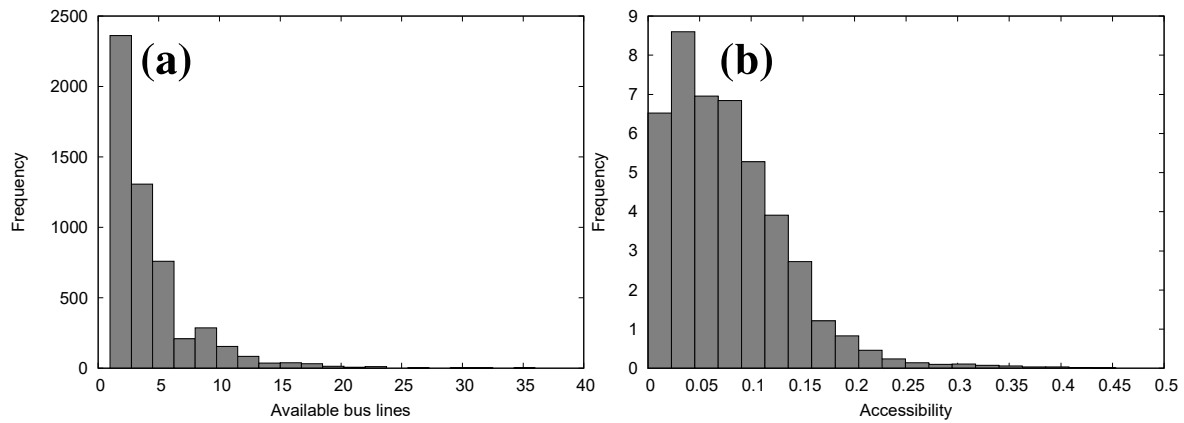


Figura 3: Distribución de las líneas de buses disponibles (a) y accesibilidad (b) para la ciudad de Santiago. Se puede notar una distribución aproximadamente exponencial en ambos casos.

para los usuarios de dicha línea, sin efectos negativos significativos.

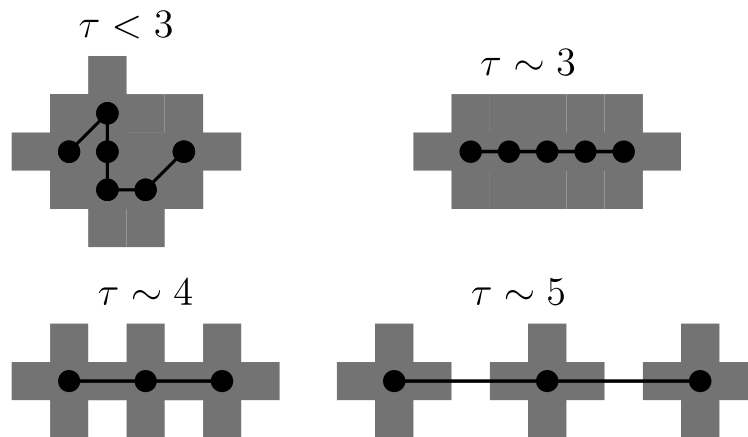


Figura 4: Agrupamiento para diferentes configuraciones de líneas de buses, como consecuencia de la definición de red expandida en la ecn. (1) el valor mas alto de esta cantidad es 5.

