

Funciones *distance decay* y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la estimación de demanda potencial en el Transporte Público de Resistencia (Chaco, República Argentina)



Osvaldo Daniel Cardozo

Departamento de Geografía y Laboratorio de Tecnologías de la Información Geográfica, Universidad Nacional del Nordeste / Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

Cristian Javier Da Silva

Laboratorio de Tecnologías de la Información Geográfica, Universidad Nacional del Nordeste / Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina

Recibido: 16 de marzo de 2015. Aceptado: 22 de junio de 2015.

Resumen

Los niveles de accesibilidad en el transporte público son un elemento crítico para evaluar y planificar el servicio. Aumentar el conocimiento de esta situación puede aportar mejoras sustanciales en las oportunidades de acceso por parte de los usuarios, especialmente a nivel local, algo que en los clásicos modelos agregados de planificación del transporte resulta dificultoso. En este sentido, se propone centrar el análisis de la demanda de viajes en transporte público a nivel de paradas, combinando una importante tarea de campo para el relevamiento de datos y un fuerte apoyo que busca reconstruir el comportamiento espacial de los pasajeros a nivel local por medio de una función empírica, conocida como curva de *distance decay*.

Palabras clave

Transporte Público
Demanda Potencial
SIG
Caída con la distancia
Paradas

Palavras-chave

Transporte Público
Demanda potencial
SIG
Distância deterioração
Parada de Ônibus

Abstract

Modelling of potential demand through GIS and distance decay function in Public Transport in Resistencia. The levels of accessibility in public transportation are a critical element to evaluate and planning the service. Increase awareness of this situation can lead to substantial improvements in access opportunities by users, especially at local level, what is very difficult in the classical aggregate transport models. In this way, our model proposes to focus the analysis of the travel demand to transportation at the bus stop level, combining an intensive fieldwork to collect date and the use of GIS tools to calculate variables, such as reached distance for obtain a model demand. The aim of the paper is to analyse the volume of passengers that access to public transportation at each bus stop in Resistencia and the distances walked to them. This seeks to reconstruct the spatial behaviour of passengers at the local level through an empirical function, known as *distance decay* curve.

Key words

Public transport
Potential demand
GIS
Distance decay
Bus Stop

Introducción

En los estudios de movilidad y redes de transporte público, los análisis de accesibilidad son considerados fundamentales en la actualidad. Entre los diferentes componentes que inciden, el factor distancia es uno de los de mayor influencia, motivo por el cual se han desarrollado varias definiciones para caracterizarlo y métodos para tratarla, el concepto de *distance decay* es un claro ejemplo de ello.

Cuando situamos el concepto de distancia en el marco de los sistemas de transporte, que se define como la separación desde un origen determinado en el territorio hacia los puntos de acceso al servicio -paradas o estaciones-, normalmente la literatura sugiere medirla por medio de alguna métrica como la euclidiana, Manhattan o por la red. Esto supone asumir cierta homogeneidad espacial, aunque la estructura de la interacción entre las localizaciones esté integrada por un número importante de factores (Lloyd, 2015).

Del mismo modo, en el ámbito del transporte público, la idea principal que se tiene acerca del efecto de la distancia consiste en que la interacción entre la población y las paradas disminuye en la medida que ella aumenta (Rodríguez-Núñez y García-Palomares, 2014; Lloyd, 2015). Este decrecimiento puede adquirir diversas estructuras en respuesta a un tipo de distribución de probabilidad, por ello normalmente, el efecto *distance decay* -aunque puede tomar otras formas- es análogo a una función exponencial o potencial negativa, a partir de la cual se hacen inferencias (Cheng y Bertolini, 2013).

Asimismo, una particularidad observada en el efecto de la distancia en el marco de la estimación de la demanda de viajes consiste en que los flujos son modificados por ella, y por esto, el principio de localización se establece como un concepto clave a considerar para lograr modelos que permitan realizar estimaciones factibles (Zacharias, 2015). Una hipótesis que se maneja comúnmente en esta área vincula características económicas y demográficas de los viajeros, donde se sostiene que la personalidad influye en el comportamiento del viaje, un aspecto revisado en profundidad por Golob (Páez, 2013).

Páez (2013) sostiene que los factores de utilidad donde se incluyen tiempo, costo y factores de desarrollo como los usos del suelo, explican parcialmente la demanda de viajes. En una misma perspectiva, la teoría utilitaria y la teoría de formación de hábitos pueden ser utilizadas en la explicación de la distribución de los viajes y su estabilidad (Zacharias, 2015). Con ello, la complejidad expresada en la construcción de modelos de estimación de demanda sugiere un gran conocimiento de los diferentes componentes que estructuran y configuran un determinado espacio geográfico, entre ellos, las actividades humanas como: trabajo, educación, ocio, entre otros (Kent et al., 2006).

Puesta en claro la importancia del factor proximidad en las interacciones espaciales, y por lo tanto, en la demanda de servicios como el transporte público en áreas urbanas, es conveniente introducir la noción de planificación, donde el modelo de cuatro etapas es el principal exponente. Las numerosas críticas que ha sufrido últimamente, guían la necesidad de desarrollar algún procedimiento complementario para que, de manera eficiente, rápida y con un mínimo requerimiento de variables, resulte una alternativa para ciudades intermedias o pequeñas.

El presente artículo se estructura de la siguiente manera: posterior a la presente introducción, se presenta un apartado de Marco Teórico y Antecedentes, donde se especifican conceptos y autores relevantes en la temática. Después, se presenta la Metodología empleada culminando con los Resultados obtenidos. Además, se presentan las conclusiones derivadas del presente estudio.

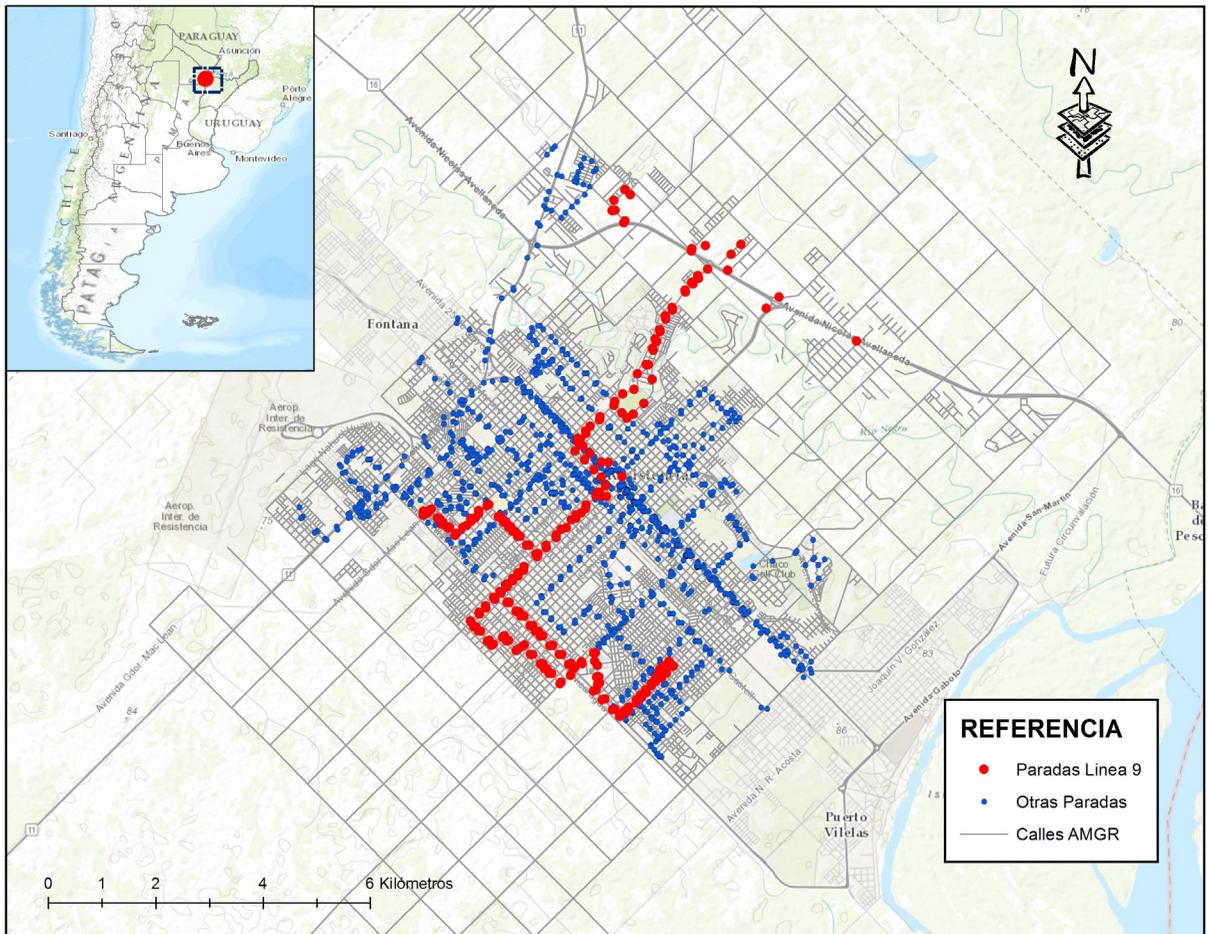


Figura 1. Distribución de las paradas del servicio de transporte público de pasajeros en Resistencia. Fuente: Elaborado sobre información provista por el LabTIG.

