

Predicción del comportamiento del Metro de Medellín por medio de dinámica de sistemas.

Hamilton Smith Gómez Osorio
Universidad EAFIT
hsgomezo@eafit.edu.co

Santiago Isaza Cadavid
Universidad EAFIT
sisazac@eafit.edu.co

Introducción

Desde que Medellín experimentó un gran crecimiento industrial, económico y político a partir de inicios del siglo XX el crecimiento urbano ha sido característico en nuestra ciudad, grandes empresas se establecieron en lo que ahora conocemos como el Valle de Aburrá y con estas surgió la necesidad de crear alternativas de movilidad para los productos y trabajadores que se desplazaban diariamente. Así se crean múltiples medios como lo fue en su momento el tranvía eléctrico, buses municipales y otros medios convencionales para la época. A medida que avanzó el tiempo, las necesidades de transporte eran muy altas y, con el crecimiento acelerado de la población, como decía José Wilson Márquez (2012) “presionó políticas de salud pública, urbanismo, transporte, servicios públicos, planificación urbana, educación y empleo”. Así fue cómo se empezó un proyecto de transporte masivo que cambiaría la movilidad urbana de todo el Valle de Aburrá. En 1995 fue inaugurado el Metro de Medellín, proyecto que dio origen a la verdadera modernidad de nuestra ciudad y que día a día se ha convertido en fuente de progreso para nosotros los habitantes de este lugar.

A la fecha la ciudad de Medellín cuenta con uno de los mejores sistemas de transporte masivo del país. Ofreciendo a sus usuarios, además del Metro, sistemas como buses integrados, MetroCable, Metroplús y Tranvía, y conformado así lo que se conoce como el Sistema Integrado de Transporte del Valle de Aburrá (SITVA).

Múltiples fuentes han estudiado el impacto que este sistema de movilidad ha traído a la ciudad pues por medio del transporte urbano podemos contribuir al desarrollo económico de las ciudades y así potenciar la innovación y permitir que muchas más personas consigan oportunidades de educación y mejores condiciones de salud (Blomquist,2005. Arnott y McMillen,2006. Glaeser,2010) citado por Gómez y Semeshenko (2018).

Este progreso ha sido fruto de soluciones innovadoras que ha implementado el SITVA para reducir en impacto ambiental de sus medios de transporte, reducción en costos de tarifas, permitir el acceso a los sectores más retirados de la zona central de la ciudad y abrir nuevos canales de comunicación para aquellas personas que buscan mejores oportunidades laborales o académicas en los sectores más desarrollados de Medellín (Quintero,2018).

Todos estos factores han hecho que el SITVA, especialmente el Metro de Medellín, se haya visto afectado en los últimos años por una creciente y constante demanda de usuarios, y no es por nada que esto sucede. Al tratarse de un medio de transporte atractivo en diferentes sentidos, ya sea económico, social o ambiental, este sistema masivo de transporte ofrece servicios de

calidad desde puntualidad en sus salidas y arribos de trenes hasta políticas de inclusión con minorías que se ven afectadas en otras esferas y situaciones de su día a día. Es por esto que trabajaremos el Metro de Medellín y su comportamiento respecto a las demandas de movilidad y muchos otros factores que influyen en su comportamiento diario. Sistema masivo que además moviliza diariamente a miles de personas y que no solo ha cambiado la vida de sus usuarios sino de todo el Valle en general. Ante las atractivas características, y todos los sistemas ofrecidos que conectan a la mayor parte de Medellín, es posible asegurar un aumento de sus usuarios y más ahora que se estima que para finales del año 2019 la línea P, el MetroCable Picacho, le ofrezca sus servicios a un estimado de 4.000 personas por hora en un solo sentido. (Correa, 2017), usuarios que pasarán también a usar el Metro.

Ante esta demanda en aumento decidimos afrontar esta situación de Metro con dinámica de sistemas, pues esta herramienta permite un modelado y posterior análisis de ciclos en los que las variables involucradas tienen una causalidad asociada y que puede afectar el comportamiento del sistema dependiendo de la condiciones que se deban cumplir internamente, además se presentan ciclos de realimentación en el sistema al evaluar las frecuencias de los trenes respecto a los pasajeros que se tienen en plataforma y como esta varía para suplir la demanda que tienen el Metro cada hora, y cómo su comportamiento cambia en el tiempo respecto a los cambios que haya en los factores que influyen en sus procesos.

