

DISEÑO DE ALTERNATIVAS PARA LA RED DE TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS DE LA CIUDAD DE SANTA FE A PARTIR DE MODELOS DE OPTIMIZACIÓN MATEMÁTICA

Raffa, Nicolás¹

¹Facultad de Ingeniería Química - Universidad Nacional del Litoral - Santa Fe, Argentina

Director: Dr. Montagna, Agustín

Co-director: Dr. Dondo, Rodolfo

Área: Ingeniería

Palabras claves: Transporte Público Pasajeros, Redes, Optimización Matemática

INTRODUCCIÓN

Las redes de transporte urbano de pasajeros son un punto clave en el entramado urbano de una ciudad, movilizándolo diariamente, a través de las mismas, miles de personas para realizar sus actividades (Ortúzar, J de D; Willumsen, L; 2011). El transporte dentro de las ciudades puede ser visto como un gran sistema, comprendido por muchos subsistemas con múltiples complejidades, cuyo objetivo es garantizar la movilidad de personas y mercaderías, dentro de niveles de servicio acorde y con una cobertura que incluya a toda la comunidad (Ceder, A; Wilson, NHM; 1986 - Magnanti, T; Wong, R; 1984). El presente trabajo busca diseñar alternativas para la red de Transporte Público de Pasajeros utilizando modelos de optimización matemática, en particular para la ciudad de Santa Fe. El proyecto tiene por alcance solamente la red de colectivos urbanos e interurbanos, la cual es el medio más utilizado y económico por parte de la población santafesina para moverse.

OBJETIVOS

Los objetivos concretos del trabajo son los siguientes:

- Confeccionar un completo y abarcativo análisis estadístico descriptivo del sistema de colectivos actual de la ciudad de Santa Fe.
- Desarrollar una matriz origen – destino a partir de los datos de las transacciones del sistema SUBE.
- Formular un modelo matemático que genere una red de nodos y arcos que satisfaga de manera óptima las necesidades de transporte de los pasajeros de la ciudad.
- Proponer una serie de recorridos superadores a los actuales, de manera de determinar los lineamientos a seguir para una configuración de recorridos óptima.

Título del proyecto: Modelos y estrategias innovadoras para la producción y distribución sustentable en procesos industriales complejos

Instrumento: CAI+D 2016-UNL / PIC 50420150100101LI

Año convocatoria: 2016

Organismo financiador: UNL

Director: Rodolfo Dondo

METODOLOGÍA

Para el desarrollo estadístico descriptivo de la red actual se propone desarrollar una serie de análisis basados en los datos de las transacciones del sistema SUBE que tuvieron lugar durante 14 días del mes de Mayo de 2019, a partir del lenguaje de programación RStudio. Se revisan diferentes dimensiones del sistema actual teniendo en cuenta dimensiones temporales, espaciales, frecuencias y usuarios del sistema (Sheffi, Y.;1985).

Para la confección de la matriz origen-destino, se desarrollan algoritmos en el lenguaje de programación Python, procesando los datos disponibles de las transacciones para inferir, en los casos que es posible, el destino de cada registro.

En lo que respecta al modelo matemático para la generación de recorridos, se plantea el desarrollo de un modelo de Programación Entera Mixta Lineal (MILP), de manera de obtener una red de nodos y arcos que satisface de manera óptima las necesidades de transporte de los pasajeros. Esto se hace en base a los trabajos de Cancela et al. (2015) y Borndorfer, R. et al (2007).

RESULTADOS: RECORRIDOS CONFIGURADOS PARA LA RED

Los resultados del modelo matemático son un conjunto de grafos (nodos y arcos) que satisfacen de manera óptima los requerimientos de demanda de viajes de los usuarios del sistema. Se puede ajustar los resultados de acuerdo a parámetros de costos y de compatibilidad de arcos entre nodos, así como a diferentes grados de resoluciones de la información. Naturalmente, un mayor grado de resolución permite obtener conclusiones y resultados de mayor precisión y valor agregado para la configuración de recorridos, pero la carga computacional para el desarrollo del modelo aumenta notablemente.