Objetivos y área de estudio

El objetivo principal del presente artículo es analizar las distancias recorridas por los pasajeros que acceden del transporte público en Resistencia, y a partir de ese análisis ver la relación que guarda con la población del entorno de la parada, a los efectos de conocer la demanda potencial del servicio. Esto podría constituir una sencilla pero eficaz herramienta para la planificación del servicio, en el marco de los modelos de respuesta directa.

A partir de lo anterior, se proponen los siguientes objetivos particulares:

- » Caracterizar el acceso diferencial al servicio existente entre el área central de la ciudad y un sector periférico.
- » Reconstruir el comportamiento espacial de las personas a nivel local -en cada parada-, por medio de una función empírica que represente el efecto *distance decay*.
- » Identificar la demanda potencial a nivel de parada y franja de distancia, considerando valores probabilísticos derivados del volumen de usuarios observado.

Actualmente la ciudad de Resistencia dispone de un servicio de transporte público de relativa complejidad, debido a la superposición de varias jurisdicciones de orden local, provincial y nacional sobre el mismo ámbito territorial. Por un lado el servicio de jurisdicción municipal es prestado por 6 líneas de autobuses, las cuales complementan el servicio interurbano de jurisdicción provincial con 6 líneas que conectan la capital con los municipios del Área Metropolitana: Barranqueras, Puerto Vilelas y Fontana. Existe además un servicio de competencia nacional que vincula las ciudades de Resistencia y Corrientes, con paradas en distintos puntos de la ciudad. En conjunto,

el servicio urbano (municipal) e interurbano (provincial) representan un total de 12 líneas de autobuses, servidas por unas 1445 paradas (Ver Figura 1).

Marco teórico y antecedentes

Modelos de planificación y transporte

Pensar en modelos de planificación de transportes nos dirige hacia el conocido modelo de cuatro etapas. Es oportuno recordar que el mismo fue diseñado en la década de los cincuenta en EE.UU por un grupo de Ingenieros en Transporte (Weiner, 1997) y por esa razón se lo conoce también como método de planificación de transporte urbano (PTU), como modelo secuencial por las etapas sucesivas que involucra (generación y atracción de viajes, distribución zonal, elección modal, asignación de ruta), o modelo regional debido a que normalmente adopta una perspectiva de planificación orientada a regiones metropolitanas.

El continuo dinamismo del espacio urbano condujo a la readaptación y actualización de muchos contenidos teóricos y metodológicos, confluyendo en nuevas propuestas de intervención y análisis. En este sentido, el modelo de metrópolis planteado en 1964 por Lowry es uno de ellos, además de ser un ejemplo en términos de integración de submodelos para localización de actividades que actúan de forma iterativa. La actualización de este modelo fue llevado a cabo por Garín en 1966, denominándose modelo de Garin-Lowry, donde plantean un enfoque matricial para analizar las relaciones entre empleo, residencia, servicios, y flujos de transporte (Gonçalves de Souza, 2005).

Otros modelos de relevancia por su aporte metodológico fue el modelo Mep -o de stock y actividades- desarrollado por Echenique en la Universidad de Cambridge en 1968, cuya versión actualizada -modelo MEPLAN-, se preocupa por avanzar en el análisis de las interrelaciones entre transporte y usos del suelo (Echenique y Partners, 1994), otra derivación del MEPLAN llamado modelo MECAN desarrollado en la Comunidad de Madrid ha servido como herramienta de análisis económico y planificación territorial (Olivares y Folgueira, 2000).

Lo cierto es que estos enfoques, planteados desde una perspectiva general, mediante el uso de áreas o zonas de planificación para simplificar la realidad, con un importante desarrollo matemático para predecir las relaciones entre variables, analizar los costes, maximizar el rendimiento de un determinado recurso, entre otros aspectos, se aproximan más a los modelos socio-económicos de planificación urbana. En el campo de la planificación de los sistemas de transporte y modelado de la demanda en particular, predomina la aplicación del modelo de cuatro etapas.

Modelos de Respuesta Directa (*Quick Response Model*)

Pese a la complejidad de sus etapas y aparente robustez en las predicciones, la fiabilidad del modelo ha sido objeto de muchas críticas (Marshall y Gardy, 2006; Flyvbjerg et al., 2006). Por un lado, debido a su carácter secuencial existe una fuerte tendencia a la propagación de errores producto de una calibración inadecuada. Por otra parte, la fuerte agregación de los datos en zonas de transporte puede conducir a una *falacia ecológica*¹, baja precisión a nivel local -parada o estación-, y una escasa capacidad para tratar con precisión el gradiente de la distancia -*distance decay*-. Finalmente, estos modelos se alimentan de encuestas de movilidad tipo origen-destino con el alto coste que significa un operativo de tales características, siendo también poco sensibles a la dinámica de los usos del suelo. En general, los sesgos en los modelos basados en el

1. El término falacia ecológica hace referencia a una argumentación errónea basada en la mala interpretación de datos estadísticos, en la que se infiere la naturaleza de los individuos a partir de las estadísticas agregadas del grupo al que pertenecen (Johnston et al., 2000).

enfoque tradicional tienden a exagerar los beneficios de expandir la capacidad vial y subestiman el valor de soluciones alternativas (Ewing et al., 2002).

A la vista de las dificultades que presenta el modelado clásico, se ha planteado recientemente la necesidad de utilizar modelos más simples, conocidos como de respuesta inmediata -*Quick Response Models* en la literatura anglosajona-, alimentados por pocas variables, de fácil acceso o cálculo -población total, empleo, tenencia de coche, etc.- y bajo coste, pero que recogen con mayor precisión las características en el entorno de las paradas o estaciones, y el gradiente de la distancia.

Estos modelos alternativos están llamados a cumplir una función complementaria donde el modelo tradicional no es efectivo y de ninguna manera a reemplazarlos. Normalmente se trata de dos tipos de métodos: curvas *decay* basados en funciones de tipo lineal, exponencial, potencial, etc., y análisis de regresión múltiple. Debido a su relativa sencillez y facilidad de aplicación, presentan también ciertas limitaciones, por ejemplo en cuanto al número y detalle de las variables ya que el aumento de ellas conduciría a un modelo más complejo, cuando la idea central en los modelos de respuesta directa es lo contrario.

El efecto Distance Decay y sus aplicaciones en transporte

La heterogeneidad del espacio geográfico trae consigo un conjunto de procesos y relaciones que vinculan horizontalmente las diferentes localizaciones, lo que se conoce comúnmente como interacción espacial. La distancia es considerada el factor de mayor influencia en los valores de intensidad de la interacción espacial, debido a que representa la separación entre diferentes entidades (Halás et al., 2014).

En la formulación de la Primera Ley de la Geografía (Tobler, 1970), la expresión de que “todo se relaciona con todo, pero lo que está cerca aún más” en referencia al efecto disuasivo que representa el aumento de la distancia con respecto a las interacciones, viene a plasmar el concepto de interacción espacial desarrollado en la década del cuarenta por Zipf y Stewar. Esta contribución al campo de la Geografía Humana pero inspirada en la Física newtoniana, proporciona un sustento empírico a las relaciones locales entre los componentes del espacio geográfico.

La interacción espacial es definida por Buzai (2010:9) como: el concepto que considera la estructuración de un espacio racional en el cual las localizaciones -sitios- distancias -ideales o reales- y vínculos -flujos- resultan fundamentales en la definición de espacios funcionales. Particularmente, las interacciones espaciales pueden ser expresadas en forma de flujos horizontales de agregación, movilidad, finanzas, información, entre otros (Halás et al., 2014).

El concepto de distancia, por tanto, sugiere un número importante de definiciones en virtud del campo y contexto dentro del cual se la interprete. Particularmente, en el campo geográfico, entendemos por distancia la medida de separación existente entre dos puntos de interés, con ello, la intensidad de las interacciones espaciales depende de la dirección en la cual se expresa, de cualidades del origen y destino de los flujos, y sobre la base de la naturaleza de ellos, pueden ser investigados desde diferentes puntos de vista (Halás et al., 2014).

Un concepto que asocia las localizaciones, los flujos y las distancias entre ellas, es el *distance decay*. El efecto que produce la distancia en la variación de la interacción espacial puede ser identificado por medio de la observación empírica de las entidades. Esto permite identificar espacios funcionales que integran componentes como: usos del suelo, flujos de mercancías, transportes e información.

$$I_{ij} = \alpha_i m_j^{\gamma_i} d_{ij}^{\beta_i}$$

Figura 2. Curvas de distancias observadas y agregadas cada 100 m. Fuente: Elaborado sobre la base de Fotheringham (1981).

