



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estrategias para aumentar la resiliencia
de un sistema de transporte urbano
que ha sufrido múltiples incidentes
provocados por desastres naturales.
Caso de estudio: Metrobús Ciudad de
México**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

PRESENTA

Luis Eduardo Chávez Arredondo

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Eduardo Reinoso Angulo



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

RESUMEN

Los sistemas de autobuses de tránsito rápido (BRT) desempeñan un rol muy importante en Latinoamérica y muestran una tendencia creciente, cada año se amplía la capacidad instalada. La movilidad en la Zona Metropolitana del Valle de México es uno de los retos actuales más grandes, debido a su enorme población y a su acelerado y desorganizado crecimiento. En la Ciudad de México en tan sólo quince años se ha implementado una red de siete corredores de Metrobús (BRT) que mueven diariamente a más de un millón de personas. La Ciudad de México está sujeta a riesgos relacionados con el cambio climático y desastres naturales. La resiliencia es el camino para enfrentar estos riesgos. El sismo del 19 de septiembre de 2017 colapsó temporalmente la mayoría de los sistemas críticos de la Ciudad de México, entre ellos el Metrobús. Esta experiencia reciente brinda información valiosa que muestra qué tan resiliente es la Ciudad y sus subsistemas. Este trabajo analiza el contexto actual del Metrobús, entendiendo los diferentes riesgos a los que esta red de transporte urbano está expuesta, y cuantifica la respuesta que presentó ante el sismo del 19 de septiembre de 2017. Esto con el fin de encontrar alternativas y estrategias que puedan construir resiliencia dentro de este sistema, para que como resultado se vea beneficiado su contexto físico, social y político.

A mi abuela,

María Graciela Sordo Alva

gracias por compartir y seguir enseñándonos día con día.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente a la Universidad Nacional Autónoma de México, el ser parte de, la que considero la mejor institución de México, me llena de orgullo y me incentiva a cada día dar lo mejor de mí. Seguiré trabajando para llevar el nombre de la UNAM cada vez más alto. A su vez, estoy muy agradecido con la sociedad mexicana, pues me queda claro que gracias a ellos recibí una formación holística de muy alto nivel, la cual siempre busqué aprovechar al máximo. Esto ansioso por retribuir a las y los mexicanos un poco de lo mucho que me han otorgado. Por mi raza hablará el espíritu.

También agradezco a la Facultad de Ingeniería, particularmente a la División de Ingeniería Civil y Geomática, así como la División de Ciencias Básicas, en ellas encontré una excelente formación académica, la cual hoy me permite aspirar a hacerme llamar Ingeniero.

Agradezco mucho al Instituto de Ingeniería de la UNAM, en especial al Doctor Eduardo Reinoso Angulo, quien me abrió las puertas del Departamento de Ingeniería Sismológica como becario y posteriormente como tesista. También, especiales agradecimientos al Doctor Pablo Quinde Martínez y al M.I. Salvador Ramos Gómez. Los tres me acompañaron constantemente a lo largo de la elaboración de este trabajo y nunca dejaron de creer en mí, aun cuando parecía que cada vez se complicaba todo más y más. Les agradezco enormemente la libertad creativa, es importante que se sepa que sin su constante apoyo, guía, tolerancia y paciencia este trabajo no sería el mismo.

A su vez, me es muy importante reconocerle y agradecerle por todo su tiempo, guía y sabiduría al Doctor Gustavo Carreón Vázquez, sin duda sus conocimientos en el área de ciencias de la computación, ingeniería de transporte y sistemas de transporte público fueron fundamentales en el desarrollo de este trabajo. También me gustaría agradecerle al Ing. Abraham Calderón Rodríguez, quien en múltiples ocasiones me brindó información clave cuando más la necesitaba.

También agradezco el apoyo del M.I. Francisco Javier Granados Villafuerte, por su guía en los temas relacionados con sistemas de transporte y movilidad urbana.

También agradezco a Fundación UNAM, la Secretaría de Educación Pública y a la Dirección General de Cooperación e Internacionalización de la UNAM, por todos sus esfuerzos en conjunto, pues gracias a ellos los estudiantes somos capaces de contar con experiencias de internacionalización que nos hacen crecer enormemente en todos los sentidos. En mi caso el haber sido parte del programa para el mejoramiento del idioma inglés y el de movilidad internacional, cambió drásticamente mis perspectivas, metas y formas de pensar y ver el mundo.

Agradezco profundamente a ExxonMobil México y al Instituto de Educación Internacional por haberme concedido el honor de ser parte de la novena generación del Programa Becas ExxonMobil para la Investigación, sin duda alguna este programa me aportó lecciones valiosísimas que aún sigo entendiendo y descubriendo. Especiales agradecimientos al Ing. Boris Martínez quien, hasta la fecha, me ha guiado y aconsejado ante situaciones complejas, aclarando el panorama con base en su amplia experiencia.

Agradezco a la Fundación Telmex-Telcel por acogerme dentro del programa Beca Telmex a lo largo de gran parte de la carrera.

Es muy importante agradecerle al Metrobús y al Gobierno de la Ciudad de México, pues gracias al programa de datos abiertos, en el cual participa el Metrobús se pudo recopilar la información operacional del Metrobús, sin ella, todo este trabajo no hubiera sido posible.

Expreso mis más profundos y sinceros agradecimientos al M.I. Miguel Ángel Rodríguez Vega, por haberme ayudado y guiado en todo momento a lo largo de toda mi formación en la ingeniería y ahora en los primeros años de mi vida profesional/académica.

Agradezco a todas las profesoras y profesores que contribuyeron en mi formación como ingeniero, a la mayoría tuve la oportunidad de elegirlos y sin duda, lo haría de nuevo, pues de todos aprendí muchísimo, académica y/o personalmente. Considero que la docencia es una de las profesiones más nobles y significativas. Especiales agradecimientos a la Doctora Nikte Ocampo Guerrero, a la M.I. Adriana Cafaggi Félix, al M.I. Miguel Ángel Rodríguez Vega, al M.I. Ricardo Rubén Padilla Velázquez, al Doctor Mauro Niño Lázaro, al Dr. Gerardo Rodríguez

Gutiérrez, al M.I. Rodrigo Sepúlveda Hirose, al Ing. Heriberto Esquivel Castellanos, al Doctor José Luis Aragón Hernández, al Fis. Edgar Raymundo López Tellez, al M.I. Erik Castañeda de Isla Puga y al Ing. Pablo García y Colomé, en todos ustedes considero que encontré muchísima calidad humana y sabiduría. ¡Gracias a todas y todos por dedicar su vida a cambiar la vida de los demás!

No hay palabras para agradecer a mi familia, aquellas o aquellos con los que comparto sangre, pero también las y los que, por hermosas casualidades llegaron a mi vida. En mi familia siempre he encontrado y estoy seguro que encontraré, apoyo y aliento para afrontar cualquier reto. Todo lo compartido con mi familia me hace ser quien hoy soy. Son la parte más importante de mi vida y siempre agradeceré y gozaré lo mucho o poco que comparto con ustedes. Particularmente, agradezco a mi madre y a mi padre todo el apoyo que me han brindado a lo largo de toda mi vida, así como a mi hermano, a mis abuelas y abuelos y a mis primas y primos. También a Georgina Luna y José Luis Tapia, quiénes me siguen enseñando día a día que la amistad se puede llevar a niveles que nunca imaginé. ¡Muchas gracias a todas y todos!

Finalmente, me gustaría agradecerles a los seres más bondadosos con los que he tenido la fortuna de compartir mucho de mi vida, Spotty, Keily y Clea por ser siempre incondicionales y muchas veces mis más grandes apoyos. Ojalá los humanos nos pareciéramos más a los perros.

“The greatest teacher failure is”

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS	3
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos	3
LIMITACIONES.....	4
CAPÍTULO I EL SISTEMA DE AUTOBUSES DE TRÁNSITO RÁPIDO DE LA CIUDAD DE MÉXICO	5
I.1. SISTEMAS DE AUTOBUSES DE TRANSPORTE RÁPIDO.....	5
I.1.1. ¿Qué es un sistema BRT?.....	5
I.1.2. ¿Cuándo surgen los sistemas BRT?.....	6
I.1.3. América Latina y los Sistemas BRT.....	7
I.2. MOVILIDAD URBANA EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO	9
I.3. METROBÚS.....	11
I.3.1. Historia del Metrobús.....	11
I.3.1. Metrobús: Situación actual.....	13
CAPÍTULO II RIESGO SÍSMICO, TERREMOTOS Y RESILIENCIA EN LA CIUDAD DE MÉXICO	17
II.1. RIESGO SÍSMICO.....	17
II.2. MARCO NORMATIVO Y TERREMOTOS HISTÓRICOS.....	20
II.3. RESILIENCIA.....	22
II.3.1. ¿Qué es la Resiliencia?.....	22
II.3.2. Resiliencia sísmica	23
II.3.3. Resiliencia y sustentabilidad	25
II.3.4. Resiliencia en la Ciudad de México.....	26
II.3.5. Resiliencia en los Sistemas Urbanos.....	28
CAPÍTULO III CASO DE ESTUDIO: EL METROBÚS Y EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017	31
III.1. EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017.....	31
III.2. EL IMPACTO DEL SISMO SOBRE EL METROBÚS.....	35
CAPÍTULO IV MÉTODOLÓGÍA	39
IV.1. MINERÍA DE DATOS	39
IV.1.1. Marco de Referencia Empleado.....	39
IV.1.2. Descripción del análisis realizado.....	42
IV.1.3. Fortalezas y limitaciones	62
IV.2. MODELO DE TRÁNSITO.....	63
IV.2.1. Justificación	63
IV.2.2. Simuladores de tránsito	64
IV.2.3. Descripción de la modelación.....	68
IV.2.4. Fortalezas y limitaciones.....	78
CAPÍTULO V RESULTADOS.....	79
V.1. RESULTADOS DE LA MINERÍA DE DATOS.....	79
V.1.1. Diagrama espacio-tiempo.....	80
V.1.2. Serie de tiempo del tiempo de espera	83
V.1.3. Gráfico de barras en 3D para el tiempo de espera.....	89
V.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE TRÁNSITO	94
V.2.1. Diagrama espacio-tiempo con datos de la simulación de tránsito	94

V.2.2.	Resultados por Línea	96
V.2.2.1.	Línea 1.....	97
V.2.2.2.	Línea 2.....	97
V.2.2.3.	Línea 3.....	99
V.2.2.4.	Línea 4.....	100
V.2.2.5.	Línea 5.....	101
V.2.2.6.	Línea 6.....	102
V.2.3.	Resultados Globales	103
 CAPÍTULO VI ESTRATEGIAS PARA AUMENTAR LA RESILIENCIA EN EL METROBÚS.....		105
VI.1.	ESTRATEGIAS PROPUESTAS PARA AUMENTAR LA RESILIENCIA Y LIMITANTES ENCONTRADAS A ESCALA URBANA.....	105
VI.2.	ESTRATEGIAS PROPUESTAS PARA AUMENTAR LA RESILIENCIA DE SUBSISTEMAS URBANOS ..	107
VI.3.	ESTRATEGIAS PROPUESTAS PARA AUMENTAR LA RESILIENCIA EN EL METROBÚS	110
VI.3.2.	Mejores datos.....	110
VI.3.3.	Sistemas autónomos en el transporte público.....	112
VI.3.4.	Implementación de sistemas inteligentes del transporte	113
VI.3.5.	Mayor densidad de puntos de quiebre en el sistema	116
VI.3.6.	Usuarios y comunidad informados	116
 CAPÍTULO VII CONCLUSIONES.....		117
REFERENCIAS.....		120
ANEXOS		130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1. Sistemas BRT	6
Figura I.2. Número Acumulado de Ciudades en el mundo con BRT [10]	7
Figura I.3. Demanda Diaria de Millones de Usuarios por Región [10].....	7
Figura I.4. Zona Metropolitana del Valle de México. Se observan los 76 municipios y alcaldías que la conforman (INEGI 2018), así como las manchas urbanas sobre estos municipios y alcaldías (CONABIO, 2010).	10
Figura I.5. Distribución Porcentual de Viajes Diarios en Ciudad de México y ZMVM. Encuesta Origen Destino (INEGI, 2018)	11
Figura I.6. Línea del Tiempo: Metrobús. Elaboración Propia.....	13
Figura I.7. Mapa actual del Metrobús [19] y distribución poblacional de la Zona Metropolitana del Valle de México.....	15
Figura I.8. Demanda diaria y número de rutas por línea del Metrobús [21]	16
Figura II.1. Zonificación geotécnica de la Ciudad de México [24] y la red de Metrobús.....	18
Figura II.2. Evaluación del Riesgo[25]	19
Figura II.3. Interés en: “Resilience” en todo el mundo desde 2004 [33].	23
Figura II.4. Diferentes Metabolismos Urbanos [32].....	26
Figura III.1 Lecturas de la aceleración del suelo registradas en la estación SCT para los sismos del 19 de septiembre de 1985 y 2017 con los valores máximos absolutos resaltados. [46].....	33
Figura III.2. Epicentro del sismo del 19 de septiembre de 2017 sobre el mapa calculado de Aceleración Máxima del Terreno (PGA) para los estados de Puebla, Morelos, México y la Ciudad de México (USGS, 2020), así como la red sismológica del Servicio Sismológico Nacional (Servicio Sismológico Nacional (SSN), 2021). En el detalle se observan los inmuebles dañados en la Ciudad de México, se puede identificar rápidamente que la gran mayoría de estos inmuebles se encuentran en las Alcaldías Benito Juárez y Cuauhtémoc (CENAPRED, 2020b).	34

Figura III.3. Colapsos Totales y Parciales registrados por CENAPRED [51] sobre el mapa de los periodos dominantes del suelo establecido en las Normas Técnicas Complementarias 2017 para el Diseño Sísmico [24] y la red de Metrobús [19]......36

Figura IV.1. Volumen de Datos Global. Medido hasta 2018, proyectado a 2025. [53], [54] ...39

Figura IV.2. El marco de referencia para el descubrimiento del conocimiento en los datos [52]42

Figura IV.3. Ejemplo representativo de la información obtenida por el órgano operador del Metrobús [19]. Los números hacen referencia a la lista numerada previa.45

Figura IV.4. Marco de referencia adoptado para evaluar la calidad de datos a través de las 8 dimensiones [59].....47

Figura IV.5. Resultados de aplicar el marco de referencia para la calidad de datos adoptado sobre los datos proporcionados por el órgano operador del Metrobús. La escala de colores indica la calificación por rubro del marco de referencia para la calidad de datos, aquellos en rojo no cumplen, mientras que los claros si cumplen [19], [59]50

Figura IV.6. Diferentes formatos en la información proporcionada por el Metrobús [19]51

Figura IV.7. Detalles del viaje en columnas relacionadas a estaciones en estados de cumplimiento para la Línea 6 del Metrobús.53

Figura IV.8. Número de registros eliminados por falta de precisión en todas las líneas por día.54

Figura IV.9. Diagrama espacio tiempo, se observa el tiempo en el eje vertical y la distancia en el eje horizontal, cada punto es una lectura en un punto establecido, generalmente para un sistema BRT son las estaciones [61]. De estudiar las pendientes se puede encontrar la velocidad del vehículo.....56

Figura IV.10. Diagrama espacio tiempo adoptado para estudiar el impacto del sismo del 19 de septiembre de 2017 sobre la dinámica del Metrobús. En el eje horizontal se despreja la distancia entre las estaciones y se consideran las estaciones mismas. De estudiar las pendientes no se podría encontrar la velocidad del vehículo.56

Figura IV.11. Serie de tiempo del tiempo de espera. Se observa la variación del tiempo de espera a lo largo de un día para una estación para todas las rutas de una línea, así como también los datos estimados que el órgano operador del Metrobús había contemplado para dicho día y estación.	58
Figura IV.12. Histograma de los tiempos de espera registrados en un día para una estación. ...	59
Figura IV.13. Tipos de uniones (JOINS) en SQL [63].	60
Figura IV.14. Espacio geométrico para la gráfica de barras en tres dimensiones para los tiempos de espera máximos. Al agrupar el tiempo de espera, se cambia la granularidad y se puede obtener información para todas las rutas, para todos los días y para todas las estaciones en un mismo gráfico.	61
Figura IV.15. Subconjunto de datos con cambio de dimensionalidad para la elaboración de un gráfico en 3D. Una fila por día y una columna por estación. También se observa el criterio de agrupación para el tiempo de espera, en este caso fue el máximo.	62
Figura IV.16. Nodos en NETLOGO que representan las estaciones del Metrobús [21], [66]. ..	69
Figura IV.17. Conexiones entre nodos en NETLOGO. Se observa que hay dos conexiones o “Edges” entre los nodos. Cada “edge” contiene un únicamente un carril el cual es unidireccional, se puede observar el sentido de los mismos con las flechas. Estos carriles representan el carril confinado del Metrobús [21], [66].	70
Figura IV.18. Paradas de autobuses en el modelo de NETLOGO [66].	71
Figura IV.19. Infraestructura del modelo sobre la cual se ejecutará la simulación de tráfico. Se pueden observar los nodos, los cuales representan las estaciones del Metrobús. A su vez, se observan los carriles confinados. Por último, se observan en azul paradas de autobús que generalmente están muy cerca de los nodos y se necesitan en el modelo para detener a los vehículos.	72
Figura IV.20. Rutas trazadas sobre la red en NETEDIT. Las 33 rutas fueron añadidas, solo que dado que están sobrepuestas no se pueden visualizar todas [21], [66].	74
Figura IV.21. Detalle en la interacción de rutas y Líneas en NETEDIT. Se puede apreciar en la figura que una ruta morada se integra hacia Línea amarilla. En el Metrobús, la mayoría de las	

rutas están contenidas en una sola Línea, sin embargo, los pocos casos que no, fueron considerados en el modelado [21], [66].....	75
Figura IV.22. Arquitectura empleada para llevar a cabo las simulaciones en SUMO.	77
Figura V.1. Arquitectura del proyecto.....	79
Figura V.2. Diagrama espacio tiempo para la ruta A3 de la Línea 1 del 12 de septiembre de 2017. Se observa la variación horaria en el eje Y, mientras que en los ejes X se encuentran de forma equidistante las distintas estaciones que componen la ruta de salida y la ruta de retorno. En el gráfico del lado izquierdo y derecho se muestran los datos para todos los viajes de salida y de retorno, respectivamente. Además, en ambos gráficos se observan dos tipos de líneas la continuas para los viajes y las punteadas para los viajes programados.....	80
Figura V.3. Diagrama espacio tiempo para la ruta A3, ida y vuelta, de la Línea 1 del 19 de septiembre de 2017.....	81
Figura V.4. Diagrama espacio tiempo para la ruta F1, ida y vuelta, de la Línea 5 del 12 de septiembre de 2017.....	82
Figura V.5. Diagrama espacio tiempo para la ruta F1, ida y vuelta, de la Línea 5 del 12 de septiembre de 2017.....	83
Figura V.6. Serie de tiempo del tiempo de espera o headway para 5 estaciones aleatorias de la Línea 1 para el 12 de septiembre de 2017. Dichas estaciones se encuentran contenidas en un mismo sentido (viaje de salida) de la Línea y comparten múltiples rutas. Para las series de tiempo, en el eje X se coloca la variación horaria, mientras que en el eje Y el tiempo de espera en segundos. Se muestran los datos estimados y los reales. En los histogramas, en el eje X se ubica el tiempo de espera en minutos y en el eje Y el conteo, el cual está dado por el número de autobuses que cruzaron una estación. En los histogramas solo se agrupa la información real, se deprecia la estimada.....	85
Figura V.7 Serie de tiempo del tiempo de espera o headway para 5 estaciones aleatorias de la Línea 1 para el 19 de septiembre de 2017.	86
Figura V.8. Serie de tiempo del tiempo de espera o headway para 5 estaciones aleatorias de la Línea 5 para el 12 de septiembre de 2017.	87

Figura V.9. Serie de tiempo del tiempo de espera o headway para 5 estaciones aleatorias de la Línea 5 para el 19 de septiembre de 2017.	88
Figura V.10. Tiempo de espera promedio, en segundos, de cada estación por día en el sentido de ida de la Línea 1. En el eje X se ubican las estaciones del sentido de ida de la Línea 1, en el eje Y se representa el tiempo en días y por último en el eje Z se muestra el tiempo de espera promedio en segundos. El color de la barra depende del valor del tiempo de espera promedio, los colores claros son asociados con tiempos de espera cortos y los oscuros con tiempos de espera largos.	90
Figura V.11. Tiempo de espera promedio, en segundos, de cada estación por día en el sentido de vuelta de la Línea 1.	91
Figura V.12. Tiempo de espera promedio, en segundos, de cada estación por día en el sentido de ida de la Línea 5.	92
Figura V.13. Tiempo de espera promedio, en segundos, de cada estación por día en el sentido de vuelta de la Línea 1.	93
Figura V.14. Diagrama espacio tiempo para la ruta A3, ida y vuelta, de la Línea 1 del 12 de septiembre de 2017.	95
Figura V.15. Diagrama espacio tiempo para la ruta A3, ida y vuelta, de la Línea 1 del 19 de septiembre de 2017.	96
Figura V.16. Duración máxima, promedio y mínima de viaje en segundos para todas las rutas de la Línea 1 para todos los días de información.	97
Figura V.17. Duración máxima, promedio y mínima de viaje en segundos para todas las rutas de la Línea 2 para todos los días de información.	98
Figura V.18. Duración máxima, promedio y mínima de viaje en segundos para todas las rutas de la Línea 3 para todos los días de información.	99
Figura V.19. Duración máxima, promedio y mínima de viaje en segundos para todas las rutas de la Línea 4 para todos los días de información.	100
Figura V.20. Duración máxima, promedio y mínima de viaje en segundos para la Línea 5 para todos los días de información.	101

Figura V.21. Duración máxima, promedio y mínima de viaje en segundos para todas las rutas de la Línea 6 para todos los días de información.	102
Figura V.22. Duración promedio de viaje en segundos para todas las líneas del Metrobús para todos los días de información.	103
Figura VI.1. Ciclo de vida de los datos [67].....	111
Figura VI.2. Flujo de datos en un Sistema de Transporte Inteligente [71].....	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.1. Sistemas BRT en el mundo[10]	8
Tabla I.2. Flota del Metrobús [19].....	14
Tabla II.1. Detalle de sismos que han provocado daños en la Ciudad de México en los últimos 45 años [30].	21
Tabla IV.1. Detalle de la información solicitada al organismo operador del Metrobús.....	44
Tabla IV.2. Evaluación de calidad para los datos proporcionados por el órgano operador del Metrobús según el marco de referencia para la calidad de datos adoptado [19], [59]	47
Tabla IV.3. Simuladores de transporte más populares [64].	66
Tabla IV.4. Número de rutas por Línea en los 33 días de información solicitados [21]......	73

“A great leap forward often requires taking two steps back”

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

La movilidad en la Zona Metropolitana del Valle de México representa grandes retos, esto debido a la gran población sujeta a un acelerado y desorganizado crecimiento, se estima que la población excede los 22 millones de habitantes, los cuales generan más de 15 millones de viajes diarios [1]. La Zona Metropolitana del Valle de México concentra casi el 30% de todos los viajes diarios del país. Los gobiernos involucrados en esta megalópolis han implementado múltiples sistemas de transporte público y estrategias para satisfacer el gran reto de la movilidad interurbana [2]. En los sistemas de transporte público de la megalópolis se realizan más de 15 millones de viajes diarios, lo cual les da una gran relevancia a estos sistemas que transportan al sector más vulnerable de la población [3]. En México, el cuartil más rico tiene el 80% del parque vehicular, por lo que la mayoría de los usuarios de transporte público no son capaces de elegir entre medios privados y públicos. El gobierno de la Ciudad de México con ayuda de organismos internacionales impulsó el desarrollo e implementación de un sistema BRT, el cual lleva por nombre Metrobús. En tan sólo quince años se ha implementado una red de siete corredores de Metrobús que mueven diariamente a más de un millón de personas. Aproximadamente, de cada diez viajes en transporte público que se generan en la Ciudad uno es realizado en Metrobús [1]. Esta red se encuentra en constante crecimiento, las autoridades de la Ciudad continuamente anuncian ampliaciones de las líneas existentes o la creación de nuevos corredores.

Los sistemas de autobuses de tránsito rápido (BRT) son sistemas de transporte urbano que le añaden características particulares a sistemas de autobuses que aumentan su eficiencia. Generalmente, estas características que pueden incluir son rutas y paradas establecidas, carriles confinados en el centro de la vialidad, tratamiento especial para las intersecciones con otras vialidades, ingreso sobre plataforma y cobro fuera del autobús. Es importante mencionar que en general en toda América Latina estos sistemas han sido de gran popularidad por la baja inversión inicial requerida en comparación con otros sistemas de transporte público, el corto tiempo de implementación y la reducción de viajes y emisiones, entre otros.

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

La Ciudad de México es sometida a los efectos y daños provocados por sismos intensos y de larga duración que en promedio ocurren cada 15 años. Estos sismos generalmente provocan daños estructurales severos que afectan a una parte importante de la población. El más reciente ocurrió el 19 de septiembre de 2019. La ciudad sufrió múltiples daños provocados por un sismo intraplaca cercano que provocó importantes pérdidas humanas y económicas.

A lo largo del tiempo las autoridades federales y locales han hecho esfuerzos importantes para promover y reducir la vulnerabilidad de la infraestructura, esto mediante la creación de agencias e institutos especializados como la Agencia de Resiliencia y el Instituto para la Seguridad de las Construcciones de la Ciudad de México y el desarrollo e implementación de mejores códigos de construcción como el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad de escala nacional o el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Sin embargo, la vulnerabilidad de las comunidades ha sido un tema pendiente en las agendas de las autoridades. Además, no han sido capaces de controlar la exposición de la infraestructura y comunidad esto porque las políticas e iniciativas de planeación son laxas y difícilmente se vuelven una realidad. Esto ha resultado en la gran concentración de bienes y personas en áreas propensas al riesgo. Hoy se tiene identificado que en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México al menos 7 millones de habitantes se han asentado en estas áreas sujetas a importantes amenazas.

Una consecuencia del crecimiento acelerado y sin planeación de las áreas urbanas es el estrés sobre los sistemas de infraestructura urbana críticos. Estos sistemas son aquellos que brindan servicios indispensables a la población como el transporte, agua potable, energía eléctrica, recolección de residuos sólidos, drenaje, entre otros. El estrés causado por la sobrepoblación en estos sistemas se debe a que no crecen al mismo ritmo que las demandas de la población, por lo que cada vez más personas dependen de sistemas que son forzados a aumentar su oferta de forma no sostenible, lo que aumenta su vulnerabilidad de forma significativa [4].

La resiliencia es la capacidad de sistemas y comunidades de absorber impactos y adaptarse a desafíos, por lo que aumentar y promover la resiliencia implica una reducción del riesgo [5]. Un estudio del Banco Mundial identificó que las limitantes principales para promover la resiliencia en la Ciudad de México son el no seguir políticas basadas en datos, contar con un presupuesto

limitado y la falta de cooperación entre agencias e institutos en los diferentes niveles de gobierno [3].

La Agencia de Resiliencia de la Ciudad de México identifica la movilidad urbana como una de las áreas prioritarias para aumentar la resiliencia en la ciudad. Sin embargo, el impacto de las zonas de daño estructural provocados por sismos de gran intensidad sobre las redes de transporte público de la ciudad no ha sido estudiado [6]. Poco se ha estudiado la relación entre las zonas de daño y los sistemas de transporte público a lo largo del mundo.

En este trabajo se analiza y cuantifica la respuesta del Sistema BRT de la Ciudad de México, Metrobús ante el sismo del 19 de septiembre de 2017. Esto por medio de indicadores de desempeño en diferentes escalas a lo largo de toda la red. Para estudiar dicha respuesta se emplearon datos proporcionados por el órgano operador del Metrobús, técnicas de minería de datos y un modelo de tránsito que simula los viajes de la red basado en la información proporcionada. Se calcularon múltiples indicadores de desempeño para más de treinta días, buscando entender el antes, durante y después del sismo en el sistema. Una vez que se ha cuantificado la respuesta, el sistema es evaluado para conocer qué tan resiliente es. Por último, múltiples estrategias para aumentar la resiliencia en el Metrobús son propuestas.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar y promover la resiliencia del sistema BRT de la Ciudad de México, Metrobús, empleando minería de datos y un modelo de tránsito para cuantificar su respuesta ante el sismo del 19 de septiembre de 2017, en diferentes dimensiones: estaciones, rutas y líneas. Esto para captar la naturaleza espacial y temporal de los múltiples impactos en el sistema. Se proponen estrategias para aumentar la resiliencia de la red junto con la de la ciudad.

Objetivos Específicos

- Identificar indicadores clave que puedan describir el rendimiento del sistema de transporte público en las diferentes dimensiones: estaciones, rutas, líneas.

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

- Por medio de un marco común para la minería de datos generar, estudiar y depurar una base de datos basada en datos operativos del sistema proporcionados por el Metrobús.
- Elaboración de un modelo de tránsito representativo del Metrobús en 2017, que sirva tanto para complementar los resultados basados en la minería de datos, como para futuros trabajos.
- Cuantificar la variación temporal y espacial de los indicadores clave por medio de minería de datos y un modelo de tránsito.
- Evaluar la resiliencia del Metrobús por medio de un marco común de referencia de resiliencia para sistemas de transporte público.
- Proponer estrategias que le permitan al sistema tener una mejor respuesta ante un futuro evento similar.

LIMITACIONES

- Carencia de información precisa para la minería de datos y el modelo de tránsito. La información proporcionada por Metrobús no es precisa en su totalidad, por lo que se tuvo que manipular eliminando registros inconsistentes.

CAPÍTULO I

EL SISTEMA DE AUTOBUSES DE TRÁNSITO RÁPIDO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

I.1. SISTEMAS DE AUTOBUSES DE TRANSPORTE RÁPIDO

I.1.1. ¿Qué es un sistema BRT?

Es un sistema de transporte urbano que funciona a base de autobuses que recorren una ruta fija con paradas establecidas a lo largo de carriles confinados, es decir carriles exclusivos para los autobuses del sistema. Se les conoce como *BRT* por la abreviación en inglés de *Autobús de Tránsito Rápido*. Un sistema BRT usualmente se distingue por contar con las siguientes características [7]:

- carriles confinados, con la finalidad de que los autobuses sean independientes del resto del tránsito que fluye por la misma vía, generalmente, están alineados al centro de la vía para evitar obstáculos que aparecen cerca de las banquetas y brindarle la oportunidad de contar con estaciones de doble frente;
- tratamiento especial de intersecciones, con el fin de que el carril confinado tenga la mayor continuidad posible a lo largo de la ruta, las acciones más efectivas son: prohibir las vueltas que atraviesan el carril confinado y darle prioridad de paso al autobús mediante la semaforización;
- llevar a cabo el cobro fuera del vehículo para reducir el tiempo de abordaje y
- abordaje sobre plataforma, con el fin de colocar a los pasajeros al nivel del vehículo, facilitando el acceso y de igual forma, reduciendo el tiempo de abordaje.

Los sistemas BRT buscan combinar la capacidad y velocidad de un sistema metro con la flexibilidad, menor costo y simplicidad de un sistema de autobuses, esto se muestra en la Figura I.1. Sin embargo, en la actualidad y con la tecnología con la que hoy se cuenta, ningún sistema

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

BRT alcanzará la capacidad ni velocidad de un sistema metro, y por consiguiente tampoco logrará la flexibilidad y simplicidad de un sistema de autobuses [8].

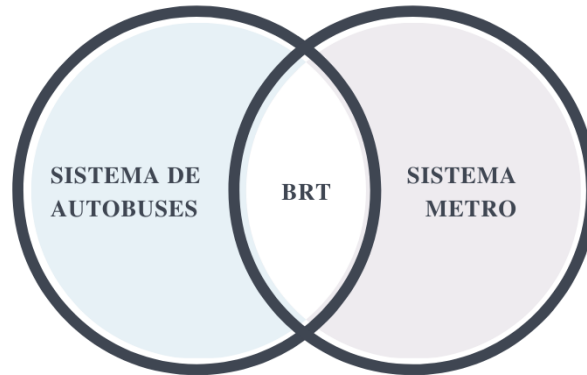


Figura I.1. Sistemas BRT

I.1.2. *¿Cuándo surgen los sistemas BRT?*

La creación de los sistemas BRT fue paulatina, por lo que hay discrepancia entre autores al definir cuál fue y cuándo surgió el primer sistema. En la década de los 60s, se comenzaron a realizar ciertas modificaciones a sistemas de autobuses para hacerlos más eficientes. En un inicio se les asignó a los autobuses un solo carril no confinado, eventualmente este carril se volvería confinado ya que esto aumentaba la efectividad del sistema. El primer caso de confinamiento del que se tenga registro se dio en Lieja, Bélgica en 1968, seguido por Washington DC, EE. UU., un año después.

En 1972, surge el que muchos autores consideran el primer sistema BRT en Curitiba, Brasil. Se proyectó durante ese año y entró en operaciones en 1974. Cabe mencionar que en ese momento el sistema no contaba con los elementos o características que hoy se consideran fundamentales en un sistema BRT [9]. En los años consecutivos, alrededor del mundo, comenzaron a surgir nuevos pseudo sistemas BRT, proyectados desde cero o añadiendo modificaciones a los sistemas de autobuses existentes. Conforme se generaban más sistemas de este tipo se fueron descubriendo cuáles eran las características que optimizaban la relación costo-servicio y fue así como, paulatinamente, se llegó a lo que hoy se conoce como un sistema BRT. En la Figura I.2

se muestra cómo se han implementado sistemas BRT en ciudades del mundo a lo largo del tiempo.

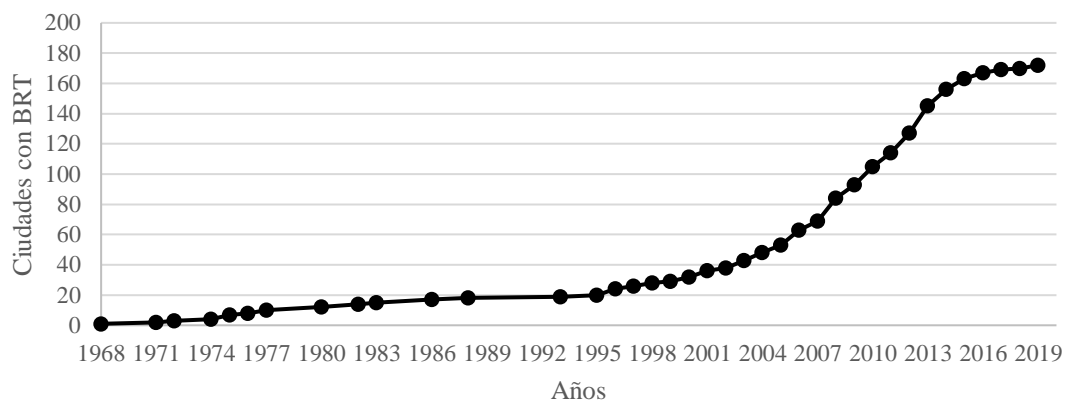


Figura I.2. Número Acumulado de Ciudades en el mundo con BRT [10]

I.1.3. América Latina y los Sistemas BRT

Un punto clave para el desarrollo acelerado de los sistemas BRT, fue el paso de estos sistemas por países latinoamericanos. En la Figura I.3 se muestra la demanda diaria actual de los sistemas BRT en el mundo por región [10].

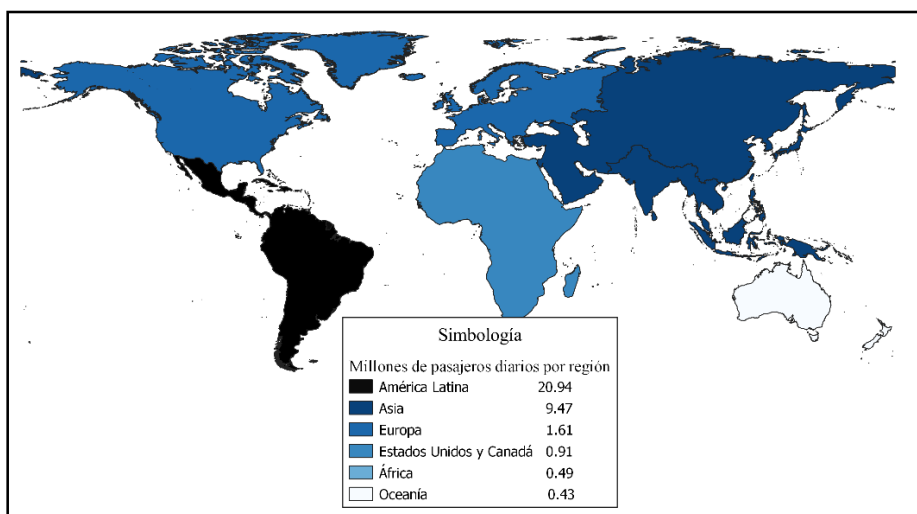


Figura I.3. Demanda Diaria de Millones de Usuarios por Región [10]

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

La popularidad de estos sistemas en Latinoamérica se debe a muchos factores, el principal que instituciones internacionales no gubernamentales, como el Banco Mundial, promueven el desarrollo de estos sistemas en países en vías de desarrollo por medio de subsidios, préstamos y créditos con intereses muy bajos o bien inexistentes [11]. Este apoyo de terceros es muy valioso para los gobiernos latinoamericanos, por lo que enfocan gran parte de sus políticas públicas de movilidad urbana en los sistemas BRT. En la Tabla I.1 se observa que Latinoamérica cuenta con la red más extensa de estos sistemas, que se encuentra dividida en cincuenta y cinco ciudades y atiende una demanda diaria de casi veintiún millones de pasajeros.

Tabla I.1. Sistemas BRT en el mundo[10]

Región	Demanda Diaria (Millones de Pasajeros)	Número de Ciudades con BRT	Longitud del sistema (Km)
América Latina	20.939 (61.83%)	55 (31.97%)	1835 (35.53%)
Asia	9.471 (27.96%)	44 (25.58%)	1624 (31.46%)
Europa	1.613 (4.76%)	44 (25.58%)	875 (16.95%)
América del Norte	0.912 (2.69%)	19 (11.04%)	588 (11.38%)
África	0.491 (1.45%)	5 (2.9%)	131 (2.54%)
Oceanía	0.436 (1.28%)	5 (2.9%)	109 (2.11%)
Total	33.862	172	5162

Dichas instituciones no gubernamentales promueven sistemas BRT porque cumplen con sus lineamientos y objetivos, pues promueven la actividad económica y generan nuevas oportunidades para los usuarios de estos sistemas. Además, estos sistemas promueven la disminución de emisiones de contaminantes a la atmósfera, al reducir el número de viajes [12]. Por último, la implementación de estos sistemas requiere mucho menos tiempo y dinero que otros sistemas de transporte urbano, por lo que se pueden implementar en una sola

administración gubernamental, sin tener problemas de continuidad con la administración próxima.

I.2. MOVILIDAD URBANA EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es una de las urbes más pobladas del mundo, según el censo de 2010 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020), más de 22 millones de personas habitan en ella y está conformada por 76 municipios y alcaldías de tres entidades federativas: la Ciudad de México, el Estado de México y el Estado de Hidalgo, como se observa en la Figura I.4. En el país diariamente se realizan 130 millones de viajes [1] de ellos el 27% sea realiza en la ZMVM, es decir, 34.5 millones de viajes diarios (INEGI, 2018). La gran mayoría de los viajes de la ZMVM, el cuarenta y cinco por ciento (45%), se realizan en transporte público, lo que representa 15.57 millones de viajes diarios. El cincuenta y cinco por ciento restante se divide en viajes en transporte privado (21%), viajes exclusivamente caminando (32%) y viajes en bicicleta u otros modos de transporte (2%) (INEGI, 2018).

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1,Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

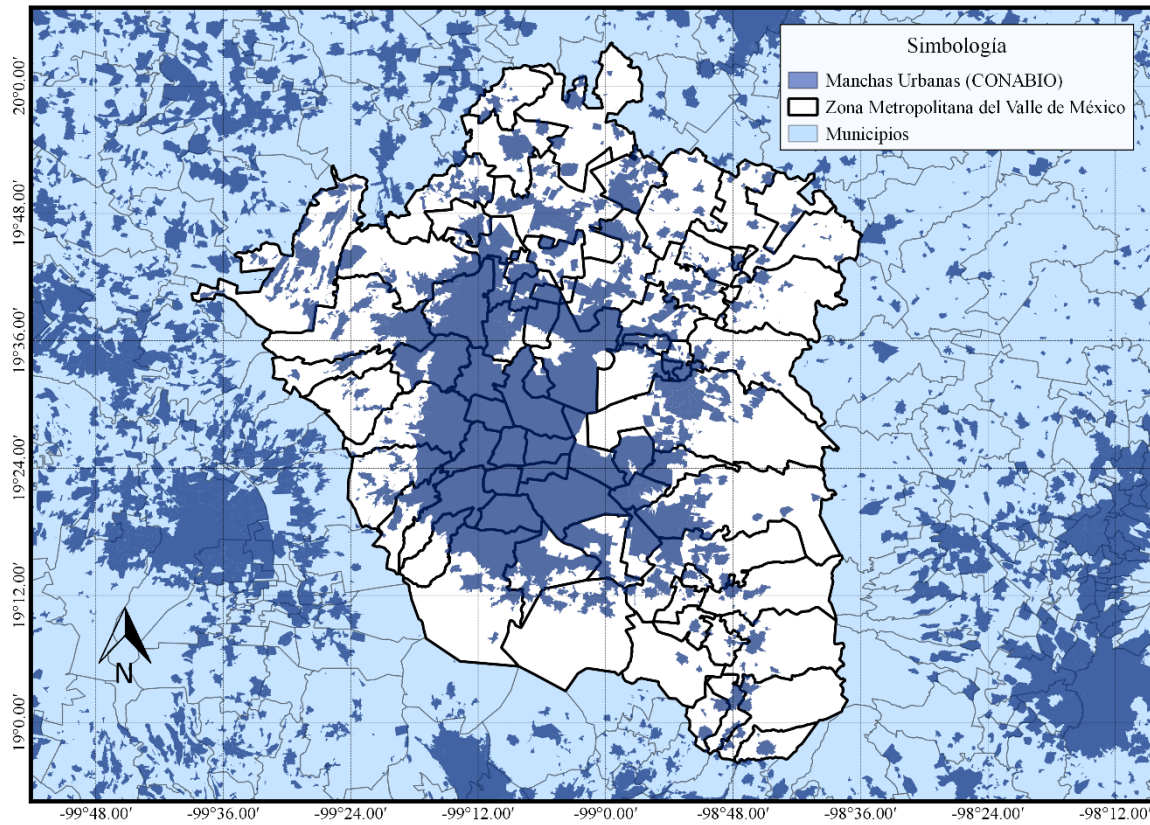


Figura I.4. Zona Metropolitana del Valle de México. Se observan los 76 municipios y alcaldías que la conforman (INEGI 2018), así como las manchas urbanas sobre estos municipios y alcaldías (CONABIO, 2010).