Por medio de la simulación de sistemas dinámico esperamos conocer el comportamiento del Metro de Medellín, como se dijo anteriormente, en el que dado que el Metro funciona en un horario diario y que sus problemas a la hora de transportar las personas no exceden en tiempo a un día; decidimos evaluar su comportamiento en una jornada completa en un periodo de 18 horas, que es el tiempo en el que este sistema presta su servicio. Con este horizonte pretendemos evaluar el comportamiento en cada hora del día respecto a la cantidad de personas que le llegan y ver cómo se refleja la realimentación para optimizar la cantidad de filas y los tiempos de espera que se presentan a diario. Lo anterior hace referencia al funcionamiento normal del metro lo cual se espera sea acorde al fenómeno real que se vive día a día. Pero conociendo los proyectos que el Metro ha pensado incluir también se hará en análisis en el que la Línea P del metro sea incluida y con ella 4.000 nuevos usuarios se integren a los pasajeros que el sistema debe transportar, además de representar el problema que ha tenido el Metro cuando hay Pico y Placa ambiental en la ciudad y el escenario de cambio de capacidad por trenes que podría surgir en el sistema. Todos estos escenarios serán simulados en el mismo período de tiempo con unas condiciones especiales que serán ilustradas en el proceso de informe.

Modo de referencia del problema y estadísticas encontradas

Como es sabido el Metro es un sistema que opera 18 horas al día y que actualmente mueve en promedio de 36906 usuarios durante cada una de ellas según las estimaciones de crecimiento del 3,8% respecto al 2017 [12], estos usuarios no son constantes puesto que en las horas pico del día, comprendidas entre las 5 am- 8 am y 3 pm-7pm [11] en el que el número de usuarios es mucho mayor respecto a los que circulan en las demás horas del día, gráfico 1. Este sistema cuenta con dos tipos de trenes, uno de ellos con capacidad para 1020 personas y el otro con capacidad de 1220 personas [9]; estos se desplazan en intervalos de 2 minutos para las horas

pico y 5 minutos en horario regular para así transportar las personas y no sufrir mayores retrasos, cumpliendo así con un tiempo de viaje promedio de 20 minutos por persona.

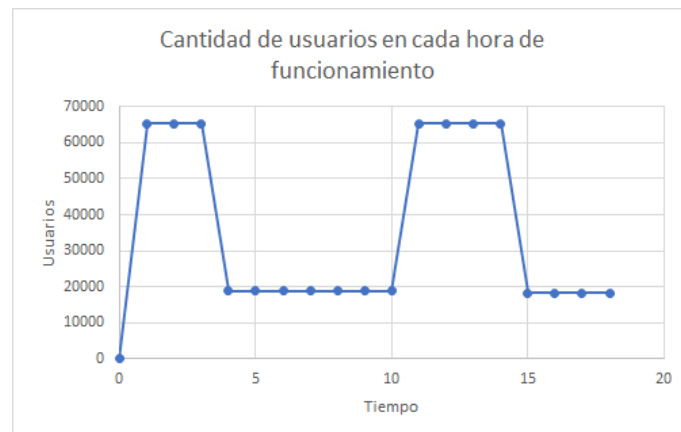


Gráfico 1: gráfico propio de cantidad de usuarios que llegan en cada hora del día en hora pico y en hora valle

Modelación de la situación problema

Diagrama Causal

Utilizamos la información recolectada desde los estudios hechos y los textos publicados acerca de la movilidad en Medellín y con la ayuda del programa Vensim planteamos una representación de causalidad en la problemática estudiada.

Gráfico 2: Diagrama causal del problema de movilidad referente al Sistema Metro en Medellín.

En el gráfico 2 podemos observar dos ciclos de realimentación, uno de ellos hace referencia a la circulación de personas en las que se ve que entre más personas utilicen el metro, más serán las personas transportadas y reduciendo su tiempo de espera y las personas en la plataforma, de caso contrario si las personas que entran son mayores a las transportadas se dará una acumulación constante de pasajeros en plataforma que se ve gracias al ciclo de refuerzo que está presente. Por otro lado, tenemos un ciclo de balance que me permite controlar el desplazamiento de las personas variando la frecuencia de los trenes para así transportar a todas las personas que llegan al sistema. Esto nos crea un tercer ciclo de causalidad directa en el que entre más personas tenga, menor será la capacidad disponible para transportarlos y viceversa.