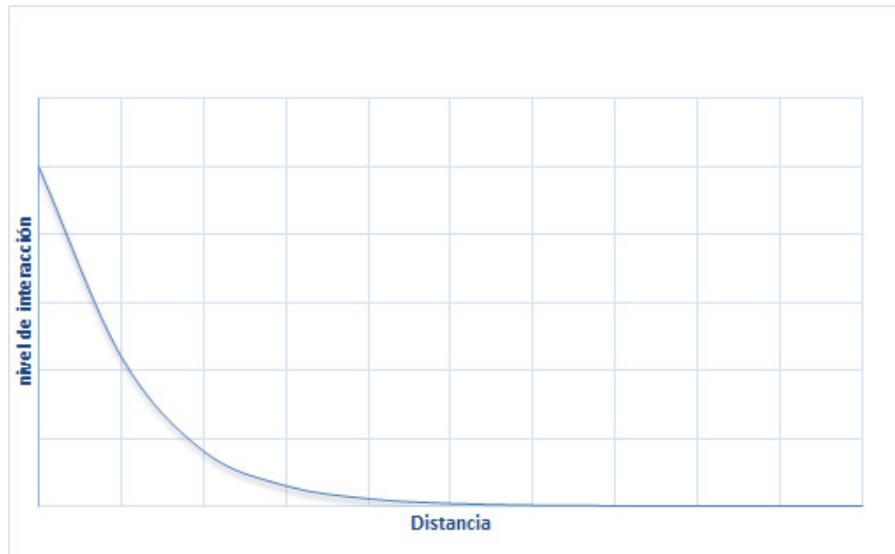


Figura 3. Curva distance decay teórica. Fuente: Elaboración propia.

Sustentada en los modelos gravitacionales, la función *distance decay* queda definida matemáticamente como se muestra en la Figura 2.

Donde I_{ij} es considerado como la interacción entre el origen i y el destino j , m_j es el atractivo de j , d_{ij} es la distancia -o costo de interacción- entre i y j , por último, α_i , γ_i y β_i son parámetros del origen donde β_i es conocido como el parámetro de origen específico del *distance decay* (Fotheringham, 1981).

La curva teórica representativa del efecto *distance decay* es una función exponencial negativa (Ver Figura 3), donde se observa la disminución del grado de interacción con el aumento de la distancia, fenómeno considerado por Tobler (1970) en la formulación de la Primera Ley de la Geografía.

El concepto *distance decay* se presenta como una robusta concepción teórica factible de ser extrapolada a diversos campos, dentro de los cuales, la distancia es una variable a considerar como explicativa de la distribución y asociación de un determinado fenómeno. Con ello, los antecedentes vinculados a esta temática sugieren las más diversas disciplinas y temas que tratan la distribución por medio del concepto *distance decay*. Conceptualmente es definido como la fricción que ejerce la distancia en las interacciones espaciales de dos entidades, lo cual la posiciona como un fenómeno a-escalar, factible por tanto de ser aplicado a variadas temáticas en diferentes contextos y unidades temporales (Eldridge y Jones, 1991).

Así, desde el punto de vista de la accesibilidad, Cheng y Bertolini (2013) por medio de la implementación de una metodología probabilística sustentada en un modelo de interacción espacial, demuestran la manera de representar, medir e interpretar lo que se conoce como *job accessibility* y *job opportunity*. En este sentido, la incorporación de los efectos de la competición, distancia y, son aspectos claves en la bondad final del modelo. En Martínez y Viegas (2013) se propone una nueva metodología *distance decay* para modelar la accesibilidad y la demanda en transporte. Particularmente, estos últimos autores van

a proponer una mejora en la cualidad de representación de los efectos de la interacción espacial en la demanda de transporte, confrontando para ello curvas teóricas con otras provenientes de datos empíricos y comparando el nivel de ajuste en ellas.

Con el propósito de obtener modelos de estimación de viajes y apoyándose, Halás et al. (2014) emplean la función *distance decay* sobre la base de regresiones univariadas y bivariadas, para estimar viajes diarios en el *hinterland* del centro de República Checa. Asimismo, Zacharias (2015) analiza la distribución de los viajes y los usos del suelo en la ciudad de Montreal, concluyendo que la función *distance decay* a la que se ajustan los viajes es modificada por la disponibilidad de los servicios. Al observar la curva concerniente a los edificios de oficinas -función exponencial- y la de viajes, pueden combinarse en una sola curva de tipo cúbica. Del mismo modo, García-Palomares et al. (2013) emplean la función *distance decay* con el objeto de medir la calidad de acceso por parte de la población a las estaciones del metro en Madrid y muestran el efecto de la distancia en los valores de demanda según el perfil demográfico de los potenciales usuarios.

Antecedentes a nivel local

En el ámbito local, no existen trabajos donde se emplee esta metodología para estimar demanda potencial a nivel de paradas, pero existen algunos antecedentes con enfoques similares. En Cardozo et al. (2009) se conjuga el uso de herramientas SIG y de grafos para analizar la conectividad topológica del transporte público de pasajeros en el centro de Resistencia. Rey y Parras (2012) se han concentrado en evaluar el origen de las fuentes de información para estudios de movilidad de la población aplicando metodologías cuantitativa y cualitativa. Por su parte, Da Silva et al. (2014) proponen un modelo explicativo de la demanda de pasajeros en un sector del centro, demostrando el fuerte efecto del uso comercial del suelo. En relación con el análisis de cobertura del transporte público, Parras (2014) obtiene las distancias entre la población -centroides de unidades censales- y las paradas, con el objeto de reconocer situaciones críticas en el acceso dadas por distancias superiores al promedio.

Datos y metodología

Fuentes de información

Las fuentes de información utilizadas han sido diversas en su naturaleza y formato. En principio debemos mencionar que los datos de base corresponden a información primaria, relevada en campo durante los meses de octubre y noviembre de 2014. Cabe destacar que existen relevamientos previos a nivel de paradas (Da Silva et al., 2014), pero no con el detalle obtenido en esta oportunidad respecto a la distancia recorrida por los pasajeros hasta la parada.

Por otra parte, el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC) de la República Argentina facilitó la cartografía censal de radios y fracciones con información del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010, un insumo básico para los cálculos de densidad de población y población a nivel de píxel, utilizados en los análisis posteriores.

De la base de datos SIG de la Dirección de Catastro y Cartografía municipal se utilizaron capas geográficas actualizadas al año 2013, correspondientes a la red vial, barrios y manzanero. Cabe señalar también que el Laboratorio de Tecnologías de la Información Geográfica (LabTIG) de la Universidad Nacional del Nordeste proporcionó la capa de paradas del transporte público, proveniente de un relevamiento realizado por Alejandro Parras en 2009.

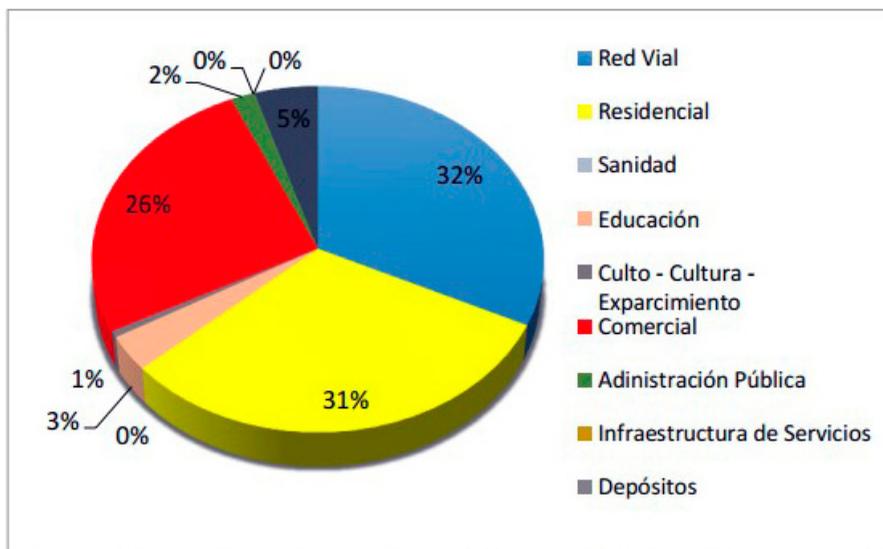


Figura 4. Usos del suelo en el área céntrica de la ciudad de Resistencia. Fuente: Da Silva et al., 2013.

Criterios de selección de línea de autobús y paradas

Dada la magnitud de la infraestructura a relevar -más de 1.400 paradas-, se decidió a los fines prácticos y operativos, circunscribir el análisis a una línea: la N° 9. Se trata de un servicio importante en la ciudad por su cobertura territorial, es una de las más extensas ya que posee 3 ramales y su recorrido enlaza el casco céntrico en sentido nort-sur, con numerosos barrios periféricos y nodos importantes de la ciudad -terminal de ómnibus, hipermercados, Parque 2 de Febrero, plaza central 25 de Mayo de 1810-. Asimismo, cabe mencionar que en un estudio previo de esta línea de autobús (Da Silva et al., 2014), ya se había observado el importante volumen de pasajeros que transporta.