Cabe señalar que los habitantes que usan transporte público no lo hacen por elección, esto tanto a nivel nacional como en la ZMVM, se ven obligados a usarlo por falta de recursos, ya que el 25% de la población que cuenta con los ingresos más altos tiene el 80% del parque vehicular nacional. Finalmente, es importante mencionar que el tiempo promedio de viaje dentro de la ZMVM es aproximadamente de una hora de recorrido [1].

Para las autoridades, el satisfacer la demanda diaria de viajes que se realizan en transporte público representa un enorme reto, por lo que se cuenta con diferentes sistemas de transporte como lo son sistemas BRT, metro, autobuses, taxis, teleféricos, bicicletas, entre otros. La distribución modal de la ZMVM de dichos sistemas se muestra en la Figura I.5, donde se muestra la distribución porcentual de viajes diarios. Cabe señalar que un viaje puede emplear múltiples modos por lo que el total es mayor que el 100%.

Dentro de la Ciudad de México (CDMX) la demanda diaria de viajes es de 17.3 millones, de los cuales 8.62 millones se llevan a cabo en transporte público. En la Figura I.5 se puede observar la distribución porcentual modal de los viajes en la CDMX. Se observa que el sistema BRT, Metrobús, aparece casi en uno de cada diez viajes.

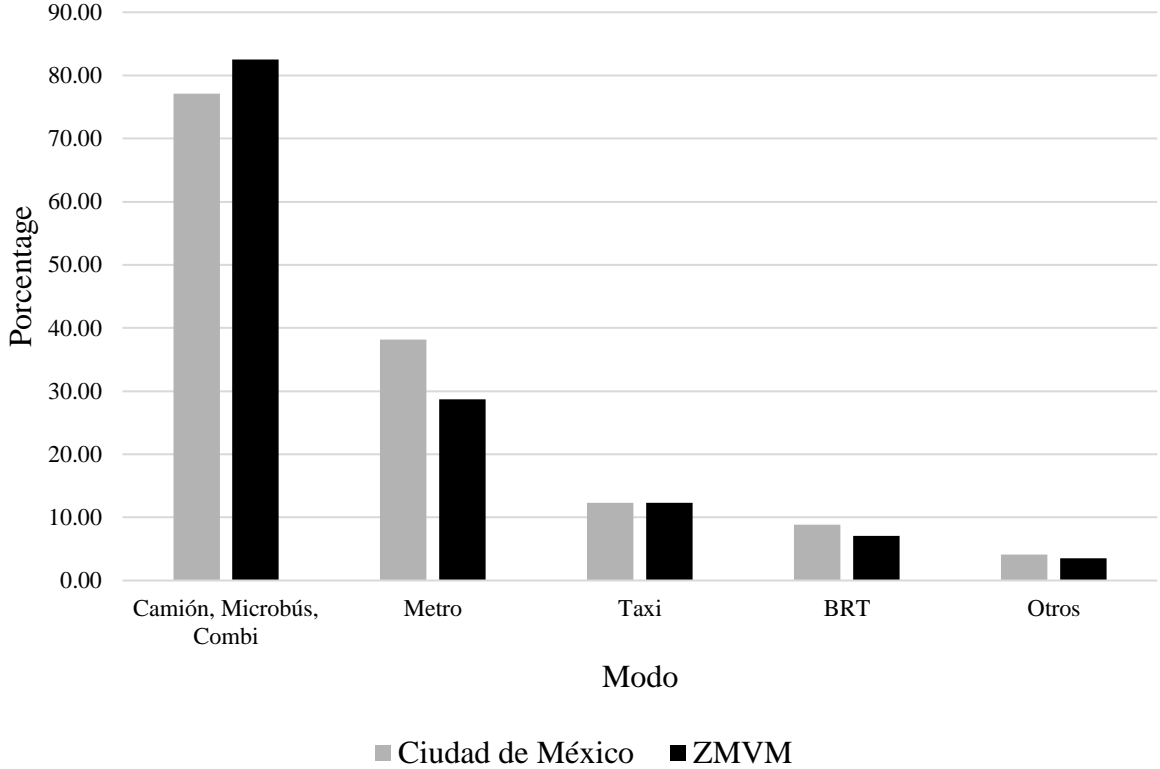


Figura I.5. Distribución Porcentual de Viajes Diarios en Ciudad de México y ZMVM. Encuesta Origen Destino (INEGI, 2018)

En la ZMVM operan independientemente dos sistemas BRT, el Metrobús y el Mexibús en la Ciudad de México y en Estado de México, respectivamente. Este estudio se enfoca sólo en el Metrobús de la Ciudad de México.

I.3. METROBÚS

I.3.1. Historia del Metrobús

En el 2002 el gobierno de la Ciudad de México firmó un acuerdo con organismos internacionales que promoverían la creación de un sistema BRT en la CDMX. Con apoyos especiales y sin precedentes en México, se comenzó a proyectar una red de corredores BRT que circularían a

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

través de la Ciudad. En diciembre de 2004 inició la construcción de la Línea 1 del Metrobús, el sistema BRT de la CDMX. En menos de un año se estaba inaugurando el primer tramo de esta línea que circularía por una de las avenidas más importantes de la ciudad, Avenida Insurgentes. Pronto las autoridades de la Ciudad notaron las grandes ventajas de este sistema, las cuales consistían en: uno, alterar muy poco el entorno urbano; dos, no requerir una inversión inicial grande y tres, el tiempo de implementación era muy corto [2].

Fue así como empezaron a llegar las siguientes líneas que ya en un principio habían sido proyectadas. En septiembre de 2007 empezaron los trabajos de la Línea 2, para marzo de 2008 ya se había puesto en marcha la ampliación de la Línea 1, conectando el norte de la Ciudad con el sur y para finales de ese mismo año se inauguraba la Línea 2, demostrando que la rápida implementación de la Línea 1 no había sido por casualidad. La Línea 3 y la Línea 4, repetirían este comportamiento, pues comenzaron las obras en marzo de 2010 y julio de 2011, y para febrero de 2011 y abril de 2012 entrarían en operación, respectivamente [2].

Para la Línea 5 el gobierno buscó que su implementación fuera aún más rápida y lo logró ya que sólo pasaron seis meses entre el inicio de obras y la inauguración. Las claves: emplearon piezas prefabricadas, las jornadas eran continuas y esta línea era la más pequeña de la red de corredores BRT. De esta forma, para noviembre de 2013 ya estaba en operación la Línea 5 [13]. Línea 6 comenzó su construcción en octubre de 2014 [14] y culminó las obras quince meses después, por lo que a finales de enero de 2016, entró en operación [15]. Por último, la Línea 7 comenzó a construirse por la avenida Paseo de la Reforma en enero de 2017 [16] para ser inaugurada en marzo del siguiente año [17]. En la Figura I.6 se muestra la línea del tiempo del sistema BRT de la CDMX: Metrobús. En la misma se puede corroborar que en tan sólo quince años se ha montado esta gran red que mueve más de un millón de usuarios al día; mientras que una línea de metro, en este caso la Línea 12, tardó más de cuatro años en construirse y entrar en operación [18]. Esto demuestra que claramente se trata de sistemas de transporte urbano con el mismo objetivo, pero con alcances muy diferentes.

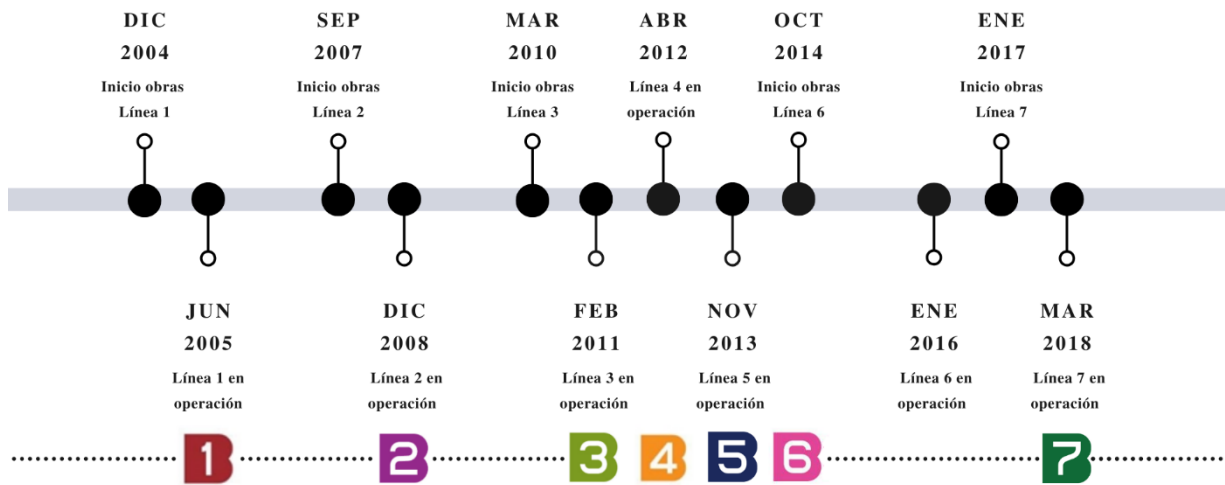


Figura I.6. Línea del Tiempo: Metrobús. Elaboración Propia.

I.3.1. *Metrobús: Situación actual*

En 2020, el sistema BRT de la Ciudad de México cuenta con 7 líneas con una longitud de 170 kilómetros, 238 estaciones y una flota de 660 autobuses. Esta es la infraestructura con la que se mueven cerca de 1.24 millones de pasajeros al día. Todas las líneas al menos tienen dos conexiones entre sí, además de estar conectadas con los principales sistemas de transporte de la ciudad, como metro, autobuses, bicicletas, taxis y trolebuses.

En la Tabla I.2 se desglosa la flota con la que cuenta el Metrobús, se distinguen 5 autobuses diferentes. Los articulados fueron los pioneros, actualmente tienen presencia en todas las líneas a excepción de la 4. Los biarticulados se incorporaron a la flota para aumentar la oferta de pasajeros en líneas con alta demanda como la Línea 1. Los autobuses de 12 metros e híbridos se incorporaron para la Línea 4, esto porque dicha línea recorre el Centro Histórico de la Ciudad de México, característico por sus calles angostas y por estar continuamente congestionado, por lo que era imposible pensar que esta línea empleara autobuses articulados. Finalmente, para la Línea 6 se consideraron autobuses de doble piso y se incorporó a la flota el modelo Doble Piso EURO VI. A finales del 2020, el Metrobús comenzó el plan de electromovilidad, el cual consiste

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

en incorporar autobuses 100% eléctricos. La primera etapa del plan es incorporar 10 autobuses articulados 100% eléctricos a la Línea 3.

Tabla I.2. Flota del Metrobús [19]

Tipo de Autobús	Cantidad de Autobuses	Capacidad de pasajeros
Articulados	303	160
Biarticulados	124	240
12 metros	61	100
Híbridos	9	100
Doble Piso EURO VI	90	130
Articulados 100% eléctricos	10	160

Actualmente, se trabaja en la ampliación de la Línea 3 y recientemente se concluyó la ampliación de la Línea 5. Con estas ampliaciones: la longitud del sistema será de 194 kilómetros, contará con 280 estaciones y atenderá a 1.345 millones de pasajeros al día [19]. En la Figura I.7 se muestra el mapa actual del Metrobús sobre la distribución poblacional de la ZMVM [20]. Áreas con menos de 3955 habitantes no son mostradas en la Figura I.7. Adicionalmente, se ha anunciado la creación de la Línea 8 la cual será el primer corredor circular con 41.6 kilómetros y 73 estaciones. Esto sólo corrobora la importancia de este sistema en la movilidad de la Ciudad de México.

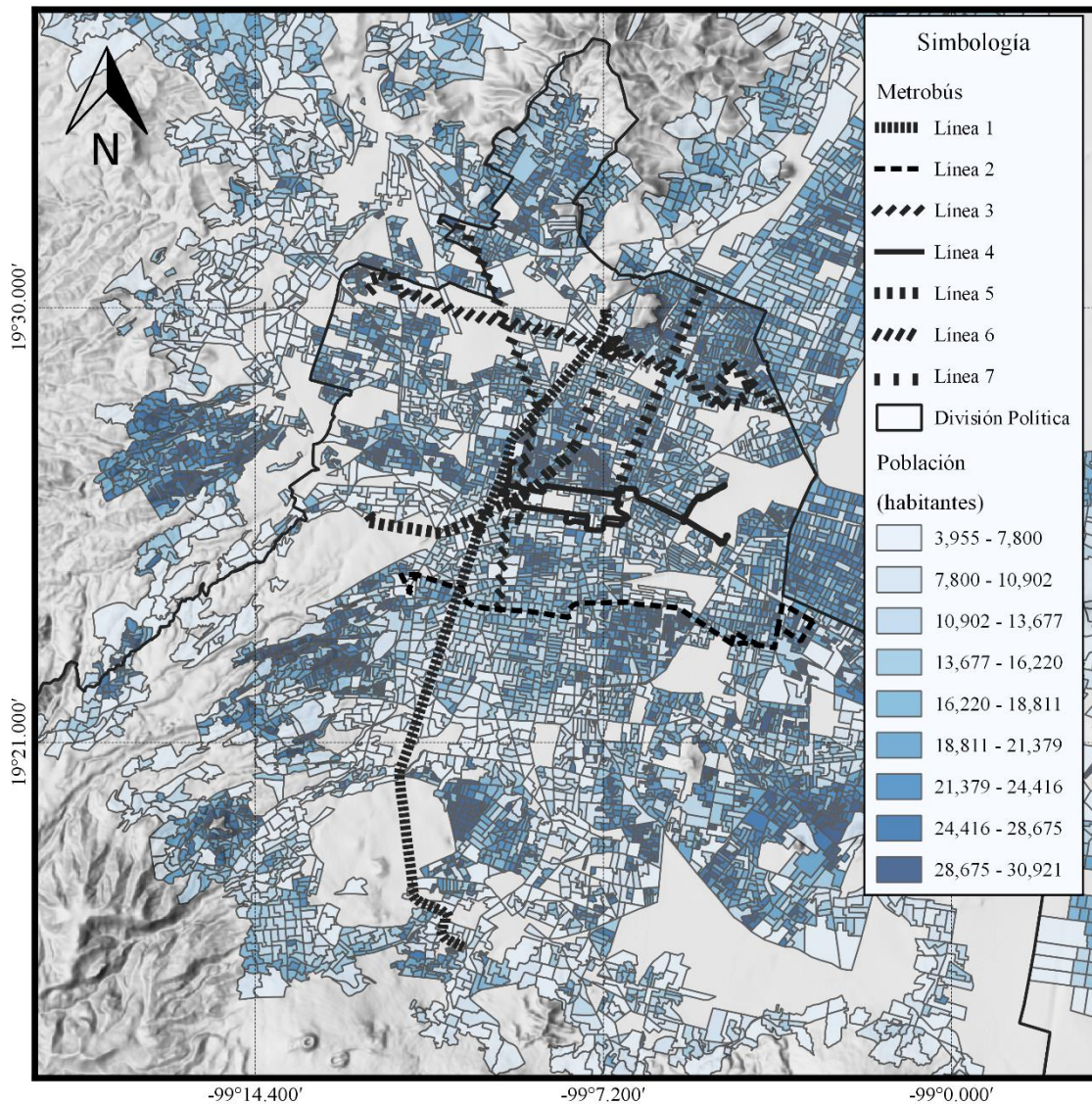


Figura I.7. Mapa actual del Metrobús [19] y distribución poblacional de la Zona Metropolitana del Valle de México.

La demanda de usuarios no se encuentra distribuida a lo largo de las diferentes Líneas de igual forma. Por un lado, en la Figura I.8 se muestra que la Línea 1 es responsable de casi la mitad de la demanda diaria total de la red, transportando a 480 mil pasajeros. Esto se debe a la ubicación, longitud, capacidad y antigüedad de la línea. Por otro lado, las Líneas 4 y 5 son las que cuentan con menor demanda y por lo tanto menor infraestructura. El Metrobús ha creado múltiples rutas dentro de las mismas líneas para segmentarlas y poder brindar una mejor oferta ante la demanda de los usuarios. Las rutas tienen terminales diferentes a lo largo de una misma línea y su

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

frecuencia de operación depende de la hora del día así como del día de la semana. La Figura I.8 también contiene el número de rutas por línea bajo un esquema ordinario. Como se observa en dicha figura, debido a la demanda la Línea 1 cuenta con 7 diferentes rutas, mientras que la Línea 5 cuenta sólo con una ruta.

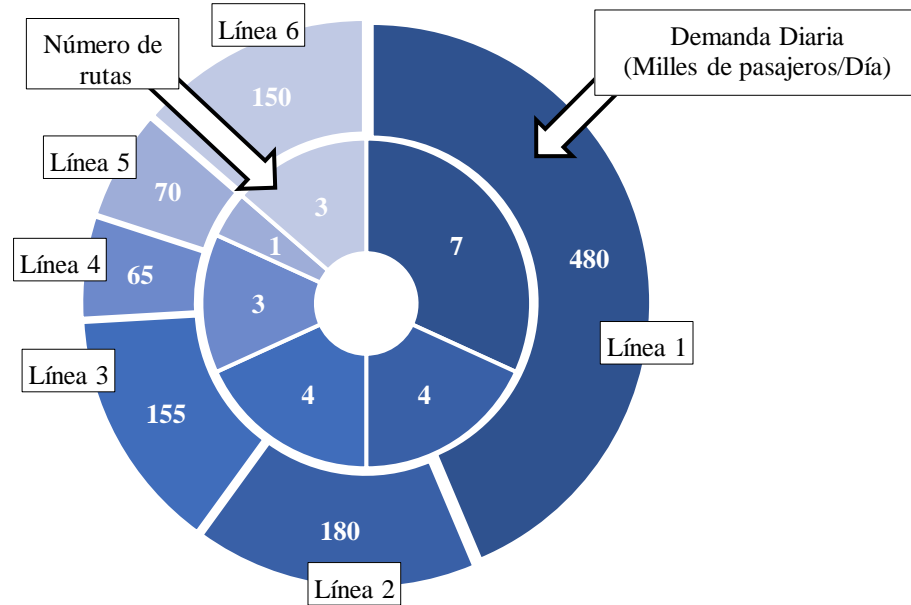


Figura I.8. Demanda diaria y número de rutas por línea del Metrobús [21]

CAPÍTULO II

RIESGO SÍSMICO, TERREMOTOS Y RESILIENCIA EN LA CIUDAD DE MÉXICO

II.1. RIESGO SÍSMICO

Muchos autores definen el riesgo como la convolución de amenaza, exposición y vulnerabilidad [5] por lo que para evaluar y conocer el riesgo se deben conocer y estudiar todos los elementos anteriores de forma exhaustiva. La ausencia de uno de estos tres agentes, riesgo, exposición y vulnerabilidad resulta en la ausencia del riesgo. Para la Ciudad de México la amenaza principal es la actividad sísmica. Los principales sismos que afectarán a la Ciudad de México son: sismos interplaca en la zona de subducción del Pacífico, sismos intraplaca en la placa de subducción de Cocos y sismos corticales en el cinturón volcánico mexicano [22].

La amenaza o peligro, se define como la probabilidad de que se exceda algún indicador predefinido que caracterice el comportamiento de un fenómeno natural, para los sismos se ha empleado de forma estándar en todo el mundo la aceleración del suelo como indicador. La amenaza puede tener una o múltiples fuentes, tal es el caso de la Ciudad de México. La intensidad de la amenaza depende del sitio, generalmente mientras más cercano esté de la fuente mayor será la intensidad y viceversa, sin embargo, esto no aplica para la Ciudad de México, pues los suelos blandos que caracterizan a la zona de lago amplifican significativamente las ondas sísmicas, aumentando la amenaza de forma considerable. Estas condiciones particulares de un sitio en Ingeniería Sísmica se conocen como condiciones de sitio [23]. En la Figura II.1 se muestra la zonificación geotécnica de la Ciudad de México. A nivel normativo se identifican tres principales zonas: de lomas, de transición y lacustre [24]. La zona lacustre es donde se registran las mayores amplificaciones de las ondas sísmicas [23].

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

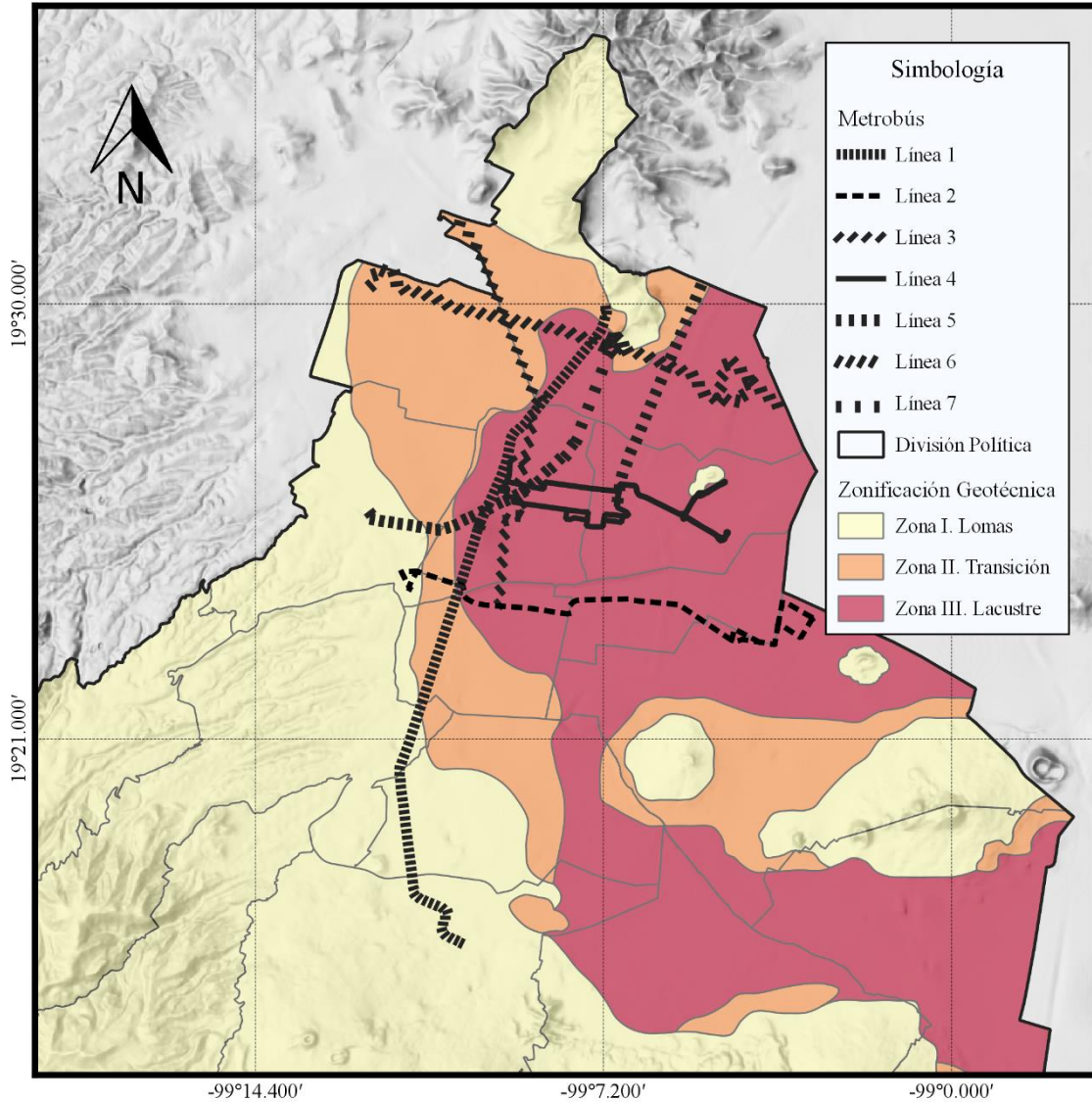


Figura II.1. Zonificación geotécnica de la Ciudad de México [24] y la red de Metrobús.

La exposición, está formada por la infraestructura y las comunidades que están sujetas a verse afectadas por las amenazas. Para el caso de la Ciudad de México, toda la infraestructura y toda la población están expuestas a amenazas [5].

La vulnerabilidad describe las pérdidas en los bienes y las comunidades que están expuestas al peligro. está formada por el daño o las pérdidas que tendrá la infraestructura que está expuesta al peligro [25]. Este concepto se comenzó a usar como un concepto físico exclusivamente para

la infraestructura, pero últimamente se ha extendido su definición para describir cualitativamente a las comunidades. La convolución de la amenaza, exposición y vulnerabilidad se muestra en la Figura II.2. En la cual se muestra que para que exista el riesgo deben estar presentes los tres conceptos que lo componen.

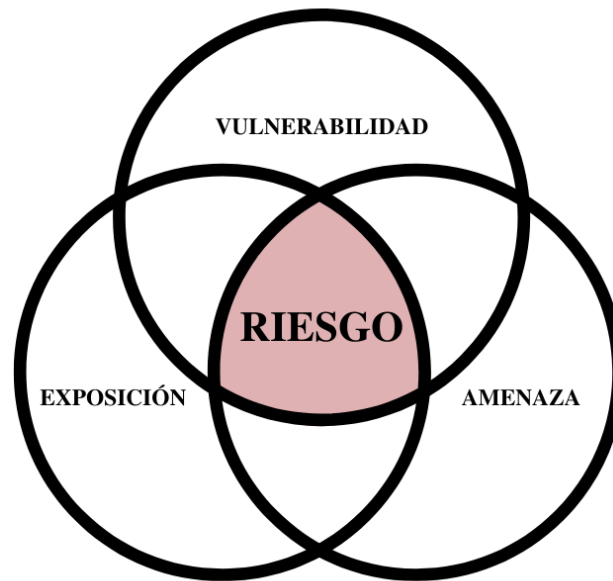


Figura II.2. Evaluación del Riesgo[25]

Es de gran importancia estudiar extensivamente estos tres componentes para realizar una correcta evaluación de lo riesgo. Una correcta evaluación de riesgos define: uno, la naturaleza y la magnitud de las amenazas; dos, la infraestructura expuesta ante este peligro y tres, la vulnerabilidad de la infraestructura expuestas a estas amenazas [3].

Actualmente, a escala global se identifica una fuerte tendencia de urbanización, es decir mucha gente está concentrándose en las zonas urbanas, lo que hace que aumente la exposición de estas. Por si fuera poco, en países en vías de desarrollo, como es el caso de México, el proceso de urbanización está caracterizado por ser acelerado y desorganizado, por lo que las tasas de crecimiento de la población dentro de las urbes son altas y mucho mayores a las tasas de crecimiento de la infraestructura con la que cuentan las ciudades.

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

Esto implica que los sistemas críticos de infraestructura urbana, que son los sistemas de movilidad, abastecimiento de agua potable, recolección de residuos sólidos, drenaje, abastecimiento de luz, entre otros, aumenten su vulnerabilidad debido a que crecieron las demandas, pero no su oferta. En general la tendencia global de urbanización, que es aún más drástica en países en vías de desarrollo, aumentan el riesgo y reducen la resiliencia de las comunidades, lo que puede resultar en muchas pérdidas humanas y materiales [3].

Este panorama genera mucha incertidumbre, por lo que para lidiar con él se deben establecer estrategias a largo plazo encaminadas al desarrollo sustentable, en donde las comunidades tendrán que aprender a convivir con desastres naturales menos esporádicos y más severos, para así ser más resilientes [26].

II.2. MARCO NORMATIVO Y TERREMOTOS HISTÓRICOS

En la Ciudad de México, debido a la recurrencia de eventos sísmicos de gran intensidad las autoridades en conjunto con la comunidad académica han desarrollado códigos de construcción de gran calidad, que a lo largo de diferentes sismos han probado que cada vez son mejores. En 2021, se cuenta con el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal publicado en la gaceta oficial de la Ciudad de México el 10 de noviembre de 2017 [24].

Desafortunadamente, la aplicación y el cumplimiento de los códigos no son tan buenos como los códigos mismos, los mayores retos que enfrentan son la autoconstrucción o construcción no regulada y el incumplimiento con los códigos [27], es por esto que sigue presentándose daño estructural después de sismos intensos.

Por un lado, la autoconstrucción o construcción no regulada consistente en la construcción o modificación de edificaciones sin supervisión. se da por la desigualdad que se vive en el país pues la población que no cuenta con suficientes recursos no puede acceder a servicios profesionales de construcción [28], más de 35 millones de mexicanos viven en situación de rezago habitacional [20] y se estima que el 61% de todas las edificaciones del país son autoconstruidas [29].

Por otro lado, el incumplimiento de los códigos de construcción se debe a fallas en la supervisión de obras, corrupción en diferentes niveles administrativos, al empleo de materiales de baja calidad, malas prácticas, entre otros [27].

Debido a las causas mencionadas previamente y al desarrollo paulatino de los códigos en los últimos 45 años en la Ciudad de México se han presentado 5 eventos sísmicos que han provocado daño estructural. Estos sismos se detallan en la Tabla II.1. Se consideró la distancia epicentral respecto a la estación acelerométrica de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes ubicada en la Zona Lacustre cerca del centro de la ciudad. [30].

Tabla II.1. Detalle de sismos que han provocado daños en la Ciudad de México en los últimos 45 años [30].

Fecha	Magnitud (Mw)	Distancia Epicentral (km)
14 de marzo de 1979	7.5	350
19 de septiembre de 1985	8.0	394
24 de abril de 1889	6.9	303
20 de marzo de 2012	7.4	335
19 de septiembre de 2017	7.1	130

Los sismos de la Tabla II.1 evidenciaron fallas y áreas de oportunidad de la ciudad, pero también gracias a ellos se han realizado avances importantes en el estudio y conocimiento del riesgo sísmico para la Ciudad de México y todo el país. Uno de los avances fue la creación del Instituto para la Seguridad de las Construcciones en la Ciudad de México en 2010 [31].

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

II.3. RESILIENCIA

II.3.1. *¿Qué es la Resiliencia?*

“La resiliencia se entiende como la capacidad de un sistema para resistir el impacto, seguir permaneciendo e incluso utilizarlo en beneficio propio para continuar proyectándose en el futuro a pesar de los acontecimientos desestabilizadores que hubiera sufrido” [32]. Otros autores la definen como la capacidad de un sistema de absorber y adaptarse, para así volver a su condición inicial [26].

“La resiliencia urbana es un concepto en construcción, pero se entiende como la capacidad de una Ciudad para absorber perturbaciones y reorganizarse mientras experimenta un cambio, a fin de retener esencialmente la misma función, estructura, identidad y reacciones.” [32].

Por otra parte, el Banco para el Desarrollo Asiático define resiliencia urbana como la habilidad de resistir y recuperarse de la conmoción de un evento asociado a peligros naturales y cambio climático. La forma más eficiente de construir resiliencia ante los riesgos asociados a estos fenómenos es por medio de la planeación y gestión urbana. Considerar la respuesta ante estos riesgos es parte esencial de las estrategias proactivas de la planeación urbana y planes de desarrollo de infraestructura [5].

En la actualidad no hay una forma única de definir la resiliencia, es abordada e interpretada desde diferentes perspectivas y formas. En la Figura II.3 se observa el interés que *Google Trends* calcula con base en el número de búsquedas que han realizado los usuarios de este navegador en todo el mundo desde 2004. Se puede notar que el interés en esta palabra está en constante aumento por lo que cada día se habla más de resiliencia y se le añaden más consideraciones [33].

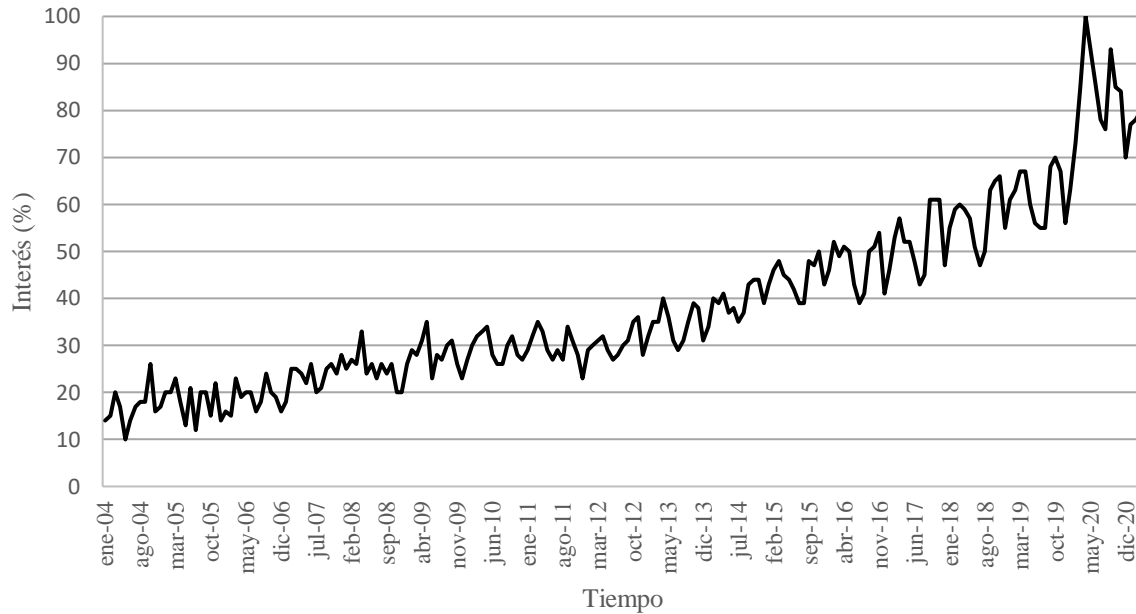


Figura II.3. Interés en: “Resilience” en todo el mundo desde 2004 [33].

Si bien no existe ninguna convención que delimite a la resiliencia, sí se tiene muy claro cuál es la esencia de este concepto. La cual se puede entender de la siguiente forma: mientras más resiliente sea un sistema, en este caso una ciudad, tendrá mejores oportunidades de sobreponerse ante los riesgos que enfrenta.

II.3.2. Resiliencia sísmica

La resiliencia sísmica se considera la habilidad o capacidad de una organización o una comunidad de recuperarse rápidamente ante un gran sismo [34]. Es un tema que se ha obtenido gran popularidad recientemente. Diferentes autores alrededor del mundo han propuesto metodologías para lograr resiliencia sísmica principalmente en edificaciones, sin embargo, en la gran mayoría de estas metodologías, la comunidad y sus demandas son tomadas en cuenta, por lo que de forma sencilla se podrían ampliar a otros sistemas urbanos [35]–[37].

El diseño basado en resiliencia es una de las metodologías más consolidadas para aportar resiliencia a las edificaciones. Parte de cambiar el objetivo principal de los códigos de construcción, el cual es proteger las vidas de los ocupantes de la edificación dejando de lado el daño que puedan sufrir los sistemas dentro de la edificación. Dicho objetivo hace varios años

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

era prioritario por las limitaciones que se tenían en el entendimiento y ocurrencia del fenómeno, pero actualmente los avances tecnológicos y científicos en el campo permiten buscar un objetivo más ambicioso de forma precisa [34].

El diseño basado en resiliencia es un proceso holístico que identifica y mitiga los riesgos relacionados con los sismos con el fin de proporcionar una rápida recuperación ante la ocurrencia de un gran sismo. Requiere de interacción interdisciplinaria y de un plan de contingencia para cumplir el objetivo de resiliencia establecido. El principal diferenciador de un diseño basado en resiliencia contra un diseño tradicional es la preparación de la edificación para recuperar su operatividad después de un sismo [34].

Por un lado, las pérdidas directas de un terremoto son los fallecimientos de los individuos y los costos financieros de la reparación o demolición de las edificaciones dañadas. Por otro lado, las pérdidas indirectas son aquellas que se asocian al tiempo fuera de operación del sistema, en este caso la edificación. Las pérdidas indirectas son mucho más difíciles de cuantificar pues toman en cuenta aspectos cualitativos, como las pérdidas culturales, el sentido de comunidad, la calidad de vida, entre otros. En ocasiones, estos aspectos cualitativos son afectados por años o décadas después de la ocurrencia del sismo [35].

Los códigos de construcción actuales proponen estados límites para medir el comportamiento de un edificio ante un sismo. Al garantizar dichos estados límites las vidas de los ocupantes son protegidas, pues el diseño de la edificación les garantiza una evacuación segura, más no una reocupación inmediata. El diseño basado en resiliencia identifica y enfrenta los retos principales para lograr dicha reocupación en un tiempo corto [35].

El diseño basado en resiliencia propuesto por la Iniciativa para el Diseño Sísmico basado en Resiliencia (REDi) consiste en minimizar el daño de todos los sistemas de la edificación por medio de un diseño mejorado, la elaboración de un plan de contingencia para la continuidad operacional, la reducción de riesgos externos que no dependen de la edificación y una evaluación de las pérdidas directas e indirectas esperadas para evaluar el cumplimiento de los objetivos de resiliencia. Los objetivos de resiliencia dependen de tres factores que son: tiempo inoperativo, pérdida financiera directa y la seguridad de los ocupantes [34].

En México, que aún se tienen bastantes retos en la implementación del código actual, pensar en un código que imponga el diseño basado en resiliencia es algo que se ve poco factible en el corto plazo, pero eventualmente el diseño basado en resiliencia comenzará a estar presente en los códigos.

II.3.3. *Resiliencia y sustentabilidad*

Se puede entender un ecosistema urbano conceptualizándolo como un sistema abierto y dinámico donde se consumen recursos y se producen desechos, el cual requiere de una elevada entrada de materia y energía para abastecer sus necesidades. De tal modo que se pueden considerar dos tipos de ecosistemas urbanos, los lineales y los cíclicos. Por un lado, el metabolismo lineal implica que un área urbana debe transportar todos sus recursos de áreas externas, así como disponer todos sus residuos, de igual forma, en áreas externas. Por otro lado, un metabolismo cíclico considera que un área urbana tiene la capacidad de generar y disponer todos sus recursos y residuos por sí sola. Es difícil encontrar áreas urbanas que tengan metabolismos puramente lineales o cíclicos, pues estos no son estados análogos, existe un amplio espectro entre los metabolismos lineales y urbanos de las áreas urbanas. Un metabolismo híbrido busca generar recursos y manejar sus residuos para así disminuir su dependencia de sitios externos, esto es una práctica sustentable que aumenta la resiliencia del ecosistema urbano [32].

Actualmente, la mayoría de las ciudades no tienen la capacidad de generar sus recursos ni de manejar sus residuos de forma autónoma, por lo que la mayoría cuentan con un metabolismo más cercano al lineal, es importante que en el corto plazo las áreas urbanas implementen políticas que les permitan reducir sus grandes dependencias externas, es decir, buscar que se tenga un metabolismo híbrido cada vez más alejado del metabolismo lineal. Un ecosistema urbano que es autosuficiente es más resiliente, pues depende de menos factores externos en los que no tiene injerencia total. Se puede observar en la Figura II.4. Diferentes Metabolismos Urbanos [32] Figura II.4 un esquema que muestra los diferentes metabolismos de las áreas urbanas.

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

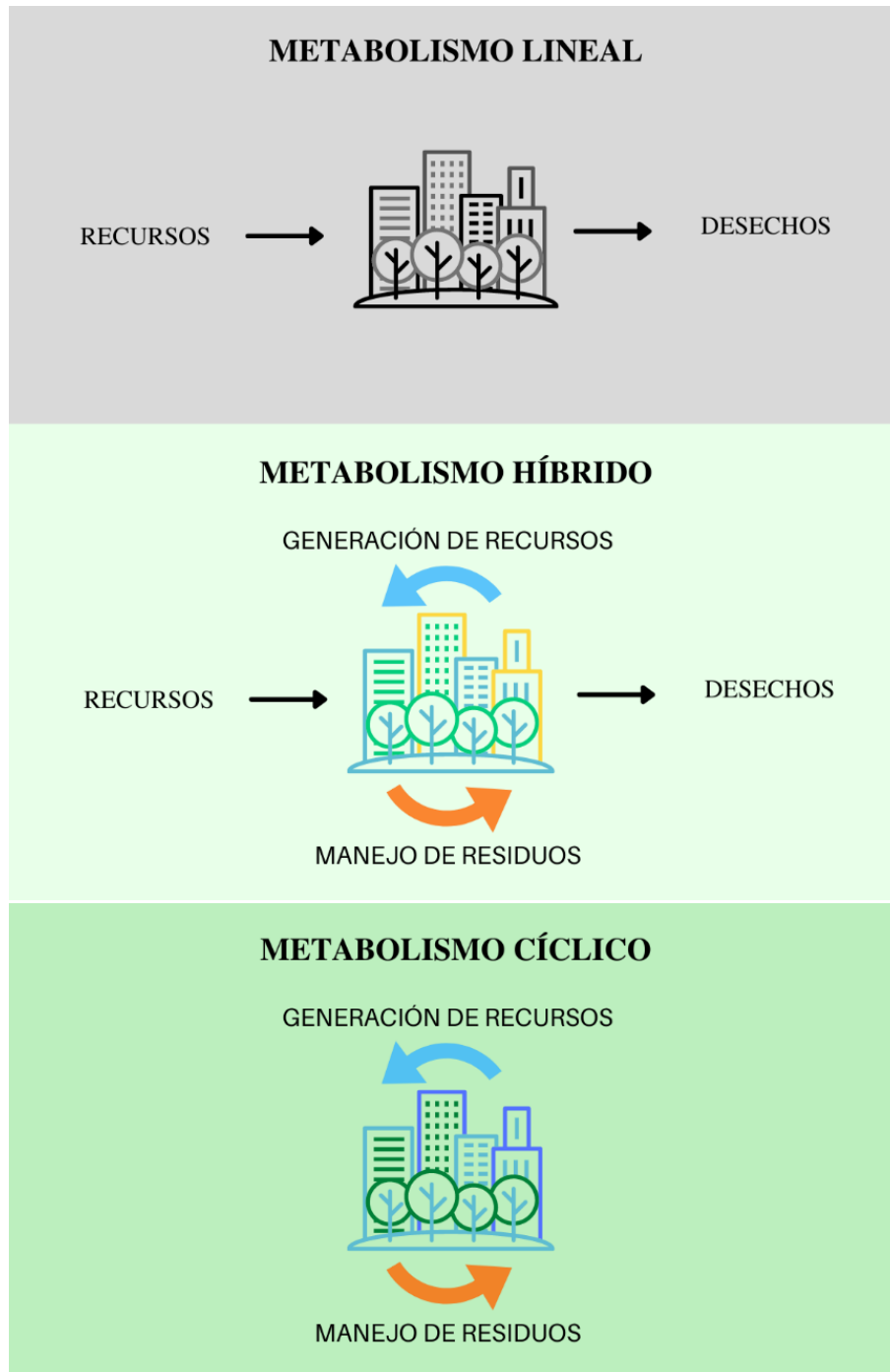


Figura II.4. Diferentes Metabolismos Urbanos [32]

II.3.4. Resiliencia en la Ciudad de México

Posterior al temblor del 19 de septiembre de 1985, dos organismos de suma importancia fueron creados, el Sistema Nacional de Protección Civil y la Centro Nacional de Prevención de

Desastres en 1986 y 1988, respectivamente. En 2011 se publica la Ley de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático y Desarrollo Sustentable para el Distrito Federal, en esta ley es mencionada la palabra resiliencia por primera vez en una ley [38].