Se puede observar en la Figura 1 el efecto de la consolidación de flujo de arcos en virtud del aumento de los costos fijos de apertura de los mismos, en pos del objetivo que busca el modelo de minimización de costos totales de la red (costos variables + costos fijos).

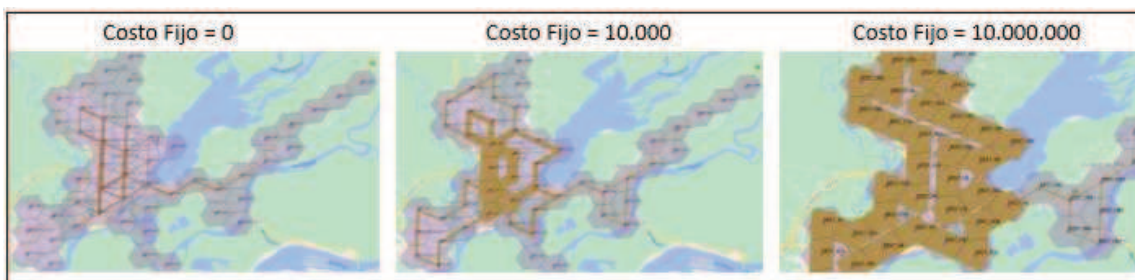


Figura 1: Diferentes resultados para distintos costos fijos de apertura de arco entre nodos.

Basándose en el análisis de los resultados obtenidos y en la confección de una matriz origen destino por macrozonas de la ciudad para reforzar las conclusiones obtenidas del modelo, se confecciona un mapeo de las características primordiales de los patrones de movimiento de pasajeros dentro de la ciudad de Santa Fe (Figura 2). Se puede observar un marcado patrón de movimiento en sentido Este–Oeste (y viceversa) en todas las zonas.

Teniendo presente estas conclusiones, se trabaja en la definición de indicadores para priorizar flujos de pasajeros que se consideran primordiales a la hora de construir una nueva red. Se identifican aquellos flujos de pasajeros de mayor volumen, así como también aquellos que recorren mayor distancia. Teniendo en cuenta estos dos criterios de prioridad definidos, junto con las conclusiones obtenidas, se propone la adopción de los recorridos para las líneas de colectivos de la ciudad de Santa Fe observados en la Figura 3.

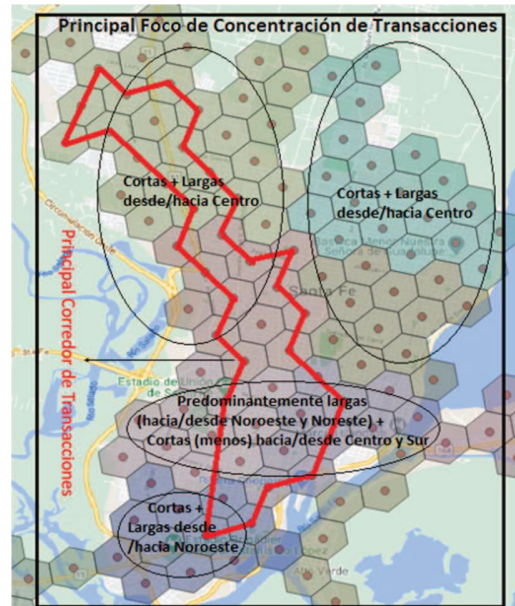


Figura 2: Caracterización de los patrones de movilidad de la ciudad.