Funcionalmente, la ciudad de Resistencia se organiza sobre la base de un área céntrica donde se concentran las actividades comerciales, de servicios y administrativas (Ver Figura 4), lo que deriva en una fuerte densidad que se atomiza en un espacio de 100 ha en torno a la plaza central y sobre ejes viales de marcada importancia, tales como: Juan Domingo Perón, Arturo Illia, General Güemes, Santa María de Oro, etc. (Da Silva et al., 2013), estas condiciones en la distribución de los usos del suelo, generan una fuerte atracción de viajes diarios y por lo tanto, una importante concentración en la oferta de transporte, tanto de líneas como paradas de autobús.

El otro sector seleccionado para la comparación es el barrio Güiraldes. Se trata de un barrio planificado, con viviendas multifamiliares de 2 y 3 plantas construidas entre las décadas del setenta y del ochenta, localizado al sur de la ciudad. Algunas características que justifican su elección son: la distancia al centro es considerable -unos 3 km aproximadamente-, predomina una estructura socioeconómica baja de alta densidad (Odriozola y Falcón, 2007), y presenta una calle principal donde se desarrollan algunas funciones de importancia -comercios, servicios, administración, entre otras.

Por último, cabe señalar que fueron tomados datos en más de 40 paradas, localizadas tanto en el sector céntrico como del barrio Güiraldes, pero a los efectos de evitar solapamientos al determinar las áreas de influencia de cada parada hasta los 400 m, se optó finalmente por seleccionar 6 sitios de paradas² en total: 4 ubicadas en el centro y 2 en el barrio Güiraldes.

Modalidad de aforo en las paradas

La toma de datos en campo se realizó por medio de aforos en las 40 paradas de la Línea 9 seleccionadas. Básicamente consistió en un registro del ascenso y descenso de pasajeros, durante los meses de octubre y noviembre de 2014, sobre la base de la siguiente metodología:

2. Se denomina de esta forma a la intersección vial donde normalmente se localiza más de una parada -una de ida y otra de vuelta- del transporte público

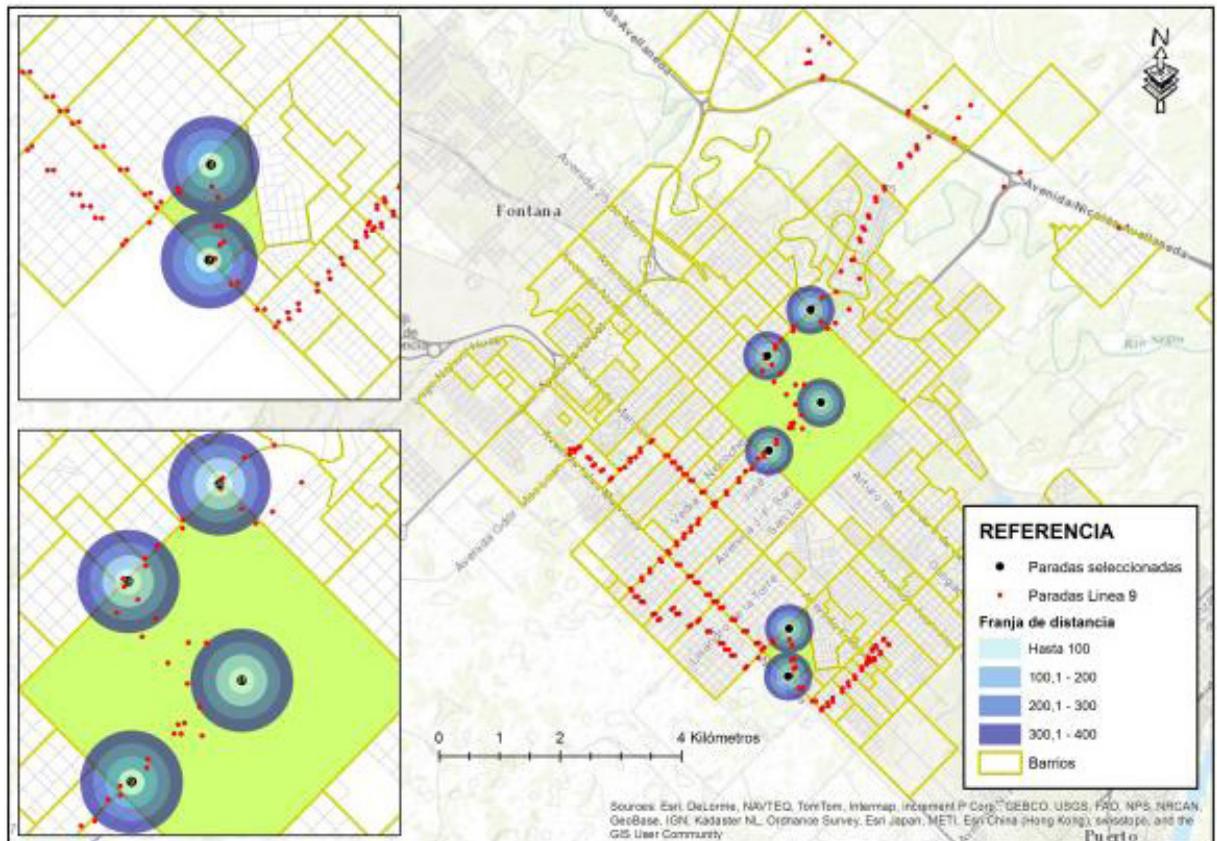


Figura 5. Áreas de captura de las paradas seleccionadas.
 Fuente: Elaboración propia.

- » durante 3 días de una semana: dos días entre semana (martes, miércoles o jueves) y un fin de semana (sábado),
- » en 3 momentos del día: mañana (9:00 h), mediodía (12:00 h) y tarde (18:00 h),
- » en periodos de 30 minutos de duración,

Las franjas horarias seleccionadas para el aforo fueron obtenidas de la curva teórica en el uso del transporte. Los momentos observados responden a las variaciones temporales (diaria y semanal) de *picos* y *valles* que experimenta el volumen de usuarios, por lo tanto, se trata de un aforo parcial del servicio, cabe aclarar que los valores de pasajeros observados no fueron expandidos a una semana, ya que de todas formas la participación relativa no varía.

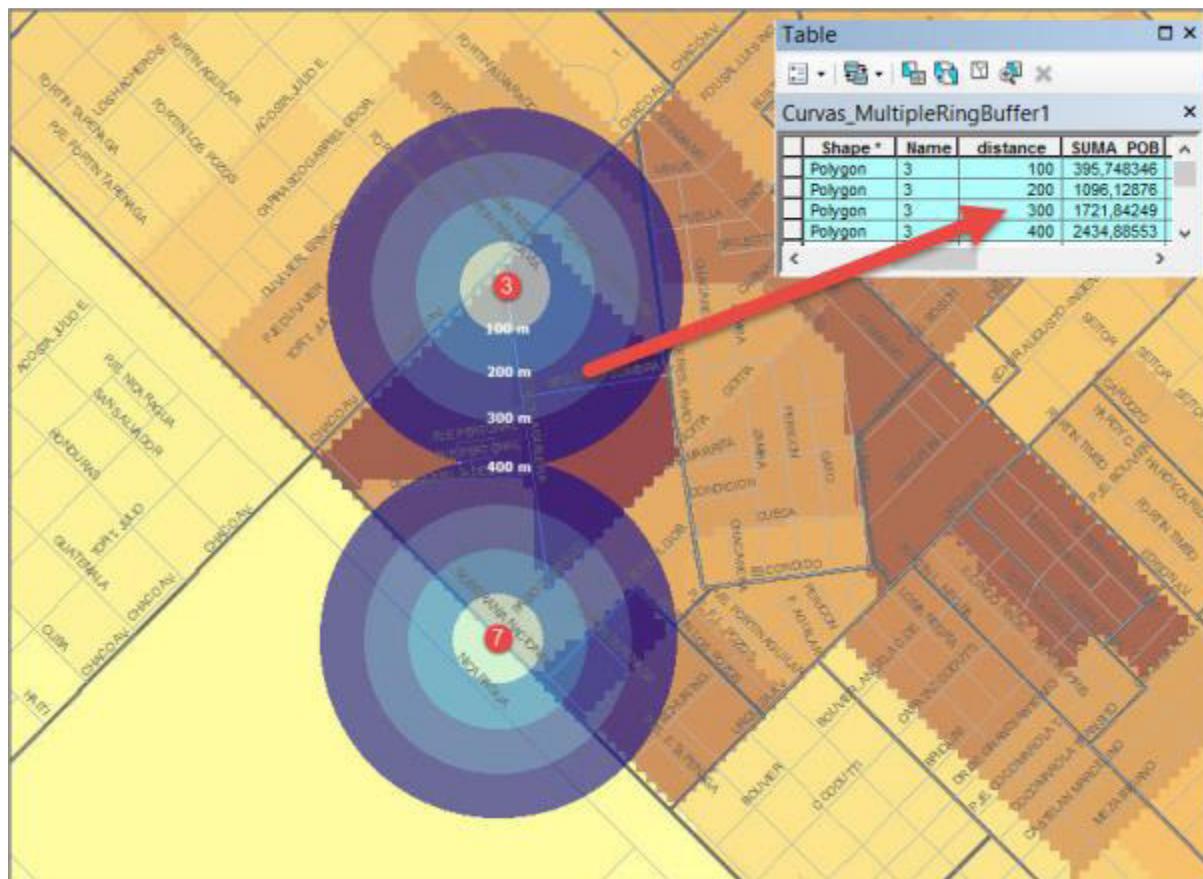
El registro de la información se efectuó por medio de planillas donde se consigna la hora de llegada del vehículo, la cantidad de personas que ascienden y descienden del mismo, así como la distancia recorrida hasta la parada.