El Banco Mundial en 2012 realizó un estudio en el que evaluaba el cambio climático, el riesgo por desastres naturales, la pobreza urbana y la relación entre estas. Todo esto con el fin de recomendar acciones para crear resiliencia en los sectores marginados de las grandes urbes. Este estudio se realizó en cuatro ciudades alrededor de mundo, todas en países en vías de desarrollo y la Ciudad de México fue una de ellas.

Por un lado, los descubrimientos clave fueron los siguientes: uno, el grupo de población más vulnerable que es el más marginado, es de cerca de siete millones de habitantes, ellos se encuentran asentados en los sitios con mayores amenazas y muchos carecen de los servicios básicos; dos, el gobierno de la Ciudad de México ya se había identificado y cuantificado las amenazas; y tres, las Alcaldías juegan un rol muy importante en la creación de la resiliencia, ya que ellas son las más cercanas a la comunidad.

Por otro lado, las principales áreas de oportunidad que el Banco Mundial encontró fueron: el presupuesto limitado a la resiliencia urbana, la falta de coordinación institucional y la carencia de bases de datos comunes para uso de las autoridades. Este estudio reveló que las dependencias no compartían información entre ellas y como consecuencia muchas veces duplicaban el trabajo [3].

En 2013 la CDMX, después de un proceso competitivo, fue admitida al programa de las 100 Ciudades Resilientes (100RC, por sus siglas en inglés) de la Fundación Rockefeller, este programa se dedica a apoyar a las ciudades a volverse más resilientes ante los desafíos físicos, sociales y económicos que enfrentan. Los beneficios de pertenecer a este programa fueron los siguientes: apoyo financiero para la creación de una agencia de resiliencia, encargada de coordinar los esfuerzos dirigidos a crear una ciudad más resiliente, asistencia técnica para el desarrollo de una estrategia de resiliencia, a través de un proceso participativo, que reflejara las necesidades de la ciudad, acceso a una plataforma de servicios y herramientas del sector privado, organizaciones no gubernamentales y agencias internacionales, y la capacidad de compartir e intercambiar experiencias y buenas prácticas con otras ciudades del programa [38].

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

El 11 de septiembre de 2017, tan sólo ocho días antes de un sismo que afectaría severamente a la Ciudad de México, se inauguró la Agencia de Resiliencia de la Ciudad de México (ARCDMX) la cual define resiliencia como *la capacidad para sobrevivir, crecer y adaptarse que tienen las personas, comunidades, empresas y sistemas que están dentro de una ciudad, independientemente de las tensiones crónicas e impactos agudos que experimenten*. Dicha definición fue propuesta por la Fundación Rockefeller [39].

La ARCDMX junto con el programa 100RC establecieron 5 ejes de trabajo para impulsar la resiliencia urbana. Los ejes son: fomentar la coordinación regional, impulsar la resiliencia hídrica, planear para resiliencia urbana y territorial, mejorar la movilidad a través de un sistema integrado, seguro y sustentable, y por último, desarrollar la innovación y capacidad adaptativa [39].

El programa 100RC concluyó en julio de 2019, sin embargo, la Fundación Rockefeller aún brinda apoyo económico a las 100 ciudades que fueron parte del programa y existe un seguimiento para las acciones que se llevan a cabo en estas [40].

Dado que las crisis son esporádicas y son difíciles de predecir, es difícil obtener recursos que busquen aportar resiliencia constantemente a las ciudades y la comunidad. Esto, generalmente lleva a que las zonas urbanas y comunidades no sean proactivas y por el contrario, sean reactivas lo que implica que no sean suficientemente resilientes y durante las crisis sean dañadas [26].

II.3.5. *Resiliencia en los Sistemas Urbanos*

El gobierno de la Ciudad de México en la Ley de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil de la Ciudad de México define resiliencia como *la capacidad de un individuo, familia, comunidad, sociedad y/o sistema potencialmente expuestos a un peligro o riesgo para resistir, asimilar, adaptarse y recuperarse del impacto y efectos de un fenómeno perturbador en un corto plazo de manera eficiente, a través de la preservación y restauración de sus estructuras básicas y funcionales, logrando una mejor protección futura, mejorando las medidas de reducción de riesgos y saliendo fortalecidos del evento* [38].

Los sistemas de infraestructura crítica se definen como aquellos que dentro de una urbe brindan servicios en respuesta a una demanda comunitaria. Están formados por elementos físicos y

operativos, tienen una agenda y métodos definidos para lograr satisfacer las demandas dentro del medio urbano y en caso de que fallen amenazarán la seguridad, economía, estilo de vida y salud pública de una ciudad, región o estado. Estos sistemas son aquellos que brindan servicios indispensables a la población, como el transporte, agua potable, energía eléctrica, recolección de residuos sólidos, drenaje, entre otros [41]–[43].

En las áreas urbanas debido a la concentración de bienes y habitantes se presentan muchas interdependencias entre los sistemas de infraestructura urbana críticos. El éxito o fracaso de estos sistemas es crucial ante la respuesta de una ciudad ante las amenazas. En muchas ocasiones ciudades enteras han sufrido severos daños por periodos prolongados por el colapso de uno o varios de estos sistemas. Es por esto que en su diseño y planeación es importante considerar el contexto físico, político y social de estos sistemas y no sólo las especificaciones técnicas deseadas [26].

En la actualidad, se ha abordado la evaluación de riesgos de la mayoría de los subsistemas urbanos estudiado la seguridad y confiabilidad de estos, principalmente desde el punto de vista estructural. La resiliencia implica que los sistemas sean proactivos sin importar el riesgo al que estén sujetos, por lo que deben de tener capacidad de respuesta, pero también capacidad de adaptarse y absorber. El brindarle a un subsistema estas capacidades creará resiliencia no solo en él sino en su entorno [26].

Sin embargo, los sistemas de infraestructura críticos que están sujetos a riesgos son muy vulnerables, principalmente porque no pueden crecer su oferta al mismo ritmo que crece su demanda, pues, debido a la constante concentración de población, cada vez sirven a más habitantes y esto aumenta la vulnerabilidad no solo del subsistema, sino de su entorno. En caso de que un subsistema fallé, se convierte en un propagador de caos debido a su extensión y a la interdependencia que guarda ante los otros subsistemas [26].

CAPÍTULO III

CASO DE ESTUDIO: EL METROBÚS Y EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017

III.1. EL SISMO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 2017

El 19 de septiembre de 2017 a las 13:14:40 tiempo del centro de México (18:14:40 UTC) y exactamente 32 años después del sismo de 1985, se generó un sismo intraplaca $M_w=7.1$. El epicentro (18.41°N , -98.71°E , profundidad $H=57$ kilómetros) se registró cerca del borde de los estados de Morelos y Puebla con una distancia hipocentral a la Ciudad de México de 127 kilómetros. En la Figura III.2 se puede observar el epicentro del evento sísmico. En la zona central de México muchos pueblos y comunidades fueron prácticamente devastados. Se registraron 369 decesos, 228 en la Ciudad de México, 74 en Morelos y 45 en Puebla. Más de 15,000 edificaciones sufrieron daños [22]. Solo en la Ciudad de México 543 edificios reportaron daño estructural severo, de esos 39 colapsaron y 41 colapsaron parcialmente. Más del 50% de los edificios dañados se ubicaban en las Alcaldías Benito Juárez y Cuauhtémoc, ambas en la zona central de la Ciudad de México [44]. Se estima que las pérdidas económicas de la ciudad fueron de casi el 0.2% del PIB nacional [39]. Este fue el segundo sismo que más daños le ha provocado a la Ciudad de México, sólo por detrás del sismo de 1985 [22].

Por la alta sismicidad de México, se han hecho esfuerzos importantes para poder caracterizar los sismos de una mejor manera. En la actualidad, México cuenta con varias redes sismológicas que trabajan en conjunto para obtener la mayor información posible de eventos sísmicos (IINGEN-UNAM, 2018). Las dos redes más extensas son la Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería de la UNAM (RAII-UNAM) y la red del Servicio Sismológico Nacional (SSN), que a su vez se divide en la Red de Banda Ancha y la Red del Valle de México, principalmente y cuenta con 96 estaciones a lo largo de todo el país (IINGEN-UNAM, 2018; Servicio Sismológico Nacional (SSN), 2021). Algunas estaciones de ambas redes se pueden observar en la Figura III.2. El objetivo de dichas estaciones es registrar las acciones del suelo causadas por

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

las ondas sísmicas. La propagación de las ondas sísmicas no es la misma en todas las direcciones, pues viajan por un medio heterogéneo que las atenúa de forma diferente a medida que se alejan del epicentro. Las estaciones registran la aceleración del suelo, entre otras medidas de intensidad. El contar con varias estaciones espacialmente distribuidas permite a los investigadores obtener diferentes intensidades para un mismo evento [45].

La estación acelerométrica que fue colocada en la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (Estación SCT, 19.39 °N, -99.14° E) fue una de las primeras de la red de RAII-UNAM, por lo que registró el evento sísmico del 19 de septiembre de 1985, además al encontrarse en la zona del lago (Zona III) ha tenido un papel vital para entender los efectos de sitio a los que está sujeta la Ciudad de México [46]. En el detalle de la Figura III.2 se puede observar la ubicación de dicha estación acelerométrica.

En la Figura III.1 se observan las intensidades registradas en la estación SCT para los sismos del 19 de septiembre de 1985 y de 2017. Se observa que el sismo de 1985 fue más intenso en dicha estación, pues el suelo alcanzó una aceleración de hasta 0.1647 g, mientras que para el sismo de 2017 el valor máximo absoluto de la aceleración del suelo fue de 0.09345 g. A estos valores se les conoce como la Aceleración Máxima del Suelo o PGA por sus siglas en inglés. Este parámetro se usa comúnmente para describir toda la historia de aceleraciones en un sitio y dado que ese sitio tiene un periodo definido, es la base para la elaboración de los espectros de respuesta y diseño [24].

En la Figura III.2 se puede observar un mapa calculado de aceleraciones máximas del suelo [47], que busca ilustrar cómo se va atenuando la intensidad de las ondas sísmicas a medida que estas viajan a través del suelo. Sin embargo, si se cruza la información de la Figura III.1 y la Figura III.2, la aceleración máxima del suelo para la Estación SCT no coincide, pues en el sitio se midió una PGA de 0.09345 g, mientras que el mapa de PGA la estima entre 0.198 y 0.245 g. Esto no quiere decir que la estimación sea del todo incorrecta, hay mucha incertidumbre en la elaboración del mapa de PGA, ya que no se cuenta con una densidad de estaciones acelerométricas adecuada para generar un mapa de PGA preciso.

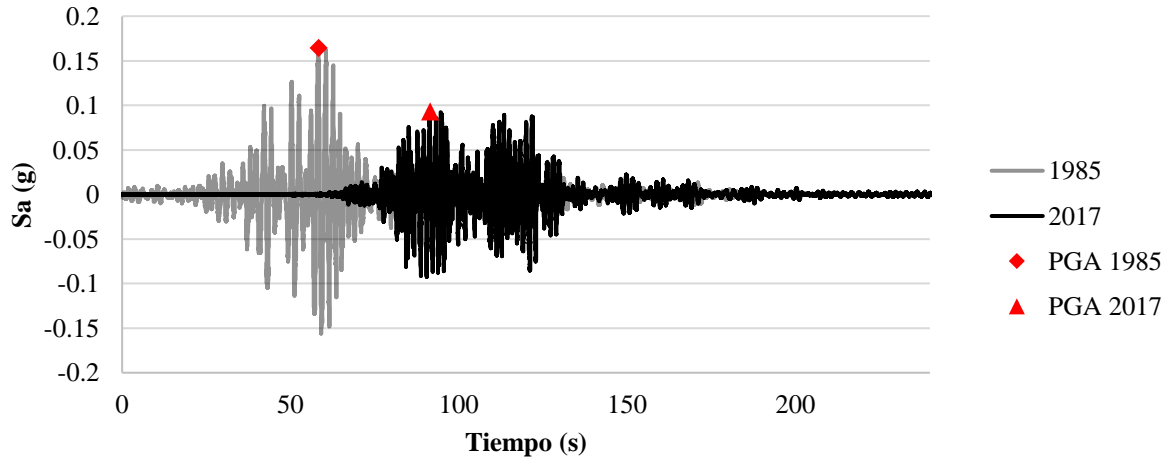


Figura III.1 Lecturas de la aceleración del suelo registradas en la estación SCT para los sismos del 19 de septiembre de 1985 y 2017 con los valores máximos absolutos resaltados. [46]

En el detalle de la Figura III.2, se observa la red de estaciones sísmicas del Servicio Sismológico Nacional y del la Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería de la UNAM, así como la estación SCT resaltada. También se pueden observar todos los inmuebles dañados categorizados por el nivel de daño, la red del Metrobús y las alcaldías Benito Juárez y Miguel Hidalgo, las cuales concentraron más del 50% de los daños.

Ante este evento la ciudad se paralizó. Tras el colapso de varios edificios se generaron zonas de daño que esparcían el caos. Provocando fallas en cadena de sistemas de infraestructura críticos, algunas zonas de la ciudad de quedaron sin energía eléctrica y sin abastecimiento de agua potable, explosiones por fugas de gas fueron registradas, la red de voz y datos se saturó, pronto las calles estaban repletas de gente desesperada. Debido a la crisis y a la congestión en las vialidades los vehículos dejaron de seguir la señalización semafórica. Los sistemas de transporte público fueron evacuados. Elementos del Ejército y la Marina fueron desplegados, por la noche se declaró estado de Emergencia Local, se establecieron tres días de luto nacional [38].

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

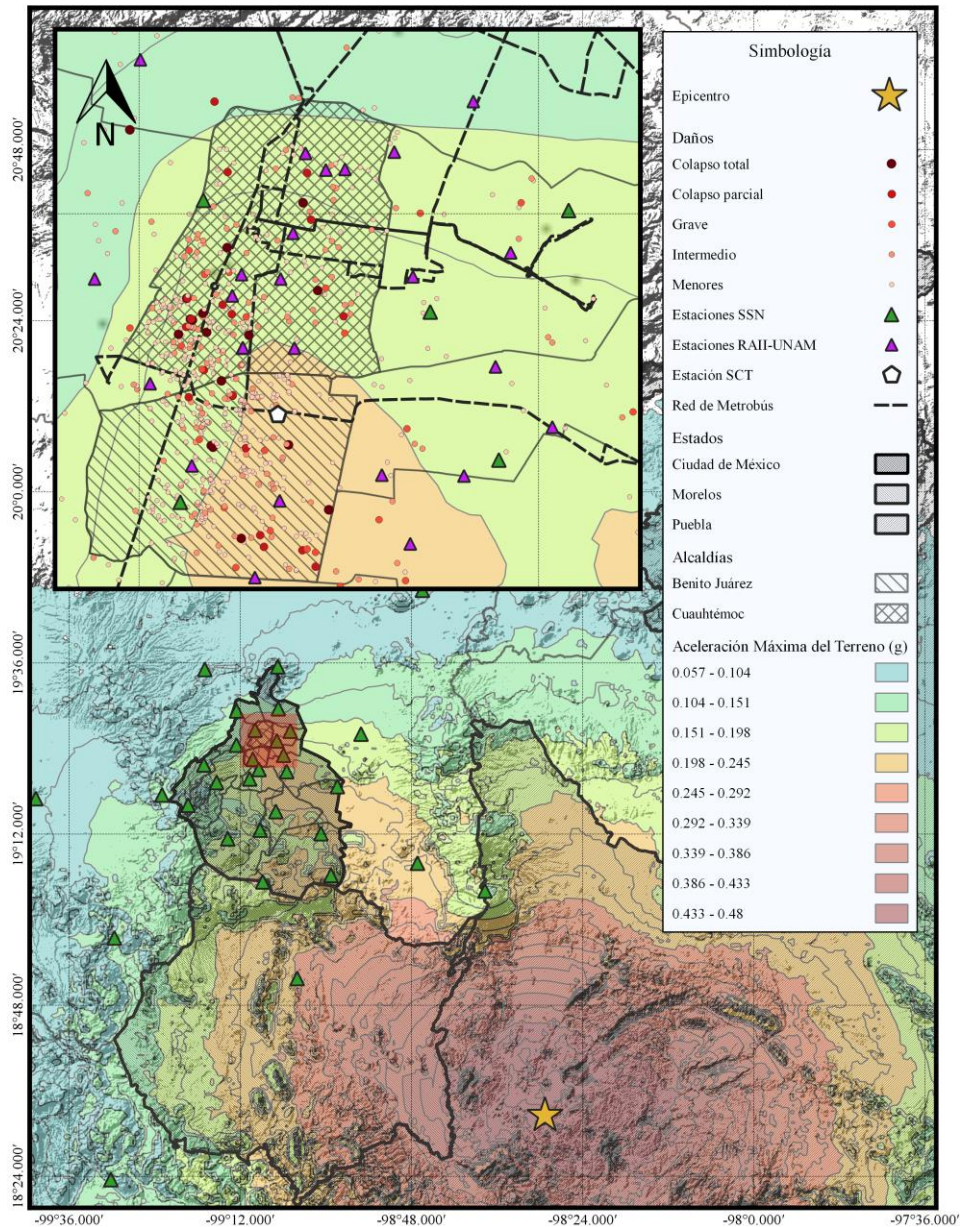


Figura III.2. Epicentro del sismo del 19 de septiembre de 2017 sobre el mapa calculado de Aceleración Máxima del Terreno (PGA) para los estados de Puebla, Morelos, México y la Ciudad de México (USGS, 2020), así como la red sismológica del Servicio Sismológico Nacional (Servicio Sismológico Nacional (SSN), 2021). En el detalle se observan los inmuebles dañados en la Ciudad de México, se puede identificar rápidamente que la gran mayoría de estos inmuebles se encuentran en las Alcaldías Benito Juárez y Cuauhtémoc (CENAPRED, 2020b).

III.2. EL IMPACTO DEL SISMO SOBRE EL METROBÚS

Después de un par de horas se declaró que todos los sistemas de transporte público de la CDMX serían gratuitos para ayudar a la población a recuperarse de los daños, el presidente llamó a los mexicanos a regresar a casa para que los servicios de emergencia lograran combatir de mejor forma la situación. Este regreso a casa para muchos mexicanos fue toda una travesía que tomaría varias horas [48].

“La Línea 2 del Metrobús opera con dos circuitos de servicio provisional... las estaciones Centro SCOP, Álamos, Xola, Las Américas, General Antonio de León y Tepalcates están fuera de servicio. En esta ruta el servicio alternativo es con microbuses que se han improvisado... La terminal Etiopía de la Línea 3 de Metrobús está deshabilitada por lo que se ofrece servicio de Obrero Mundial a Tenayuca. En tanto que, la Línea 4 de Metrobús no está penetrando a la Terminal 2 del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México” [49].

“La infraestructura de movilidad y los sistemas de operación fueron afectados por los sismos. Los temblores de septiembre pusieron en evidencia la importancia de evitar que los sistemas de transporte público colapsen inmediatamente después de un sismo... En cuanto al Metrobús, se identificaron las líneas 1, 3 y 5 como las más estratégicas debido a la cantidad de usuarios y a su conectividad...” [50].

El terremoto llegó para demostrar que aún faltan muchos esfuerzos, para que la Ciudad de México sea más resiliente, pero también demostró que la sociedad fue muy solidaria, lo cual da esperanza y encamina a la ciudad hacia un futuro resiliente.

En la Figura III.3 se observa la ubicación de los 39 colapsos y 41 colapsos parciales sobre los periodos dominantes del suelo a lo largo de la Ciudad de México [24]. También se muestra la red de Metrobús que se tenía operando en el 2017 [19], así como las alcaldías Miguel Hidalgo y Cuauhtémoc, las cuáles concentraron más de la mitad del daño total de la ciudad. En la misma Figura III.3 se puede apreciar que una parte importante de los colapsos se registraron cerca y a lo largo de la Línea 1 del Metrobús, por lo que la importancia que tuvo esta línea fue protagónica, ya que era el sistema de transporte público que contaba con las estaciones más cercanas a zonas que habían registrado múltiples colapsos. Además, se observa que la gran mayoría de los

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

colapsos totales y parciales se presentaron en zonas donde el suelo tiene un periodo dominante cercano a 1.4 segundos.

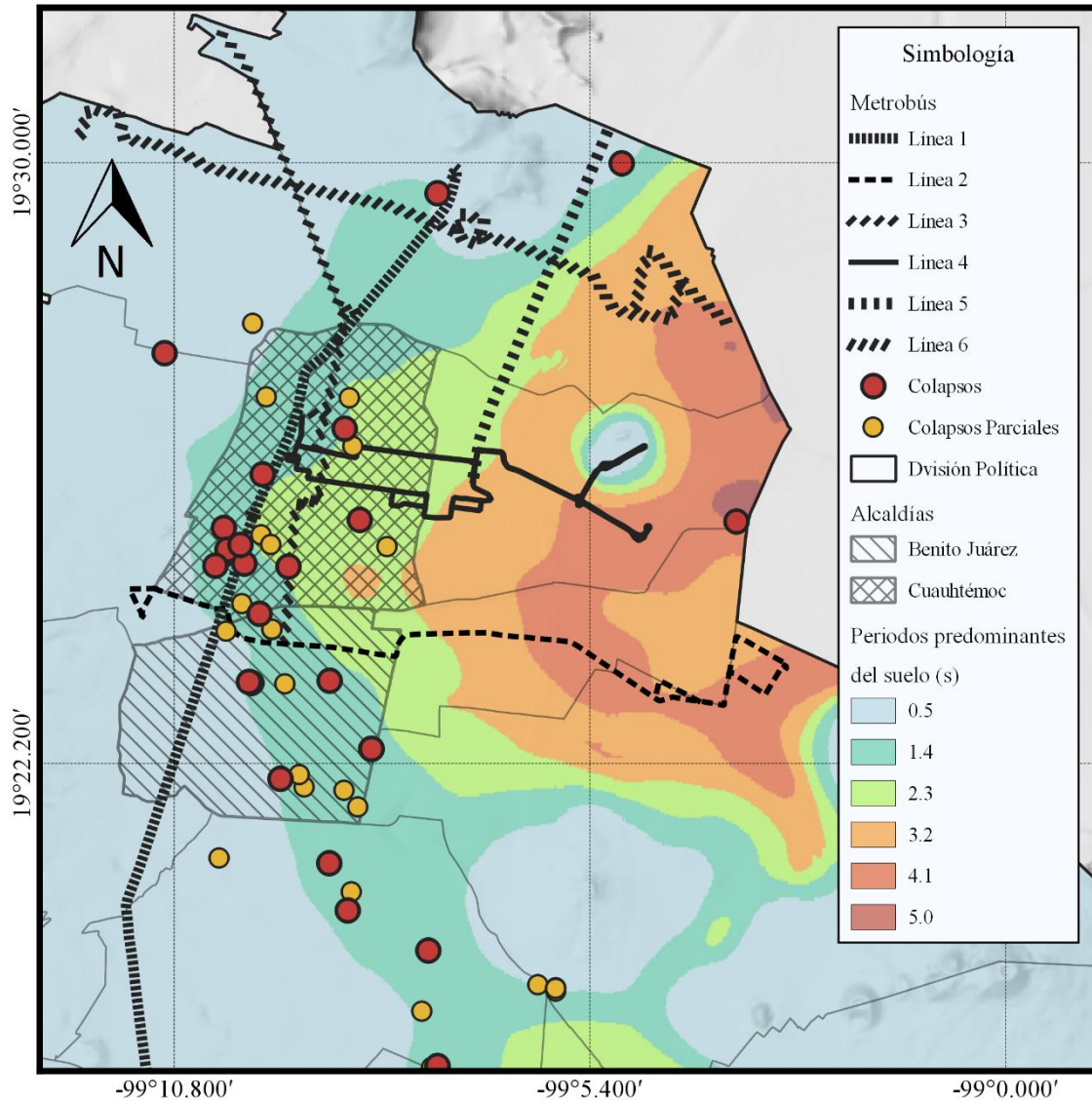


Figura III.3. Colapsos Totales y Parciales registrados por CENAPRED [51] sobre el mapa de los periodos dominantes del suelo establecido en las Normas Técnicas Complementarias 2017 para el Diseño Sísmico [24] y la red de Metrobús [19].

Como muchos de los otros sistemas urbanos, el Metrobús también sufrió importantes impactos, por edificios dañados muchas estaciones fueron cerradas y acciones de respuesta se tuvieron

que llevar a cabo para restablecer el servicio de algunas partes de las Líneas. Sin embargo, la respuesta del sistema no fue la misma a lo largo de toda la red. Esto se debe a la variación temporal y espacial de la amenaza, por lo que no todas las zonas registraron daño estructural y por lo consiguiente no afectaron la dinámica de su entorno.

Para conocer qué tal vulnerable fueron las líneas ante el sismo del 19 de septiembre de 2017 y si los impactos en la red estuvieron solamente asociados con zonas de daño estructural se obtuvo el estado de cumplimiento para cada línea. El estado de cumplimiento contiene el tiempo de llegada agendado, el tiempo de llegada actual y el tiempo de salida para todos los camiones durante todo un día de operación. Estos estados de cumplimiento fueron solicitados al Metrobús [19] quien a su vez se los solicitó al órgano operador del Metrobús, que fue el proveedor de la información para este estudio. Se solicitó información para las 6 líneas que se encontraban en operación para 22 días consecutivos, empezando una semana antes del temblor, el 12 de septiembre de 2017. Adicionalmente, se solicitaron 11 días más de los dos meses consecutivos, octubre y noviembre de 2017, para estudiar la respuesta del sistema a largo plazo.

Por medio de minería de datos y un modelo de tránsito se llevaron a cabo diferentes análisis para conocer la respuesta del Metrobús a diferentes escalas ante el sismo de Puebla del 19 de septiembre de 2017.

CAPÍTULO IV

MÉTODOLÓGÍA

IV.1. MINERÍA DE DATOS

IV.1.1. Marco de Referencia Empleado

La transición global a la era digital ha transformado el mundo, la gran mayoría de los sectores han encontrado importantes beneficios al recorrer esta transición. La generación y el almacenamiento de datos han crecido de forma acelerada. Gracias a los impresionantes avances tecnológicos se han logrado librar muchos obstáculos y se ha alimentado el rápido crecimiento del uso de datos [52]. En la Figura IV.1 se observa el volumen de datos usados a lo largo de todo el mundo en zeta bytes por año. Se puede ver que la tendencia es creciente, por lo que cada vez se generarán más datos y se podrán almacenar aún más [53]. La transición a la era digital es un hecho y con ella surgen muchos desafíos, por ejemplo, el obtener información valiosa a partir de los datos.

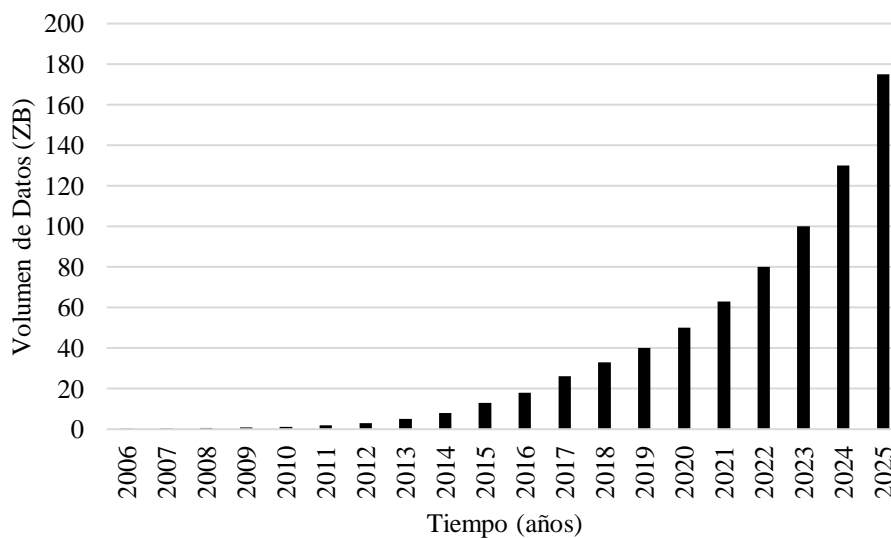


Figura IV.1. Volumen de Datos Global. Medido hasta 2018, proyectado a 2025. [53], [54]

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

Múltiples autores [52], [53], [55] han propuesto diferentes métodos y técnicas para obtener información valiosa de los grandes volúmenes de datos con los que se cuenta en la era digital.

La minería de datos es un área emergente que busca facilitar el descubrimiento de conocimiento al aplicar algoritmos que identifican patrones dentro de grandes conjuntos de datos [55]. Actualmente, se necesita de forma acelerada que surjan herramientas y teorías computacionales que asistan a los humanos en el proceso de extracción, pues hoy en día muchos de estos esfuerzos son manuales, por lo que consumen muchos recursos computacionales y humanos [52].

Rahman et al., definen la minería de datos como la ciencia de extraer información útil de grandes conjuntos de datos con el objetivo de entender y predecir. También reconocen que en la actualidad, la minería de datos se está convirtiendo en un componente fundamental de cualquier proceso de negocio, pues en la gran mayoría de estos se generan datos, que posteriormente se pueden analizar para finalmente, optimizar dicho proceso. La minería de datos ayuda a comprender complejas relaciones entre la naturaleza de los datos del mundo lógico, físico, real y virtual [56].

Fayyad et al., proponen un marco de referencia que busca, a lo largo de varios pasos o etapas, lograr el descubrimiento de conocimiento a partir de los datos. Dichos autores reconocen que la minería de datos es solo un paso de dicho marco de referencia, pues hay que preparar la información para que la aplicación de los algoritmos sea efectiva.

El marco de referencia para el descubrimiento del conocimiento en los datos propuesto por Fayyad et al., consta de las siguientes etapas:

- Entendimiento:
 - Comprensión de los patrones que obedecen a la naturaleza de los datos.
 - Identificación del alcance de los datos.
- Selección:
 - Creación de un conjunto de datos a analizar, asegurando que demuestre significativamente la variación del fenómeno a estudiar y que se cuenten con los recursos humanos y computacionales adecuados para procesar dicho conjunto.

- Preprocesamiento:
 - Identificación y limpieza de datos inservibles.
 - Análisis de la calidad de datos.
 - Definición de estrategias particulares para los datos seleccionados, por ejemplo, manejo de registros incompletos, manejo de registros atípicos, establecimiento de límites permisibles, entre otras.
- Aplicación de Transformaciones
 - Reducción y proyección de datos por medio de la aplicación de transformaciones. El encontrar características y/o relaciones clave puede hacer que el número de variables a estudiar se reduzca, a esto se le conoce como reducción de dimensionalidad.
- Minería de Datos
 - Elección de varios métodos de minería de datos que se alineen con los objetivos del marco de referencia para el descubrimiento del conocimiento, por ejemplo, integración, clasificación, regresión y agrupación.
 - Análisis exploratorio de los métodos seleccionados bajo la creación de una hipótesis. Este proceso incluye la validación de los parámetros previamente definidos.
 - Definición del método de minería de datos a utilizar y búsqueda de patrones de interés que respondan contundentemente la hipótesis.
- Interpretación y Evaluación
 - Análisis de los patrones obtenidos.
 - Visualización de datos extraídos.
 - Uso del conocimiento adquirido, alimentando un proceso contiguo o simplemente, documentándolo.

Es importante remarcar que dicho marco de referencia describe un proceso iterativo e interactivo, pues implica numerosos pasos con muchas decisiones en manos del usuario. Fayyad et al., reconocen que en cualquier momento es válido regresar al paso que el usuario considere necesario para replantearse el proceso. En la

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

Figura IV.2 se ilustra el marco de referencia para el descubrimiento de conocimiento en los datos, se detallan los múltiples pasos del marco de referencia, así como la flexibilidad que proporciona el marco de regresar en cualquier momento a cualquier paso [52].

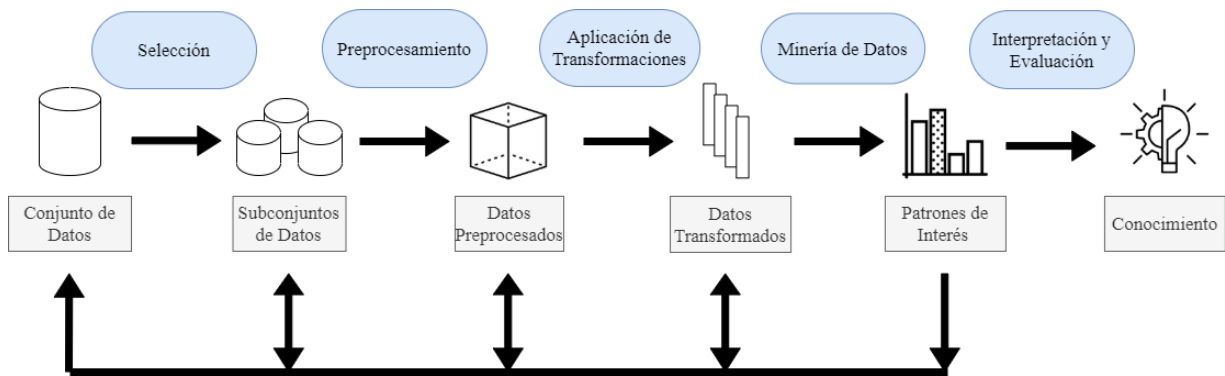


Figura IV.2. El marco de referencia para el descubrimiento del conocimiento en los datos [52]

Para conocer y entender la respuesta del Metrobús a diferentes escalas ante el sismo de Puebla del 19 de septiembre de 2017, se eligió el marco de referencia propuesto por Fayyad et al., ya que se identificó una mayor flexibilidad sobre otros marcos de referencia como el marco de referencia para logística y transporte [56] o el marco de referencia para datos geoespaciales y ambientales [57].

IV.1.2. Descripción del análisis realizado

Siguiendo el marco de referencia propuesto por Fayyad et al., se buscó conocer la respuesta del Metrobús ante el sismo del 19 de septiembre de 2017. A continuación, se describirá detalladamente cómo se realizaron las diferentes etapas señaladas en el marco de referencia seleccionado [52].

5.1.2.1 Entendimiento y definición del conjunto de datos

De acuerdo con la Figura IV.2, se definió al conjunto de datos como toda la información pública que le podría solicitar al Metrobús. El Metrobús cuenta con un portal de datos abiertos, en el cual se menciona que se puede proporcionar la siguiente información:

“... podrá tener acceso a la siguiente información de datos abiertos, ya sean estáticos o en tiempo real:

1. Datos estáticos:

- 1. Ubicación de las estaciones.*
- 2. Horarios de cada línea/ruta.*

2. Datos en tiempo real:

- 1. Llegada de autobuses a cada estación, la cual se actualiza cada 30 segundos.*
- 2. Alertas del sistema y avisos a usuarios.*
- 3. Ubicación de autobuses.”*

[19]

5.1.2.2 Selección y elaboración del subconjunto de datos

Partiendo de este conjunto de datos, se realizaron tres solicitudes de información al Metrobús por medio del portal de la Ciudad de México de atención ciudadana. En todas las solicitudes se le pidió al órgano operacional del Metrobús los tiempos de llegada de todos los autobuses a todas las estaciones de la red para diferentes fechas. En la Tabla IV.1 se muestra el detalle de las tres solicitudes hechas, el motivo de haber realizado tres solicitudes fue que al avanzar por las etapas del marco de referencia definido se notó que hacía falta información por lo que se regresó a la etapa de la elaboración del subconjunto de datos en dos ocasiones.

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

Tabla IV.1. Detalle de la información solicitada al organismo operador del Metrobús.

Fecha de Solicitud	Folio	Fechas Solicitadas	Número de Días
12 de noviembre de 2019	SUAC-121119190800	Del 19 al 26 de septiembre de 2017	8
14 de octubre de 2020	SUAC-141020539463	Del 12 al 18 de septiembre de 2017, los días 3, 5, 10, 12, 17, 19, 24, 26 y 31 de octubre de 2017 y los días 7, 14 y 21 de noviembre de 2017.	19
30 de noviembre de 2020	SUAC-301120594716	Del 27 de septiembre al 2 de octubre de 2017	6

Se muestra en la Figura IV.3 un ejemplo representativo de la información obtenida del órgano operador del Metrobús por medio de las múltiples solicitudes. En la misma se resaltan los siguientes aspectos:

1. Título descriptivo.
 - a. Ejemplo: “ECL1170912”.
 - i. EC - Estado de Cumplimiento.
 - ii. L1 - Línea de Metrobús.
 - iii. 170912 – Fecha en formato “aammdd”.
2. Fecha.
3. Línea de Metrobús analizada.
4. Identificador único del vehículo que realizó el viaje.
5. Estaciones de la ruta analizada. Una estación por sentido por columna.
6. Tiempos.
 - a. Tiempo de paso: hora estimada de llegada a la estación.
 - b. Tiempo de llegada: hora registrada de llegada a la estación.

c. Puntualidad: diferencia entre la hora estimada y registrada de llegada a la estación.

d. Tiempo de salida: hora registrada de salida de la estación.

7. Nombre de la ruta analizada. Múltiples rutas para una línea.

Después de familiarizarse con los datos se puede comentar en general que, hay un Libro de Excel por día por línea del Metrobús, el número de hojas por libro varía de acuerdo con el número de rutas por línea por día, el número de columnas dentro de una hoja varía según la extensión de la ruta, cuatro filas consecutivas representan un viaje de Metrobús a lo largo de una ruta [19].

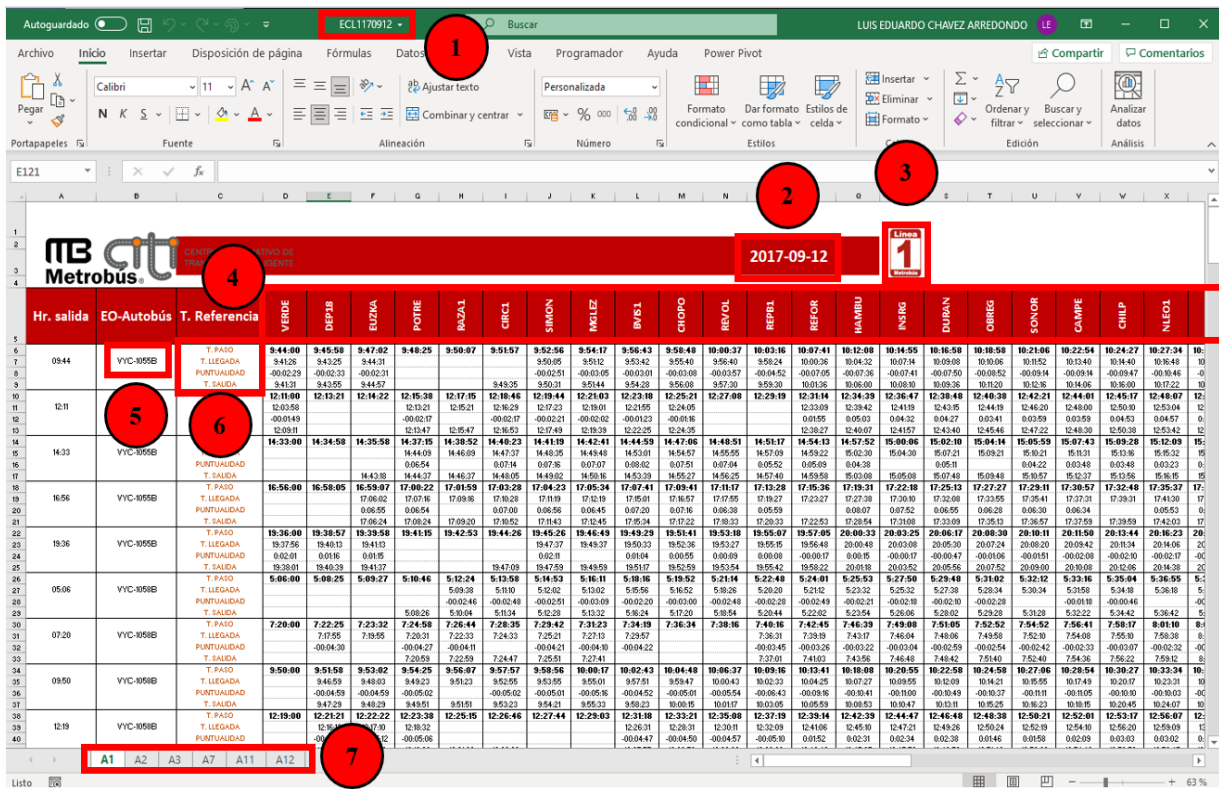


Figura IV.3. Ejemplo representativo de la información obtenida por el órgano operador del Metrobús [19]. Los números hacen referencia a la lista numerada previa.

5.1.2.3 Preprocesamiento. Limpieza y calidad de datos.

La calidad de datos es una parte fundamental del manejo de datos, garantiza que los datos sean útiles y cumplan con el propósito que se le dio. Se refiere a qué tan útil es un conjunto de datos,

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

midiendo su utilidad en términos de qué tan sencillo es procesarlo y analizarlo. El contar con datos con calidad hace que los datos sean útiles [58].

Para lograr medir la calidad de los datos, múltiples autores han propuesto diferentes dimensiones para así, desde diferentes perspectivas entender qué tan útiles son los datos con los que se cuenta [58]–[60]. Para evaluar la calidad de los datos proporcionados por el órgano operador del Metrobús se adoptó el marco de referencia propuesto por Batini et. Al., el cual considera las siguientes ocho dimensiones:

- Integridad: se refiere a la capacidad de representar todos los aspectos del fenómeno en estudio.
- Completitud: identifica si todos los datos necesarios para satisfacer las demandas de información están disponibles en el conjunto de los datos.
- Unicidad o duplicidad: Busca mantener una única fuente de la verdad dentro del conjunto de datos. Es decir que no haya dos o más registros que se puedan considerar verdaderos.
- Consistencia: busca que todos los datos tengan una representación uniforme a lo largo de los diferentes grupos funcionales. Se debe establecer una métrica para medir la coherencia entre diferentes conjuntos de datos que están gobernados por el mismo órgano.
- Puntualidad: evalúa si la información está lista para los usuarios con la rapidez necesaria.
- Utilidad: analiza si el usuario obtuvo una ventaja por haber hecho uso de la información.
- Veracidad: analiza que tan seguro el usuario se siente al utilizar la información.
- Precisión: evalúa si los datos representan la realidad y si vienen de una fuente confiable.

Como lo muestra la Figura IV.4, se obtienen datos con calidad si se cumplen con las ocho dimensiones propuestas por Batini et al.