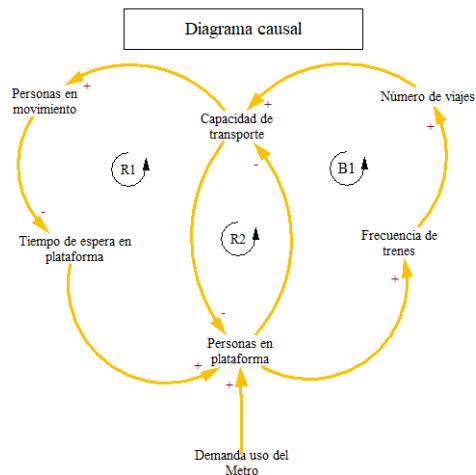


Diagrama de flujos y niveles

También con la ayuda de Vensim hicimos un diagrama que representa las variables involucradas en el sistema que se encargan de los cambios en el comportamiento del sistema, conocidos como flujos y la identificación de aquellas componentes que reportan el estado del sistema conocidos como niveles.

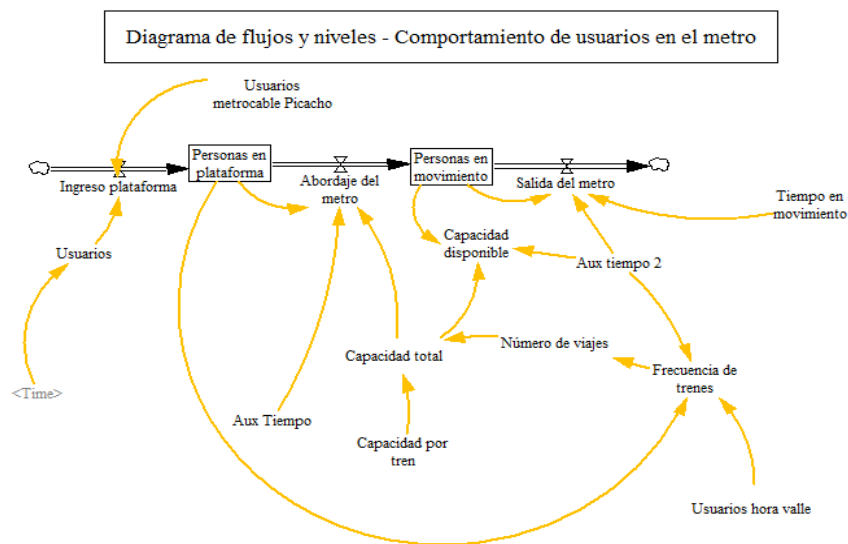


Gráfico 3: Diagrama de flujos y niveles del problema de movilidad referente al Sistema Metro en Medellín.

Variables

Variable	Ecuación	Unidades
Usuario del metro	Función gráfica (time)	Persona/hora
Ingreso plataforma	Usuarios+Usuarios Picacho	Persona/hora
Personas plataforma dP/dT	Ingreso plataforma-Abordaje del metro	Persona
Abordaje metro	IF THEN ELSE((Personas en plataforma/Aux Tiempo)<Capacidad total, Personas en plataforma/Aux Tiempo ,Capacidad total)	Persona/hora
Capacidad por tren	1120	Persona/tren
Capacidad total	Capacidad por tren*Número de viajes	Persona/hora
Personas en movimiento dP/dT	Abordaje del metro-Salida del metro	Persona
Capacidad disponible	Capacidad total-(Personas en movimiento/Aux tiempo 2)	Persona/hora
Frecuencia trenes	IF THEN ELSE((Personas en plataforma/Aux tiempo 2)<=Usuarios hora valle, 12, 30)	Tren/hora
Usuario hora valle	18837	Persona/hora
Número de viajes	2*Frecuencia de trenes	Tren/hora

Salida del metro	IF THEN ELSE(Tiempo en movimiento>=1, Personas en movimiento/Tiempo en movimiento , Personas en movimiento/Aux tiempo 2)	Persona/hora
Tiempo en movimiento (promedio)	1/3	Hora