Generación de información por medio de herramientas SIG

Obtención de la población en el entorno de la parada

Las herramientas SIG están llamadas en un corto plazo a ocupar un destacado rol en el campo de la movilidad y el transporte, debido a sus amplias capacidades analíticas y para el manejo de información georreferenciada (Da Silva et al., 2014). En este marco, se aplicaron una serie de geoprocursos en un software SIG para el cálculo de las variables, que de otra forma serían difíciles de obtener, por ejemplo, la población en cada franja de 100 m.

Una de las principales variables generada fue la población en el entorno de la parada, como una aproximación de la demanda general, valor que luego sería ajustado con las funciones de *distance decay*. Para esta tarea, se realizó el cálculo de la densidad de



población en hectáreas a partir de la cartografía censal, y luego su conversión a un formato ráster con celdas de 20 m a los efectos de obtener la cantidad de personas a nivel de píxel, se trata de un enfoque superior frente a los clásicos análisis de unidades censales por centroide o por asignación proporcional del área.

Figura 6. Cálculo de población cubierta según franja de distancia. Fuente: Elaboración propia.

Delimitación del área de captura -buffers- de las paradas seleccionadas

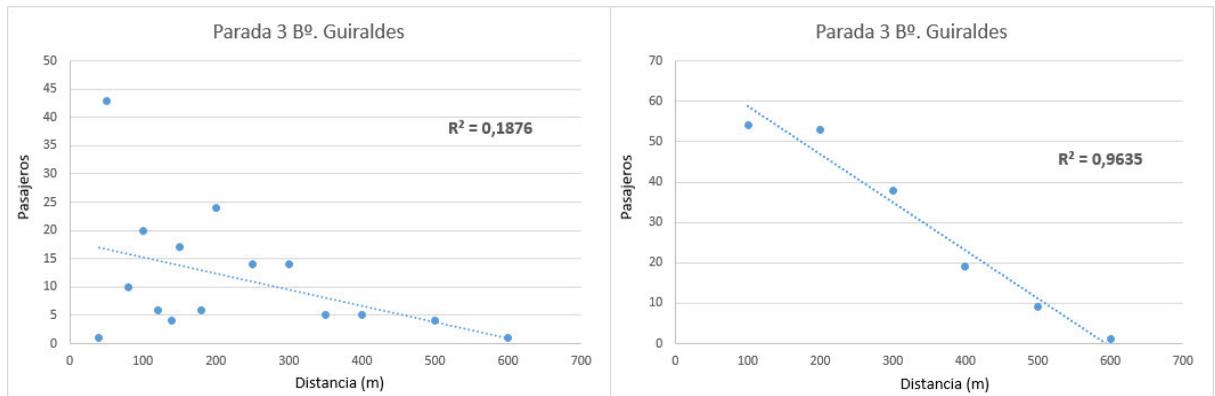
Otra tarea desarrollada con los SIG fue la determinación del área de captura de las paradas. Esta operación se realizó con la herramienta de buffers múltiples, lo que permitió obtener franjas cada 100 m de distancia desde a las paradas seleccionadas. Un parámetro importante en estas operaciones es definir el umbral máximo de distancia, lo cual normalmente es resuelto de forma arbitraria. En nuestro caso se utilizó el valor de 400 m ya que representa la distancia promedio que caminan los pasajeros en las paradas relevadas.

Obtención de estadísticas para el área de captura

Seguidamente, mediante operaciones de superposición entre las franjas de distancia y la población a nivel de píxel, se realiza el cálculo de personas en el entorno de cada parada (ver Figura 6). Para ello se utiliza la herramienta de *estadística zonal*, donde una de las operaciones aritméticas que ejecuta, es la suma de los valores de los píxeles en el entorno definido por franjas de distancia en el buffer correspondientes a cada parada.

Agregación en franjas de 100 metros de los viajeros observados

Sobre la base de la pregunta de la distancia recorrida hasta la parada, se pudo obtener el alcance efectivo de la cobertura de las mismas. Una vez que los valores de distancia declarados por los pasajeros fueron agregados en rangos de 100 m, se construyeron las curvas



de *distance decay* con sus correspondientes funciones de ajuste, que representan la forma en que decrecen los viajes a partir del aumento de la distancia desde la parada (ver Figura 7).

Figura 7. Ejemplo de curvas de distancias observadas y agregadas cada 100 m. Fuente: Aforo de pasajeros, octubre-noviembre de 2014.

Obtención de valores de probabilidad para el ajuste de la demanda potencial por franjas de distancia

Finalmente se realiza el cruce de ambos datos, la población en el entorno de la parada definido por los 400 m y los valores de probabilidad obtenidos de las observaciones a nivel de franjas de distancias. El producto de ambos en cada franja de distancia, constituye un valor de demanda potencial, entendida esta como el segmento de la población total en el entorno de la parada que tiene mayor probabilidad de usar el servicio.

La demanda potencial queda definida matemáticamente como:

$$DP_{fi} = P(fi) * Pob_{fi}$$

Figura 8. Fórmula el cálculo de probabilidad por franjas. Fuente: Elaboración propia.

Donde DP_{fi} , es la demanda potencial que se quiere estimar en la franja de distancia considerada, fi , es la franja de distancia observada, $P(fi)$, es la probabilidad obtenida para esa franja, $Pob(fi)$, es la población total en la franja.

El procedimiento para obtener los valores de probabilidad por franjas de distancia se obtiene de la siguiente fórmula:

$$P(fi) = \frac{Pas_{fi}}{Pas_n}$$

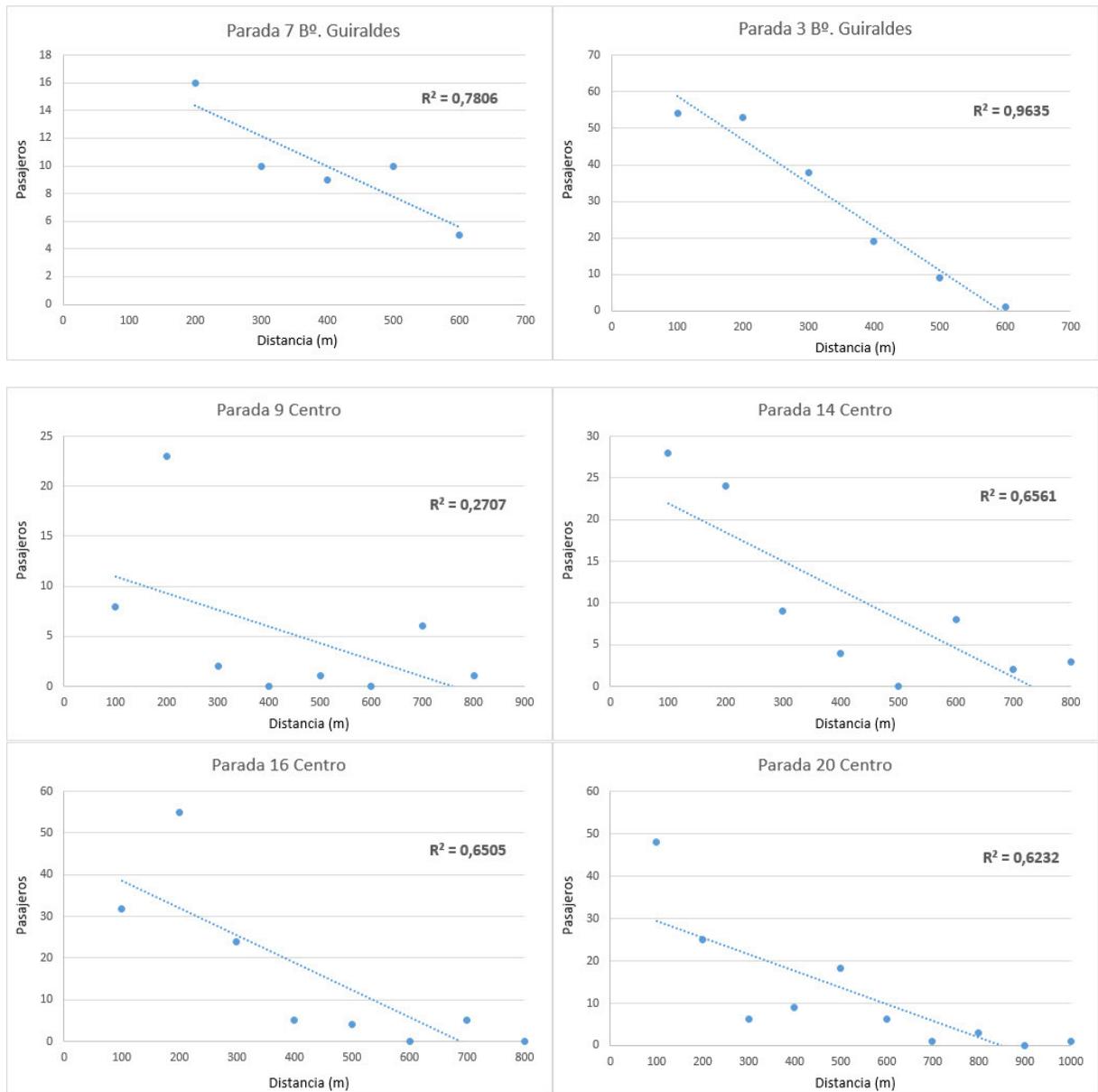
Figura 9. Fórmula para la estimación de demanda potencial. Fuente: Elaboración propia.