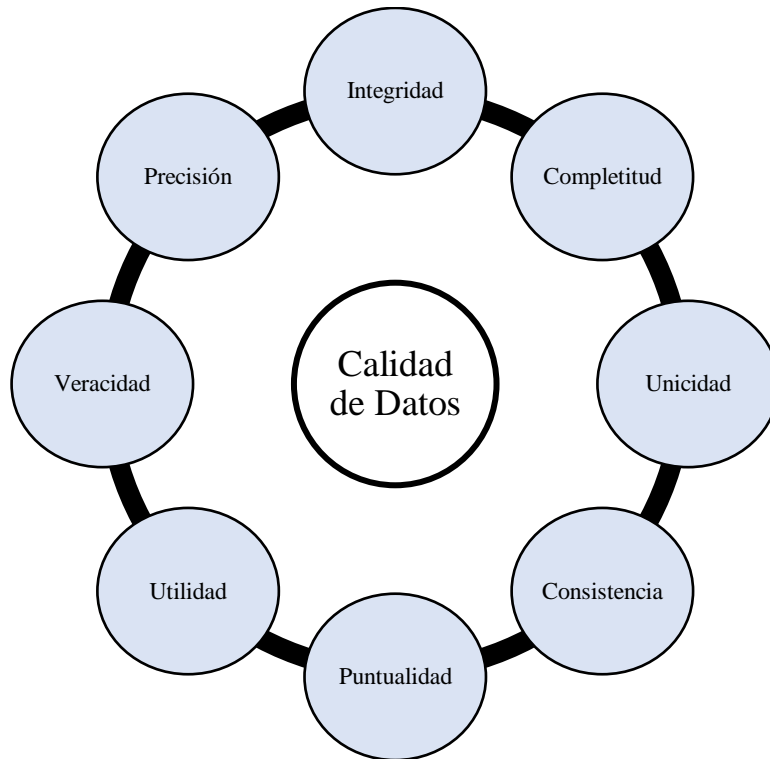


Figura IV.4. Marco de referencia adoptado para evaluar la calidad de datos a través de las 8 dimensiones [59].

Los resultados de aplicar el marco de referencia para la calidad de datos a la información proporcionada por el Metrobús se muestran en la

Tabla IV.2. Evaluación de calidad para los datos proporcionados por el órgano operador del Metrobús según el marco de referencia para la calidad de datos adoptado [19], [59]

Dimensión	Comentarios	Ejemplo/Hipótesis	Resultado
Integridad	Los datos sí son íntegros, pues con los datos contenidos en los Estados de Cumplimiento se puede analizar, en términos del tiempo, el impacto del sismo en la red del Metrobús.	Se esperan discrepancias muy grandes entre el tiempo de llegada estimado y registrado a partir de la ocurrencia del sismo.	Cumple.

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

Completitud	En varios archivos, los tiempos registrados de llegada y salida de las estaciones están incompletos. Se asume que hay fallas en la generación y captura de estos datos, por lo que los datos no están listos para ser usados por el usuario porque nunca se capturaron.	En general, los archivos cuentan con registros incompletos, las capturas de los tiempos de llegada y salida son intermitentes, para algunas estaciones están y para otras no.	No cumple.
Unicidad	No se identificaron registros duplicados.	La combinación de los campos “Fecha”, “Identificador del Vehículo” y “Hora de Salida” hacen que los registros sean únicos, no hay un solo par de registros que tengan la misma fecha, hora de salida y vehículo.	Cumple.
Consistencia	Los datos tienen consistencia, todos los tiempos están dados en el mismo formato (“hh:mm:ss”), los identificadores únicos de vehículo son congruentes a lo largo de todos los archivos.	Los Estados de Cumplimiento para todas las líneas contienen la información de tiempos en el mismo formato. Los identificadores únicos de vehículo proporcionan la información adecuada para todas las líneas.	Cumple.
Puntualidad	Después de realizar un análisis detallado, se concluye que los datos no son puntuales. Se cree que hay fallas en la generación	Algunos registros de tiempos de llegada y salida están incompletos. La información necesaria para	No cumple.

	<p>y captura de los tiempos registrados de llegada y salida, por lo que los datos no están listos para ser usados por el usuario, porque nunca se capturaron.</p>	<p>el Estado de Cumplimiento no se tiene, por lo que no se puede considerar que los datos sean puntuales.</p>	
Utilidad	<p>A pesar de que los datos no cumplan con varias dimensiones, sí se pueden llevar a cabo procesos para la obtención de conocimiento con ellos.</p>	<p>Se considera que esta dimensión es de las más cualitativas, pues no se obtendrá la utilidad deseada, pero también sería inadecuado pensar que los datos no sirven para realizar ningún análisis.</p>	Cumple.
Veracidad	<p>Los datos no tienen veracidad total, al analizarlos cuidadosamente se encontraron muchas discrepancias importantes. Sería un error que algún usuario lleve a cabo algún análisis con ellos considerándolos todos veraces.</p>	<p>Algunos registros indican que el tiempo de salida de una estación es posterior al tiempo de llegada de una estación consecutiva. Es decir, el vehículo hizo el recorrido en sentido contrario, lo cual no tendría sentido.</p>	No cumple.
Precisión	<p>Los datos no siempre representan la realidad y a pesar de que vengan de una fuente confiable, no son veraces.</p>	<p>Varios registros, sobre todo el día del sismo, describen patrones y trayectorias imposibles para los vehículos.</p>	No cumple.

Los resultados de aplicar el marco de referencia para la calidad de datos adoptado [59] sobre los estados de cumplimiento para las seis líneas del Metrobús se resumen en la Figura IV.5. Las

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

dimensiones en rojo son aquellas con las que no cumplen, mientras que las azules son aquellas con las que sí se cumple. En general, se concluye que los datos no tienen la calidad adecuada ni esperada, por lo que habrá que aplicar transformaciones y métodos alternativos de análisis para generar conocimiento. A partir de este momento, se reconoce que habrá un grado importante de incertidumbre en todos los resultados y análisis que se lleven a cabo, pues los datos no representan la realidad fidedignamente.

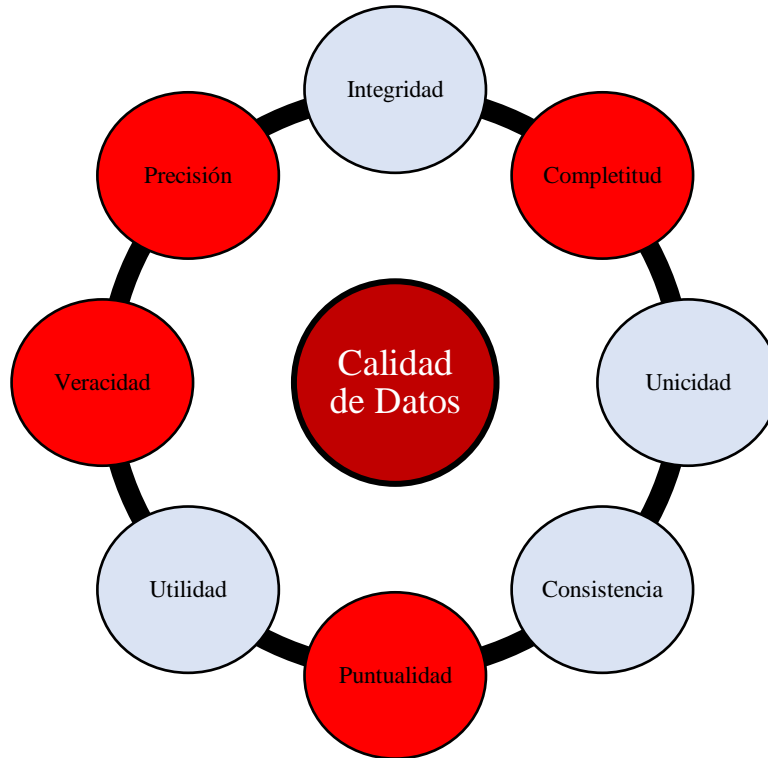


Figura IV.5. Resultados de aplicar el marco de referencia para la calidad de datos adoptado sobre los datos proporcionados por el órgano operador del Metrobús. La escala de colores indica la calificación por rubro del marco de referencia para la calidad de datos, aquellos en rojo no cumplen, mientras que los claros si cumplen [19], [59]

El primer paso para llegar al conjunto de datos preprocesados fue darles el mismo formato a todos los archivos, esto para tener un formato único y después elaborar los análisis partiendo de un formato único.

La

Figura IV.6 muestra las discrepancias en el formato.

Hr. salida	EO-Autobús	T. ciclo	T. ida	T. Regreso	Retorno o Estadia	T. Referencia	VERDE	DEP18	EUZKA	POTRE
05:00	VVC-1055B					T. PASO	5:00:00	5:02:25	5:03:27	5:04:46
						T. LLEGADA		5:01:44	5:02:26	5:03:46
						PUNTUALIDAD		-00:00:41	-00:01:01	-00:01:00
						T. SALIDA		5:01:51	5:02:50	5:04:12
07:12	VVC-1055B	2:39:01 a. m.	1:21:17 a. m.			T. PASO	7:12:00	7:14:25	7:15:32	7:16:58
						T. LLEGADA	6:52:42	7:09:11	7:10:19	7:11:41
						PUNTUALIDAD	-00:11:27	-00:05:14	-00:05:13	-00:05:17
						T. SALIDA	7:00:33	7:09:41	7:10:47	7:12:11
09:44	VVC-1055B	2:39:12 a. m.	1:04:04 a. m.			T. PASO	9:44:00	9:45:58	9:47:02	9:48:25
						T. LLEGADA	9:42:05	9:44:06	9:45:12	9:46:29
						PUNTUALIDAD	-00:01:50	-00:01:52	-00:01:50	-00:01:56
						T. SALIDA	9:42:10	9:44:38	9:45:36	9:46:56
05:06	VVC-1058B	2:02:18 a. m.	12:55:28 a. m.			T. PASO	5:06:00	5:08:25	5:09:27	5:10:46
						T. LLEGADA	5:03:21	5:05:26	5:06:29	5:07:44
						PUNTUALIDAD	-00:02:32	-00:02:59	-00:02:58	-00:03:02
						T. SALIDA	5:03:28	5:05:54	5:06:54	5:08:12

Hr. salida	EO-Autobús	Cred. MB	T. Referencia	VERDE	DEP18	EUZKA	POTRE	RAZAL
16:56	VVC-1055B	292	T. PASO	16:56:00	16:58:11	16:59:10	17:00:24	17:02:04
			T. LLEGADA		16:58:29	16:59:30	17:00:48	17:02:33
			PUNTUALIDAD		0:00:18	0:00:20	0:00:24	0:00:29
			T. SALIDA		16:58:56	16:59:58	17:01:14	17:03:00
19:36	VVC-1055B	292	T. PASO	19:36:00	19:38:24	19:39:24	19:40:43	19:42:26
			T. LLEGADA					
			PUNTUALIDAD					
			T. SALIDA					
14:33	VVC-1055B	292,302	T. PASO	14:33:00	14:35:21	14:36:23	14:37:39	14:39:16
			T. LLEGADA	14:32:29	14:34:40	14:35:45	14:37:08	14:38:55
			PUNTUALIDAD	-00:00:22	-00:00:41	-00:00:38	-00:00:31	-00:00:21
			T. SALIDA	14:32:38	14:35:10	14:36:15	14:37:33	14:39:25
05:06	VVC-1058B	9991	T. PASO	5:06:00	5:08:56	5:09:59	5:11:22	5:13:05
			T. LLEGADA	5:02:43	5:04:46	5:05:50	5:07:10	5:08:56
			PUNTUALIDAD	-00:03:06	-00:04:10	-00:04:09	-00:04:12	-00:04:09
			T. SALIDA	5:02:54	5:05:16	5:06:16	5:07:42	5:09:22

Hr. salida	EO-Autobús	T. Referencia	BV63	CHOPO	REVOL	REPBL	REFOR
05:30	VVC-1061B	T. PASO	5:30:00	5:31:35	5:32:58	5:34:25	5:35:55
		T. LLEGADA	5:22:44	5:26:11	5:28:00	5:30:12	5:31:12
		PUNTUALIDAD	-00:06:55	-00:05:24	-00:04:58	-00:04:13	-00:04:43
		T. SALIDA	5:23:05	5:26:45	5:28:36	5:30:44	5:31:46
07:53	VVC-1061B	T. PASO	7:53:00	7:55:14	7:56:55	7:59:01	8:01:38
		T. LLEGADA	7:46:09	7:48:34	7:50:14	7:52:28	7:56:36
		PUNTUALIDAD	-00:06:48	-00:06:40	-00:06:41	-00:06:33	-00:05:02
		T. SALIDA	7:46:12	7:49:16	7:51:10	7:53:04	7:57:16
10:34	VVC-1061B	T. PASO	10:34:00	10:36:08	10:37:51	10:40:14	10:42:09
		T. LLEGADA	10:20:33	10:23:38	10:25:50	10:28:12	10:30:18
		PUNTUALIDAD	-00:13:14	-00:12:30	-00:12:01	-00:12:02	-00:11:51
		T. SALIDA	10:20:46	10:24:16	10:26:28	10:28:36	10:30:50
13:03	VVC-1061B	T. PASO	13:03:00	13:04:55	13:06:35	13:08:37	13:10:28
		T. LLEGADA	13:00:02	13:01:51	13:02:51	13:04:37	13:06:41
		PUNTUALIDAD	-00:02:49	-00:03:04	-00:03:44	-00:04:00	-00:03:47
		T. SALIDA	13:00:11	13:02:17	13:03:33	13:05:09	13:08:35

Figura IV.6. Diferentes formatos en la información proporcionada por el Metrobús [19]

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

Como se observa en la

Figura IV.6, variaba el número de columnas antes de la terminal de salida, esta fue la única discrepancia que se identificó. El estado de cumplimiento que más columnas tenía es el que se muestra en la parte superior de la

Figura IV.6, parecía bueno contar con datos resumen del viaje como el tiempo de ciclo, tiempo de ida y tiempo de regreso, sin embargo, se identificó que muy pocos estados de cumplimiento contenían estas columnas, además en caso de que contaran con ellas estaban pobremente pobladas, por lo que se decidió descartarlas. El estado del cumplimiento del medio de la

Figura IV.6, contenía una nueva columna “Credencial de Metrobús” y como este había otros archivos que incorporaban columnas nuevas, estas había que eliminarlas. Finalmente, la imagen inferior de la

Figura IV.6 era representativa de la mayoría de los estados de cumplimiento, pues como mínimo todos los estados de cumplimiento tenían los campos “Hora de Salida” y “EO-Autobús”, por esto se decidió adoptar este como formato único para todos los estados de cumplimiento.

También se identificó que algunos estados de cumplimiento tenían fallas de origen, sobre todo los de la Línea 6, particularmente para las rutas G2 y G3. El problema era que en las columnas de algunas estaciones no tenían tiempos, sino detalles del viaje, esto se muestra en la Figura IV.7. Se elaboró un algoritmo que identificaba que la información en los campos relacionados a estaciones fuera solo de tipo tiempo (hh:mm:ss) o nula, al identificar otro tipo de información se alertaba al usuario para que este fuera y removiera de forma manual la información incorrecta. Por medio del uso de este algoritmo y la confirmación visual del usuario, se aseguró que toda la información de todos los estados de cumplimiento fuera de tipo tiempo (hh:mm:ss) o nula para todas las estaciones.

Hr. salida	EO-Autobús	T. Referencia	BACH1	ROSAR	ROSAR*	BACH1*	CULTU*	FERRO*	UAMAZ*	TECNO*	N59*	N45*
		T. SALIDA	23:32:48									
08:55	CE4-324	T. PASO	9:17:31	9:19:30								9:37:00
		T. LLEGADA	9:14:10	9:15:50	CE4-324	0:00:00	0:00:00	0:00:00	17 09:31:55	09/2017 10:06:01		9:31:32
		PUNTUALIDAD	-00:03:21	-00:03:40								-00:05:05
		T. SALIDA	9:14:38	9:16:22								9:31:55
10:16	CE4-324	T. PASO	10:36:25	10:38:05								10:58:00
		T. LLEGADA	10:33:04	10:34:48	CE4-324	0:00:00	0:00:00	0:00:00	17 10:55:14	09/2017 11:32:02		10:55:08
		PUNTUALIDAD	-00:03:21	-00:03:17								-00:02:46
		T. SALIDA	10:34:10	10:35:16								10:55:14
11:38	CE4-324	T. PASO	11:58:07	11:59:38								12:19:00
		T. LLEGADA	11:57:08	11:58:49	CE4-324	0:00:00	0:00:00	0:00:00	17 12:19:47	09/2017 12:55:57		
		PUNTUALIDAD	-00:00:59	-00:00:49								
		T. SALIDA	11:57:37	11:59:29								
12:59	CE4-324	T. PASO	13:19:40	13:21:09								13:38:00
		T. LLEGADA	13:22:13	13:24:05	CE4-324	0:00:00	0:00:00	0:00:00	17 13:43:57	09/2017 14:18:36		13:43:45
		PUNTUALIDAD	0:02:33	0:02:56								0:05:57
		T. SALIDA	13:22:45	13:24:40								13:43:57
14:17	CE4-324	T. PASO	14:37:24	14:38:58								14:59:00
		T. LLEGADA	14:41:08	14:42:56	CE4-324	0:00:00	0:00:00	0:00:00	17 15:01:25	09/2017 15:44:53		15:01:13
		PUNTUALIDAD	0:03:44	0:03:58								0:02:25

Figura IV.7. Detalles del viaje en columnas relacionadas a estaciones en estados de cumplimiento para la Línea 6 del Metrobús.

Otro paso importante para la elaboración del conjunto de datos preprocesados fue remover registros que contenían tiempos incorrectos para estaciones consecutivas, es decir el tiempo de llegada a la estación destino era menor al tiempo de salida de la estación origen. Para lograr esto se creó un algoritmo que validaba que hubiera información de tipo tiempo (hh:mm:ss) en dos estaciones contiguas, de obtener éxito comparaba el tiempo de salida de la estación origen con el tiempo de llegada a la estación destino, si el tiempo de llegada era menor al tiempo de salida, entonces removía todo el registro del viaje. Finalmente, dicho algoritmo generaba un nuevo archivo de salida en formato xlsx sin los registros incorrectos, esto para llevar un control de cambios adecuado sobre el conjunto de datos preprocesados. En la Figura IV.8 se muestra un resumen de los registros eliminados por el algoritmo antes mencionado. Para los 33 días de información, se eliminaron 5,178 viajes, en promedio 157 viajes por día. Lo cual nos habla de una gran falta de precisión en la generación de la información.

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

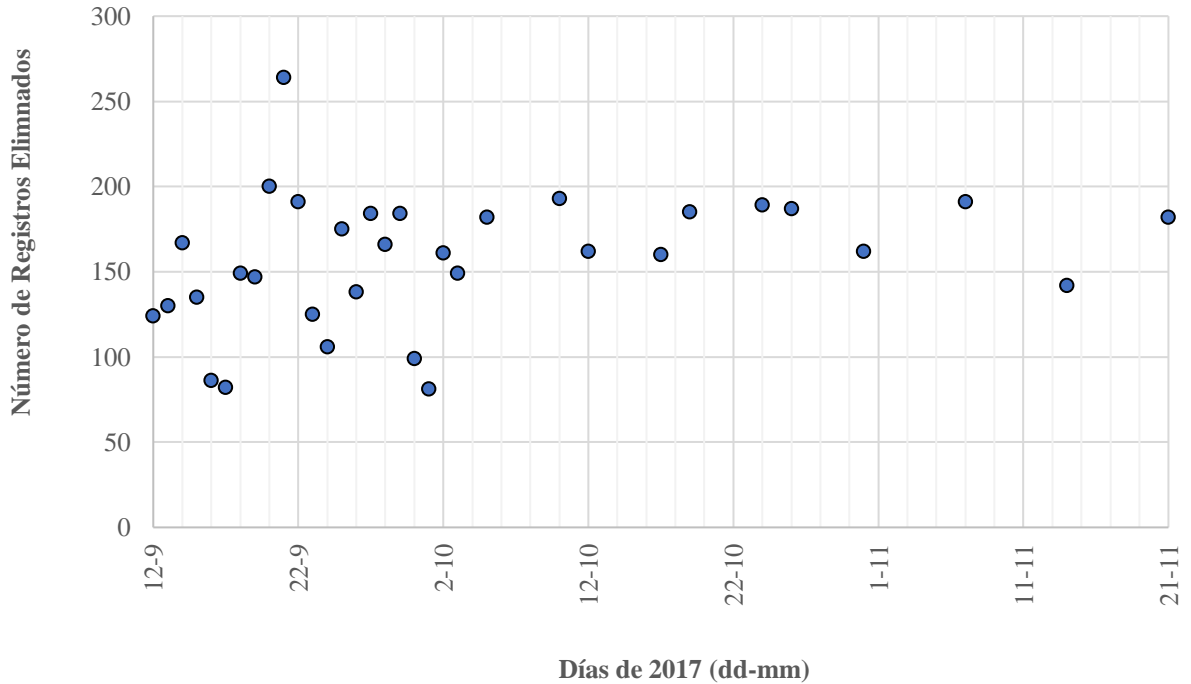


Figura IV.8. Número de registros eliminados por falta de precisión en todas las líneas por día.

En resumen, para la generación del conjunto de datos preprocesados se adoptó un marco de referencia para medir la calidad a través de 8 dimensiones, se evaluaron dichas dimensiones y se concluyó que los datos no tenían la calidad adecuada, pero que sí se podrían realizar análisis para encontrar conocimiento. Posteriormente, se definió un formato único para todos los estados de cumplimiento y por medio de algoritmos se limpiaron los mismos removiendo registros incorrectos y verificando que el tipo de datos fuera nulo o tiempo <hh:mm:ss>.

5.1.2.4 Aplicación de transformaciones

No se consideró pertinente el aplicar ninguna transformación al conjunto de datos preprocesados, por lo que se realizó la minería de datos sobre el mismo. Para los diferentes análisis mencionados en el siguiente punto si se realizaron transformaciones, que se detallaran en cada uno

5.1.2.5 Minería de datos y patrones de interés

Por la falta de calidad de datos se definió que para analizar el comportamiento global de la red entera o de alguna línea en particular se emplearía otro tipo de análisis, pero para analizar patrones a una escala puntual o segregada (estaciones) el llevar a cabo diferentes análisis de datos podría ser de gran ayuda.

Se definieron tres formas distintas de visualizar el comportamiento de los autobuses dentro de la red. Uno, el diagrama espacio tiempo para entender cómo se mueven los autobuses a lo largo de sus respectivas rutas; dos, una serie de tiempo e histograma del tiempo de espera por estación, esto permite visualizar el tiempo de espera no al nivel ruta sino Línea; tres, grafica de barras en tres dimensiones del tiempo de espera máximo registrado por día y por estación. Los tres serán detallados a continuación.

5.1.2.5.1 Diagrama espacio tiempo

El diagrama espacio tiempo estudia cómo se mueven los vehículos en el tiempo a lo largo de una ruta establecida, generalmente en el eje de las abscisas se grafica la distancia o las estaciones de la ruta en estudio, mientras que en el eje de las ordenadas se grafica el tiempo. De seguir esta recomendación, por una parte, al fijar un punto sobre el eje horizontal (estación) se identifica el tiempo de espera, que representa cuanto tiempo transcurre entre el paso de dos autobuses; por otra parte, si se fija un punto sobre el eje vertical (tiempo) se identifica la separación entre los vehículos para ese instante. Además, el inverso de la pendiente de la trayectoria es la velocidad del vehículo y por medio de los cambios en la pendiente se puede identificar la aceleración [61]. El uso de estos diagramas comenzó en la década de los cincuenta cuando comenzaron a surgir los sistemas de transporte masivo. En ese entonces el problema de los diagramas era la obtención de los datos, sin embargo, ahora la obtención de los datos es automática y abundante, por lo que los diagramas espacio tiempo tienen cada vez más relevancia [61]. La Figura IV.9 muestra el diagrama espacio tiempo propuesto por Anwar et al.

Para los diagramas espacio tiempo elaborados se decidió despreocuparse de la distancia entre estaciones, pues al tratarse de un sistema BRT la mayoría son equidistantes (aproximadamente 1 kilómetro [19]). Además, las variables de interés tienen que estar relacionadas con el tiempo, pues se busca conocer el impacto en el tiempo que el sismo tuvo sobre la red, por lo que los diagramas espacio

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

tiempo elaborados para estudiar el impacto del sismo del 19 de septiembre de 2017 sobre la red del Metrobús, serán como el que se muestra en la Figura IV.10.

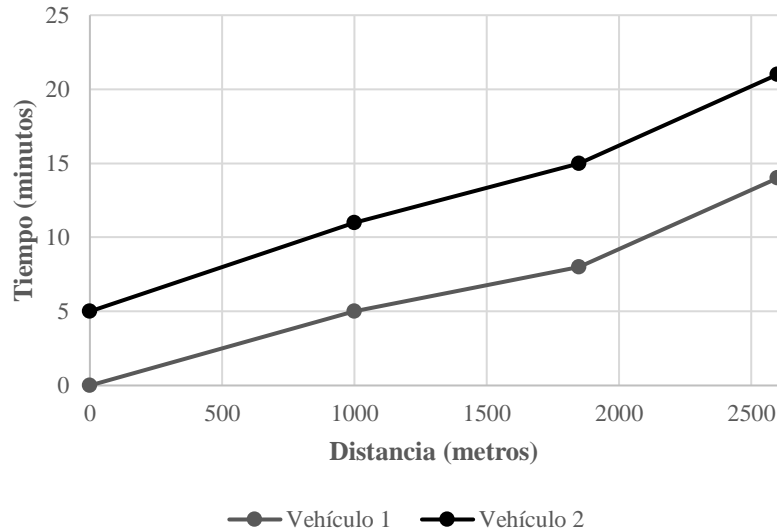


Figura IV.9. Diagrama espacio tiempo, se observa el tiempo en el eje vertical y la distancia en el eje horizontal, cada punto es una lectura en un punto establecido, generalmente para un sistema BRT son las estaciones [61]. De estudiar las pendientes se puede encontrar la velocidad del vehículo.

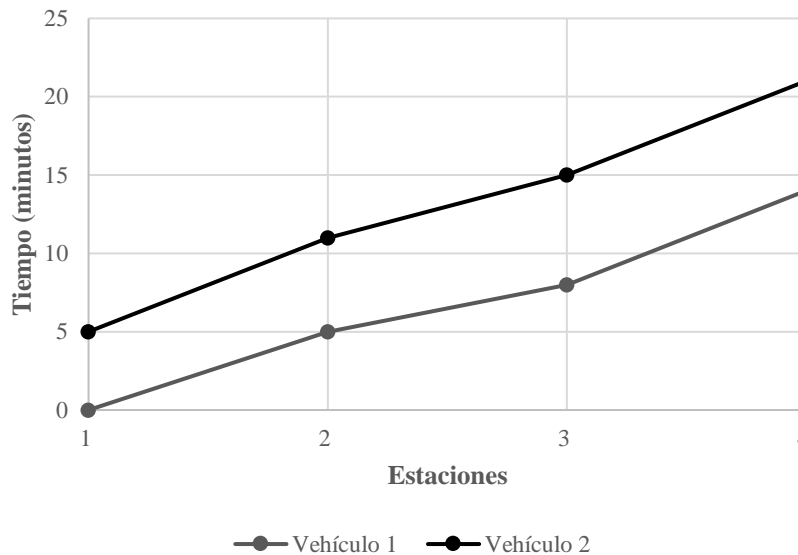


Figura IV.10. Diagrama espacio tiempo adoptado para estudiar el impacto del sismo del 19 de septiembre de 2017 sobre la dinámica del Metrobús. En el eje horizontal se desprecia la distancia entre las estaciones y se consideran las estaciones mismas. De estudiar las pendientes no se podría encontrar la velocidad del vehículo.

Los diagramas espacio tiempo fueron generados por día y por ruta, pues no todas las estaciones de una línea comparten las mismas rutas. Partiendo del conjunto de datos preprocesados se realizaron tres nuevas modificaciones. La primera, fue eliminar las filas sobrantes, pues por ahora solo había interés en los tiempos de llegada, por lo que el tiempo de paso, el tiempo de salida y la puntualidad fueron eliminados, esto hizo que por un viaje hubiera sólo una fila. La segunda modificación una conversión de tipo de dato, en vez de tener los tiempos de llegada en formato tiempo (hh:mm:ss) se convirtieron a segundos, con la siguiente lógica, las 00:00:00 de un día representan al segundo 0 y las 23:59:59 representan al segundo 86,399. La tercera y última modificación, fue eliminar aquellos registros que excedían las 23:59:59 horas, pues no se contaba con un formato que incluyera información del día (ejemplo: dd hh:mm:ss), además las actividades de la red, pasada la media noche, no tienen ninguna relevancia para este estudio.

Sobre este conjunto de datos modificados se ejecutaba un algoritmo que trazaba las trayectorias de todos los viajes en un día para una ruta en un gráfico de dos dimensiones, con el tiempo en el eje vertical y las estaciones en el eje horizontal. Estos diagramas se encuentran en la sección *6.1 Resultados puntuales de la minería de datos* de este documento.

5.1.2.5.2 Serie de tiempo de espera e histograma

Aunque se sabe que los tiempos de espera por estación se pueden obtener del diagrama espacio tiempo [61], se decidió elaborar un gráfico que permitiera visualizarlos de mejor forma, ya que por la gran cantidad de viajes, el visualizar los tiempos de espera desde el diagrama espacio tiempo era prácticamente imposible. Además, otra ventaja de crear un gráfico independiente para visualizar los tiempos de espera es que se podrían incluir todas las rutas, por lo que se escalaría en un nivel el análisis, en vez de tener resultados válidos para una ruta, se obtendrían resultados válidos para una línea completa. Por último, se asume que durante una emergencia los usuarios de un sistema de transporte público buscan trasladarse de forma inmediata, por lo que la relevancia de qué ruta usar o esperar quedaría en segundo plano.

El tiempo de espera, es el tiempo que transcurre entre que dos vehículos, en este caso autobuses, pasan por un mismo punto. Este es uno de los procesos más importantes del transporte público, pues ante una demanda no constante, los operadores tratan de planear acorde para brindar un mismo nivel de servicio. En inglés se le conoce al tiempo de espera como headway. El tiempo

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

de espera es una característica muy importante de cualquier sistema de transporte público, pues depende de los procesos fundamentales del transporte público, como el traslado del vehículo, el abordaje y descenso de los usuarios y la demanda dinámica de los mismos. Por todos estos factores, es muy difícil mantener los tiempos de espera uniformes a lo largo del tiempo [62].

Por lo antes mencionado se entiende que los tiempos de espera son un indicador muy representativo de un sistema de transporte público, por lo que se estudiará para cuantificar el impacto del sismo del 19 de septiembre en la red, ya que se cree que habrán mayores tiempos de espera a lo largo de toda la red y mayores aún en las estaciones más cercanas a las zonas de daño estructural.

Se decidió elaborar dos gráficos para estudiar el tiempo de espera en una estación. El primero, una serie de tiempo en la que en el eje horizontal se encuentran las horas del día y en el eje vertical el tiempo de espera. Además, como se tienen datos estimados y datos registrados, se pueden comparar, para ver qué tan preciso es el Metrobús, se puede observar el formato de dicho gráfico en la Figura IV.11.

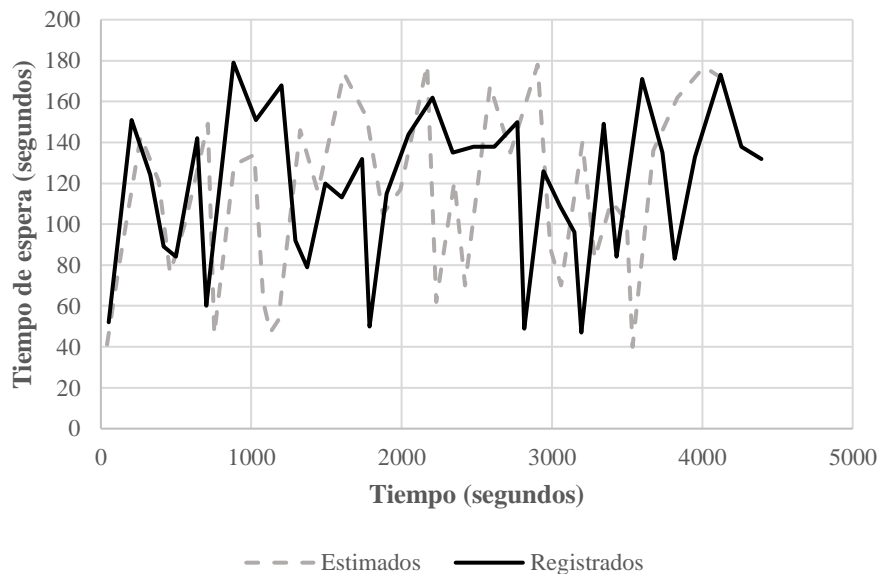


Figura IV.11. Serie de tiempo del tiempo de espera. Se observa la variación del tiempo de espera a lo largo de un día para una estación para todas las rutas de una línea, así como también los datos estimados que el órgano operador del Metrobús había contemplado para dicho día y estación.

El segundo gráfico es un histograma de los tiempos de espera registrados, en donde en el eje horizontal se encuentra el tiempo de espera en segundos y en el eje vertical el número de registros o el número de autobuses que pasaron en una estación en un día. Se puede observar un histograma tipo en la

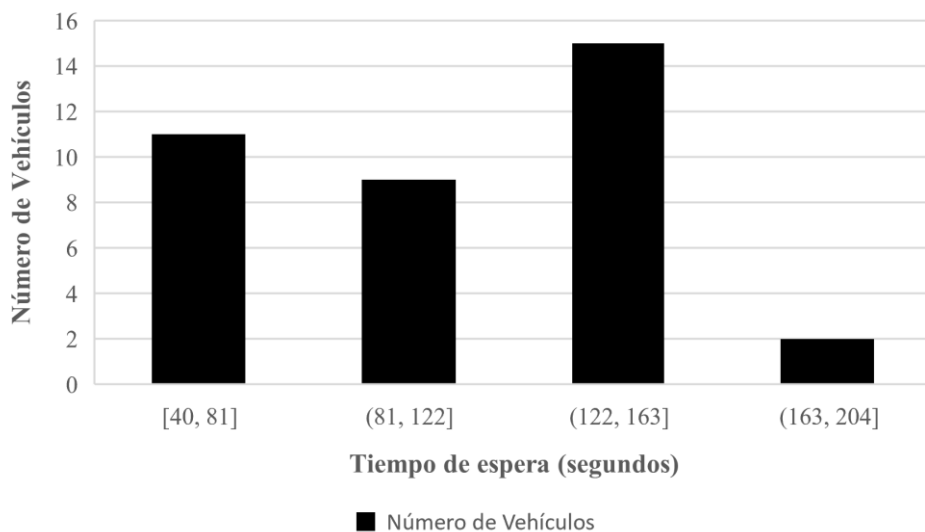


Figura IV.12. Histograma de los tiempos de espera registrados en un día para una estación.

Como las series de tiempo del headway o tiempo de espera se elaboraron no por ruta sino por línea del Metrobús, se tuvieron que hacer modificaciones al conjunto de datos preprocesados. Para recapitular, se tiene un libro de Excel por línea de Metrobús por día, dicho libro contiene diferentes hojas, una por cada ruta, por lo que si se desea hacer un análisis a nivel de línea se deben de combinar las hojas. Las no todas las hojas tienen las mismas estaciones, pues esa es la particularidad de las rutas. Para satisfacer la necesidad de unir las hojas por lo que se decidió llevar a cabo una unión de tipo *full outer join* solo sobre los tiempos de llegada registrados y estimados, la cual se ilustra en la Figura IV.13 [63], este tipo de unión permite traer toda la información de todas las hojas sin pérdida alguna. Por lo que, ahora el conjunto de datos ya contiene todas las estaciones de la línea en estudio, sin embargo, no todas las estaciones tienen el mismo número de registros, esto se debe a que no todas las rutas tienen el mismo número de viajes y a los registros eliminados en el preprocesamiento. Posteriormente, se ordenaron los datos de menor a mayor por estación, esto para integrar los datos de las diferentes rutas, por último, se restaron consecutivamente los tiempos de llegada por columna para obtener los

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

tiempos de espera. Este proceso se realizó dos veces, para los datos registrados y los datos estimados.

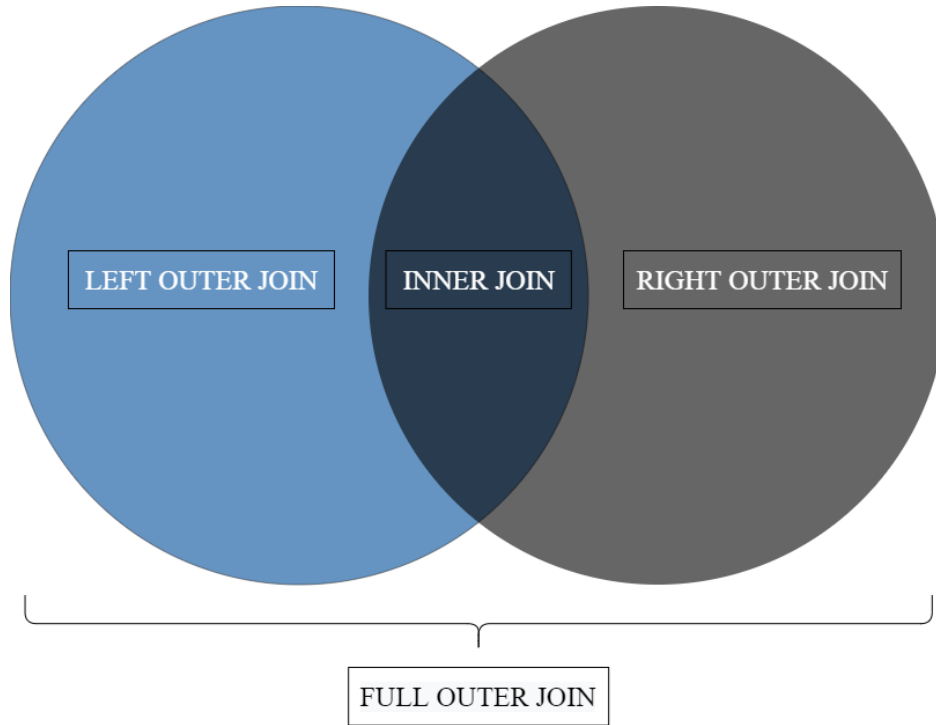


Figura IV.13. Tipos de uniones (JOINS) en SQL [63].

5.1.2.5.3 Gráfica de barras en tres dimensiones para los tiempos de espera máximos

Por último, se decidió realizar un tercer gráfico, también para el tiempo de espera esta vez cambiando la granularidad. La idea principal era poder apreciar el tiempo de espera a lo largo de los diferentes días, así como estaciones. Dado que se contemplaban tres variables se decidió elaborar un gráfico tridimensional. Para lograr este tipo de gráfico en tres dimensiones era necesario agrupar la serie de tiempo del headway o tiempo de espera, pues tenía que ser representada por un solo valor. Para dicha agrupación se propusieron los siguientes criterios:

- Seleccionar el tiempo de espera máximo por día por estación
- Calcular el promedio del tiempo de espera por día por estación

Después de ejecutar los análisis y comparar los gráficos tridimensionales, se concluyó que seleccionar el tiempo de espera máximo era lo más adecuado y gráfico, para cuantificar la respuesta del sismo del 19 de septiembre de 2017. El espacio geométrico de dicho gráfico lo representa la Figura IV.14.



Figura IV.14. Espacio geométrico para la gráfica de barras en tres dimensiones para los tiempos de espera máximos. Al agrupar el tiempo de espera, se cambia la granularidad y se puede obtener información para todas las rutas, para todos los días y para todas las estaciones en un mismo gráfico.

Para la elaboración de este tercer gráfico se partió del conjunto de datos que se ocupó para la serie de tiempo de los tiempos de espera y sobre esa se aplicó el criterio de agrupación, al iterar este proceso se formó un nuevo set de datos que contenía el tiempo de espera máximo por estación por día. La estructura de este nuevo subconjunto de datos con cambio de dimensionalidad es la que se muestra en la Figura IV.15. Sobre este subconjunto de datos se ejecutó el algoritmo que genera el gráfico de tres dimensiones.

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

		VERDE	DEP18	EUZKA	POTRE	RAZA1	CIRC1	SIMON	MGLEZ	BVIS1	CHOPO	REVOL	REP1	REFOR	HAMBU
12-09	max	1107	1004	1022	1018	1062	1092	725	699	800	592	615	597	595	728
13-09	max	3816	3286	3287	2459	3277	1176	1173	961	963	951	3963	2435	3241	3293
14-09	max	1989	1973	1965	1522	1954	1942	1548	1558	1554	1497	1538	1554	1587	1593
15-09	max	2229	1948	1715	1705	1695	2105	2105	2101	1683	1683	1655	1673	1681	1699
16-09	max	5398	4869	4867	4856	6097	6078	6068	6056	7610	6785	6703	6810	6797	9346
17-09	max	2413	2286	2277	2436	2414	2217	2209	3483	2964	2912	2826	2811	2792	3391
18-09	max	1400	1108	1109	775	775	673	672	712	616	566	586	579	536	608
19-09	max	11861	11205	11216	9460	9461	9457	9453	9366	9176	9091	9089	4663	6840	6403
20-09	max	5843	3259	3857	4067	2819	2803	2783	2827	2881	2817	2779	2755	2757	2735
21-09	max	3748	3410	3418	3193	4000	4008	4002	2994	2370	2990	2994	2991	2273	3060
22-09	max	2737	2343	2345	2397	2371	2393	2397	2403	2427	2423	2402	2386	2340	2368
23-09	max	1239	1224	1230	1019	950	957	961	979	1033	697	721	704	786	714
24-09	max	1438	1098	1090	1082	1066	1054	1046	1072	955	901	917	933	895	907
25-09	max	1525	1524	1039	1227	1026	1571	1577	1179	1155	1111	906	932	1077	1031
26-09	max	2289	2691	2695	2693	2837	2853	2852	2638	2097	1640	1638	1596	1717	2608
27-09	max	2847	1457	1169	1157	1136	1434	1603	1114	1094	1110	1146	1176	1273	1233
28-09	max	2205	3389	3219	2263	3217	3214	2290	2334	2368	2364	2387	2398	2335	2455
29-09	max	1844	1479	1477	1472	1662	1678	1460	1452	1437	1399	1399	1437	1459	1477
30-09	max	1601	1564	1541	1510	1484	1467	1471	1449	1483	1539	1489	1467	1541	1497

Figura IV.15. Subconjunto de datos con cambio de dimensionalidad para la elaboración de un gráfico en 3D. Una fila por día y una columna por estación. También se observa el criterio de agrupación para el tiempo de espera, en este caso fue el máximo.