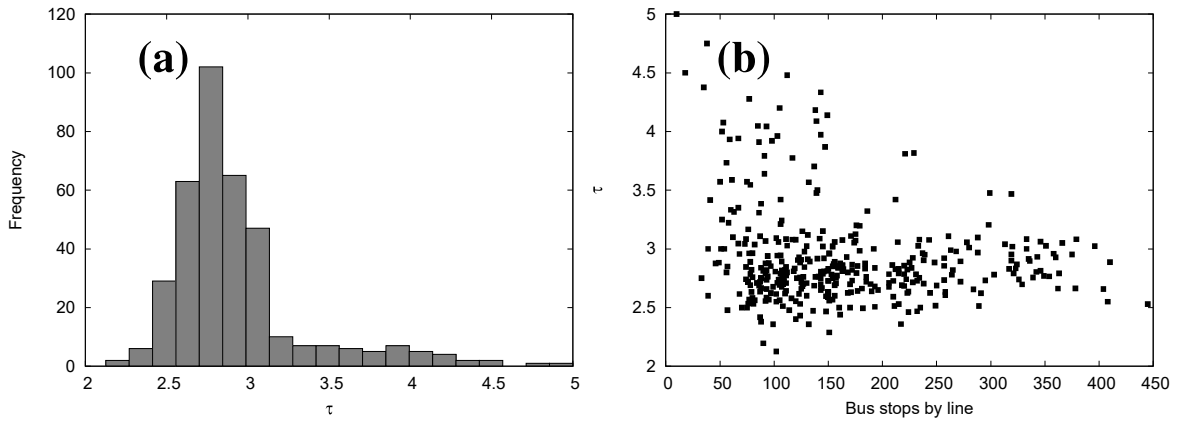


Figura 5: Distribución del agrupamiento para la ciudad de Santiago, el máximo corresponde a $\tau = 2,77$ (a). Agrupamiento como función del número de paradas de buses (b), notar que los valores altos del agrupamiento se dan para las líneas mas cortas.

3.2. Red de buses aleatoria

Implementamos una red de buses aleatoria como ejemplo para comparar. Esta red consiste en 250 líneas con 40 paradas cada una, de modo de tener una red similar a Transantiago. Las paradas fueron ubicadas en una matriz de 95×105 , entonces la red expandida tendrá un tamaño de $\sim 10^4$ y será mas o menos de las mismas proporciones que Santiago. Con esta red aleatoria generamos un sistema de transporte con una accesibilidad que se muestra en la Figura 6 (a), ahí es evidente que la distribución de accesibilidad es mucho mas homogénea, con algunos puntos aislados de accesibilidad $\sim 0,3$, que es bastante más pequeña que la accesibilidad máxima de Transantiago (con un valor de 0,45). Más importante aún, se tiene que las regiones de accesibilidad intermedia con valores de $\sim 0,15$ son mucho mas frecuentes en esta configuración. En efecto si miramos su histograma de accesibilidad en la Figura 6 (b), es claro que esta cantidad es mucho menos desigual con un valor más frecuente de $\sim 0,1$ que es casi dos veces mayor que el valor más frecuente del Transantiago $\sim 0,05$.

Esta distribución más homogénea de accesibilidad puede ser explicada, en parte, debido al hecho de que en este ejemplo todas las líneas tienen el mismo número de paradas y además el valor típico del tangling para cada línea es mas grande, con un valor mas frecuente de $\sim 4,9$, que los valores del ejemplo anterior. Entonces