Donde $P(fi)$, es la probabilidad en la franja considerada, Pas_{fi} , es la cantidad de pasajeros en la franja, y, Pas_n , es la sumatoria de los pasajeros observados en todas las franjas.

Resultados

Curvas distance decay

Uno de los primeros resultados obtenidos en la presente investigación son las curvas *distance decay* para cada una de las paradas obtenidas, tanto en el barrio Güiraldes como en el Centro. Estas fueron calculadas para cada una de las paradas del



transporte público de pasajeros (ver Figuras 10 y 11), información con la que no se contaba hasta el momento. Cabe destacar que ello constituye una aproximación superadora frente al típico análisis la cobertura, donde todas las paradas son tratadas bajo un mismo umbral de distancia.

Figura 10. Curvas de distance decay en las paradas del barrio Guiraldes. Fuente: Aforo de pasajeros, octubre-noviembre de 2014.

Los ajustes obtenidos en las curvas, ponen de manifiesto la magnitud del efecto de la distancia en la captura de población para cada una de las paradas. En el caso de las paradas de barrio Güiraldes, los coeficientes de determinación obtenidos dan la pauta de relaciones más fuertes -R² de 0,78 y 0,96 en las paradas 7 y 3 respectivamente-, lo que corrobora la hipótesis de la disminución de la población que utiliza el transporte público con el aumento de la distancia.

Figura 11. Curvas de distance decay en las paradas del Centro. Fuente: Aforo de pasajeros, octubre-noviembre de 2014.

Por otro lado, las curvas del Centro presentan algo menores respecto a las anteriores, con ajustes de entre 0,62 y 0,65 para las paradas 14, 16 y 20, excepto en la parada 9 donde el R² es de 0,27. En términos generales, las paradas 14, 16 y 20, manifiestan un comportamiento similar a las del Guiraldes -marcada disminución de la población que utiliza el transporte

público con el aumento de la distancia-, situación también presente pero de una manera más débil en la parada 9, la cual puede estar siendo influida por el comportamiento de alguna variable del entorno como los usos del suelo, la densidad de población, entre otras. En virtud de ello, es necesario un estudio más profundo para conocer las cuestiones vinculadas a las capturas de población usuaria en cada franja de la parada 9, incorporando otras variables explicativas, consideración que traspasan los alcances de la presente contribución.

Estimación de demanda potencial en el Centro y el barrio Güiraldes

A partir de las franjas de distancias construidas por medio de operaciones de geoprosesos en un SIG, se obtienen los datos de población y se calculan las probabilidades por franjas de distancias, para finalmente estimar la demanda potencial en cada una de ellas.

Demanda potencial estimada en las paradas del barrio Güiraldes

En primera instancia, se ha elaborado el Cuadro 1 que representa los valores de población total y los de demanda potencial estimados para el barrio Güiraldes.

Cuadro 1. Estimación de la demanda potencial (DP) en las paradas 3 y 7 del barrio Güiraldes. Fuente: Elaboración propia.

Parada Distancia	3		7	
	Población Total	Demanda Potencial	Población Total	Demanda Potencial
100	396	123	133	10
200	1.096	334	572	169
300	1.722	376	1094	203
400	2.435	266	1395	233
TOTAL	5.649	1.099	3.194	614

Si analizamos los resultados obtenidos en ambas paradas, vemos que en la parada 3, el 34% de la demanda potencial se ubica en la franja de 300 m, llegando al 64% en la franja de 200 m. Si observamos la localización de la parada en el barrio (ver Figura 5), observamos que su localización en los bordes del área urbana, dificulta la captura de población en la franja de 100 m. Del mismo modo, la demanda potencial disminuye en la franja de 400 m, debido a que a esa distancia entra en un área de competencia con las otras paradas localizadas en el barrio.

La situación presente en la parada 7 cambia sustancialmente, tanto en la primera franja como en la última -100 y 400 m-. Su ubicación en un extremo del barrio, adyacente a una importante avenida, le genera una pobre captura de población pero no así de usuarios por tratarse de una especie de cabecera de servicio, y por lo tanto, los valores estimados de demanda potencial tienden a aumentar, particularmente en la franja de 400 m donde se calculó en un 37% del total. Frente a esto, apenas 1,6% de demanda potencial estimada se localiza en la franja de 100 m (ver Figura 12).

Demanda potencial estimada en las paradas del Centro

Con el mismo proceder que la estimación en el barrio Güiraldes, se ha elaborado el Cuadro 2, donde se muestran los valores de población total observados por franjas de distancia y la demanda potencial estimada en las mismas.

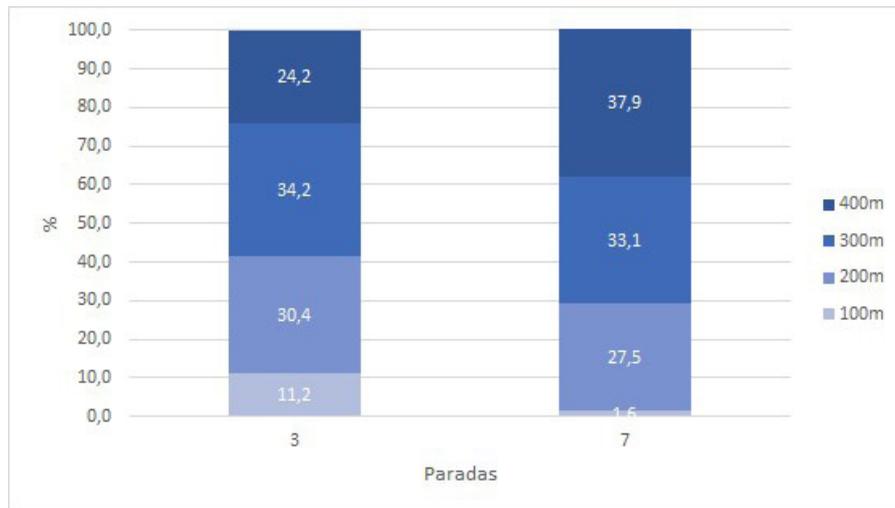


Figura 12. Proporción de demanda potencial por franjas del Barrio Güiraldes. Fuente: Aforo de pasajeros, octubre-noviembre de 2014.

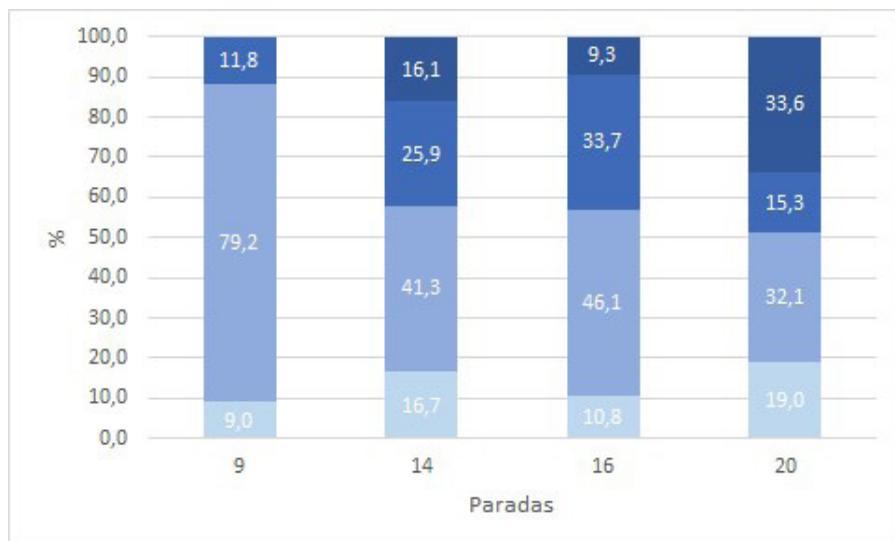


Figura 13. Proporción de demanda potencial por franjas del Centro. Fuente: Aforo de pasajeros, octubre-noviembre de 2014.

Cuadro 2. Estimación de la demanda potencial (DP) en las paradas 9, 14, 16 y 20 del Centro. Fuente: Elaboración propia.

Parada Distancia	9		14		16		20	
	Población Total	Demanda Potencial						
100	167	33	143	51	137	35	75	52
200	515	289	410	126	338	149	244	88
300	883	43	685	79	566	109	480	42
400	1.130	-	951	49	751	30	708	92
TOTAL	2695	365	2189	305	1792	323	1507	274

Para todas las paradas del centro consideradas, observamos que los máximos valores de estimación de la demanda potencial se producen siempre en la franja de 200 m, lo que representa un 79,2% en la parada 9, 41,3% para la parada 14, y un 46,1% en la 16, a excepción de la parada 20 donde el monto mayor de demanda se alcanza en la franja de 400 m con el 32,1% (Ver Figura 13). Es decir, que en casi todas ellas se confirma la hipótesis del efecto de la distancia respecto del volumen de pasajeros.