5.1.2.6 Interpretación y evaluación

Refiérase el Capítulo V: Resultados.

IV.1.3. Fortalezas y limitaciones

Sin duda, el análisis de datos siguiendo un marco de referencia establecido es de gran utilidad, pues esto permite estandarizar los datos y procesos, para después poder realizar las comparaciones adecuadas. Por la mala calidad de datos, no se puede tener la precisión deseada, pero al analizar los resultados presentados en el capítulo 6 se observan patrones lógicos y coherentes. Además, al analizar la variación por día de los indicadores definidos en este capítulo, se logra observar y cuantificar el impacto del sismo en las diferentes estaciones de la red.

Se considera que se pueden obtener conclusiones importantes después de este ejercicio de minería de datos, sin embargo, se cree que para obtener mayor precisión en los indicadores globales del sistema este análisis no será suficiente. En busca de aumentar la precisión de los resultados se decidió generar un modelo simple de la red del sistema donde se puedan simular los viajes. De esta forma y asumiendo que los datos que ya han sido procesados son verídicos,

pues ya han pasado por varios filtros, se lograrían incorporar aquellos viajes con registros incompletos en este modelo. Lo que permitiría completar la información y refinar los resultados.

A modo de cierre, se considera que realizar un análisis de datos usando un marco de referencia definido es de gran utilidad, pues se puede obtener conocimiento muy valioso. Sin embargo, si los datos a analizar no tienen la calidad adecuada, habrá que hacer esfuerzos adicionales para tratar de llegar a una mejor precisión.

IV.2.MODELO DE TRÁNSITO

IV.2.1. Justificación

Como se mencionó en la sección pasada, en busca de aumentar la precisión de los resultados obtenidos por el análisis de datos, se decidió elaborar un modelo de transporte que incluyera aquellos registros que no tuvieran la información completa para todo el recorrido.

Es importante precisar que este esfuerzo buscó generar información adecuada o coherente para algunos registros eliminados. Es importante precisar que por una parte, había viajes que tenían datos coherentes en la mayor parte de su recorrido, pero en algunos tramos había incoherencias, por lo que en el preprocesado de datos únicamente estos tramos con tiempos incoherentes eran removidos. Por otra parte, habían viajes que tenían muy pocos registros, por lo que estos viajes sí fueron removidos completamente en el preproceso.

Para tratar de completar los tramos incoherentes la primera propuesta fue asumir una cierta velocidad constante y tiempos de espera promedio para así completar la información faltante. Esta propuesta era la más sencilla y lógica, se consideró que sería muy válida si las rutas fueran independientes, pero como múltiples rutas comparten la misma infraestructura y están contenidas en la misma Línea, esta primera propuesta fue desechada.

Al generar un modelo de tránsito se podría vaciar toda la información obtenida y generar la información restante tomando en cuenta la actividad de todas las rutas dentro de la misma Línea, lo cual definitivamente sería una aproximación más real, debido al principio de posición fija de un autobús respecto a los otros autobuses (no rebases por ser un solo carril). Si el autobús A1

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

que tiene información incompleta que va por la Línea X1, ruta Y1, detrás del autobús B1 que va por la misma Línea, X1, pero en la ruta Y2 y con información completa, no podrá rebasarlo por lo que deberá de seguir atrás del autobús B1. Por este particular comportamiento hace mucho sentido completar los datos faltantes por medio de este modelo que toma en cuenta el comportamiento dinámico de toda la línea.

IV.2.2. *Simuladores de tránsito*

Simulaciones en computadoras se pueden implementar para analizar fenómenos que implican la interacción de múltiples agentes. El transporte es considerado uno de estos fenómenos y recientemente investigadores, gobiernos e industrias se han apoyado en simulaciones en computadora para planear y evaluar diferentes estrategias de transporte [64].

Para llevar a cabo estas simulaciones sea genera un mundo sintético en donde se representará el fenómeno a estudiar, analizando las interacciones entre los diferentes agentes. Los agentes son sistemas cerrados que son situados en dicho ambiente sintético y que son capaz de llevar a cabo acciones autónomas con el fin de cumplir con su objetivo previamente configurado. Para el caso del transporte, el mundo sintético, es un espacio finito que contiene la red de infraestructura que permite la movilidad entre los diferentes puntos de la red y los agentes son los vehículos que tendrán características particulares que afectarán la forma en la que cumplirán con su objetivo, que en la mayoría de los casos es simplemente llegar a su destino [64], [65].

Múltiples herramientas se han desarrollado para simular redes de transporte. Una buena forma de clasificarlas es de acuerdo al nivel de detalle que se busca replicar en la simulación. Nguyen et al., 2021 después de un estudio exhaustivo encontraron cuatro niveles de detalle, los cuales se describen a continuación. Es importante tener en mente que entrar en más detalles de los necesarios, hace que el modelo de simulación sea más complejo, tanto en la elaboración, en la obtención de los datos de entrada y en los recursos de cómputo necesarios para ejecutar la simulación.

- Macroscópico
 - Se enfocan en modelar el flujo de tráfico basado en modelos matemáticos de alto nivel. Este tipo de simulación puede utilizarse para el análisis de sistemas de

grandes escalas en los que no se requiere un modelo tan detallado. Por ejemplo, la simulación del tráfico en autopistas. Dado el bajo nivel de detalle, las simulaciones macroscópicas son relativamente rápidas y requieren menos potencia de cómputo.

- Microscópico
 - Las simulaciones microscópicas se enfocan en el modelado de los agentes con un alto nivel de detalle. Este tipo de simulación se utiliza a menudo para el análisis del tráfico urbano. Es posible analizar tanto los aspectos macroscópicos como los microscópicos del sistema. En consecuencia, las simulaciones microscópicas pueden dar lugar a tiempos de cómputo más largos.
- Mesoscópico
 - Son una mezcla de modelos de simulación macroscópicos y microscópicos. Los agentes de tráfico se modelan con un mayor nivel de detalle que en un modelo macroscópico, sin embargo, la interacción y el comportamiento de los individuos son menos detallados que en un modelo microscópico.
- Nanoscópico
 - Son aún más detalladas que los modelos microscópicos. Este tipo de simulación se aplica en el campo de la conducción autónoma, en el que hay que examinar funciones internas de los vehículos como el cambio de velocidad o la visión del vehículo.

Todos los modelos (macroscópicos, microscópicos, mesoscópicos y nanoscópicos) tienen dos elementos fundamentales, la infraestructura y la demanda. Por un lado, la infraestructura son aquellos elementos del mundo real que se replicarán en el mundo sintético, qué y cuántos elementos dependerá el nivel de detalle del modelado. Por el otro lado, la demanda engloba a todos los agentes que interactuarán en el mundo sintético, dependiendo del objetivo del modelado y del nivel de detalle se incluirán más o menos agentes en el modelo. Además, hay diferentes formas de definir la demanda, estas dependerán en mayor medida del software que se esté empleando, por comentar algunos ejemplos, se puede definir a modo de matriz origen-destino, puede generarse con base en variables aleatorias, puede generarse a nivel viaje o a nivel actividad, entre otras [64].

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

Los efectos de las nuevas estrategias en materia de movilidad son difíciles de estimar por adelantado y dependen en gran medida de los múltiples agentes involucrados en el proceso de tránsito. Realizar simulaciones que empleen modelados basados en agentes es muy prometedor, ya que el modelado, se centra en las preferencias y comportamientos autónomos que ejecutan los individuos a lo largo de la simulación.

Otra clasificación para las herramientas actuales de simulación de transporte es considerando si el modelo está o no basado en agentes [64]. Un simulador completamente basado en agentes es aquel en el que los móviles están implementados en su totalidad por agentes de software inteligentes. De este modo, se aprovecha la perspectiva individual en el modelado que conlleva la capacidad de interacción, así como el comportamiento autónomo y orientado a objetivos.

Tabla IV.3. Simuladores de transporte más populares [64].

Totalmente basado en agentes	No basado en agentes
MATSim	TRANSIMS
ITSUMO	SUMO
MovSim	OpenTraffic
MASCAT	CONTRAM
MATISSE	PTV VISSIM
POLARIS	GETRAM/AIMSUN
AgentPolis	PARAMICS
OPUS	MITSIM
MOSAIIC	FreeSim
MARS	TSIS/CORSIM

Dentro de este contexto de los simuladores de transporte, se definió que se elaboraría un modelo con un nivel de detalle mesoscópico, pues los únicos puntos de interés son las estaciones, entre

estación y estación solo se considera un tramo con dos carriles cada uno unidireccional, sin tomar en cuenta la semaforización, esto con afán de simplificar el modelado.

Por otro lado, dado que se tienen los tiempos de llegada y salida definidos, es posible optar por un modelo no basado en agentes, ya que se busca que los vehículos sigan una ruta con tiempos fijos y no que tomen decisiones autónomas.

En consecuencia, se decidió que SUMO, uno de los simuladores más populares, de código abierto, con interfaz gráfico y enfocado en movilidad urbana, sería el adecuado para llevar a cabo el modelado y los análisis posteriores.

Simulación de Movilidad Urbana, (**S**imulation of **U**rban **M**Obility) SUMO es un programa de código abierto para la simulación del tráfico. Su tipo de simulación es microscópico, es decir, cada vehículo se modela explícitamente, tiene su propia ruta y se mueve individualmente por la red. Está desarrollado principalmente por el Instituto de Sistemas de Transporte, ubicado en el Centro Aeroespacial Alemán. Entre otras características, permite la existencia de diferentes tipos de vehículos, caminos con varios carriles, semáforos, interfaz gráfica para ver la red y las entidades que se están simulando, e interoperabilidad con otras aplicaciones en tiempo de ejecución a través de una API llamada TraCI. En lo general, se considera que esta herramienta tiene un mejor desempeño comparándolo con otros simuladores lo que lo convierte en uno de los más populares. Adicionalmente, se puede desprejar la interfaz gráfica, permitiendo que la simulación se acelere [66].

Aunque SUMO es un gran simulador para enfoques microscópicos, por las varias suposiciones que se adoptaron no se considera que el modelo a realizar tenga un detalle microscópico. Dichas suposiciones serán detalladas en la siguiente sección y es importante aclarar que se todas las suposiciones que se consideraron fueron en afán de simplificar la modelación, sobre todo por la obtención de datos de entrada, ya que en la mayoría de las ocasiones es necesario recolectarlos en sitio y dichos esfuerzos quedaban fuera del alcance de este trabajo de investigación.

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

IV.2.3. Descripción de la modelación.

Como se mencionó en la sección anterior, todos los modelos de tráfico cuentan con dos componentes principales, la infraestructura o red y la demanda, SUMO no es la excepción a la regla por lo que se tuvieron que generar ambas entradas [64].

Para la infraestructura se consideró que el BRT podría modelarse como un sistema aislado, lo cual es falso, porque tiene alguna interacción con los carriles para autos y por su puesto con la semaforización. Sin embargo, para el alcance de este trabajo que busca cuantificar el impacto de un evento extraordinario de gran escala como lo es un sismo, se cree que es adecuado considerarlo como un sistema aislado, pues al final la interacción con el entorno urbano, en general, se verá reflejada en los tiempos de salida para cada autobús y estación que se tienen para la mayoría de los casos.

Partiendo de estos supuestos, se puede ignorar la semaforización, pues los autobuses se pararán en cada estación hasta que llegue su hora de salida. Además, como en la gran mayoría de la red el Metrobús cuenta con un carril confinado, solo se modelará este y obviamente no se considerará el tránsito de autos particulares, pues estos no tienen permitido ingresar a estos carriles.

Se obtuvo la ubicación geoespacial de todas las estaciones del Metrobús [21], estas se ingresaron manualmente a una herramienta llamada NETEDIT, que es parte de SUMO. Dicha herramienta ayuda a generar el código que define la red para la simulación en SUMO, por medio de una interfaz gráfica. El resultado de este proceso se puede ver en la Figura IV.16.

Posteriormente, en la misma interfaz gráfica NETEDIT, se trazan las conexiones entre nodos, a estas SUMO las identifica como "EDGE". Se asumió para la mayoría de las conexiones que se podían trazar como una línea recta entre los dos nodos, esto para la mayoría de las estaciones es válido, sin embargo, hay casos particulares en los que esta suposición no es válida, por lo que se usaron nodos auxiliares para replicar las condiciones reales de la red. Una vez trazadas las conexiones, se definen el número de carriles, así como las propiedades de cada carril. El detalle que se puede alcanzar en las propiedades de cada carril es impresionante, pero en este modelo, sólo se contempló un carril por conexión entre nodos. Es importante resaltar que entre los nodos

hay dos conexiones, una para el viaje de ida y otra para el de vuelta. Los carriles se definieron como unidireccionales, esto se observa en la Figura IV.17.

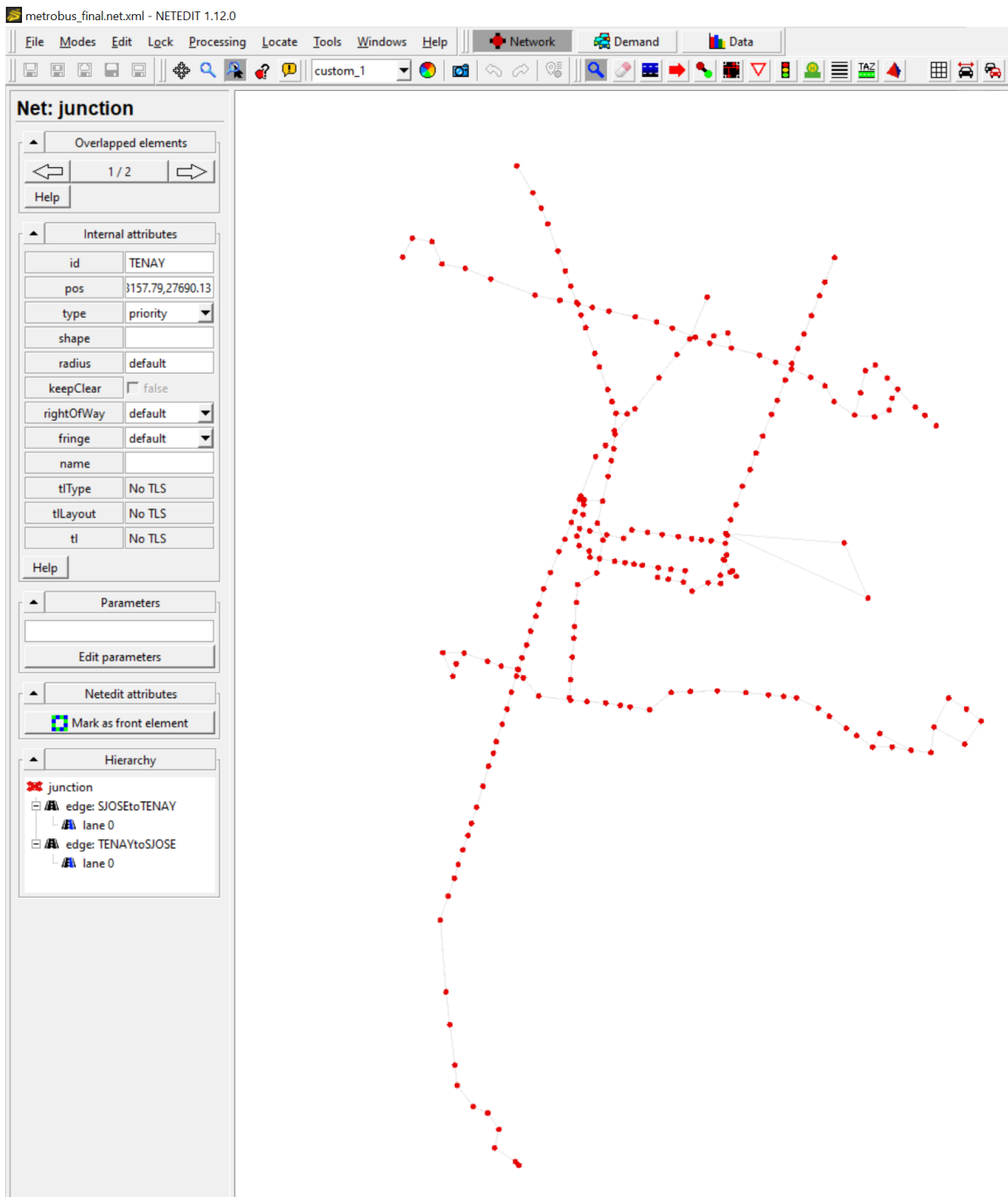


Figura IV.16. Nodos en NETLOGO que representan las estaciones del Metrobús [21], [66]

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

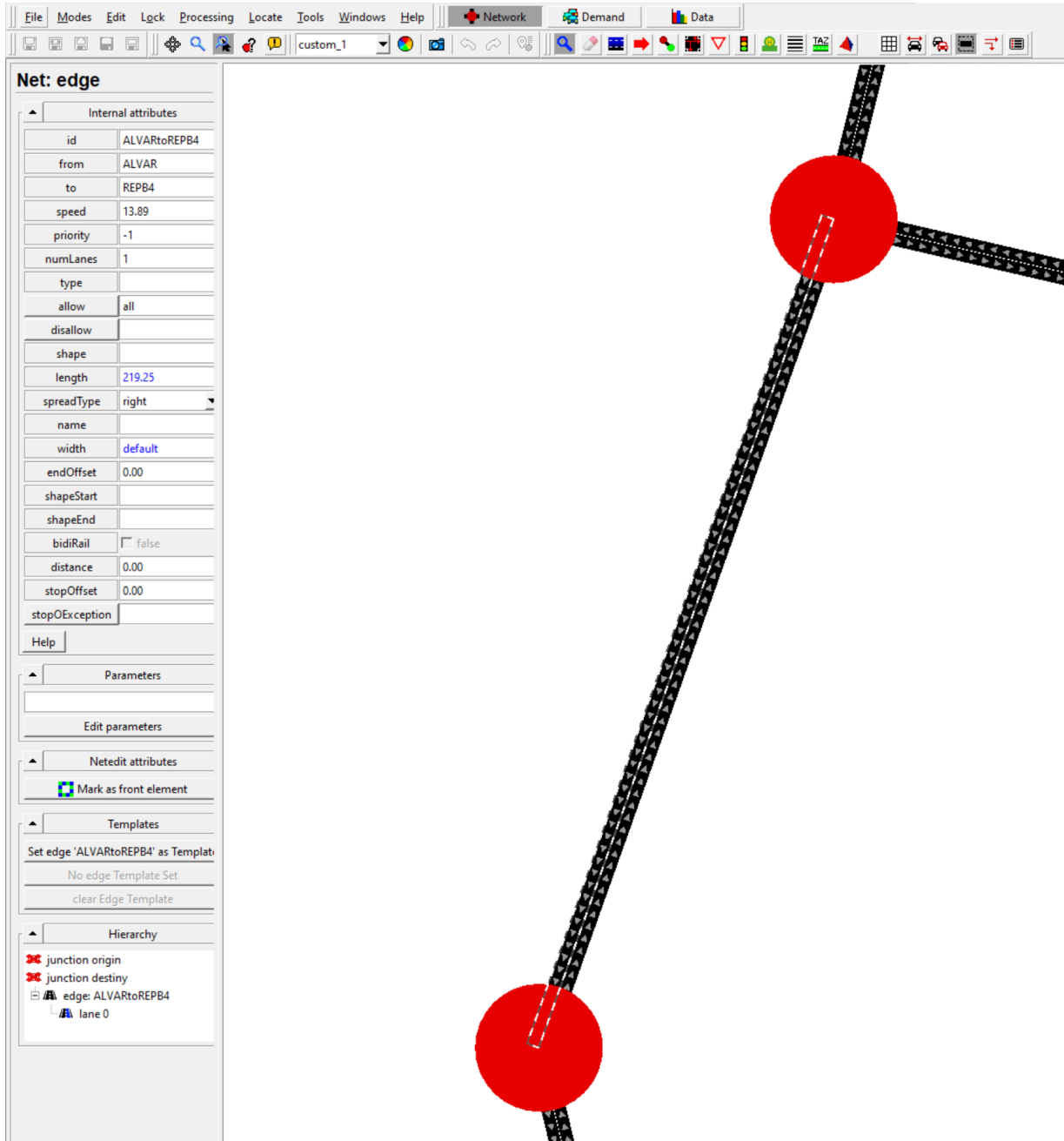


Figura IV.17. Conexiones entre nodos en NETLOGO. Se observa que hay dos conexiones o “Edges” entre los nodos. Cada “edge” contiene un únicamente un carril el cual es unidireccional, se puede observar el sentido de los mismos con las flechas. Estos carriles representan el carril confinado del Metrobús [21], [66].

Al definir los nodos y las conexiones (carriles) la infraestructura del modelo está casi lista, solo hace falta añadir las estaciones. En una primera versión del modelo se pensó que se podía configurar un viaje que hiciera paradas en los nodos, sin embargo, esta funcionalidad no está habilitada, por lo que se tuvo que añadir un tercer elemento al modelo, las paradas de autobuses.

En estos nuevos elementos sí se puede configurar a qué hora debe de salir el autobús X de la estación/parada Y. Dichas paradas se pueden observar en la Figura IV.18.

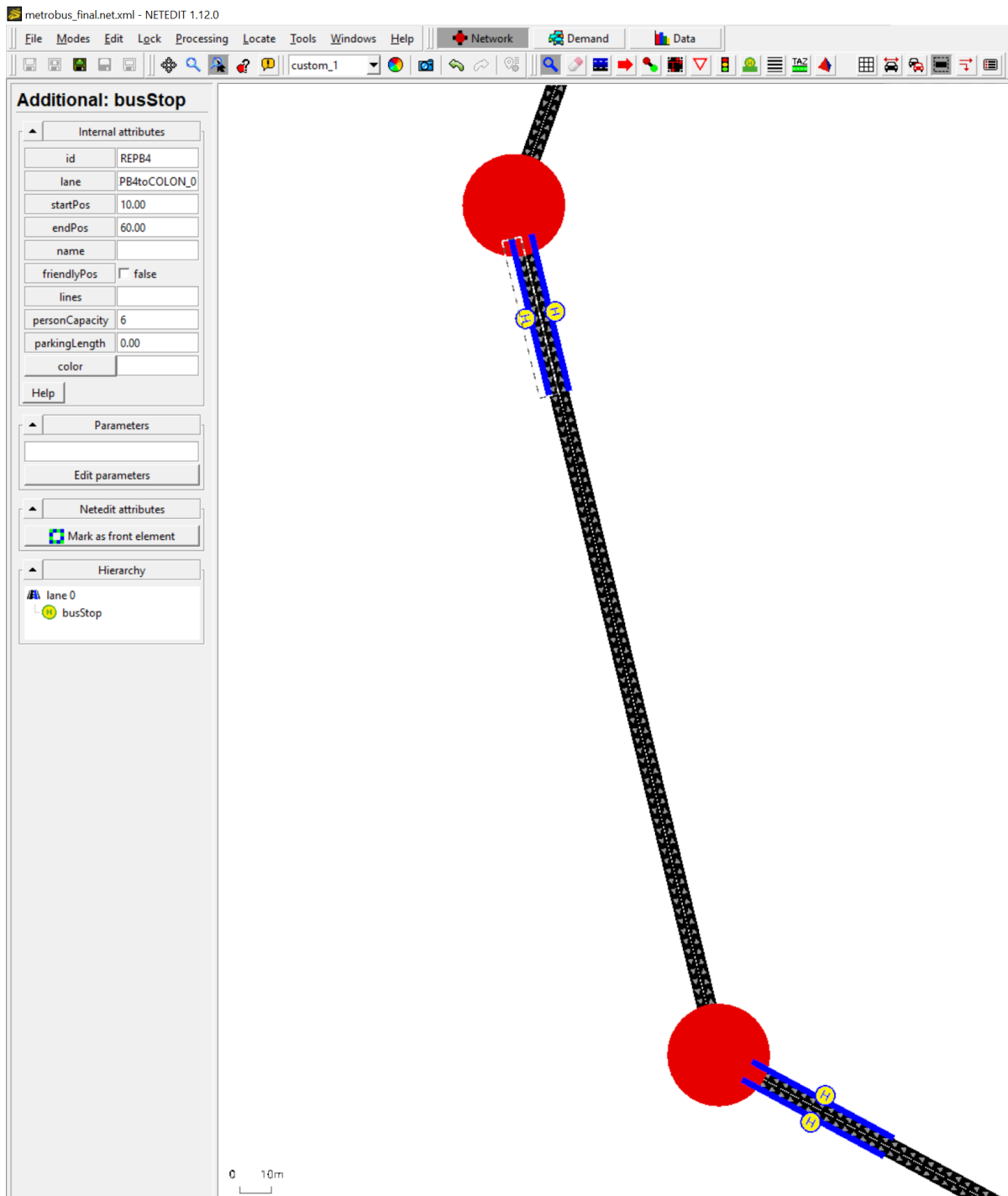


Figura IV.18. Paradas de autobuses en el modelo de NETLOGO [66].

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

Con estos tres elementos, nodos, conexiones y paradas de autobús, se completó el componente de infraestructura del modelo. Como se observó en la descripción de estos pasos, se buscó en todo momento mantener el modelo lo más simple posible, sin perder mucha semejanza con el sistema real. Es importante no perder de vista que el producto final a obtener de NETLOGO es un archivo xml con terminación .net. También se debe aclarar que las paradas de autobús no se escriben dentro del archivo .net, se crea un archivo adicional con el detalle de todas las estaciones, el cual tiene una terminación .add, esto es importante, porque al momento de ejecutar la simulación habrá que hacer referencia por aparte a ambos archivos, la red (.net) y las paradas (.add). El resultado de cargar los archivos para la red y las paradas de autobús se muestra en la Figura IV.19.

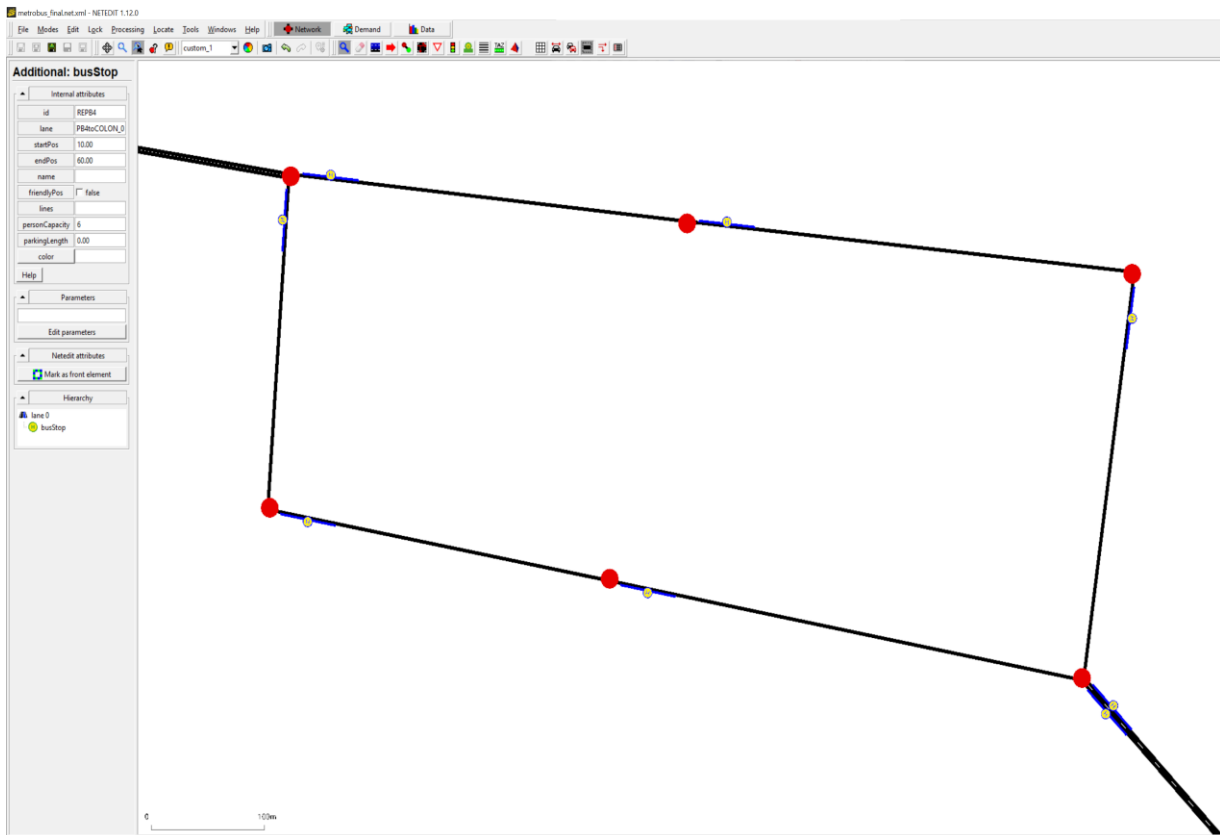


Figura IV.19. Infraestructura del modelo sobre la cual se ejecutará la simulación de tráfico. Se pueden observar los nodos, los cuales representan las estaciones del Metrobús. A su vez, se observan los carriles confinados. Por último, se observan en azul paradas de autobús que generalmente están muy cerca de los nodos y se necesitan en el modelo para detener a los vehículos.

Con la infraestructura lista se procedió a modelar la demanda. Esta parte de la simulación fue la más compleja, pues se generó un recorrido único para cada autobús, esto porque cada autobús

tenía un tiempo de partida diferente para cada estación. Sin embargo, es importante mencionar que el generar los recorridos es la parte final de la demanda. Antes hay que definir las rutas por las cuales los autobuses circularán en la red y el tipo de autobús. La herramienta NETEDIT también se puede utilizar para generar la demanda, sin embargo, para las particularidades de esta simulación las herramientas que ofrece NETEDIT no eran de utilidad.

El primer elemento de la demanda que se modeló fueron las rutas, éstas si se realizaron en NETEDIT, pues basta con dos clicks, uno en el tramo del origen y otro en el tramo destino y se genera la ruta. Es importante mencionar que se generaron múltiples rutas por línea tal como lo muestra la Tabla IV.4. En total se generaron 33 rutas, para mayor detalle en la temporalidad de las rutas refiérase a los anexos.

Tabla IV.4. Número de rutas por Línea en los 33 días de información solicitados [21].

L1		L2		L3		L4		L5		L6	
Rutas	Conteos	Rutas	Conteos	Rutas	Conteos	Rutas	Conteos	Rutas	Conteos	Rutas	Conteos
A1	33	C1	33	D1	33	E1	33	F1	33	G1	33
A2	29	C2	30	D2	33	E2	33			G2	29
A3	33	C3	32	D3	33	E3	33			G3	27
A4	3	C4	20	D4	26						
A5	12	C6	1	D7	3						
A6	2	C14	7	D1C	18						
A7	33	C15	7								
A11	30	C18	11								
A12	31	C1b	11								
		C2b	11								
		C3b	11								

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

En la Figura IV.20 y Figura IV.21 se muestran las rutas trazadas en NETLOGO. Dado que la mayor parte de los tramos de las distintas rutas se traslapa es imposible notar a simple vista en la Figura IV.20 que hay múltiples rutas sobre la misma Línea, sin embargo, en la Figura IV.21 si es posible visualizar que una ruta que va por la Línea 2 (Morada), al llegar a la Línea 1 (Amarilla) gira y sigue el recorrido de la Línea 1.

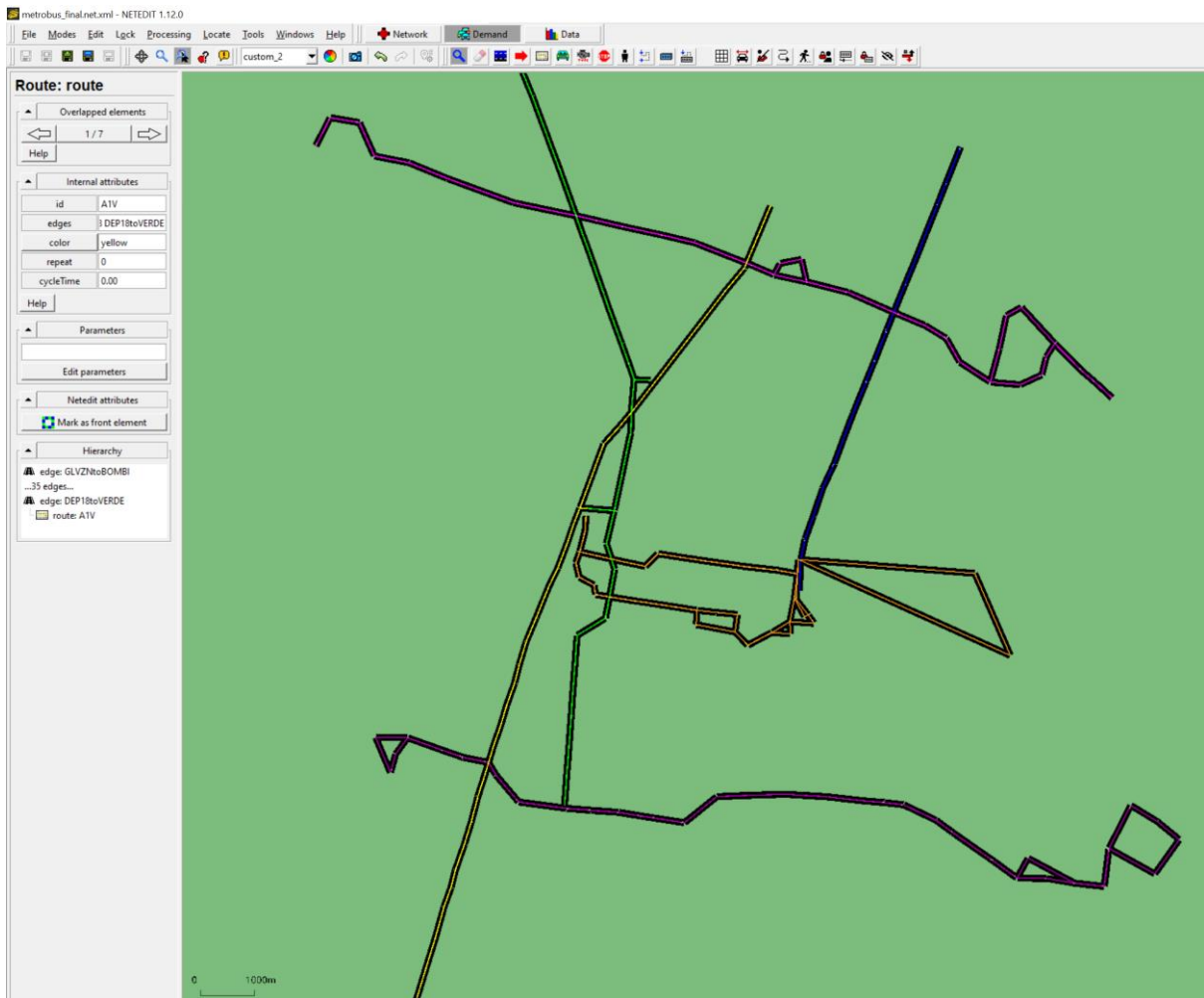


Figura IV.20. Rutas trazadas sobre la red en NETEDIT. Las 33 rutas fueron añadidas, solo que dado que están sobrepuestas no se pueden visualizar todas [21], [66].

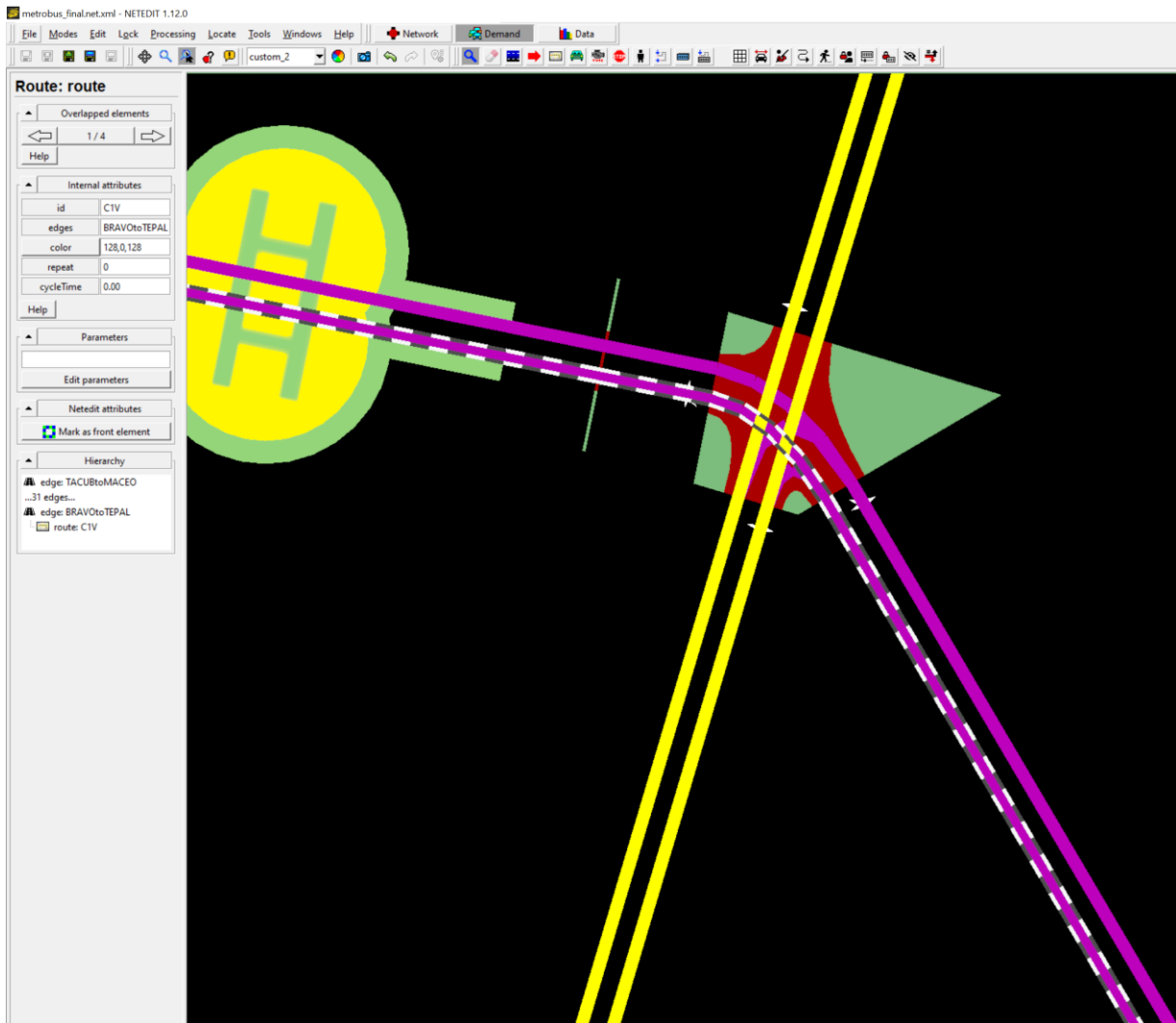


Figura IV.21. Detalle en la interacción de rutas y Líneas en NETEDIT. Se puede apreciar en la figura que una ruta morada se integra hacia Línea amarilla. En el Metrobús, la mayoría de las rutas están contenidas en una sola Línea, sin embargo, los pocos casos que no, fueron considerados en el modelado [21], [66].

Una vez que las rutas fueron modeladas, se definieron los tipos de autobuses. La flota del Metrobús se especificó en el Capítulo 2, sin embargo de los 5 diferentes tipos de vehículos que tienen (articulado, biarticulado, 12 metros, Doble Piso, 100% eléctrico) se despreciaron 2, el Autobús doble piso EURO VI y el 100% eléctrico, pues este tipo de vehículos no existían en la red en 2017 [21].

De la misma forma que para la red, SUMO al ser un simulador de tránsito microscópico, permite detallar mucho el tipo de vehículos, ya que hay múltiples parámetros para caracterizar los

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

distintos tipos de vehículos. Sin embargo, por el enfoque de esta simulación dichos parámetros no tienen tanta relevancia pues los autobuses se estarán deteniendo hasta que su tiempo de salida llegue. Por esto, para la mayoría de los parámetros se mantuvo el valor indicado por default, menos para el de la velocidad promedio y la longitud del vehículo. Por un lado, se aumentó la velocidad máxima, se consideró una velocidad de 11.11 metros por segundo lo cual es equivalente a 40 kilómetros por hora, velocidad que el Metrobús define como la máxima permitida [21]. Por otro lado, se asignó la longitud adecuada para cada uno de los tres tipos de autobuses a modelar, 18 metros para los autobuses articulados, 24 metros para los biarticulados y 12 metros para el autobús 12 metros [21].

Con los autobuses y rutas modeladas se procedió a generar los viajes de los autobuses, pero antes de esto se generó un archivo con terminación ‘.rou’ con la información de las rutas y los autobuses, pues estos datos son válidos para todas las simulaciones que se generarán (una simulación por cada día de información).

El paso final para completar la demanda es generar los viajes y por el enfoque de esta simulación no era eficiente generar dichos viajes en la herramienta NETEDIT dado que se iban a generar viajes únicos para cada autobús.

Se analizó el código en xml que genera la herramienta NETEDIT para autobuses con paradas en estaciones de autobús y posteriormente se decidió que lo más óptimo era generar esos códigos xml directamente. Por lo que se desarrollaron aplicaciones (scripts) en Python para convertir la información que se tenía en Excel a un formato xml.

La Figura IV.22 ilustra la arquitectura que se llevó a cabo para la elaboración de las diferentes entradas del modelo de simulación de tránsito. Como se observa en la misma, las entradas están divididas en “Infraestructura” y “Demanda” las dos entradas fundamentales para cualquier modelo de simulación de tránsito [64]. Por un lado, la infraestructura está dividida en “nodos y calles” y “estaciones” los cuales se modelaron en su totalidad con la herramienta NETEDIT. Por otro lado, la demanda está dividida en “Rutas y Autobuses” y “Viajes” En todos los casos el resultado final es un archivo xml que consumirá SUMO posteriormente para llevar a cabo la simulación.

Es importante recalcar que, de los cuatro insumos al modelo, sólo la demanda es temporal. Por lo que será la única que varíe cuando ejecuten simulaciones para diferentes días.