Tabla 1: tabla de variables con su respectiva ecuación en Vensim y sus unidades

Comportamiento del problema base

Niveles y flujos

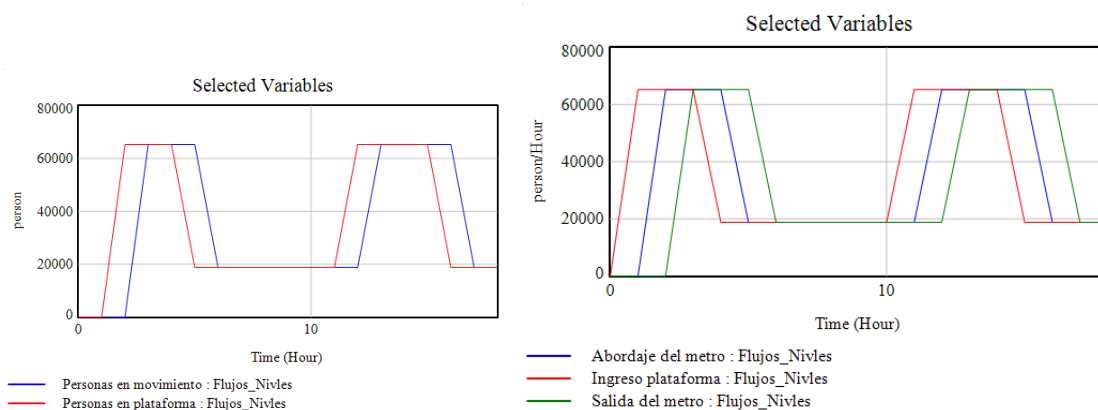


Gráfico 4 y 5: Comportamiento de los niveles y flujos por horas en un día respectivamente

Frecuencia de trenes

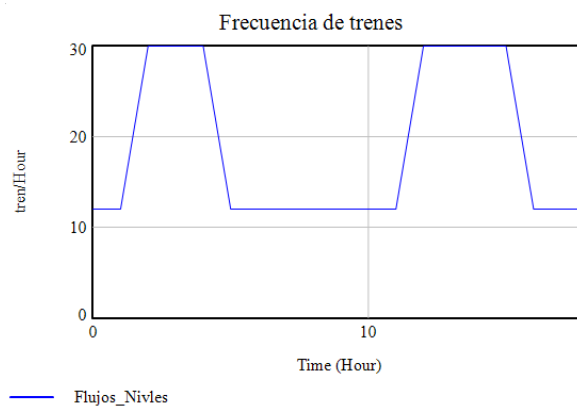


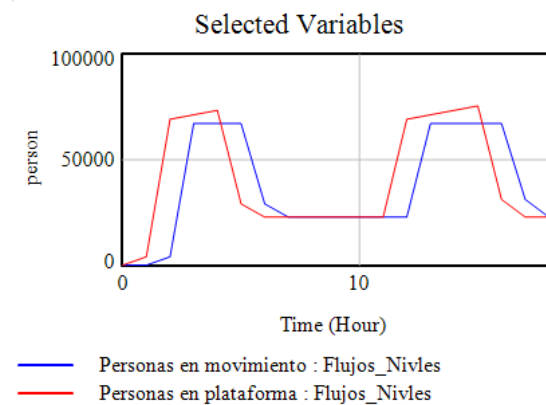
Gráfico 6: Comportamiento de la frecuencia de los trenes por hora en un día

En el caso base podemos observar que por cada número de pasajeros que llega al sistema la frecuencia varía para que la cantidad de trenes que transportan a las personas sean suficientes y así no generar acumulación de pasajeros en plataforma. Podemos ver que los niveles siempre mantienen valores constantes cuando la cantidad de pasajeros que entran es la misma que la que sale de un nivel ya que se alcanza a transportar los pasajeros que llegaron en la hora

anterior. Logrando así que para el cierre del sistema todos los pasajeros hayan sido transportados.

Escenarios Posibles

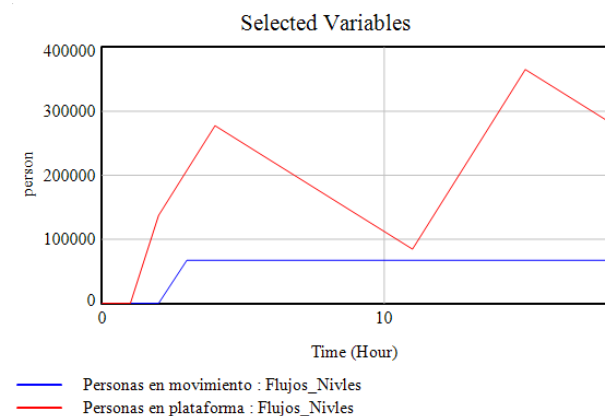
Metrocable Picacho



[13]