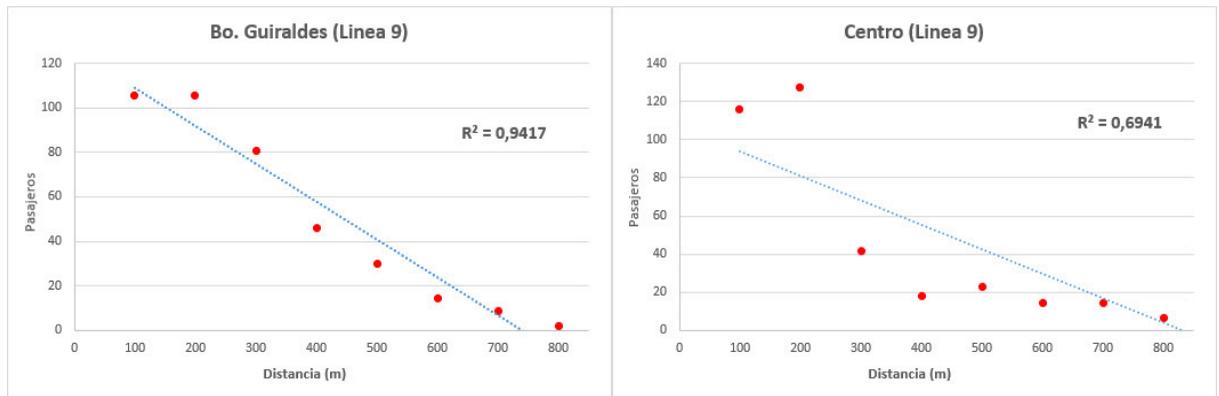


Figura 14. Comparativa de distance decay en Centro y barrio Güiraldes. Fuente: Aforo de pasajeros, octubre-noviembre de 2014.

El gran número de datos observados en la parada 9 -unas 290 observaciones- se vincula a la posición geográfica de dicha infraestructura. Se trata de un espacio próximo a la plaza central de la ciudad, donde la actividad comercial se atomiza considerablemente, en particular a una distancia de 150 a 300 m. Asimismo, cabe aclarar que una posible influencia en los datos estaría relacionada con lo que en la literatura se conoce como *población flotante*, aquella población que proviene de otros sectores de la ciudad con el objetivo de realizar algún tipo de actividad como trabajo, compras, educación, trámites, entre otras.

Sin embargo, las paradas 9, 16 y 20 -localizadas en los extremos del centro-, capturan población tanto del centro como de las unidades administrativas limítrofes. Por ello, estas entidades pueden captar tanto población flotante como población residente, lo que abre nuevos horizontes para el estudio más acabado de la demanda de usuarios del transporte público en la ciudad.

Comparación de curvas *distance decay* y demanda potencial entre el Centro y el barrio Güiraldes

Comparación de curvas distance decay

Por último, con el fin de observar la variabilidad general tanto en los efectos *distance decay* y las estimaciones de demanda potencial a nivel de franjas, se ha optado por la generalización tanto de las curvas como. Esta generalización, permite observar el comportamiento global de las paradas analizadas, disminuyendo la influencia causada por factores externos a cada una de las paradas observadas en apartados anteriores.

Un dato importante que brindan las curvas generales (Ver Figura 14) es la pendiente de las rectas de ajuste. En este caso, la disminución de la población que accede al transporte público con el aumento de la distancia muestra en el barrio Güiraldes una relación más fuerte, dado su R^2 de 0,94, en comparación con la del Centro que presenta un R^2 de 0,69. Sin embargo, en ambos casos existe una buena correlación entre distancia y disminución de la población que accede al transporte público, debido a que los ajustes superan el 0,5 valor normalmente considerado como crítico en estos tipos de estudios.

Estimación de demanda potencial general

Para realizar las correspondientes comparaciones en las estimaciones de demanda potencial general, se elaboraron los Cuadros 3 y 4 donde se especifican los pasajeros observados, la población total por franjas, los valores de probabilidad obtenidos para cada una de las franjas y las estimaciones de demanda potencial.

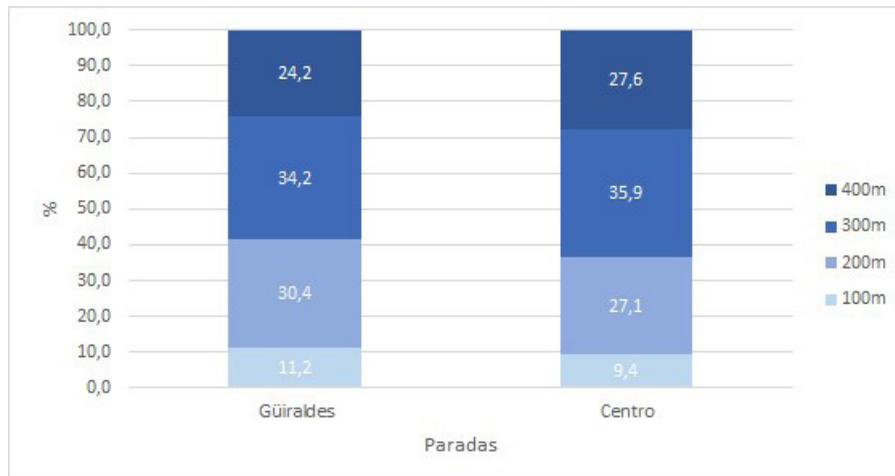


Figura 15. Proporción de demanda potencial por franjas del barrio Güiraldes y Centro. Fuente: Aforo de pasajeros, octubre-noviembre de 2014.

Cuadro 3. Datos generales de población cubierta, probabilidad y demanda potencial en las paradas del barrio Guiraldes. Fuente: Elaboración propia.

Distancia	Pasajeros	Población Total	Probabilidad	Demanda Potencial
100	54	396	0,31034	123
200	53	1.096	0,30460	334
300	38	1.722	0,21839	376
400	19	2.435	0,10920	266
500	9	-	0,05172	-
600	1	-	0,00575	-
TOTAL	174	5.649	1	1.099

Cuadro 4. Datos generales de población cubierta, probabilidad y demanda potencial en las paradas del Centro. Fuente: Elaboración propia.

Distancia	Pasajeros	Población Total	Probabilidad	Demanda Potencial
100	106	522	0,26904	140
200	106	1.507	0,26904	405
300	81	2.614	0,20558	537
400	46	3.540	0,11675	413
500	30	-	0,07614	-
600	14	-	0,03553	-
700	9	-	0,02284	-
800	2	-	0,00508	-
TOTAL	394	8.183	1	1.497

La generalización llevada a cabo muestra un comportamiento similar de la demanda potencial a nivel de franjas tanto en el Centro como en Güiraldes, alcanzado en la franja de 300 m, la máxima proporción de estimación con un 34,2% para el Guiraldes y un 35,9% para el Centro (Ver Figura 15).

Conclusiones

Una contribución interesante para el análisis del transporte público de Resistencia es haber determinado umbrales empíricos mínimos -400 m- y máximos -700/800 m- del área de captura de las paradas. Estos valores de alcance efectivo del transporte público, constituyen un dato fundamental para la planificación futura del servicio. También es cierto que esa magnitud no tiene un componente de distribución geográfica y que, por lo tanto, considerar el umbral de distancia sin una dirección genera en ocasiones solapamientos en las áreas de captura de las paradas. A futuro se podría ensayar la utilización de un buffer o área servicio ponderado que mejore este inconveniente.

La obtención de las curvas de *distance decay* permitió por un lado, reconstruir el comportamiento espacial de los pasajeros al momento de acceder al transporte público, con lo cual se comprobó la existencia de diferencias en el área de captura de las paradas según su localización. Mientras que en el Centro muestran una fuerte caída más allá de los 200 m, en el barrio Guiraldes las curvas experimentan un decrecimiento menos pronunciado.

Otro elemento clave puesto en evidencia es el rol que juega el factor *localización* de las paradas. Las características de su ubicación ejercen una fuerte influencia, y en cierta forma condiciona los valores de población capturada en las franjas de distancia, por lo tanto, también incide en los valores de demanda potencial estimados.

También resulta evidente cómo, la demanda potencial estimada con esta metodología representa un dato más preciso de la cantidad de usuarios que realmente accede al transporte público, mejor que la mera cantidad de persona residentes en el entorno de la parada obtenida con los clásicos análisis de cobertura.

Por otro lado, una de las principales utilidades de las curvas generadas fue la de posibilitar el cálculo de las probabilidades necesarias para conocer la demanda potencial a nivel de paradas. Se trata de un modelo predictivo sencillo basado en la población y la distancia recorrida, pero que a futuro puede mejorarse incluyendo otras variables como la tenencia de vehículos en el hogar, nivel de renta, usos de suelo, etc. Si fuera posible caracterizar a los pasajeros, también habría que esperar diferencias en cuanto a la edad, género y motivo del viaje, cuestiones que podrán ser abordadas en trabajos futuros.