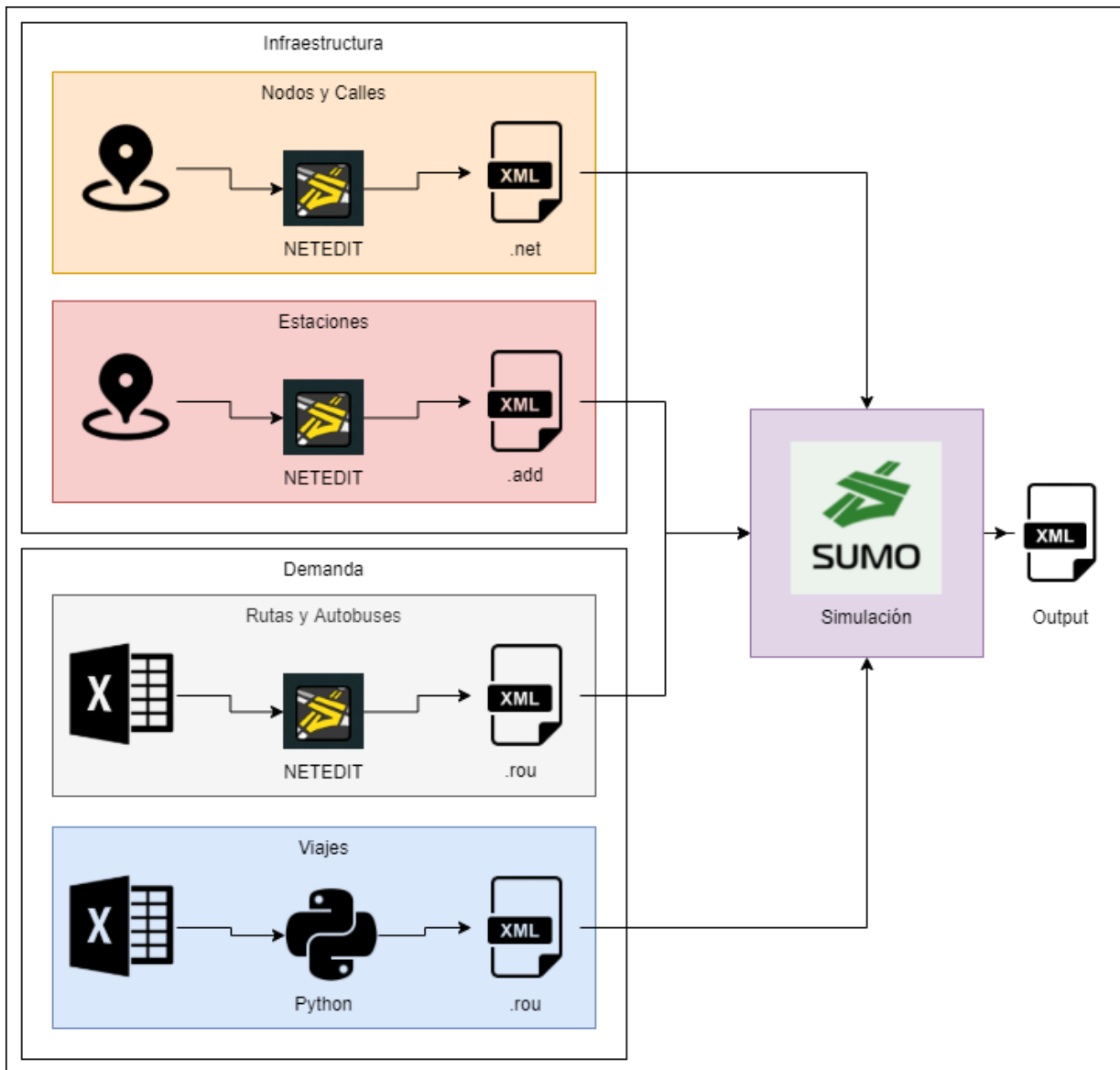


Figura IV.22. Arquitectura empleada para llevar a cabo las simulaciones en SUMO.

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

IV.2.4. *Fortalezas y limitaciones*

Se considera que el modelo construido sobre los datos procesados es de mucha utilidad, pues permite estudiar el comportamiento del sistema de una forma más integra al analizar el comportamiento de las rutas en conjunto y no por separado. Sin duda, el primero limpiar y procesar los datos fue de mucha ayuda, por ejemplo, durante la programación de los scripts de Python para la elaboración de los viajes para la demanda, el saber que los datos ya estaban estandarizados y tenían calidad ahorró mucho tiempo y eficientó el desarrollo de estos.

Se cree que las suposiciones fueron adecuadas, pues al final el interés para este estudio es el tiempo de recorrido asociado a un tramo y eso sí lo refleja el modelo adecuadamente. El modelo puede llegar a ser mucho más complejo y detallado, pero se considera que este es un muy buen punto de partida. La idea es que futuros trabajos se apoyen en este modelo para agregarle complejidad poco a poco. Al SUMO ser un simulador opensource o de código abierto esto se facilita pues toda la parte de licencias y costos queda de lado.

Respecto a las limitaciones del modelo, se podría considerar que cada vez que algo se asume se pierde detalle y precisión, sin embargo, se consideró que la mala calidad de los datos proporcionados por el órgano operador del Metrobús quitó mucha precisión y alejó a la simulación de lo que realmente ocurrió. Por esto se consideró que no valía la pena desgastarse en detallar en demasía los diferentes elementos, pues ya no se podía considerar que la simulación tuviera un grandísimo grado de fidelidad.

La otra gran limitante que se identificó fue en la visualización de los resultados de la simulación, definitivamente no es igual de interactivo y amigable para el usuario que el proceso de modelado. Se considera que podría ser mucho más amigable el análisis de los datos de salida en la misma herramienta o tal vez en alguna otra proporcionada por ellos mismos. Aunque, seguramente ya se está trabajando en esta área de oportunidad y bastará con esperar poco para que esto se mejore.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

V.1. RESULTADOS DE LA MINERÍA DE DATOS

Se busca que este capítulo sea visualmente descriptivo, por lo que principalmente estará compuesto por figuras que comparen los diferentes análisis. La descripción y justificación de cada figura se puede observar en el capítulo previo.

En la Figura V.1 se muestra la arquitectura del proyecto, esto para darle mayor visibilidad y entendimiento al lector a lo largo de este capítulo. Recapitulando y siguiendo la Figura V.1 de izquierda a derecha y de arriba abajo: primero; se obtuvo la información del organismo operador del Metrobús; segundo, se buscó enriquecer por medio de un marco de referencia para la minería de datos; y por último se generó una simulación de tránsito buscando enriquecer la información.

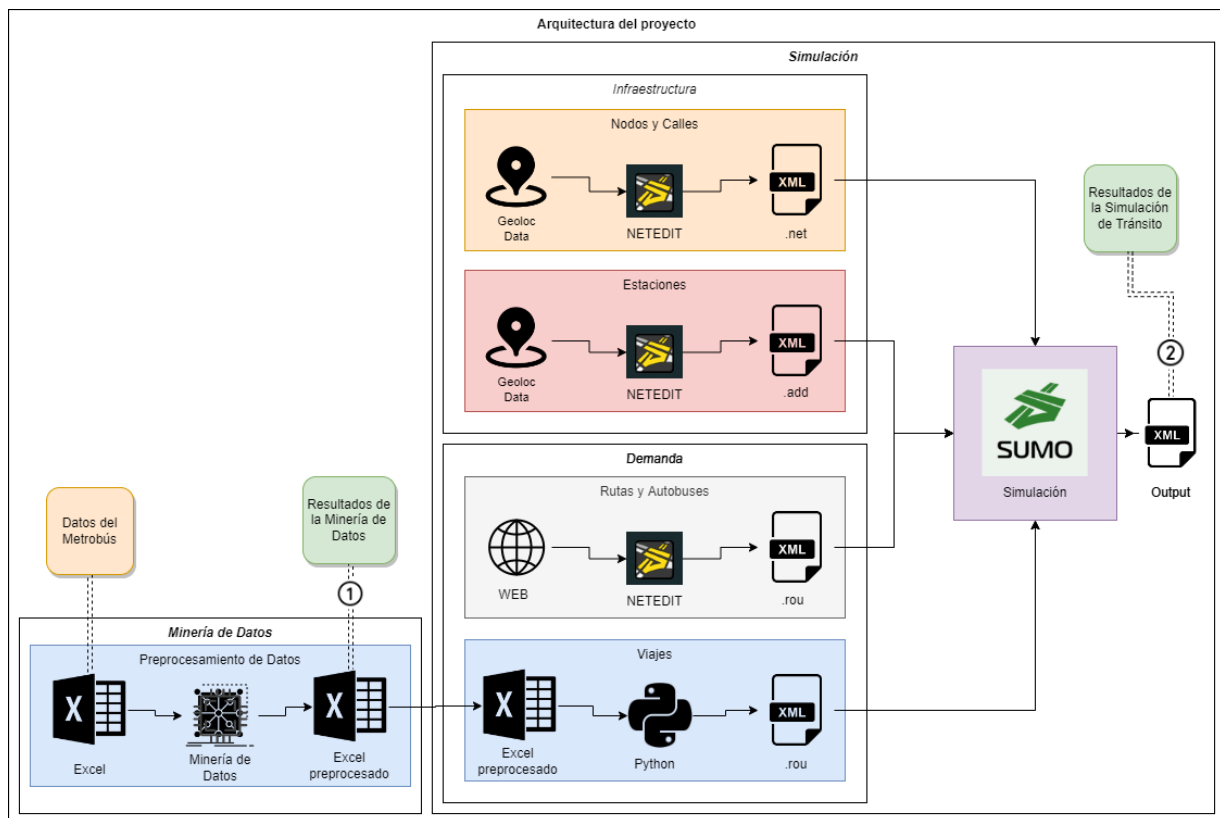


Figura V.1. Arquitectura del proyecto.

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

V.1.1. Diagrama espacio-tiempo

Se muestran los diagramas espacio-tiempo para dos rutas del Metrobús, A3 y F1 que pertenecen a las líneas 1 y 5 respectivamente. Es importante aclarar que los diagramas espacio-tiempo se elaboraron para todas las rutas y para todos los días de información, sin embargo, por cuestiones de presentación no se presentarán todos los diagramas en este capítulo. Se eligió mostrar las rutas A3 y F1 porque son representativas de situaciones muy diferentes. Por un lado, la ruta A3 es una ruta que está presente diariamente en la Línea 1, tiene una alta frecuencia de viajes y es una de las 5 rutas con mayor longitud de toda la red. Por otro lado, la ruta F1 es una de las más recientes, más cortas y es la única ruta de la Línea 5. En la Figura V.2, Figura V.3, Figura V.4 y Figura V.5 se muestran los diagramas espacio-tiempo para un día regular (12 – 09 -2017) y el día del sismo (19-09-2017) para las rutas A3 y F1 respectivamente.

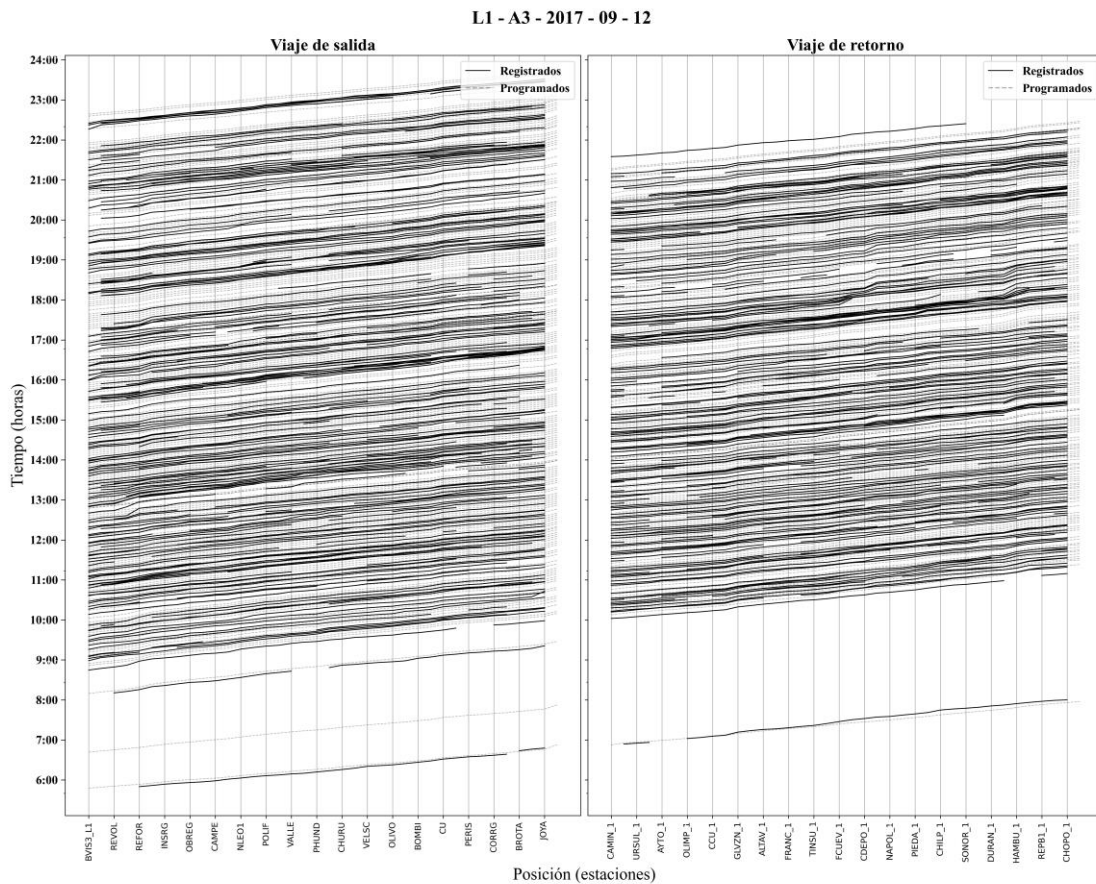


Figura V.2. Diagrama espacio tiempo para la ruta A3 de la Línea 1 del 12 de septiembre de 2017. Se observa la variación horaria en el eje Y, mientras que en los ejes X se encuentran de forma equidistante las distintas estaciones que componen la ruta de salida y la ruta de retorno. En el gráfico del lado izquierdo y

derecho se muestran los datos para todos los viajes de salida y de retorno, respectivamente. Además, en ambos gráficos se observan dos tipos de líneas la continuas para los viajes y las punteadas para los viajes programados.

En la Figura V.2, se observan ligeras variaciones entre los viajes registrados y programados, además, no se registran interrupciones en el servicio. Las pendientes de la mayoría de las líneas son paralelas lo que indica que en general el tiempo de espera a lo largo del día para esta ruta fue constante. Sin embargo, se puede notar que hay viajes inconclusos, ya que se pierde la línea en el gráfico, esto significa que no hay información para ese viaje para dichas estaciones, esto se presenta indiferentemente a lo largo de la ruta, ya sea al inicio, fin o en tramos intermedios.

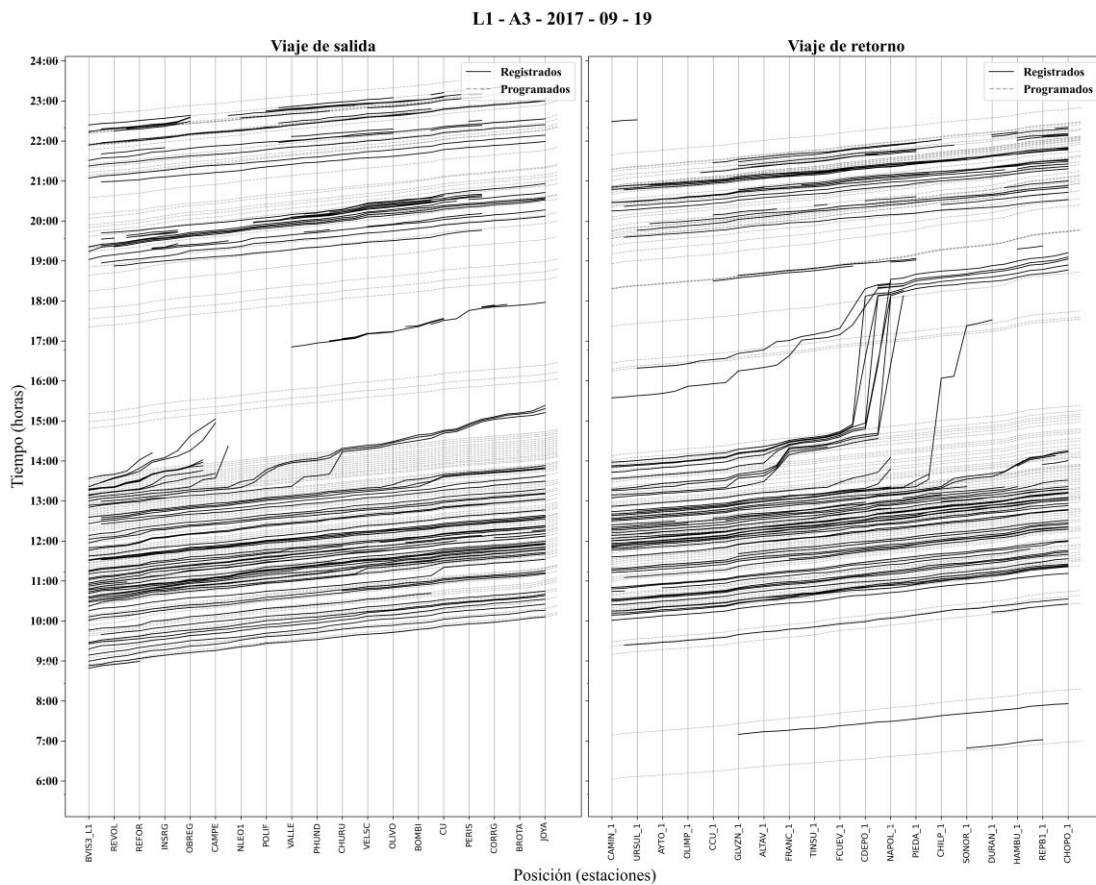


Figura V.3. Diagrama espacio tiempo para la ruta A3, ida y vuelta, de la Línea 1 del 19 de septiembre de 2017.

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

En la Figura V.3 se puede observar el comparativo entre viajes programados y registrados. Se observa también que a partir de la hora del sismo 13:06 la línea se empieza a descompensar, ya que solo crecen los tiempos, pero no avanzan los autobuses. También se puede notar que hay mucha información faltante para la gran mayoría de los autobuses que se encontraban operando durante o después del sismo, esto último aplica para la gran mayoría de las rutas de todas las Líneas del sistema.

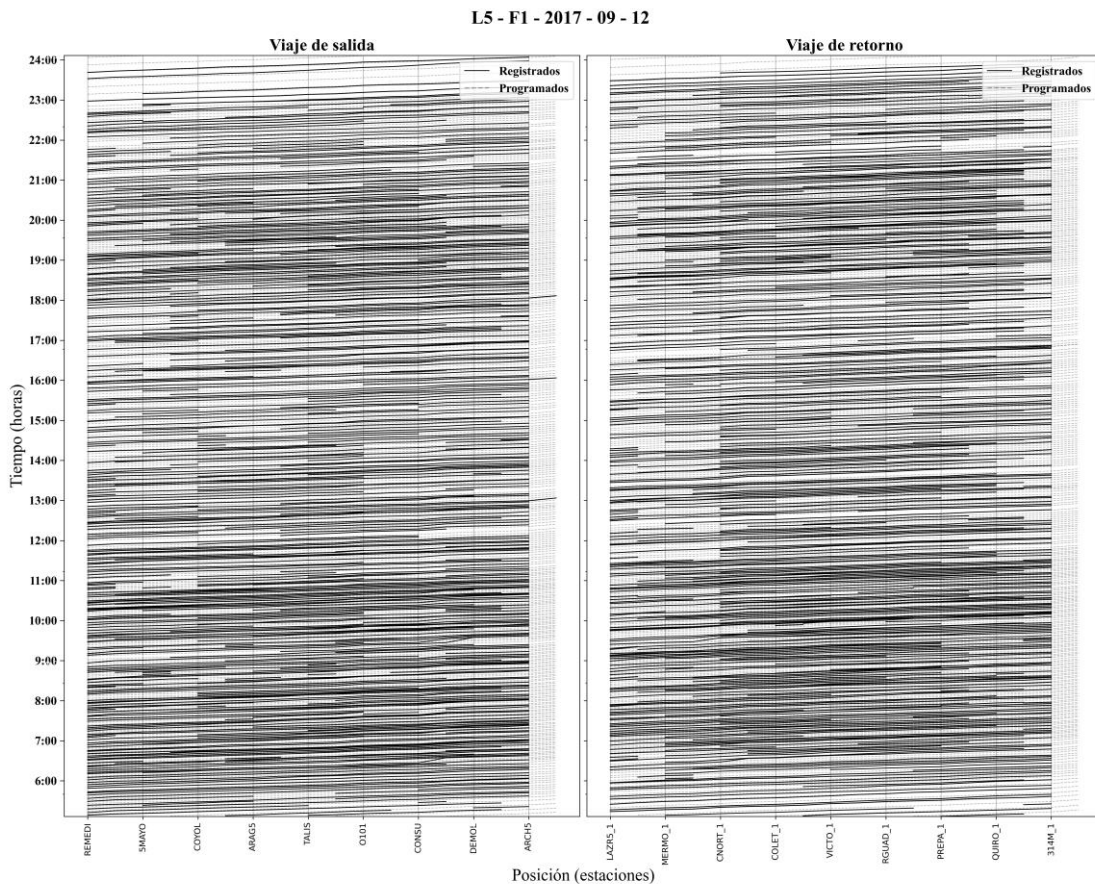


Figura V.4. Diagrama espacio tiempo para la ruta F1, ida y vuelta, de la Línea 5 del 12 de septiembre de 2017.

En la Figura V.4 se puede observar el comparativo entre viajes programados y registrados. Se observa que hay mucha información faltante para el comienzo de la ruta. También se puede observar que en lo general esta ruta al no tener una demanda tan grande puede comportarse de una forma regular a lo largo del día. No se observan interrupciones importantes en el servicio.

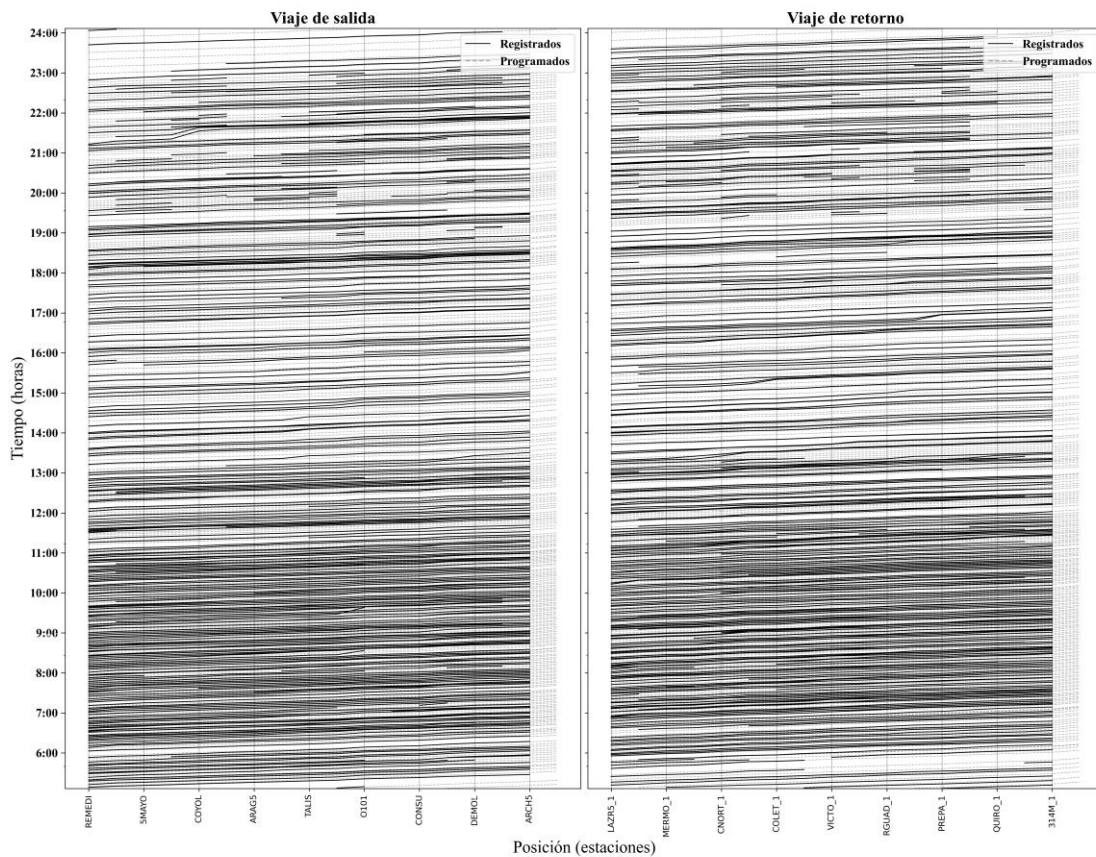


Figura V.5. Diagrama espacio tiempo para la ruta F1, ida y vuelta, de la Línea 5 del 12 de septiembre de 2017.

Se observa en la Figura V.5 que hay información faltante, sin embargo, a pesar de tratarse del día del sismo, de acuerdo con los datos, no hubo interrupciones en el servicio. Solo se observa una menor densidad de viajes a partir del sismo.

V.1.2. *Serie de tiempo del tiempo de espera*

De igual forma, se muestran las series de tiempo del tiempo de espera para algunas estaciones de las líneas 1 y 5 del Metrobús. Es importante aclarar que las series de tiempo se elaboraron para todas las estaciones y para todos los días de información, sin embargo, por cuestiones de redacción y visualización no se presentarán todas en este capítulo. Como se mencionó antes para los diagramas espacio-tiempo, se eligió mostrar algunas estaciones de la Línea 1 y 5 porque son representativas de contextos muy diferentes y para facilitar la comparación al lector. Es

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

importante mencionar que en estas series de tiempo se despreciaron las rutas, pues el tiempo empieza a registrarse desde que un autobús de cualquier ruta deja una estación y termina una vez que el siguiente autobús, sin importar la ruta, parte de la misma estación. Se seleccionaron 5 estaciones aleatorias para cada Línea, para la Línea 1 fueron Insurgentes, Álvaro Obregón, Campeche, Nuevo León y Poliforum; mientras que para la Línea 5 fueron 5 de mayo, Preparatoria 3, Talismán, Río Santa Coleta, Mercado Morelos. En la Figura V.6, Figura V.7, Figura V.8 y Figura V.9 se muestran las series de tiempo del tiempo de espera para un día regular (12-09-2017) y el día del sismo (19-09-2017) para las estaciones previamente mencionadas de las Líneas 1 y 5, respectivamente. En dichas figuras también se presentan los histogramas para cada serie de tiempo, esto con el fin de agrupar las series de tiempo y poder facilitar su comparación.

Es importante comentar que en la Figura V.6, Figura V.7, Figura V.8 y Figura V.9 no se observa la información faltante, debido al nivel de agrupación de los datos y a que se fija un punto a lo largo de la línea para obtener estas series de tiempo, por lo que se considera que si no hay información del viaje para una estación, se asume que el autobús no pasó por ella, lo cual no siempre es cierto.

En la Figura V.6 se observa que el headway varía bruscamente entre 0 y 400 segundos a lo largo del día, lo cual indica que el rendimiento del sistema no es malo, aunque se podría mejorar. No se observa un patrón que relacione grandes headways a periodos de hora pico y pequeños headways a periodos de hora valle.

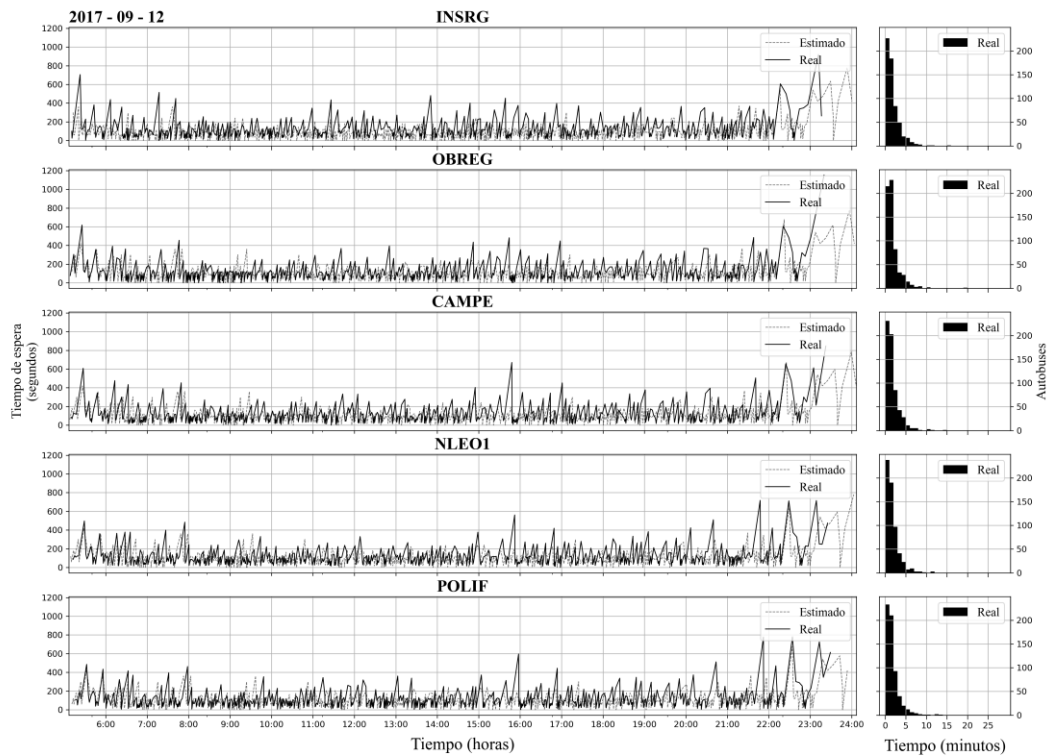


Figura V.6. Serie de tiempo del tiempo de espera o headway para 5 estaciones aleatorias de la Línea 1 para el 12 de septiembre de 2017. Dichas estaciones se encuentran contenidas en un mismo sentido (viaje de salida) de la Línea y comparten múltiples rutas. Para las series de tiempo, en el eje X se coloca la variación horaria, mientras que en el eje Y el tiempo de espera en segundos. Se muestran los datos estimados y los reales. En los histogramas, en el eje X se ubica el tiempo de espera en minutos y en el eje Y el conteo, el cual está dado por el número de autobuses que cruzaron una estación. En los histogramas solo se agrupa la información real, se deprecia la estimada.

En la Figura V.7 se puede observar que para algunas estaciones hubo una interrupción del servicio de hasta 5 horas, lo cual no se puede garantizar ya que no hay certeza de que no haya pasado otro autobús por dicha estación. También se observa que los histogramas tienen una distribución menos homogénea. Otro indicador de que la información no es confiable, es que los tiempos estimados para el día del sismo muestran una interrupción en el servicio, la cual no deberían de tener registrada.

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

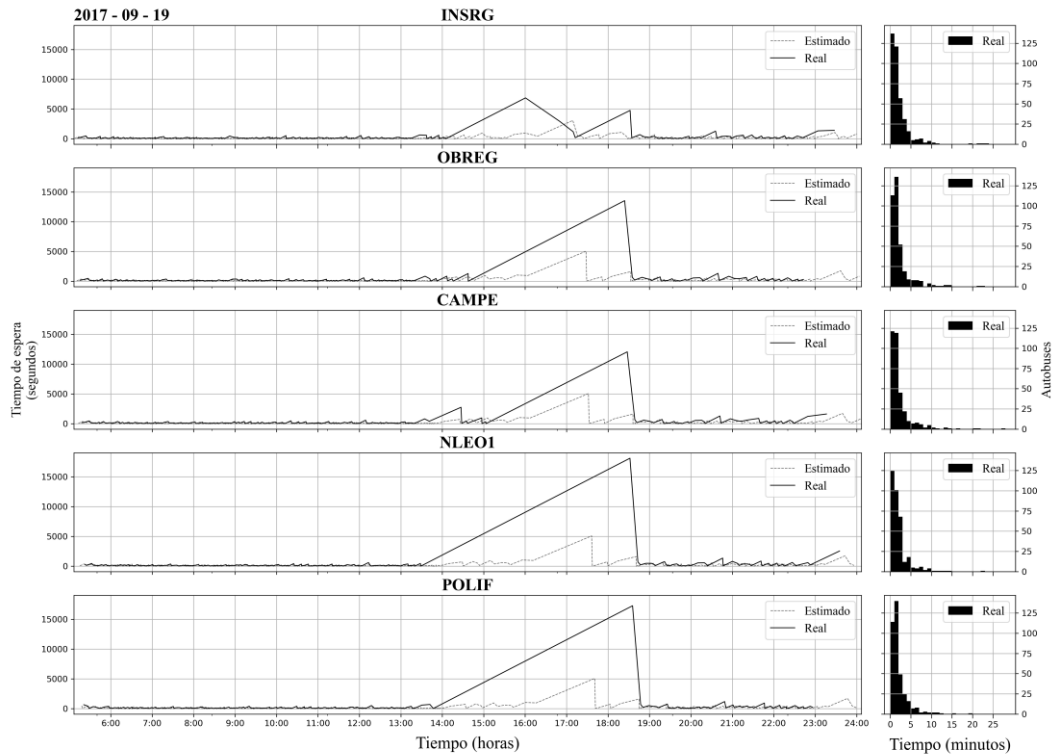


Figura V.7 Serie de tiempo del tiempo de espera o headway para 5 estaciones aleatorias de la Línea 1 para el 19 de septiembre de 2017.

Se observa en la Figura V.8 que el headway varía drásticamente entre 0 y 500 segundos. Se observa una diferencia más grande entre los tiempos de espera estimados y reales. Se observan picos con mayor frecuencia que en las estaciones de la Línea, esto se cree es por la baja demanda que tiene el sistema. Además, a partir de las 22:00 horas se observa que el tiempo de espera aumenta notablemente, esto de igual forma tiene que ver con la poca demanda que tiene el sistema durante la noche. Los histogramas tienen una distribución menos homogénea que aquellos de la Figura V.6.

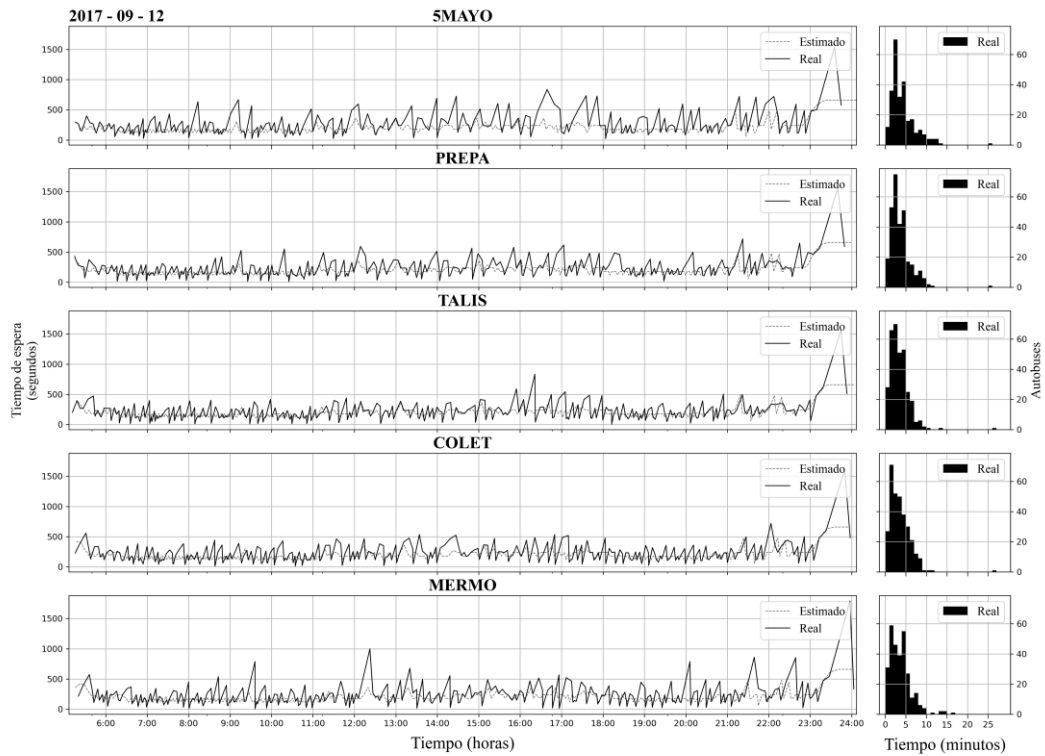


Figura V.8. Serie de tiempo del tiempo de espera o headway para 5 estaciones aleatorias de la Línea 5 para el 12 de septiembre de 2017.

En la Figura V.9 se observa que el headway antes del sismo variaba entre 0 y 500 segundos, mientras que después del sismo variaba entre 0 y 1000 segundos. Lo cual indica que no hubo interrupciones en el servicio, lo cual es bueno ya que de acuerdo a los datos la Línea 1 tuvo que interrumpir el servicio. Es bastante claro el impacto del sismo en esta línea, sin embargo, a pesar de las múltiples interrupciones, el servicio continúa. Por lo que en general se puede concluir que la Línea 5 es más resiliente que la Línea 1.

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

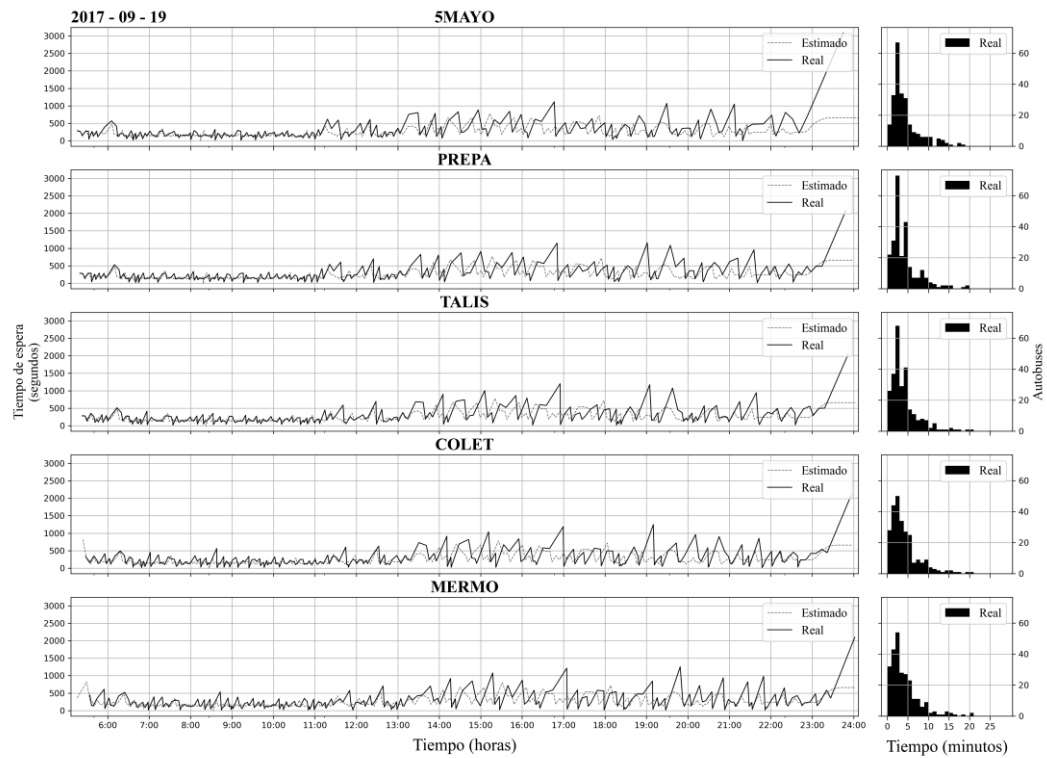


Figura V.9. Serie de tiempo del tiempo de espera o headway para 5 estaciones aleatorias de la Línea 5 para el 19 de septiembre de 2017.

V.1.3. *Gráfico de barras en 3D para el tiempo de espera*

Por último, para la información preprocesada, se muestran los gráficos de barras en 3D para el tiempo de espera promedio por día por estación por sentido por línea. La constitución del gráfico es la siguiente: estaciones de toda la línea en el eje X, los diferentes días en el eje Y y el tiempo de espera promedio por día en segundo en el eje Z. Se eligió que el criterio de agrupación fuera el promedio ya que no se tiene la confianza de que los valores extremos como el mínimo o el máximo sean certeros, esto por la mala calidad de datos. De igual forma que los otros gráficos, estos se calcularon para todos los sentidos de todas las líneas, pero al igual que los gráficos anteriores se muestran ambos sentidos de la Línea 1 y 5. En los planos XZ y YZ se capturan los valores máximos, por lo que la línea proyectada en el plano XZ muestra el valor máximo del tiempo de espera promedio de todos los días de estudio por estación y análogamente el plano YZ muestra el valor máximo del tiempo de espera de todas las estaciones por día. La Figura V.10, Figura V.11, Figura V.12 y Figura V.13 muestran los gráficos de barras en 3D del tiempo de espera promedio para ambos sentidos de la Línea 1 y la Línea 2, respectivamente.

En la Figura V.10 se observa que el 19 de septiembre, el día del sismo, se presentan los valores máximos del gráfico, sin embargo, se nota la falta de calidad de datos, pues no hay datos para estaciones intermedias de la línea, además se nota que el tiempo de espera crece y decrece de forma brusca entre una estación y sus estaciones vecinas, lo cual es incorrecto. Se considera que la falta de datos para ciertas estaciones está asociada a errores en la captura de la información, pues las estaciones con información faltante son aquellas que se encuentran más cercana a los colapsos provocados por el sismo.