Gráfico 7: Comportamiento de niveles en el escenario del Metrocable el Picacho

Pico y placa ambiental



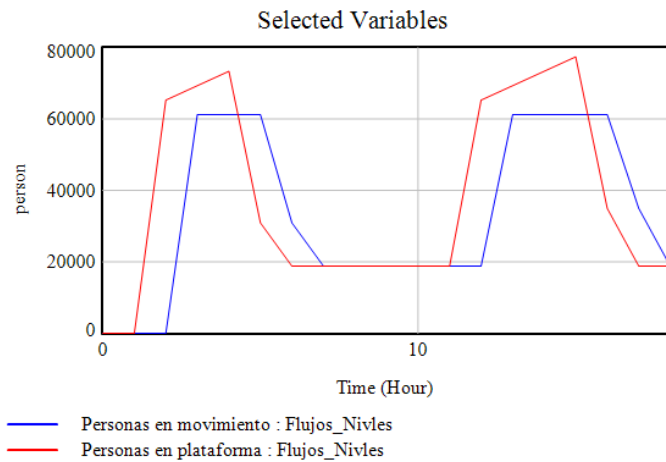
abasto para suplir la demanda. [10]

Gráfico 8: comportamiento de los niveles en el escenario del pico y placa ambiental

Capacidad con vagones nuevos

En este caso de simulación se tiene en cuenta la incorporación del MetroCable Picacho al sistema. Este medio le sumará 4000 usuarios por hora (en promedio) al sistema (Noticias Metro, 2019); por lo que al analizar la gráfica se observa que se da una acumulación de pasajeros en las horas pico debido al alto flujo de usuarios, pues en ese caso no da abasto en determinada franja horaria el transporte; aun así, después de un tiempo de espera estas personas logran ser transportadas cuando el flujo de personas comienza a disminuir.

Durante el año 2019 se presentaron múltiples crisis ambientales que causaron un aumento del 10.4% de usuarios en el sistema durante horas pico (Correa, 2019) Esta simulación supone que durante todo el día se mantuvo la medida del pico y placa aumentando constantemente el flujo de usuarios y causando una masiva acumulación de personas en las plataformas, pues el metro operando a su máxima capacidad de transporte (65300 personas por hora) no daba



Actualmente el metro se encuentra renovando sus vagones (Noticias Metro, 2017) y estos cuentan con una capacidad menor a la acostumbrada lo que genera un problema de movilidad ya que si se todos los trenes que se utilizan son nuevos se generan grandes acumulaciones de personas en las horas picos donde las personas tendrían que esperar más de 2 horas para poder ser transportadas, situación que no favorece el sistema.

Gráfico 9: comportamiento de los niveles en el escenario de la capacidad de vagones nuevos

Pruebas de validación

A continuación, se adjuntan gráficas del modelo con condiciones extremas.

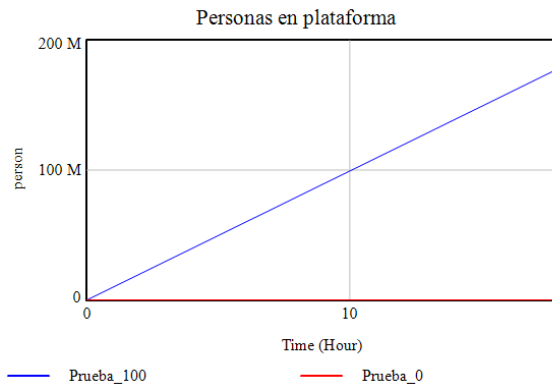
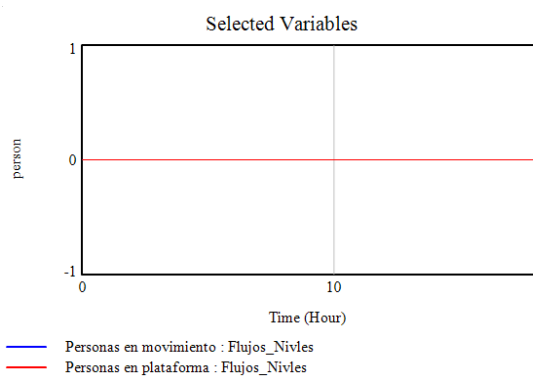


Gráfico 10 y 11: Comportamiento de los niveles cuando los usuarios son cero y cuando estos son 10 millones en una hora respectivamente.



Gráfico 12: Comportamiento de las personas en movimiento cuando su capacidad es cero y 10 millones por hora respectivamente.