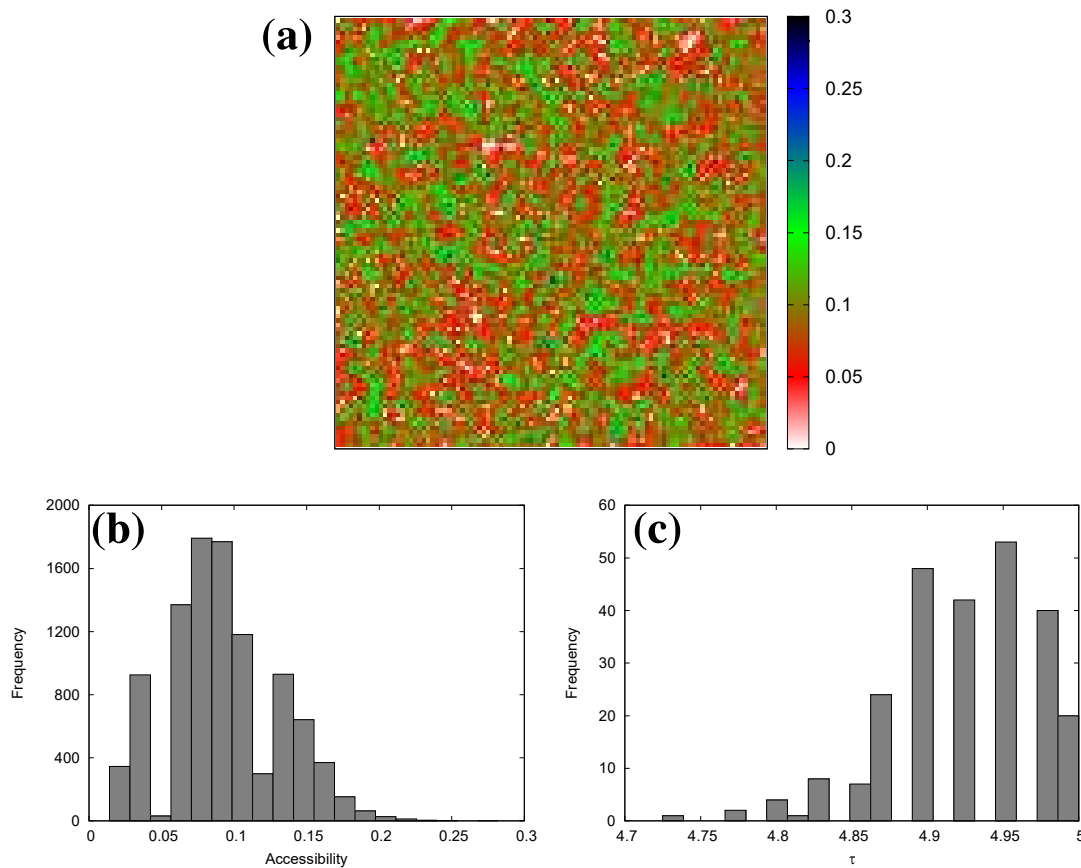


Figura 6: Accesibilidad para una red aleatoria con características similares al Transantiago (a), es evidente que esta red es mas homogénea con un máximo de accesibilidad en $\sim 0,3$. Histograma de la accesibilidad (b) notar el máximo en $\sim 0,12$ que es dos veces mas grande que el máximo de Transantiago. Histograma del tangling (c) notar el alto valor del máximo en 4,9 y comparar con el ejemplo anterior.

la distancia entre paradas es mayor y en consecuencia la red expandida asociada a cada línea cubre una mayor superficie con el mismo número de paradas de buses. Evidentemente este mapa de accesibilidad solo considera la infraestructura del transporte público e ignora factores tan relevantes como la densidad de población o la distribución de ingreso, que son factores de vital importancia en el

diseño de un sistema de transporte público. Por lo que no es posible decir que esta disposición para la red de buses sea superior a la utilizada en Transantiago.

4. Conclusiones

Utilizamos nuestra propuesta de medida de accesibilidad y encontramos que aplicando este concepto, a la red de buses de la ciudad de Santiago y a una red de parecidas características (como el tamaño de la red extendida y número de paradas de buses) dispuesta en forma aleatoria, hay similitudes como una distribución exponencial de la accesibilidad y diferencias como el valor más frecuente que resulta ser mayor en la red aleatoria. Debemos agregar que esta última red fué creada solamente como un ejercicio de comparación entre ésta y la red de buses de Transantiago. En ningún momento se sugiere disponer en forma arbitraria la última con el fin de mejorar su accesibilidad.

Una de las ventajas de esta medida de accesibilidad propuesta es que parámetros como la forma en la que se genera la red expandida o la distancia que los usuarios están dispuestos a caminar, son muy fáciles de modificar y no cambian cualitativamente los resultados anteriormente presentados. Además analizar modificaciones de la red de transporte sobre la red extendida es muy simple utilizando este método, produciendo resultados con poco esfuerzo computacional.

Esta medida está basada en tomar sólo un bus, ya que sólo pretende medir la fracción de red extendida que le es inmediata a cada punto del espacio, pero puede ser extendida sin problemas, modificando la ecuación (5), para incluir los transbordos.

Como futuros prospectos de investigación con estas herramientas esperamos cotejar la accesibilidad con datos como la distribución espacial de ingreso y población, con el fin de poder detectar que puntos necesitan mejorar su accesibilidad al mismo tiempo que benefician al mayor número posible de personas.

Referencias

[Biba et al., 2014] Biba, S., Curtin, K. M., and Manca, G. (2014). Who can access transit? reviewing methods for determining population access to bus transit. *Cityscape*, 16(2):193.

- [Geurs and Van Wee, 2004] Geurs, K. T. and Van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport geography*, 12(2):127–140.
- [Handy and Niemeier, 1997] Handy, S. L. and Niemeier, D. A. (1997). Measuring accessibility: an exploration of issues and alternatives. *Environment and planning A*, 29(7):1175–1194.
- [O’Neill et al., 1992] O’Neill, W. A., Ramsey, R. D., and Chou, J. (1992). Analysis of transit service areas using geographic information systems. *Transportation Research Record*, (1364).
- [Spiekermann and Wegener, 1996] Spiekermann, K. and Wegener, M. (1996). Trans-european networks and unequal accessibility in europe. *European journal of regional development*, 4(96):35–42.
- [Tyler, 2002] Tyler, N. (2002). *Accessibility and the Bus System: From Concepts to Practice*. Thomas Telford.