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

Línea 1 Ida

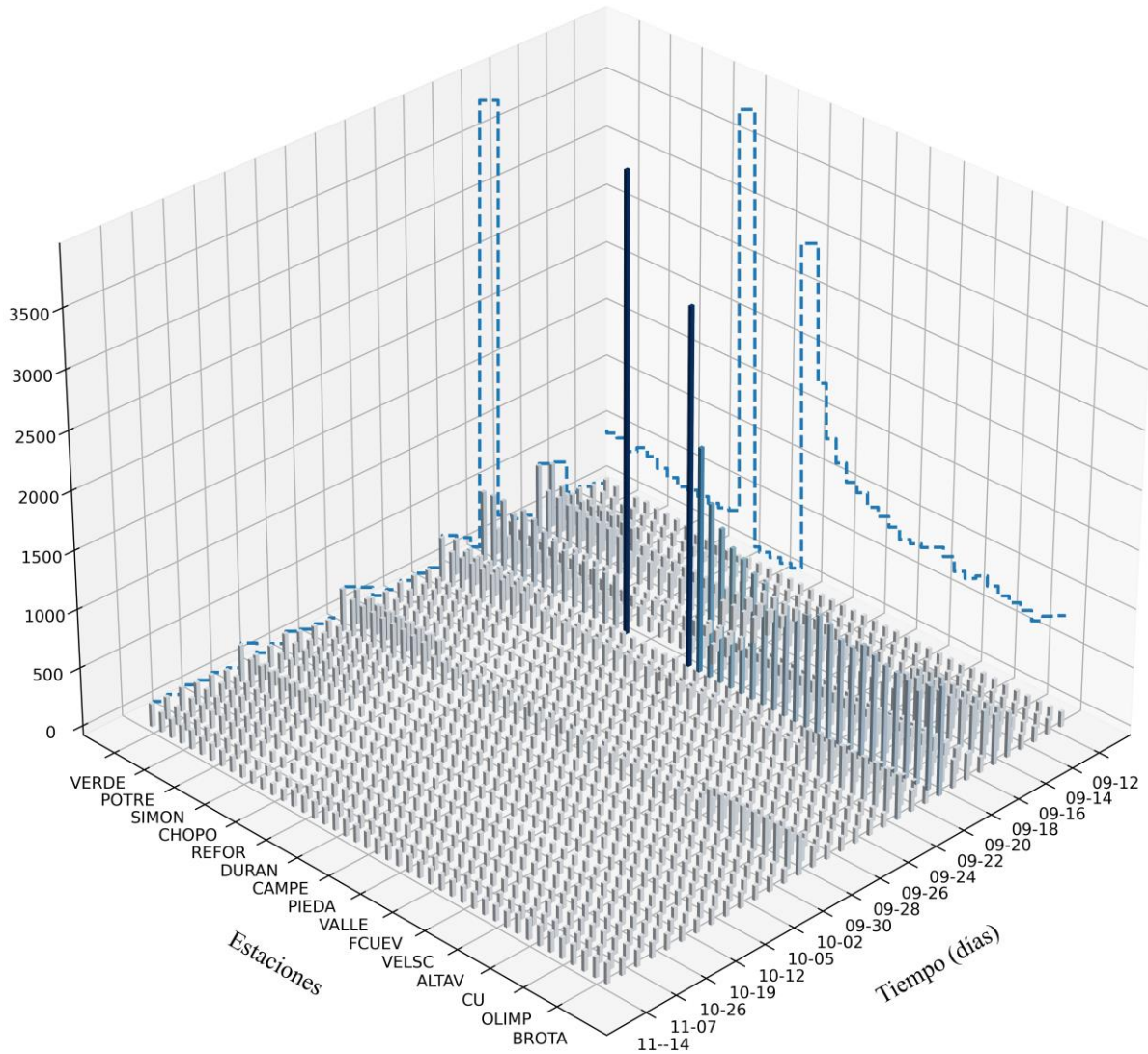


Figura V.10. Tiempo de espera promedio, en segundos, de cada estación por día en el sentido de ida de la Línea 1. En el eje X se ubican las estaciones del sentido de ida de la Línea 1, en el eje Y se representa el tiempo en días y por último en el eje Z se muestra el tiempo de espera promedio en segundos. El color de la barra depende del valor del tiempo de espera promedio, los colores claros son asociados con tiempos de espera cortos y los oscuros con tiempos de espera largos.

Se observa en la Figura V.11 que el 19 de septiembre, el día del sismo, se presentan los valores máximos del gráfico, sin embargo, se nota la falta de calidad de datos, pues no hay datos para estaciones intermedias de la línea. Se puede decir que los datos para el sentido de vuelta de esta

línea son mejores que los del sentido de ida, esto al comparar la Figura V.10 con la Figura V.11, pues a lo largo del 19 de septiembre se observa una variación más lógica del tiempo de espera promedio a lo largo de toda la línea en el sentido de vuelta.

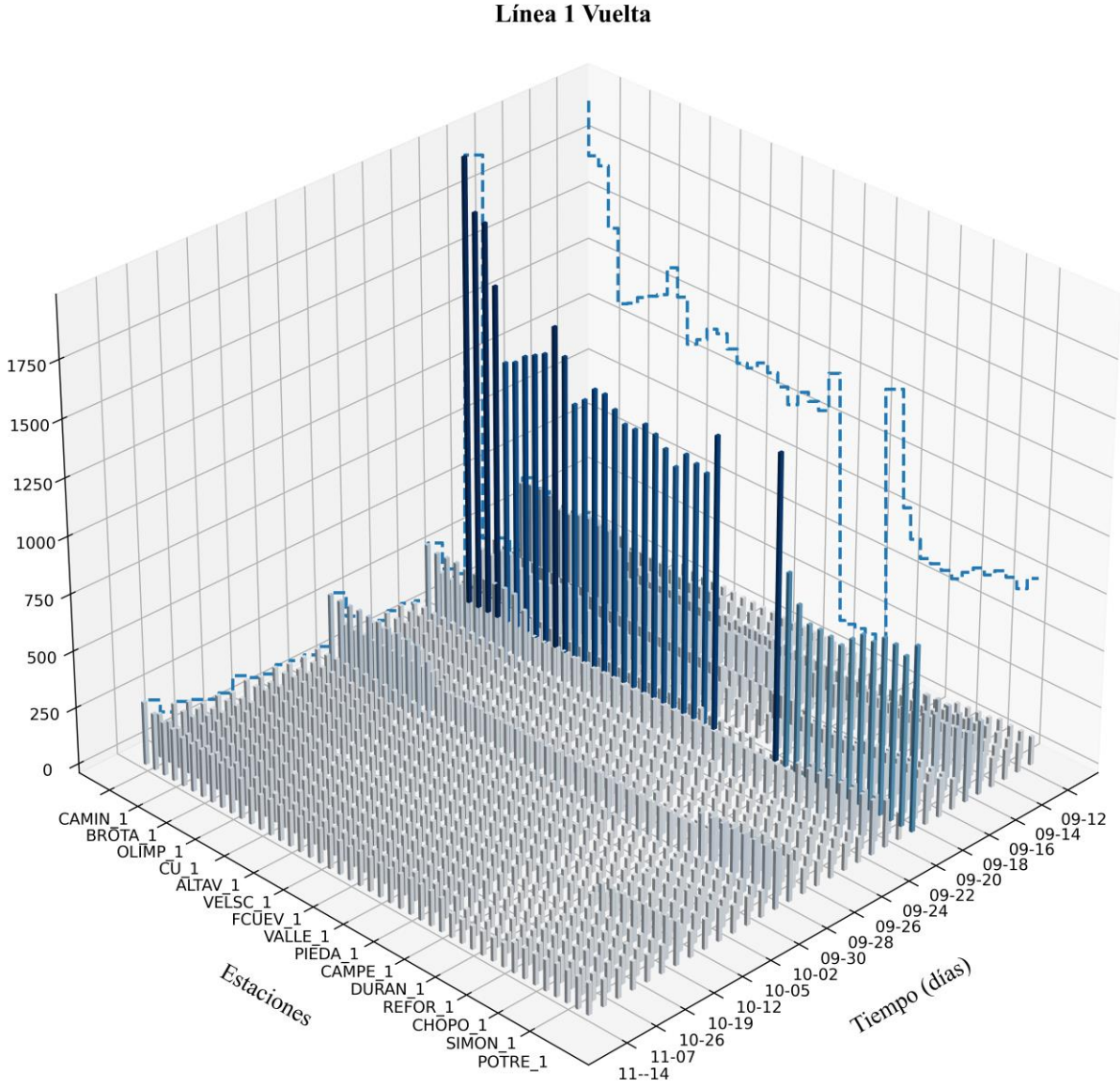


Figura V.11. Tiempo de espera promedio, en segundos, de cada estación por día en el sentido de vuelta de la Línea 1.

Se observa en la Figura V.12 que el 19 de septiembre, el día del sismo, se presentan los valores máximos del gráfico, sin embargo, no son mucho mayores a los valores de los otros días, se

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

observan valores para todas las estaciones y para todos los días lo cual nos habla de una mejor calidad de datos. Las variaciones del tiempo de espera promedio a lo largo de la Línea 5 tienen más lógica, pues no hay variaciones bruscas.

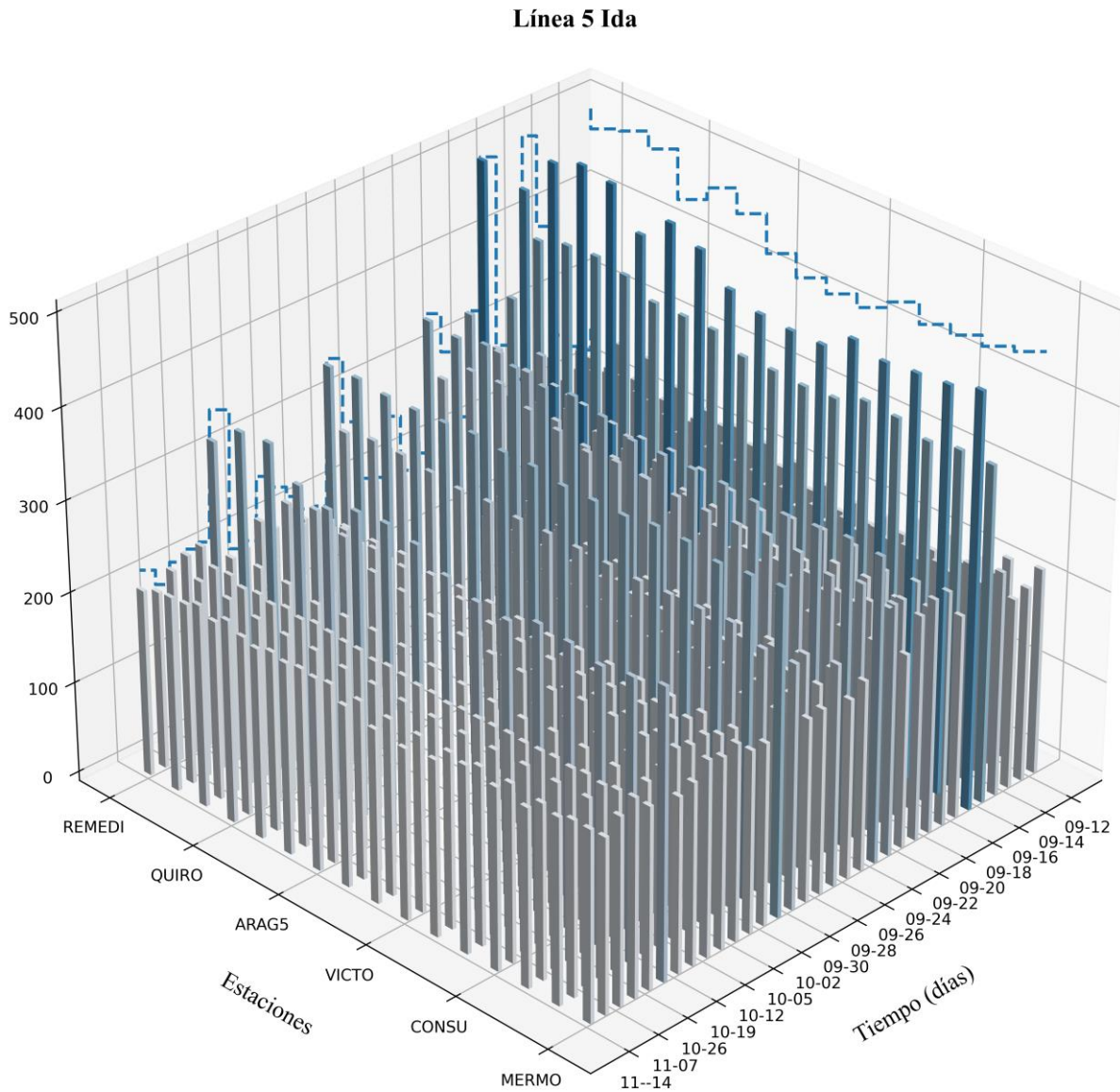


Figura V.12. Tiempo de espera promedio, en segundos, de cada estación por día en el sentido de ida de la Línea 5.

En la Figura V.13 se observa, igual que en la Figura V.12, que el 19 de septiembre, el día del sismo, se presentan los valores máximos y que se cuenta con mejores datos para la Línea 5.

Línea 5 Vuelta

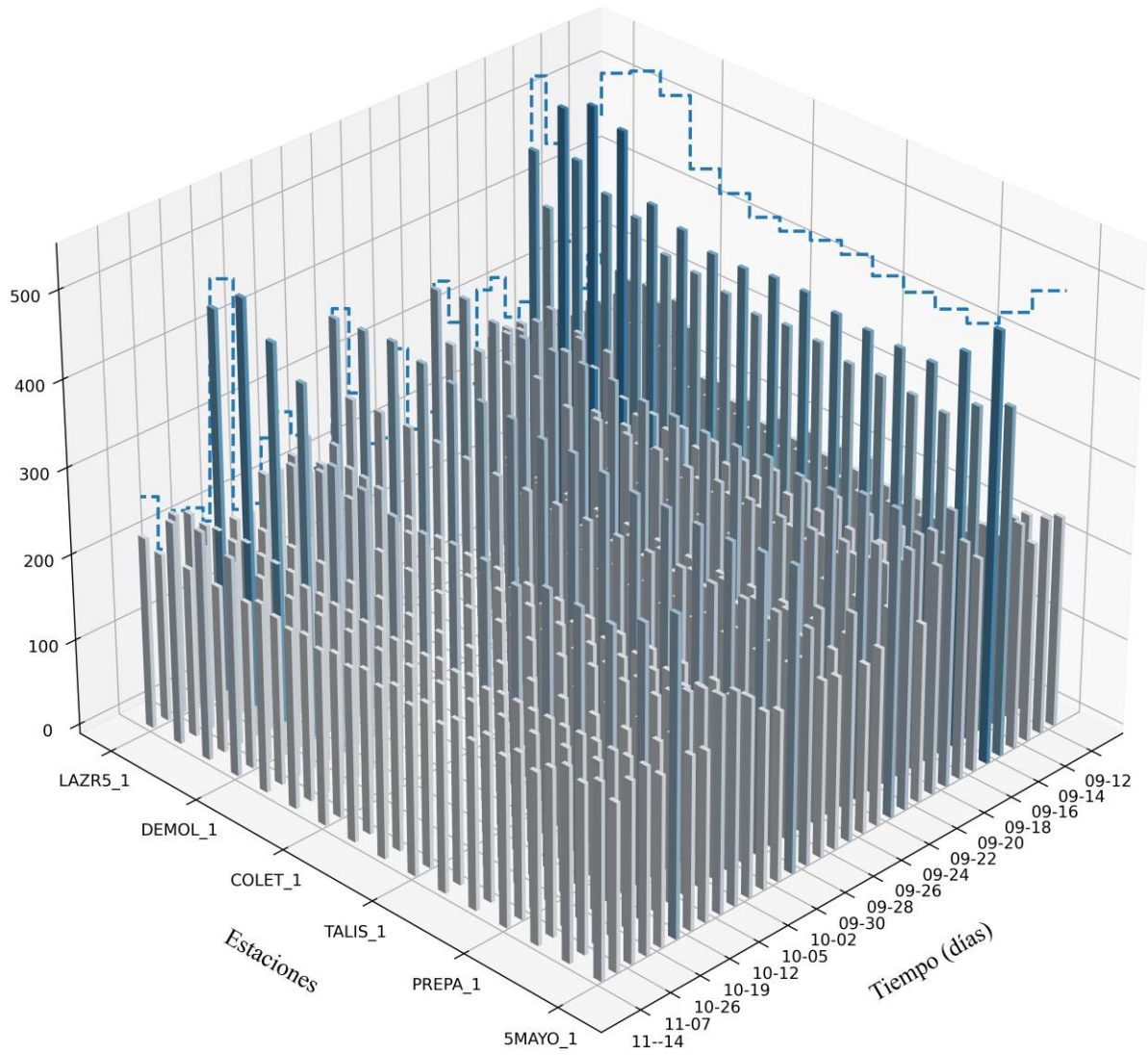


Figura V.13. Tiempo de espera promedio, en segundos, de cada estación por día en el sentido de vuelta de la Línea 1.

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1,Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

V.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE TRÁNSITO

Una vez que se corrieron las simulaciones para cada día de información, se puede considerar que se mejoró la información obtenida. De igual forma no se puede garantizar que la información obtenida por medio de la simulación es representativa de lo ocurrido, porque se asume que los autobuses continúan por su recorrido de forma regular considerando que no se presenta ningún otro incidente. Para la información faltante este es el mejor escenario que se puede asumir, pues tampoco se puede garantizar que sí ocurrieron incidentes en los tramos de viaje sin información.

V.2.1. Diagrama espacio-tiempo con datos de la simulación de tránsito

Para demostrar visualmente que la información se ha mejorado notablemente, generando información para aquellos tramos de viaje sin información, se elaboró de nuevo el diagrama espacio-tiempo para todos los días y todas las rutas. De igual forma, se muestran únicamente los diagramas espacio-tiempo para la ruta A3 de la Línea 1, para los días 12 y 19 de septiembre del 2017. En la Figura V.14 y Figura V.15. se muestran dichos diagramas espacio-tiempo con la nueva información. Se puede observar que ahora todos los viajes están completos y siguen una tendencia lógica, sin embargo, no se puede asumir que la información es verídica, pero sí se puede considerar que representa una situación muy cercana a la realidad.

L1 - A3 - 2017 - 09 - 12

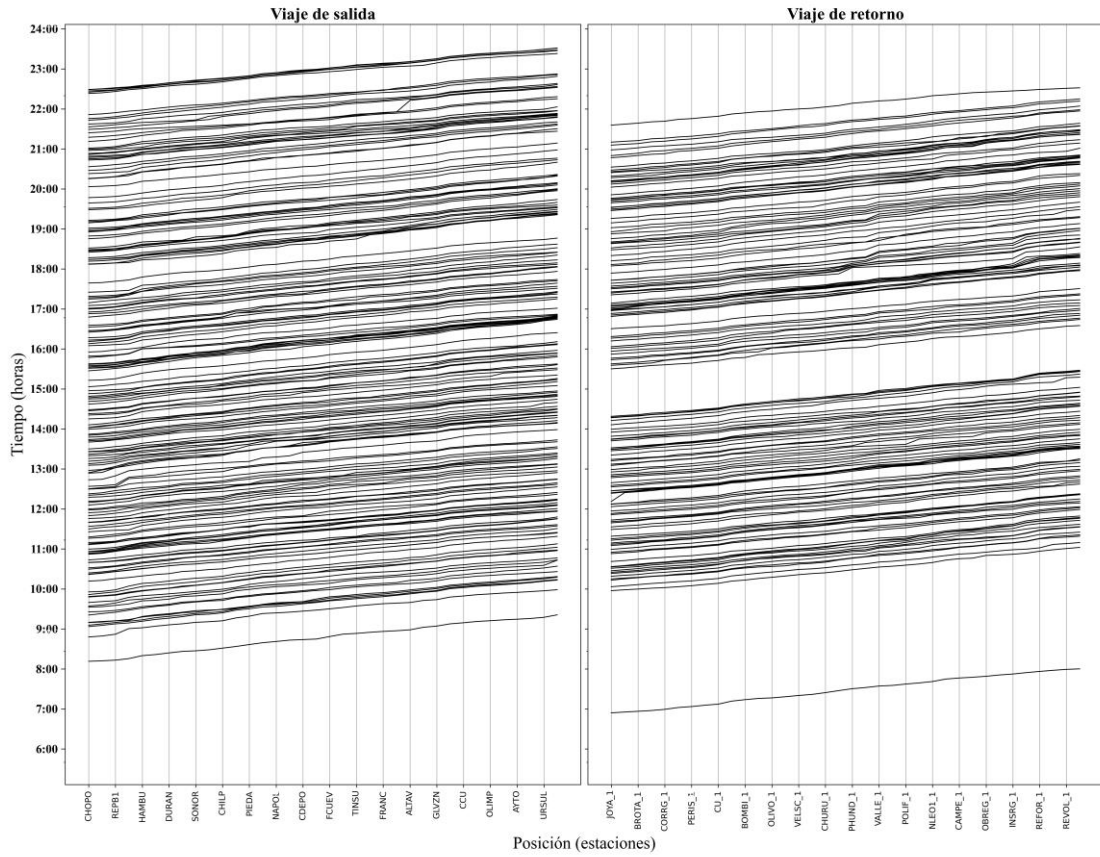


Figura V.14. Diagrama espacio tiempo para la ruta A3, ida y vuelta, de la Línea 1 del 12 de septiembre de 2017.

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1,Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

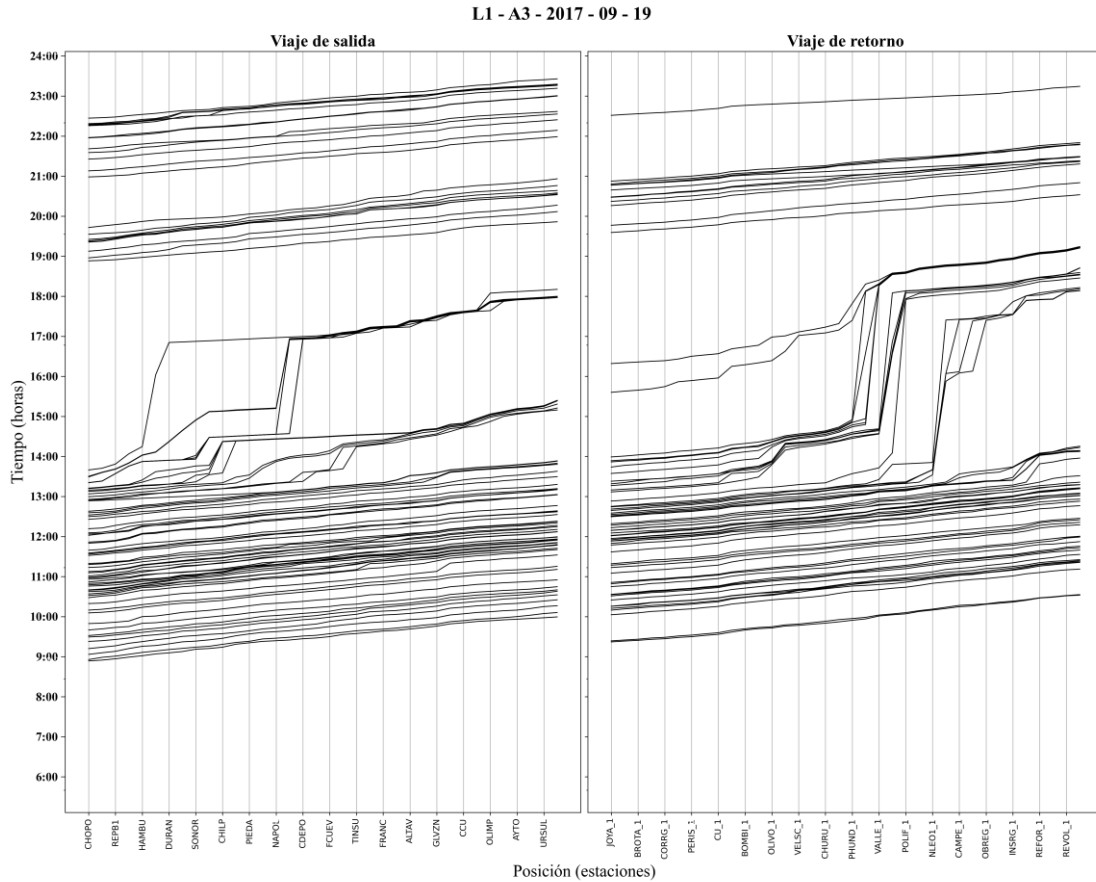


Figura V.15. Diagrama espacio tiempo para la ruta A3, ida y vuelta, de la Línea 1 del 19 de septiembre de 2017.

Con la información enriquecida por la simulación se llevaron a cabo los análisis y gráficos de las siguientes secciones. Es muy notable cómo la información se ha mejorado a lo largo de este proyecto. Es importante recordar que la información proporcionada por el Metrobús, contenía registros “imposibles” que no seguían lógica alguna, por medio del marco de referencia para la minería de datos, se establecieron criterios para identificar y eliminar dichos registros imposibles y posteriormente, una vez que estaba la información limpia se enriqueció con la simulación de tránsito.

V.2.2. Resultados por Línea

Una vez computadas todas las simulaciones, una para cada día de información, se obtuvieron indicadores globales para todas las líneas, esto porque es casi nula la interacción entre diferentes

líneas. El indicador que se encontró más ilustrativo fue la duración del viaje, es importante recalcar que para este caso de estudio se considera a la duración del viaje como el tiempo que transcurre entre la salida de un autobús de la terminal inicial a la llegada del mismo a terminal última de la ruta. Se tomó esta consideración porque no en todas las ocasiones el autobús parte y regresa a la misma terminal.

V.2.2.1. Línea 1

En la Figura V.16 se muestra que en la Línea 1 la duración promedio y mínima de viaje, son bastante uniformes a lo largo del tiempo, ya que antes y después del sismo presentan un comportamiento muy similar, sin embargo el día del sismo y los 2 siguientes días, la duración promedio de viaje se ve afectada severamente, ya que el día del sismo presenta un pico para dos días después presentar una reducción notable. Respecto a los valores máximos, el pico se presenta el día del sismo y generalmente hay una variación importante en esta serie.

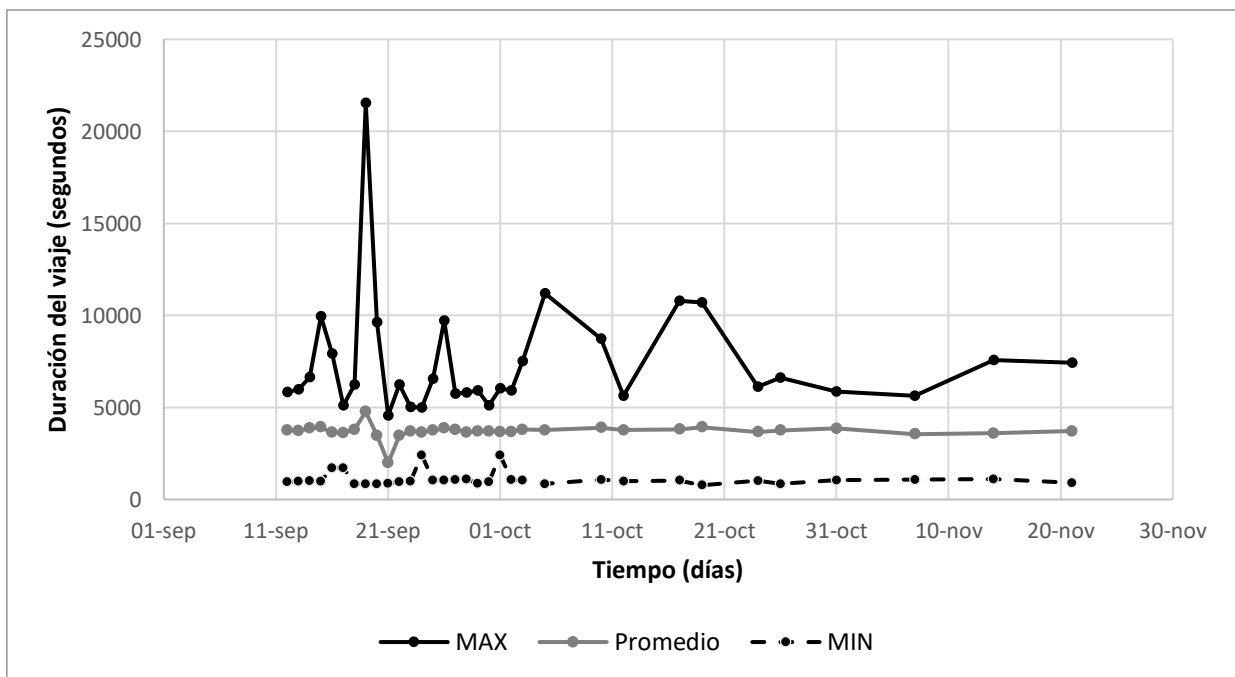


Figura V.16. Duración máxima, promedio y mínima de viaje en segundos para todas las rutas de la Línea 1 para todos los días de información.

V.2.2.2. Línea 2

En la Figura V.17 se observa los valores máximos, promedio y mínimos de la duración del viaje en segundos para la Línea 2. Al igual que en la Figura V.16, se observa que los valores promedio

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

y mínimo tienen una mínima variación para días regulares, sin embargo el sismo los afecta. En el caso de la Línea 2, se observan reducciones importantes en los días consecutivos al sismo. Esto se debe a que como hubo estaciones que cerraron por estar muy cerca a zonas de daño estructural, se elaboraron nuevas rutas más cortas para seguir usando la infraestructura que no presentaba ningún riesgo para los pasajeros. Para los valores máximos, de igual forma, se presenta el máximo histórico el día del sismo y también, al igual que en la Línea 1, dichos valores máximos presentan gran variabilidad.

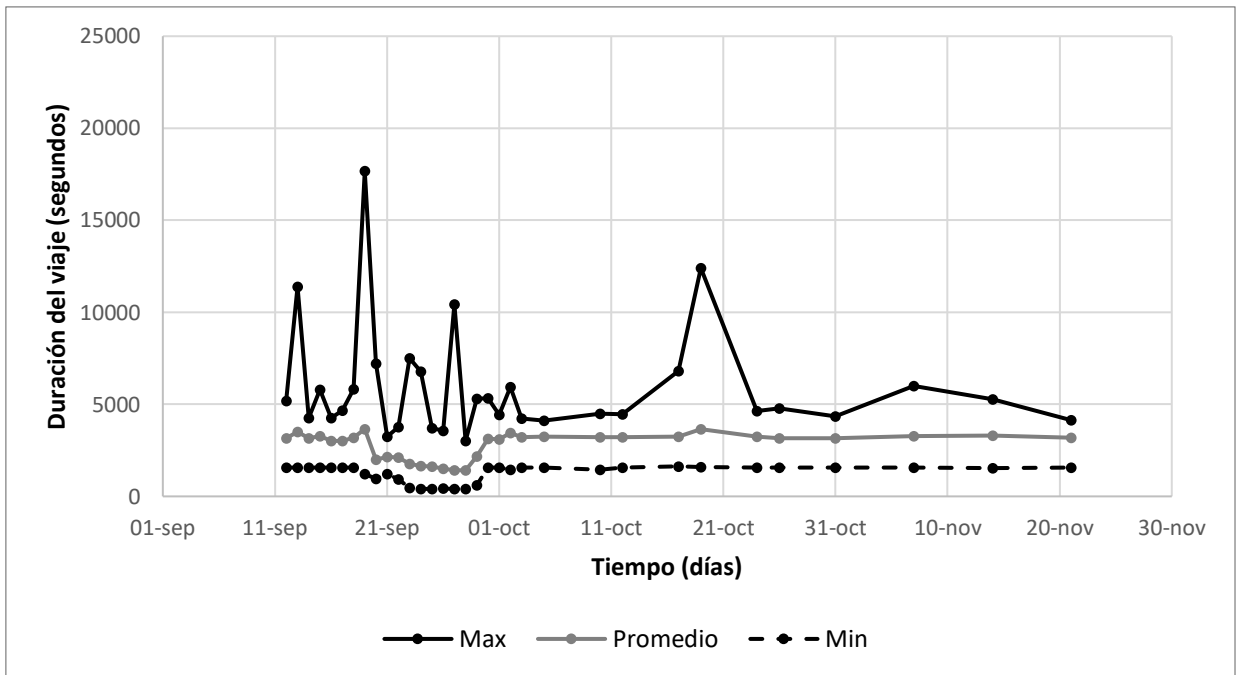


Figura V.17. Duración máxima, promedio y mínima de viaje en segundos para todas las rutas de la Línea 2 para todos los días de información.

V.2.2.3. Línea 3

En la Figura V.18, se presentan los valores máximos, promedio y mínimos de la duración del viaje en segundos para la Línea 3. Dado que la Línea 3 presenta un comportamiento muy similar a la Línea 1, los comentarios para la Figura V.16 aplican también para esta. Además, se observa que el valor máximo histórico, que se registra el día del sismo, no es mucho mayor que otros valores máximos.

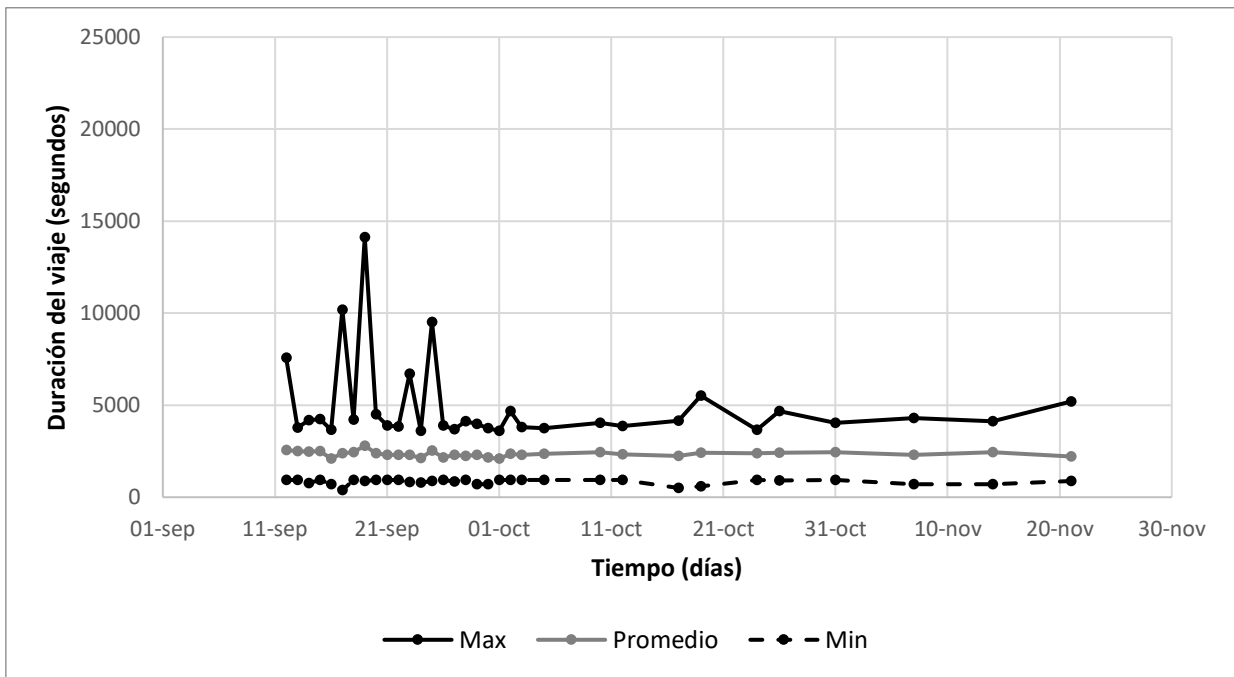


Figura V.18. Duración máxima, promedio y mínima de viaje en segundos para todas las rutas de la Línea 3 para todos los días de información.

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

V.2.2.4. Línea 4

En la Figura V.19 se muestran los valores máximos, promedio y mínimos de la duración del viaje en segundos para la Línea 4, la cual presenta un comportamiento muy similar al de la Línea 1, por lo que los comentarios para la Figura V.16 aplican también para la Figura V.19.

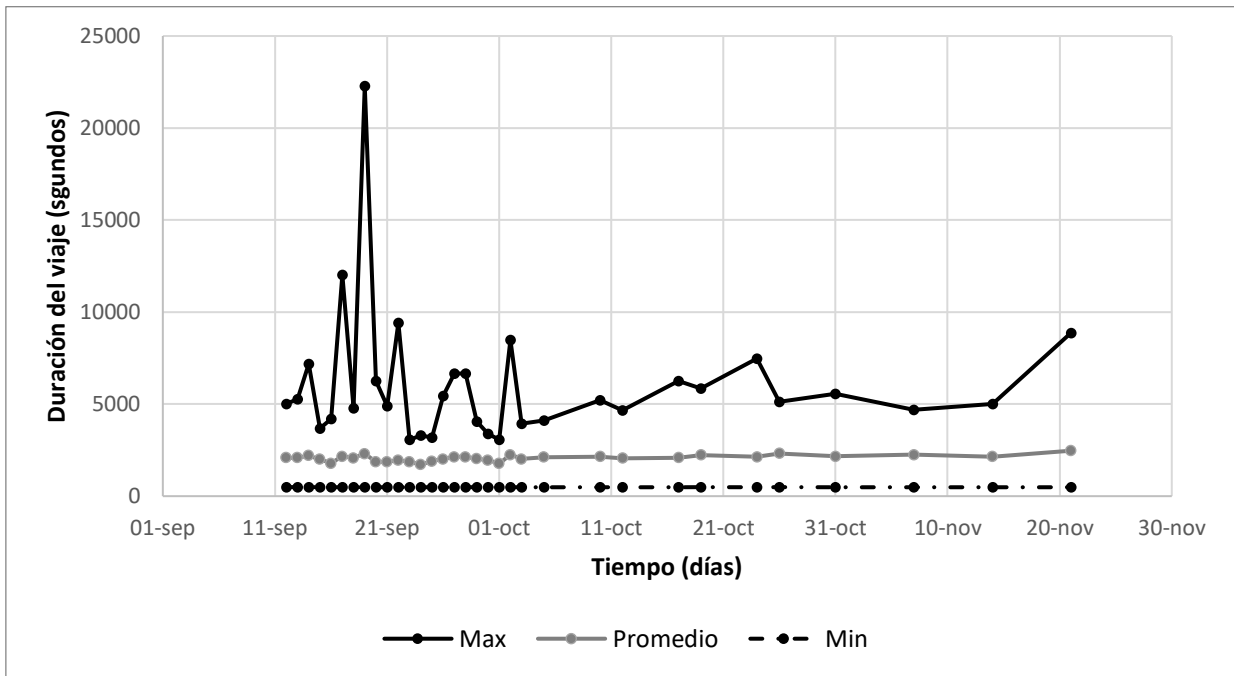


Figura V.19. Duración máxima, promedio y mínima de viaje en segundos para todas las rutas de la Línea 4 para todos los días de información.

V.2.2.5.Línea 5

En la Figura V.20 se muestran los valores máximos, promedio y mínimos de la duración del viaje en segundos para la Línea 5, la cual presenta un comportamiento muy similar al de la Línea 5, por lo que los comentarios para la Figura V.16 aplican también para la Figura V.20. Importante mencionar que por las condiciones de esta línea, aunado a una baja demanda, la duración del viaje máxima histórica es de aproximadamente 10 veces menor que la de la Línea 1.

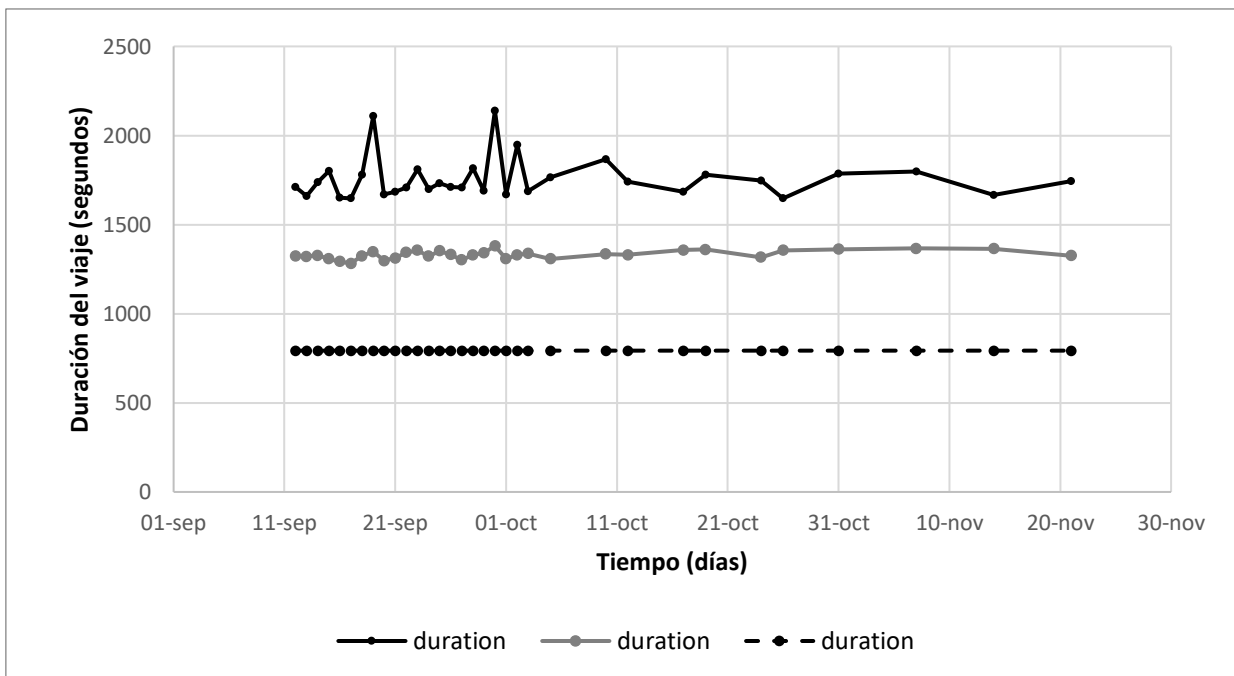


Figura V.20. Duración máxima, promedio y mínima de viaje en segundos para la Línea 5 para todos los días de información.

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

V.2.2.6.Línea 6

En la Figura V.21 se muestran los valores máximos, promedio y mínimos de la duración del viaje en segundos para la Línea 6, la cual presenta un comportamiento muy similar al de la Línea 1, por lo que los comentarios para la Figura V.16 aplican también para la Figura V.21.

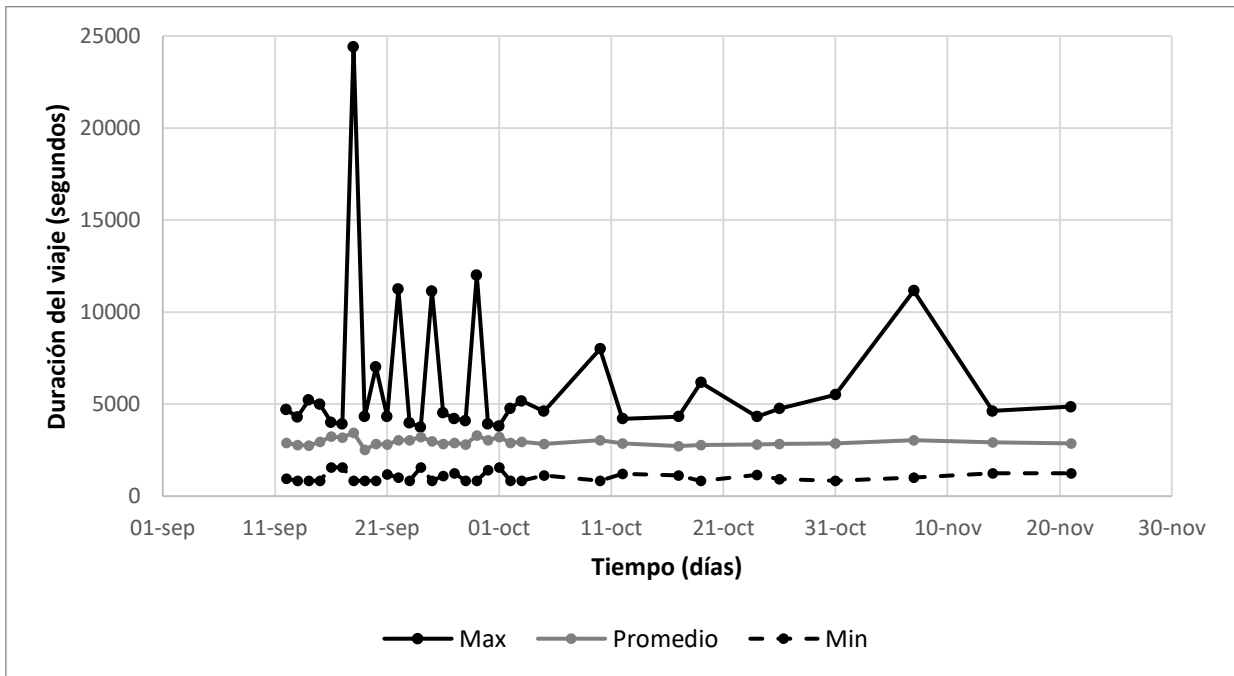


Figura V.21. Duración máxima, promedio y mínima de viaje en segundos para todas las rutas de la Línea 6 para todos los días de información.