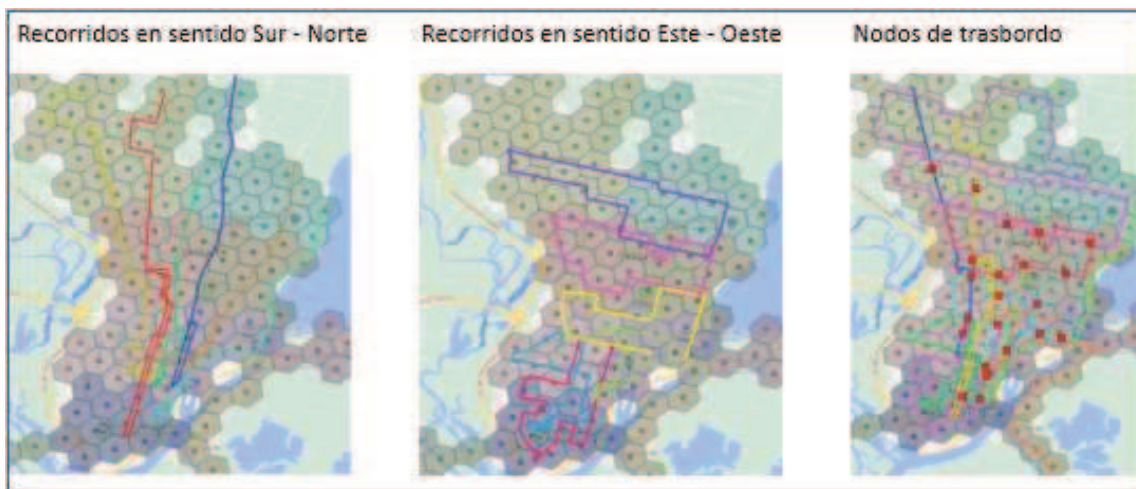


Figura 3: Nuevos recorridos propuestos

En los nuevos recorridos propuestos se pueden identificar dos tipos de recorridos diferentes: por un lado, un conjunto de recorridos rápidos, directos y que circulan en sentido sur – norte (y viceversa); y por otro lado, un grupo de trayectos que circulan en sentido latitudinal, conectándose con los del primer conjunto a través de nodos de traspordo.

En una comparativa de indicadores de performance claves entre los recorridos actuales y los propuestos, para la constitución de una red de transporte público de pasajeros, se

encuentra que estos últimos ofrecen una mejor oferta de servicio, como lo muestran los resultados de la Tabla 1.

Tabla 1: Comparativa de recorridos actuales con los propuestos

RECORRIDOS	ACTUALES	NUEVOS
CANTIDAD DE LÍNEAS	14	14
DISTANCIA TOTAL RECORRIDA ¹ [KM]	436,9	309,89
ÁREA DE COBERTURA ² [KM ²]	61,229	59,107

CONCLUSIONES

Los recorridos propuestos poseen una serie de beneficios superadores en los que se destaca: en primer lugar, están basados en una red de nodos y arcos óptima, es decir, la mejor red que se podría obtener de acuerdo a las demandas de movilización de pasajeros en la ciudad buscando minimizar los costos; en segundo lugar, si se plasman ambos recorridos en una misma capa de mapa, puede observarse una disminución de los solapamientos entre las líneas, lo cual se corresponde con una asignación más eficiente; en tercer y último lugar, si bien el área de cobertura con la nueva disposición disminuye, esta lo hace en un 6,7 %, mientras que la distancia recorrida disminuye en un 29%, lo que genera la posibilidad de modificar en cierta medida los recorridos de las nuevas disposiciones (o generar nuevas líneas), abarcando mayor territorio, sin que la distancia recorrida aumente en grandes proporciones respecto de la disposición actual.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

- Cancela, H; Mauttone, A; Urquhart, ME.** 2015. Mathematical programming formulations for transit network design. *Transportation Research Part B: Methodological* 77:17–37.
- Borndorfer, R; Grottschel M; Pfetsch, ME.** 2007. A column-generation approach to line planning in public transport. *Transportation Science* 41(1):123-132
- Ceder, A; Wilson, NHM.** 1986. Bus network design. *Transportation Research Part B: Methodological* 20(4):331–344.
- Magnanti, T; Wong, R.** 1984. Network design and transportation planning: models and algorithms. *Transportation Science* 18(1):1–55.
- Ortúzar, J de D; Willumsen, L.** 2011. *Modelling Transport*. John Wiley & Sons. ISBN: 780470760390.
- Sheffi, Y.** 1985. *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*. Prentice Hall.

¹ Distancia medida a través de una línea coincidente por el trayecto de ida y vuelta de cada una de las líneas

² Se mide a partir de un área de cobertura ubicada a 100 metros a ambos lados de la línea trazada por los trayectos de ida y vuelta