Al analizar las gráficas vemos que concuerdan con el modelo planteado, por lo que se comporta de la forma esperada, aunque los valores de entrada sean extremos. Cuando el número de usuarios es de

cero, vemos que nadie usa el sistema, por lo que nadie está ni en plataforma ni en movimiento. Y cuando el número de usuarios es de 10000000, la gráfica de personas en plataforma es lineal creciente, pues se están acumulando las personas en el sistema, y la gráfica de personas en movimiento es una línea constante con valor de 65300 personas por hora, que es la máxima capacidad de transporte que tiene el metro en dicha franja de tiempo (una hora).

Respecto a la estructura del modelo, se presenta una consistencia en los valores obtenidos, pues ninguno de ellos es negativo, además de que el modelo se acopla al número de usuarios que entra en el sistema. También es importante mencionar que la estructura representa de manera correcta el proceso de circulación de pasajeros.

Bibliografía

- [1] Márquez, J. (junio de 2012). El Tranvía eléctrico de Medellín (Colombia) y su aporte al proceso de modernización urbana: 1920-1951. *Revista de historia regional y local*, (vol 4, No. 7) página 149
- [2] Gómez, Y., & Semeshenko, V. (2018). Transporte y calidad de vida urbana. Estudio de caso sobre el Metroplús de Medellín, Colombia. *Lecturas de Economía*, (89), 103–131. <https://doi-org.ezproxy.eafit.edu.co/10.17533/udea.le.n89a04>
- [3] González, J. R. Q. (2018). Transporte público mediante cables, desde lo ambiental, lo social y lo económico: análisis de la legislación y normativa en Colombia (1989-2015). *Revista Jurídica PIELAGUS*, 17(1), 1–28. <https://doi-org.ezproxy.eafit.edu.co/10.25054/16576799.1733>
- [4] Correa, V. (2017). Así será el nuevo metrocable del Picacho. Recuperado de <https://bit.ly/2Oyq3gR>
- [5] Heinrichs, D., & Bernet, J. S. (2014). Public Transport and Accessibility in Informal Settlements: Aerial Cable Cars in Medellín, Colombia. *Transportation Research Procedia*, 4, 55–67. <https://doi-org.ezproxy.eafit.edu.co/10.1016/j.trpro.2014.11.005>
- [6] Estadísticas y datos de transporte público en Medellín. (2019). Recuperado de https://moovitapp.com/insights/es-419/Moovit_Insights_Índice_de_Transporte_Público-1642
- [7] Tiempo, C. (2017). Metro de Medellín mejora las frecuencias de viajes. Recuperado de <https://www.eltiempo.com/colombia/medellin/metro-de-medellin-mejoran-las-frecuencias-de-viaje-135350>
- [8] Noticias Metro (2017). 2017: Un año de retos y logros en movilidad sostenible. Recuperado de <https://www.metrodemedellin.gov.co/al-día/noticias-metro/artmid/6905/articleid/393/2017-un-a241o-de-retos-y-logros-en-movilidad-sostenible>
- [9] Restrepo, E. (2017). 22 datos curiosos para celebrar el cumpleaños del Metro de Medellín. Recuperado de <https://www.elcolombiano.com/antioquia/movilidad/datos-curiosos-del-metro-de-medellin-DG7787984>

- [10] Pico y placa ambiental generó grandes congestiones en el metro de Medellín, ELESPECTADOR.COM. (2019). Recuperado de <https://www.elspectador.com/noticias/nacional/antioquia/pico-y-placa-ambiental-genero-grandes-congestiones-en-el-metro-de-medellin-articulo-843540>
- [11] Correa, V. (2019). ¿Por qué se están congestionando las estaciones del metro?. Recuperado de <https://www.elcolombiano.com/antioquia/metro-de-medellin-congestion-de-pasajeros-HG10341017>
- [12] Noticias Metro. (2019). Cifras del Sistema Metro que hablan de una excelente gestión. Recuperado de https://www.metrodemedellin.gov.co/al-d%C3%ADa/noticias-metro/artmid/6905/articleid/971/cifras-del-sistema-metro-que-hablan-de-una-excelente-gesti243n?fbclid=IwAR0LbUx1cQJYg8D6KYfDaa038UU3ysvPUzyhVdO_5_PHQ4ph9zjYz0K1u9Y
- [13] Metro, N. (2019). Metrocable Picacho, una obra para seguir volando juntos. Recuperado de <https://www.metrodemedellin.gov.co/al-día/noticias-metro/artmid/6905/articleid/290/metrocable-picacho-una-obra-para-seguir-volando-juntos>