En cuanto a la generalización de los datos a nivel administrativo -Centro y Güiraldes-, podemos remarcar como las franjas de 200 y 300 se consolidan como los umbrales donde los valores de la demandad potencial son máximos. Si nos detenemos en una de las explicaciones de diseño urbano, los 100 m se ven afectados por la red vial y las veredas presentes en el entorno de cada una de las paradas, por ello vemos el valor positivo que adquiere la agregación cada 100 m, debido a que permite disminuir el efecto producido por esta particularidad urbana.

En efecto, estas consideraciones observadas tanto en el entorno de las paradas, en los umbrales de distancia empleados y en los valores de demanda potencial obtenidos, abren interrogantes hacia estudios más profundos de la demanda de usuarios para el transporte público, desde una óptica más *local*, lo que posiciona a esta metodología como una de las más adecuadas para su análisis, a diferencia de los modelos más sofisticados -como el de 4 etapas-, que requiere un número de requisitos más importante y lo generaliza a nivel de zonas de transporte.

Bibliografía

- » BUZAI, G. y BAXENDALE, C. (2011). *Análisis socioespacial con Sistemas de Información Geográfica*. Buenos Aires, Lugar Editorial.
- » BUZAI, G. (2010). Análisis espacial con Sistemas de Información Geográfica: sus cinco conceptos fundamentales. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica. Aspectos conceptuales y aplicaciones*, Nº 7, Universidad Nacional de Luján - GESIG. pp. 163-195 <<http://www.gesig-proeg.com.ar/documentos/articulos/2010-BUZAI-CAP7.pdf>>
- » CARDOZO, O., GÓMEZ, E. y PARRAS, A. (2009). Teoría de Grafos y Sistemas de Información Geográfica aplicados al transporte público de pasajeros en Resistencia (Argentina). *Revista Transporte y Territorio* Nº 1, Universidad de Buenos Aires. ISSN: 1852-7175. p. 89-111. <www.rtt.filo.uba.ar/RTT00105089.pdf>
- » CHENG, J. y BERTOLINI, L. (2013). Measuring urban job accessibility with distance decay, competition and diversity. *Journal of Transport Geography*, p. 100-109. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.03.005>>
- » DA SILVA, C., CARDOZO, O., ODRIÓZOLA, G. y BONDAR, C. (2014). Uso comercial del suelo y transporte público en el centro de Resistencia, Argentina, *XVIII Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito Transporte y Logística (PANAM)*, Universidad de Cantabria, España.
- » DA SILVA, C., CARDOZO, O., ODRIÓZOLA, J. y BONDAR, C. (2013). Usos del suelo: distribución, análisis y clasificación con Sistemas de Información Geográfica (SIG). *Geografía y Sistemas de Información Geográfica. (GESIG-UNLU, Luján)*, 5, p. 142-152. <http://www.gesig-proeg.com.ar/documentos/revista-geosig/2013/ARTICULO-o8-DA-SILVA.pdf>
- » ECHENIQUE, M. y PARTNERS LTD. (1994). *MEPLAN Models of London and the south east Scenario test for London*. Cambridge, England, Final Report.
- » EWING, R. y CERVERO, R. (2002). Travel and the built environment: a synthesis. *Transportation Research Record*, p. 87-113.
- » FLYVBJERG, B., HOLM, M.K.S. y BUHL, S.K. (2006). Inaccuracy in Traffic Forecast. *Transport Reviews*, Vol. 26 Nº 1, p. 1-24.
- » ELDRIDGE, D. y JONES, P. (1991). Warped Space: a geography of distance decay. *Association of American Geographers*, Vol. 43 Nº 4, p. 500-511.
- » FOTHERINGHAM, Stewar A. (1981). Spatial Structure and Distance-Decay Parameters. *Annals of Association of American Geographers*, Vol. 71, Nº 3, p. 425-436.
- » GARCÍA-PALOMARES, J. C., GUTIÉRREZ, J. y CARDOZO, O. D. (2013). Walking accessibility to public transport: an analysis based on microdata and GIS. *Environment and Planning B: Planning and Design* Vol. 40 Nº 6, p. 1087-1102. <[10.1068/b39008](https://doi.org/10.1068/b39008)>
- » GONÇALVES DE SOUZA, P. V. (2005). *Modelización de la Interacción de Usos del Suelo y Transporte. Aplicación al Corredor de la A-3 de Madrid*, Tesis Doctoral, Madrid.
- » HALÁS, M., KLAPKA, P. y KLADIVO, P. (2014). Distance-decay functions for daily travel-to-work flows. *Journal of Transport Geography*, p. 107-119. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.02.001>>

- » HANSEN, W. (1959). How accessibility shapes land-use. *Journal of the American Institute of Planners*, Vol. 25 N° 2, p. 73-76.
- » JOHNSTON, R. J., GREGORY, D y SMITH, D. (2000). *Diccionario Akal de Geografía Humana*. Madrid, Ediciones Akal.
- » KENT, J., LEITNER, M. y CURTIS, A. (2006). Evaluating the usefulness of functional distance measures when calibrating journey-to-crime distance decay functions. *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol. 30, p. 181-200. <10.1016/j.compenvurbsys.2004.10.002>
- » LLOYD, C. D. (2015). Local cost surface models of distance decay for the analysis of gridded population data. *Journal of the Royal Statistical Society. Statistics in Society*, p. 125-146.
- » MARSHALL, N. y GRADY, B. (2006). Sketch Transit Modeling Based on 2000 Census Data. *Journal of the Transportation Research Board* 1986, P. 182-189.
- » MARTÍNEZ, M. L. y VIEGAS, J. M. (2013). A new approach to modelling distance-decay functions for accessibility assessment in transport studies. *Journal of Transport Geography*, p. 87-96. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.08.018>>
- » ODRIOZOLA, J. y FALCÓN, V. (2007). Geo-referenciación de los niveles socioeconómicos del Gran Resistencia. *XXI Educa-AL*, Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina.
- » OLIVARES, C. y FOLGUEIRA, C. (2000). El modelo de usos del suelo y transporte de la Comunidad de Madrid (MECAN), Desarrollo y Aplicaciones, *IV Congreso de Ingeniería del Transporte*. CIT 2000, Valencia.
- » ORTÚZAR, J. y WILLUMSEN, L. (2001). *Modelling Transport*. (Third ed.). New York, Wiley and Sons Inc.
- » PÁEZ, A. (2013). Mapping travelers' attitudes: does space matter? *Journal of Transport Geography*, N° 26, p. 117-125. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.09.002>>
- » PARRAS, A.M. (2014). Propuesta de indicadores para la planificación del Transporte Público en la ciudad de Resistencia (Chaco, Argentina) basada en Sistemas de Información Geográfica. *Revista digital del Grupo de Estudios sobre Geografía y Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica (GESIG)* N° 6, p. 29-46. <http://www.gesig-proeg.com.ar/documentos/revista-geosig/2014/03-PARRAS_2_2014.pdf>
- » REY, C. E. y PARRAS, A. M. (2012). Procedencia de la información en estudios de movilidad de la población a través de experiencias con aplicación de metodología cuantitativa y cualitativa. Resistencia-Chaco. *Revista Transporte y Territorio*, N° 7, p. 100-118. <<http://www.rtt.filo.uba.ar/RTT00706100.pdf>>
- » RODRÍGUEZ-NÚÑEZ, E. y GARCÍA-PALOMARES, J. C. (2014). Measuring the vulnerability of public transport networks. *Journal of Transport Geography*, N° 35, p. 50-63. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.01.008>>
- » TOBLER, W. (1970). Computer movie simulating urban growth in Detroit region. *Economic Geography*, Vol. 46 N° 2, p. 234-240.
- » ZACHARIAS, J. (2015). Underground pedestrian trips-trip generation, spatial distribution and activities in Montréal underground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 46, p. 46-51. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2014.10.006>>

Osvaldo Daniel Cardozo / odcardozo@hum.unne.edu.ar

Profesor en Geografía (2002) egresado de la Facultad de Humanidades (Universidad Nacional del Nordeste). Auxiliar de 1º Categoría y Prof. Adjunto en las cátedras de Geografía de la Población (2002) y Sensores Remotos (2010) respectivamente. Realizó estudios doctorales en Cartografía, SIG y Teledetección en la Universidad de Alcalá, España (2005). Miembro del Laboratorio de Tecnologías de la Información Geográfica -LabTIG- y Grupo de Estudio en Movilidad, Servicios, Infraestructura y Territorio -GEMSIT-.

Cristian Javier Da Silva / cjdasilva@hum.unne.edu.ar

Profesor en Geografía. Egresado (2012) de la Facultad de Humanidades (Universidad Nacional del Nordeste). Cursa la Maestría en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica en la Universidad del Centro de la Provincia de Buenos Aires-Azul (UNCP-BA) y del Doctorado en Geografía dictado en la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE). Miembro del Grupo de Estudio en Movilidad, Servicios, Infraestructura y Territorio -GEMSIT-.