V.2.3. Resultados Globales

La Figura V.22 muestra una comparación entre las 6 diferentes líneas de la duración promedio del viaje. Por una parte, se observa que las líneas más afectadas fueron la 1 y la 2, las más demandadas y también las más cercanas a las zonas de daño estructural. Por otra parte, se observa que la Línea 5 no presentó alteraciones importantes, esto por tener baja demanda de pasajeros y estar relativamente lejos de las zonas de daño estructural. Se observa también que la Línea 6 es la que presenta mayor irregularidad durante días normales y dicha variación hace que el día del sismo, no se genere un impacto tan extraordinario. Por último se puede decir que las líneas 3 y 4 resintieron el sismo, pero no tanto como las líneas 1, 2 y 6.

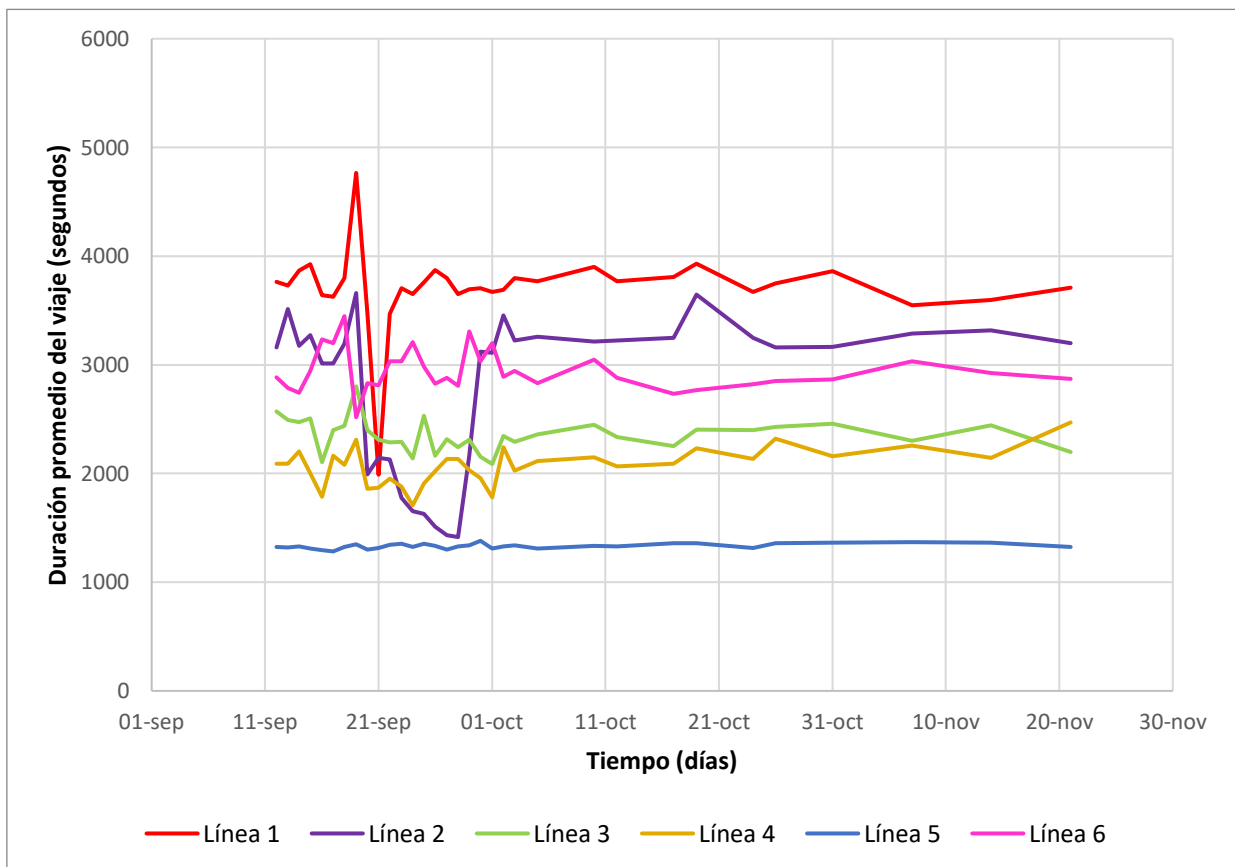


Figura V.22. Duración promedio de viaje en segundos para todas las líneas del Metrobús para todos los días de información.

CAPÍTULO VI

ESTRATEGIAS PARA AUMENTAR LA RESILIENCIA EN EL METROBÚS

VI.1. ESTRATEGIAS PROPUESTAS PARA AUMENTAR LA RESILIENCIA Y LIMITANTES ENCONTRADAS A ESCALA URBANA.

El Banco Mundial elaboró un estudio en 2012 para la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) [3] en el cual emitió recomendaciones generales para crear resiliencia en zonas urbanas con población marginada y sujetas a los efectos del cambio climático y riesgos naturales.

Las recomendaciones son:

- entender riesgos ambientales, socioeconómicos e institucionales, como un primer paso fundamental para el desarrollo de planes de adaptación y mitigación de riesgo,
- el tener un punto de vista más amplio que el de un sistema en particular es mejor, porque los riesgos naturales afectan a muchos sectores y es importante tomar a todos en cuenta para que la elaboración de políticas públicas aborde dichos sectores,
- estrechar la relación que existe entre las comunidades y los gobiernos locales para trabajar en conjunto en soluciones de carácter local, y
- crear oportunidades financieras para que las ciudades puedan reducir los riesgos de sus comunidades más marginadas.

Por otra parte, el Banco Asiático para el Desarrollo [5] propone las siguientes recomendaciones para aportar resiliencia a una comunidad:

- identificar de forma extensiva las amenazas, exposición y vulnerabilidad para así gestionar la planeación urbana y las operaciones de respuesta ante desastres,
- proveer de servicios básicos a todos los habitantes, con especial atención en las zonas marginadas,

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

- planear el desarrollo de la ciudad desde la perspectiva de los riesgos y la resiliencia, aumentar la supervisión para garantizar que se cumpla con los reglamentos de construcción,
- mejorar el diseño de infraestructura para tomar en cuenta los riesgos naturales y los asociados con el cambio climático, contar con una operación calificada y adecuada de la infraestructura y proveer recursos para mantener el desempeño óptimo de esta,
- priorizar el funcionamiento natural del ecosistema, e
- implementar sistemas efectivos de alerta temprana, de respuesta de emergencia y de pronta recuperación, para así mitigar los daños provocados por el cambio climático y desastres naturales.

Además, ambas instituciones internacionales identifican cuáles son los principales retos que impiden que sus estrategias entren en acción. Por su parte, el Banco Mundial [3] identifica los retos específicos de la ZMVM, mientras que el Banco Asiático para el Desarrollo [5] lo hace de forma general.

Limitantes para la ZMVM:

- muchas veces los gobiernos locales (Alcaldías) no cuentan con el personal adecuado, las habilidades técnicas y la capacidad financiera, por lo que organizaciones comunitarias, durante las crisis, han salido a llenar los vacíos que las Alcaldías no han logrado satisfacer. Estas organizaciones civiles desempeñan un rol fundamental, sin embargo, no pueden reemplazar al gobierno, por lo que este debe ocuparse de los vacíos que la sociedad ya ha logrado identificar,
- los desastres en la ZMVM son manejados principalmente de manera reactiva y
- es evidente que tiene que mejorar el canal de comunicación intergubernamental.

Limitantes generales:

- existen muy pocas estrategias participativas de desarrollo urbano. Estas, están caracterizadas por incluir a las comunidades con los sectores públicos y privados para así lograr políticas de desarrollo urbano que beneficien a todos los involucrados,

- migrar la planeación y gestión urbana de una sola institución gubernamental a un conjunto de instituciones para maximizar los beneficios de las inversiones urbanas y
- mejorar la coordinación institucional, tanto entre pares como entre los diferentes niveles de gobierno,

En general, con el paso de los años medidas que han sido recomendadas por los expertos se han seguido y fomentado en la CDMX, se puede apreciar el avance en el desarrollo de atlas de riesgos, mayor cobertura de servicios básicos y una plataforma de datos abierta y colaborativa. Sin embargo, aún hay que desarrollar más estas medidas y fomentar aquellas que se han dejado de lado, pues aún hay mucha más resiliencia que aportar a la Ciudad.

VI.2. ESTRATEGIAS PROPUESTAS PARA AUMENTAR LA RESILIENCIA DE SUBSISTEMAS URBANOS

La ARCDMX declara como uno de sus cinco ejes de acción, el mejorar la movilidad a través de un sistema integrado, seguro y sustentable. La ARCDMX estableció cinco metas para el eje de acción relacionado con la movilidad, las cuales son: primera, impulsar un sistema integral de movilidad que conecte y revitalice a la CDMX y la ZMVM; segunda, desincentivar el uso del vehículo particular; tercera, crear una ciudad segura y accesible a peatones y ciclistas; cuarta, preparar al sistema de movilidad frente a posibles riesgos e impactos del cambio climático y quinta, promover el uso de datos para mejorar la toma de decisiones en movilidad. Todas estas metas buscan aumentar la resiliencia de los sistemas de movilidad, no sólo en la CDMX, sino en la ZMVM [6].

Para cada una de estas metas propone acciones que llevarán a cumplir estas, las acciones propuestas para la cuarta meta, preparar al sistema de movilidad frente a posibles riesgos e impactos del cambio climático, son las siguientes: uno, mejorar la planeación de la movilidad frente a situaciones de emergencia y desastres, y dos, adaptar el sistema de transporte público ante los impactos del cambio climático [6]. Es importante resaltar que estas acciones van de la mano con lo que proponen organismos internacionales no gubernamentales, lo cual se celebra.

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

La experiencia del 19 de septiembre de 2017 demostró que el sistema de transporte no es suficientemente resiliente, pues este colapsó. Es por esto que la ARCDMX ha identificado la necesidad de contar con un protocolo de actuación que resulte del análisis del comportamiento de este sistema antes, durante y después del evento sísmico de septiembre de 2017 [39]. El contar con un protocolo de actuación sin duda aportará muchísima resiliencia a la red de transporte de la CDMX y dentro de esta, se encuentra el Metrobús.

Sin duda alguna, la elaboración de este protocolo de actuación o protocolo de emergencia no será nada fácil y presentará un reto sin precedentes para las autoridades de la CDMX, ya que por primera vez se tendrán que analizar todos los sistemas de transporte a la vez, para así encontrar las interdependencias que estos guardan entre sí.

Abordando un punto de vista ambiental, es importante mencionar que la SEDEMA identifica al transporte como uno de los principales contribuyentes a las emisiones de gases de efecto invernadero y de carbono negro de la CDMX [32]. Por lo que, si se incrementan las políticas públicas para desincentivar el uso de los vehículos personales y se aumenta la capacidad instalada para aumentar la oferta de movilidad se pueden reducir dichas emisiones asociadas al transporte. Particularmente en el caso del Metrobús se podría proponer un cambio paulatino hacia una flota híbrida en su totalidad o que cierto porcentaje de la flota sea eléctrica. De hecho, Metrobús lanzó el programa “Metrobús Eléctrico” en 2020, el cual consistió en integrar unidades sin emisiones, 100% eléctricas, a la Línea 3. Este programa ha sido un éxito, actualmente sigue en marcha y cada vez se integran más unidades eléctricas a la flota [21]. Acciones como estas encaminan al Metrobús hacia la sustentabilidad y por lo tanto lo harán cada vez más resiliente.

Enfatizando de nuevo en el Metrobús se pueden proponer estrategias participativas que estrechen la relación entre el Metrobús y sus usuarios, esto puede ser a escala de estación, de tal forma que el sistema BRT conozca mejor a la población local a la que sirve y que la población entienda y conozca de mejor forma la operación del sistema. Así, se podría elaborar y mantener un canal de comunicación local y efectivo, que durante una situación de emergencia sería de mucha ayuda.

Es importante entender que cada una de estas estrategias y acciones, aportan resiliencia no sólo al sistema del que se esté hablando, ya sea el sistema de transporte de la ZMVM, sistema de transporte de la CDMX o Metrobús. Sino que de alguna forma estas estrategias y acciones permean en el contexto del sistema aumentando la resiliencia de los usuarios, la comunidad inmediata e incluso la de otros sistemas. Por lo que es muy importante que se construya resiliencia de forma holística, abarcando a la comunidad, a los sistemas, al gobierno y a todos aquellos que sean partes involucradas en el sistema.

Para lograr este desarrollo holístico de la resiliencia, será necesario encontrar un marco que de alguna forma acoté cómo se evaluará la resiliencia actual para así lograr incrementarla. Se infiere que dicha evaluación tendrá que ser cualitativa o al menos tener una parte cualitativa, pues deberá tomar en cuenta elementos que no podrán ser evaluados cuantitativamente. El marco que propone [26] en su modelo conceptual para evaluar la resiliencia parece ser muy adecuado. En dicho modelo se divide a la resiliencia en cuatro grandes grupos cognitiva, funcional, correlativa y organizacional. La resiliencia cognitiva apela a todo el conocimiento que la sociedad ya ha adquirido con base en experiencias previas. La resiliencia funcional determina las interacciones entre los componentes de un sistema y busca establecer una relación entre las fallas. La resiliencia correlacional parte de encontrar el punto en el tiempo en el que el sistema será inoperante y empezar a tomar acciones desde el presente que corrijan esa situación. Finalmente, la resiliencia organizacional refleja la capacidad de solidaridad entre las instituciones, es decir cómo instituciones que no fueron afectadas pueden aportar más a aquellas que si lo fueron.

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

VI.3. ESTRATEGIAS PROPUESTAS PARA AUMENTAR LA RESILIENCIA EN EL METROBÚS

Es importante recalcar que para aumentar la resiliencia se debe llevar a cabo un proceso de carácter cuantitativo y cualitativo, que permita implementar y medir diferentes estrategias de forma iterativa.

Dicha estrategia o proceso debe ser definido, no por el Metrobús sino en conjunto por diferentes entidades administrativas, como por ejemplo la Secretaría de Movilidad de la Ciudad de México (SEMOVI). De esta forma se podría pensar en una estrategia general para los diferentes sistemas de transporte urbano de la ciudad y estrategias particulares para cada sistema que tomen en cuenta las interacciones intersistemas.

Después del análisis realizado a lo largo de este proyecto y de una extensiva revisión bibliográfica se identificaron las siguientes propuestas para contar con un sistema BRT más resiliente en la ZMVM.

VI.3.2. Mejores datos

Es fundamental que se mejore todo el ciclo de vida de datos, pues después del análisis realizado se identificó que la calidad de los datos proporcionados era inadecuada para llevar a cabo análisis, por lo que se dedicaron grandes esfuerzos y recursos a limpiar y mejorar los datos para contar con análisis más certeros.

El ciclo de vida de datos es el proceso que recorren los datos dentro de una organización, múltiples autores han propuesto/definido diferentes etapas durante el proceso y sí bien el proceso depende de la organización la gran mayoría de las etapas siempre figuran en el proceso.

El ciclo de vida de los datos comienza con una etapa de planeación y preparación, en la cual se definen las expectativas que se buscan satisfacer con los datos, así como los requerimientos que se deben de garantizar para lograr dichas expectativas. También se definen cómo los datos evolucionarán a lo largo del tiempo y los diferentes procesos que seguirán. Una vez que se tiene un plan, el siguiente paso es tener acceso a la información, dependiendo del proyecto se obtendrán los datos de fuentes externas o se generarán. En la siguiente etapa, diseño y

procesamiento, se debe tener en cuenta tanto las tecnologías a través de las cuáles fluirán los datos, así como los procesos de negocio a los que los datos apoyarán, esto para entender las limitantes de la infraestructura y necesidades de los usuarios de modo que se diseñe una mejor solución. En esta etapa también se define y ajustan las estructuras de datos a emplear. Una vez que se completa el diseño, se procesa la información obtenida. Una vez que se han procesado los datos se almacenan para su uso posterior, es importante definir políticas de almacenamiento para poder darle un mantenimiento adecuado a los datos. Con los datos almacenados se puede explotar la información para obtener conocimiento y valor. Posterior a uso, es importante obtener retroalimentación de todos los involucrados en el proceso de datos para así poder implementar esquemas de mejora continua. Finalmente, de acuerdo a las políticas de almacenamiento, los datos deberán ser destruidos. Se muestra en la Figura VI.1 el ciclo de vida de los datos descrito [67].

El contar con un ciclo de datos bien definido y administrado aumenta notablemente la calidad de datos y convierte a los datos en un activo muy valioso para la organización.

“El único momento en que los datos aportan valor es cuando se utilizan, y si no son de alta calidad en ese momento, su uso puede dar lugar a conclusiones incorrectas, malas decisiones o interacciones negativas... De hecho, una organización pierde valor si sus datos conducen a errores que afectan negativamente a sus partes interesadas.” [67].

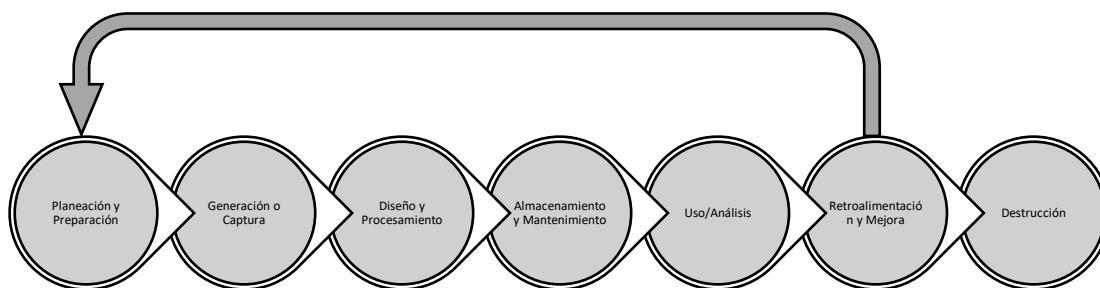


Figura VI.1. Ciclo de vida de los datos [67].

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

Con base en la experiencia obtenida después de haber trabajado con los datos operacionales del Metrobús, se cree que hay puntos de dolor en varias partes del ciclo de vida de los datos dentro de la organización. Se cree que se deben hacer esfuerzos importantes en mejorar la captura de la información de los autobuses, pues durante la crisis, el sismo, fue cuando menos información se tenía. También se identificó que el almacenamiento de los datos era inconsistente, pues no para todos los viajes se tenían los mismos indicadores ni estructura de datos. A su vez, se identificó que la generación de estimaciones tenía inconsistencias, por lo que desde la etapa de diseño y procesamiento hay errores o reglas que no se cumplen. En general, se observa que el proceso de datos no está estandarizado y tampoco automatizado, lo que da lugar a errores manuales durante el proceso.

Sin duda es importante que el Metrobús dedique esfuerzos para poder contar con mejores datos con los que se puedan generar conocimiento y valor para así aumentar su resiliencia. También es importante reconocer que el tener una política de datos abiertos es un gran paso que el Metrobús ha tomado, sin embargo, es fundamental que esos datos tengan más calidad para así facilitar e incentivar su uso.

VI.3.3. Sistemas autónomos en el transporte público

En la actualidad la mayoría de los sistemas de transporte público cuentan con un órgano central que regula la operación de todos los móviles en la red, este es el caso para el Metrobús. Desde esta estación central los conductores de los autobuses reciben las instrucciones que regulan la operación del sistema. Por ejemplo, en caso de algún accidente el conductor del autobús notifica al centro de control, en él se toman decisiones y posteriormente el centro de control le indica al autobús cómo debe proceder ante la situación.

El contar con un órgano de regulación central es bueno, pues permite que el sistema esté coordinado, pero en términos de eficiencia se ha demostrado que no es lo más eficiente. Reemplazar el sistema de control central puede traer beneficios sustanciales en la operación regular de un sistema de transporte público. La propuesta en la que múltiples autores han coincidido es remover el órgano de control central haciendo que los móviles, en el caso del Metrobús, autobuses, tengan la capacidad de tomar decisiones basadas en su entorno. Este tipo de sistemas descentralizados, se les conoce como autónomos o adaptativos [62], [68].

Para que un sistema autónomo pueda ser interactivo, debe conocer su entorno físico y su objetivo, así como su estado interno actual. Esta capacidad ayuda a los sistemas a percibir, inferir y reaccionar mediante la auto-adaptación. Un concepto común sobre el proceso de auto-adaptación es la capacidad de un sistema para supervisar de forma autónoma su comportamiento y, eventualmente, modificar el mismo en función de los cambios en el entorno operativo o en el propio sistema [68], [69].

Si el Metrobús fuera autónomo, cada autobús debería ser capaz de conocer la posición de los autobuses vecinos, así como su posición y estatus, de esta forma en caso de algún incidente, la capacidad de respuesta sería mucho más rápida y eficiente. Además, bajo situaciones normales, está probado que un sistema autónomo capaz de regular el headway reduciría el tiempo de viaje hasta en un 20%, mejorando drásticamente la experiencia del usuario [62].

Descentralizar la operación del Metrobús, sin duda haría que este fuera mucho más resiliente. Es importante recalcar que cualquier proceso en busca de aumentar la resiliencia en cualquier sistema, brindará beneficios y eficiencia, no solo en situaciones de emergencia, sino también durante la operación regular.

VI.3.4. Implementación de sistemas inteligentes del transporte

La aplicación de tecnologías avanzadas de comunicación, electrónica e información para mejorar la eficiencia, la seguridad y la fiabilidad de los sistemas de transporte se denomina comúnmente Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS, por sus siglas en inglés) [70].

Los ITS han permitido la recolección automatizada de datos de transporte, así como su transmisión eficiente, lo que permite tomar mejores decisiones, principalmente en operaciones "en tiempo real". La implementación de cualquier ITS implica un componente físico (hardware) y un componente digital (software), lo cual muchas veces representa un reto importante para los tomadores de decisiones, pues hay que destinar importantes recursos para llevar a cabo dichas implementaciones. Además, estos sistemas, en la mayoría de los casos, generan un gran volumen de datos de forma continua, lo que implica que se debe tener la infraestructura digital adecuada para poder tratar dichos datos y obtener valor de ellos [70].

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

Existen diferentes tipos de ITS, el objetivo de todos es el mismo, a través del procesamiento y análisis de datos buscar que el transporte sea más eficiente brindándole una mejor experiencia a los usuarios. En la Figura VI.2 se muestra el flujo de datos en un sistema inteligente de transporte. El flujo comienza con la recolección de datos, ya sea información que proviene de los móviles, sensores en los vehículos, y/o de la infraestructura, sensores fijos en la red y/o de factores externos, como centros de control. Los datos de estas tres diferentes fuentes son capturados y enviados a un centro de datos, donde son procesados y almacenados para posteriormente generar conocimiento y afectar positivamente el comportamiento de los vehículos, infraestructura y factores externos [71].

Dependiendo de la complejidad del ITS, puede que todo este proceso sea inmediato (tiempo real) o que sea bajo demanda. Por un lado, en caso de que sea inmediato, se busca automatizar acciones sobre la infraestructura y/o los vehículos como por ejemplo alterar el orden semafórico o motivar al conductor del vehículo a que cambie su velocidad. Por otro lado, en caso de que este proceso no sea inmediato, aun así, es muy efectivo, pues se puede analizar la información del día/semana anterior y con eso tomar acciones manuales sobre la infraestructura y/o los vehículos [71].

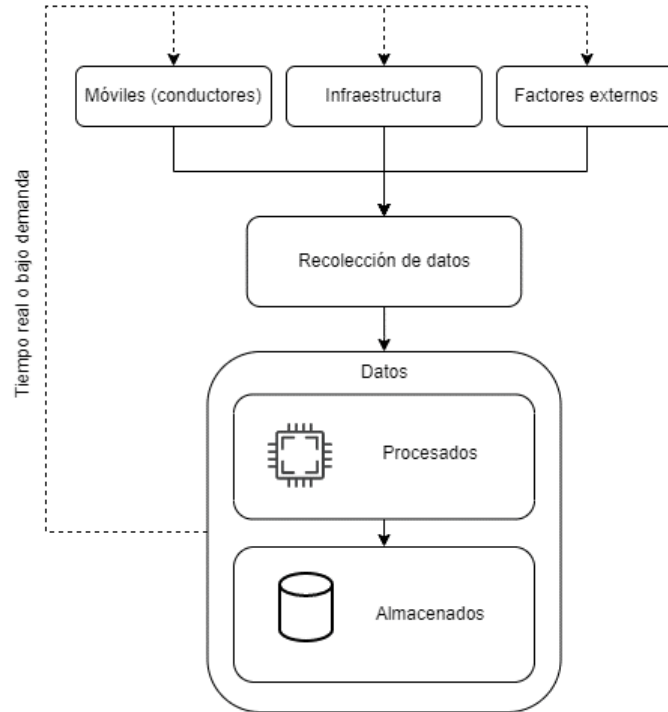


Figura VI.2. Flujo de datos en un Sistema de Transporte Inteligente [71].

El Metrobús ya cuenta con ITS, por ejemplo, el que se pueda conocer la ubicación de todos los autobuses, los tiempos de llegada y salida a cada estación, entre otros datos es gracias a este tipo de sistemas. Sin embargo, no se han implementado sistemas de transporte inteligentes más avanzados o complejos (acciones en tiempo real), los cuales podrían mejorar la eficiencia del Metrobús notablemente, lo que implicaría más resiliencia en el sistema.

Estudios que consideran la implementación de ITS en el Metrobús ya se han efectuado, por ejemplo, en 2020 se estudió la factibilidad de implementar un sistema de prioridad de paso semafórica (TSP, por sus siglas en inglés) en la Línea 1 del Metrobús. Los resultados de esta implementación representarían una reducción del tiempo de recorrido de entre 5 y 10%. Además, el contar con un sistema así durante una emergencia priorizaría el flujo sobre el carril confinado por donde no solo transitaría el Metrobús, sino también los vehículos de emergencia.

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

VI.3.5. *Mayor densidad de puntos de quiebre en el sistema*

Con base en los análisis realizados, el día del sismo muchos autobuses quedaron atrapados dentro del carril confinado del Metrobús después de la ocurrencia del sismo y de los múltiples incidentes en la red. Esto se debió a que los autobuses no pueden abandonar el carril confinado hasta que llegan a una terminal. Estos puntos donde un autobús puede abandonar la red son conocidos como puntos de quiebre.

El contar con infraestructura que permita tener más puntos de quiebre a lo largo de la red evitará que ante una próxima emergencia queden autobuses atrapados en la red. Además, en caso de que algunas estaciones deban ser cerradas durante algún tiempo de recuperación post emergencia y se generen nuevas rutas alternativas, como fue el caso de la Línea 2 después del sismo del 9 de septiembre de 2017, estos puntos de quiebre ayudarán notablemente con la operación de las rutas emergentes.

El escenario ideal sería que no se registraran interrupciones en el servicio, pero en caso de que sí se registren, estos puntos de quiebre brindarían una flexibilidad importante al sistema.

VI.3.6. *Usuarios y comunidad informados*

Otra estrategia para aumentar la resiliencia en el Metrobús, es informando y/o involucrando más a las comunidades y usuarios en su operación [72]. Por un lado, es importante que los usuarios estén informados de qué hacer y cómo responder ante una emergencia, para así tener una respuesta más rápida y eficaz. Por otro lado, brindarle conocimiento de la situación puntual de una estación, ruta o línea a los usuarios puede influir en el comportamiento del usuario, por lo que el mismo usuario estaría tomando acciones para beneficiarse y a su vez beneficiar al sistema.

Contar con usuarios informados sin duda aportaría muchísima resiliencia al Metrobús, pues así la comunidad a la que el sistema sirve se vuelve una aliada que cambia o ajusta sus hábitos para que el sistema pueda ser mucho más eficiente y así su experiencia de usuario mejore mucho. Además, esto es un círculo virtuoso, pues mientras más mejore la experiencia del usuario, el usuario buscará ser más eficiente usando el sistema, generando cada vez más resiliencia.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES

Los sistemas BRT, son sistemas de transporte urbano que brindan soluciones rápidas y no tan costosas a las demandas de movilidad de las grandes urbes. En Latinoamérica son parte fundamental de la movilidad, ya que esta es la región con más demanda del mundo. Sin embargo, en los próximos años estos sistemas enfrentaran un corte de realidad sin precedentes, pues muchas ciudades en Latinoamérica han centrado toda su infraestructura de transporte en los sistemas BRT, lo cual no es bueno. Estas ciudades se han visto en graves problemas debido a que los corredores BTR han alcanzado su máximo nivel de servicio y se han tenido que realizar inversiones para aumentar la capacidad de los corredores. Un ejemplo de esta situación es la Línea 1 del Metrobús de la CDMX. El problema es que llegará un momento en el que no habrá inversión viable que permita aumentar la capacidad de un corredor. Para evitar que se llegue a esta situación las ciudades tendrán que satisfacer la creciente demanda de movilidad empleando diferentes modos de transporte masivo.

El escenario para las grandes ciudades de países en vías de desarrollo con riesgos asociados a desastres naturales y el cambio climático en aumento, combinado con la concentración masiva de bienes y gente, no es nada prometedor. Conceptos como la resiliencia, brindan esperanza en medio de este panorama.

La resiliencia es un concepto que aún está en construcción. Personas de diferentes contextos la han empleado para describir situaciones similares. Se espera que en el futuro se pueda definir y delimitar este concepto. De lo que no hay duda, es que la mejor forma de combatir y mitigar los riesgos es por medio de la resiliencia. Se sabe y se entiende que la resiliencia de un sistema no es exclusiva para este, debido a que los sistemas siempre están interconectados, sin embargo, esto también implica que el colapso de uno muchas veces significa el colapso del otro.

Ante el sismo del 19 de septiembre de 2017, el Metrobús tuvo una reacción reactiva, es decir sin planeación previa. Cuando un sistema reacciona reactivamente pierde eficiencia y muchas

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar Heading 1, Primer orden al texto que desea que aparezca aquí.

veces tiene que interrumpir el servicio que proporciona, lo cual fue el caso del Metrobús en dicho sismo.

En este trabajo era fundamental medir el impacto del sismo del 19 de septiembre en la red. Después de múltiples análisis de minería de datos y un modelo de simulación de tránsito se pudo determinar lo siguiente:

- Las líneas que tienen mayor demanda y mayor longitud se encuentran localizadas en las zonas con mayor exposición (mayor concentración de bienes y servicios), las grandes demandas, que sobrepasan la oferta ofrecida por el sistema de forma importante, aumentan la vulnerabilidad del sistema, resultando en sistemas con alta propensión al riesgo.
- Las zonas de daño estructural están directamente relacionadas a los mayores tiempos de espera, es decir mientras más cerca esté una estación de una zona de daño estructural mayores tiempos de espera presentará.
- Al tratarse de estaciones que están conectadas sobre la misma línea, el que en una estación se presente algún incidente impacta de igual o menor forma a las estaciones vecinas.
- El impacto del sismo en la red implicó que en promedio el tiempo de recorrido de la mayoría de las líneas, a excepción de la Línea 5, crecieron en un 30%.
- Después del sismo, se presenta un tiempo de recuperación de 1 a 5 días en la mayoría de las líneas, a excepción de la Línea 5, posterior a ese tiempo de recuperación el sistema regresa a las dinámicas previas al sismo.
- Debido a colapsos muy cercanos, varias estaciones tuvieron que suspender el servicio por más de una semana, este fue el caso para Línea 2. Lo que resultó en la creación de rutas emergentes, estas eran más cortas ya que recorrían los tramos entre estaciones cerradas. A pesar de que esta fue una estrategia reactiva, se considera que fue una buena estrategia para continuar con el servicio, pues redujo el tiempo de recuperación de la línea a costa de sacrificar un poco la experiencia del usuario.
- Las líneas cortas con baja demanda son más resilientes, tal como fue el caso de la Línea 5 en 2017. Esto se debe a que, ante una menor propensión al riesgo, son menores los

esfuerzos que hay que emplear para mitigar dicho riesgo. Casos como el de la Línea 5 comprueban que hay que hacer esfuerzos muy importantes para aumentar la resiliencia en las otras líneas.

- Definitivamente el primer paso para la resiliencia del Metrobús tiene que ser contar con mejores datos y procesos de datos, pues es necesario poder contar con datos que garanticen ser la fuente de la verdad. Para así poder comparar y medir el impacto de las múltiples estrategias que se puedan implementar en el sistema.
- Queda claro que el camino a la resiliencia es un proceso iterativo, en el cual hay que planear, ejecutar y medir múltiples veces las estrategias que encaminen al Metrobús a un estado de mayor resiliencia.
- Las diferentes estrategias de resiliencia deben de tomar en cuenta las condiciones particulares del Metrobús, así como las condiciones generales de otros sistemas de transporte público de la urbe. El generar e implementar estrategias de resiliencia en los diferentes sistemas de transporte público tiene que ser un esfuerzo interinstitucional en donde existan deseos de intensa cooperación.
- La comunidad tiene que ser un pilar fundamental en cualquier esfuerzo en busca de aumentar la resiliencia. Se necesita el entendimiento, apoyo y cooperación de los usuarios en todo el proceso para tener mejor resultados en menor tiempo.

No hay un único camino hacia la resiliencia, pero la resiliencia es el camino hacia un mejor futuro. Dentro del Metrobús, existen muchos sectores desde los cuales se pueden establecer iniciativas que aporten resiliencia y lo mejor es que todas estas iniciativas a pesar que partan de diferentes orígenes, no se interpondrán.

Se entiende que para estudiar la resiliencia del Metrobús y proponer estrategias para aumentarla, el Metrobús no sólo dependerá de él mismo, deberá de tomar en cuenta otros organismos e instituciones. Aunado a esto habrá que establecer un marco de trabajo, común para todos los sistemas de transporte público de la Ciudad, para evaluar diferentes estrategias que aporten resiliencia. De esta forma se obtendrán cuáles propuestas son las que se deban priorizar debido a su alta efectividad para cada sistema.

REFERENCIAS

- [1] M. Suárez Castro, *Entre mi casa y mi destino: Movilidad y transporte en México: Encuesta Nacional de Movilidad*. 2015.
- [2] Colegio Mexicano de Ingenieros Civiles A.C., *Movilidad Urbana en la Ciudad de México y Zona Metropolitana*. 2013. [Online]. Available: <https://vdocuments.mx/movilidad-urbana-ciudad-de-mexico-flr-ok-1.html>
- [3] J. L. Baker, *Climate Change, Disaster Risk, and the Urban Poor*. Washington, D.C.: World Bank, 2012. doi: 10.1596/978-0-8213-8845-7.
- [4] BRT+ Centre of Excellence y EMBARQ, “Mexico City,” 2020. https://brtdata.org/location/latin_america/mexico/mexico_city (accessed Mar. 29, 2020).
- [5] Asian Development Bank, “Moving from Risk to Resilience.” p. 38, 2013. [Online]. Available: <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/31200/moving-risk-resilience-sustainable-urban-development-pacific.pdf>
- [6] Agencia de Resiliencia de la Ciudad de Mexico, “Estrategia de Resiliencia de la Ciudad de México,” *Gac. Of. la Ciudad México*, pp. 13–92, 2018, Accessed: Mar. 30, 2020. [Online]. Available: <https://www.resiliencia.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Estrategia de Resiliencia CDMX -- Gaceta Oficial CDMX.pdf>
- [7] Institute for Transportation and Development Policy, “What is BRT?,” 2020. <https://www.itdp.org/library/standards-and-guides/the-bus-rapid-transit-standard/what-is-brt/> (accessed Mar. 26, 2020).
- [8] H. Levinson *et al.*, *Bus Rapid Transit, Volume 1: Case Studies in Bus Rapid Transit*, vol. 1. 2003. doi: 10.17226/24726.
- [9] P. Midgley, “BRT: A Historical Perspective,” 2005. Accessed: Mar. 26, 2020. [Online]. Available: <http://siteresources.worldbank.org/INTURBANTRANSPORT/Resources/340136-1120662668760/midgley.pdf>

- [10] BRT+ Centre of Excellence y EMBARQ, “Global BRTData,” *Version 3.48*, 2020. <http://brtdata.org/> (accessed Mar. 26, 2020).
- [11] World Bank, “What We Do,” *Financial Products and Services*, 2020. <https://www.worldbank.org/en/about/what-we-do> (accessed Mar. 27, 2020).
- [12] G. Bel and M. Holst, “Evaluation of the impact of Bus Rapid Transit on air pollution in Mexico City,” *Transp. Policy*, vol. 63, no. March 2017, pp. 209–220, 2018, doi: 10.1016/j.tranpol.2018.01.001.
- [13] La Jornada, “Lista, en 6 meses la línea 5 de Metrobús, de Río de los Remedios a San Lázaro,” 2013. <https://www.jornada.com.mx/2013/03/27/capital/036n1cap> (accessed Mar. 26, 2020).
- [14] Excélsior, “Inicia obra por Línea 6 del Metrobús,” 2014. <https://www.excelsior.com.mx/comunidad/2014/08/06/974745> (accessed Mar. 26, 2020).
- [15] El Financiero, “Mancera inaugura Línea 6 del Metrobús,” 2016. <https://www.elfinanciero.com.mx/nacional/mancera-inaugura-linea-del-metrobus> (accessed Mar. 29, 2020).
- [16] La Razón, “Inician obras de carril confinado de la Línea 7 del Metrobús,” 2017. <https://www.razon.com.mx/ciudad/inician-obras-de-carril-confinado-de-la-linea-7-del-metrobus/> (accessed Mar. 26, 2020).
- [17] El Universal, “Inicia operaciones la L7 del Metrobús,” 2018. <https://www.eluniversal.com.mx/metropoli/cdmx/inicia-operaciones-la-l7-del-metrobus> (accessed Mar. 26, 2020).
- [18] El Universal, “FCH: Línea 12, esfuerzo de voluntades; reconoce a Ebrard,” 2012. <https://archivo.eluniversal.com.mx/notas/879793.html> (accessed Mar. 29, 2020).
- [19] Metrobús, “Acerca de,” 2020. <https://www.metrobus.cdmx.gob.mx/dependencia/acerca-de> (accessed Mar. 29, 2020).

- [20] INEGI, “Instituto Nacional de Estadística y Geografía,” 2020.
- [21] Metrobús, “Fichas Técnicas,” 2020. <https://www.metrobus.cdmx.gob.mx/dependencia/acerca-de/fichas-tecnicas> (accessed Mar. 29, 2020).
- [22] S. K. Singh *et al.*, “Deadly intraslab Mexico earthquake of 19 September 2017 (Mw 7.1): Ground motion and damage pattern in Mexico City,” *Seismol. Res. Lett.*, vol. 89, no. 6, pp. 2193–2203, 2018, doi: 10.1785/0220180159.
- [23] E. Reinoso, “Riesgo sísmico de la Ciudad de México,” *Acad. Ing. AI. Ciudad México*, p. 50, 2007, [Online]. Available: http://www.ai.org.mx/ai/archivos/coloquios/2/Riesgo_sismico_de_la_Ciudad_de_Mexico.pdf
- [24] Gobierno de la Ciudad de México, “Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal,” 2017. Accessed: Mar. 15, 2021. [Online]. Available: <https://www.seduvi.cdmx.gob.mx/storage/app/uploads/public/5a3/5af/e2e/5a35afe2e10a5769682752.pdf>
- [25] D. Serre, B. Barroca, and R. Laganier, “Resilience and Urban Risk Management.” CRC Press, London, p. 192, 2012. doi: <https://doi.org/10.1201/b12994>.
- [26] B. Barroca and D. Serre, “Behind the barriers: A resilience conceptual model,” *Sapiens*, vol. 6, no. 1, 2013, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/287087667_Behind_The_Barriers_A_Resilience_Conceptual_Model
- [27] BBC, “¿Por qué algunos edificios se derrumbaron y otros no en el terremoto de México? - BBC News Mundo,” Sep. 20, 2017. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-41342143> (accessed Mar. 15, 2021).
- [28] CMIC, “Diagnóstico del Sector de la Construcción y Propuestas para el Impulso de la Infraestructura en México,” Ciudad de México, 2016. Accessed: Mar. 15, 2021. [Online]. Available: [https://www.cmic.org.mx/cmic/ceesco/2016/resumen_ejecutivo_vfinal_211215\(1\).pdf](https://www.cmic.org.mx/cmic/ceesco/2016/resumen_ejecutivo_vfinal_211215(1).pdf)

- [29] El Economista, “‘Autoconstruidas’, 63% de las viviendas en México: Conavi | El Economista,” 2010. <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Autoconstruidas-63-de-las-viviendas-en-Mexico-Conavi--20100507-0067.html> (accessed Mar. 15, 2021).
- [30] P. Quinde, E. Reinoso, and C.-A. Luis, “Cumulative damage over time of 2D-frames systems subjected to multiple long-duration recorded earthquakes in the lakebed zone of Mexico City,” *17th World Conf. Earthq. Eng. 17WCEE*, no. September, pp. 0–11, 2020.
- [31] Instituto para la Seguridad de las Construcciones en la Ciudad de México, “CDMX,” 2021. <https://www.isc.cdmx.gob.mx/> (accessed Mar. 15, 2021).
- [32] Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, “Estrategia Local de Acción Climática de la Ciudad de México 2014-2020,” *Gac. Of. la Ciudad México*, p. 76, 2016, [Online]. Available: <http://cgsservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/5489.pdf>
- [33] Google Trends, “Resilience - Explorar - Google Trends,” 2021. <https://trends.google.com/trends/explore?date=all&q=Resilience> (accessed Mar. 29, 2020).
- [34] I. Almufti *et al.*, “REDi™ Rating System Resilience-based Earthquake Design Initiative for the Next Generation of Buildings,” no. October, pp. 1–133, 2013.
- [35] G. P. Cimellaro, “Resilience-based design (RBD),” *Geotech. Geol. Earthq. Eng.*, vol. 41, pp. 31–48, 2016, doi: 10.1007/978-3-319-30656-8_2.
- [36] H. Masoomi and J. W. van de Lindt, “Community-Resilience-Based Design of the Built Environment,” *ASCE-ASME J. Risk Uncertain. Eng. Syst. Part A Civ. Eng.*, vol. 5, no. 1, p. 04018044, 2019, doi: 10.1061/ajrua6.0000998.
- [37] N. Dominguez, “Multi-scale modeling of urban regions in the framework of the Resilience-Based Design,” no. March, 2018.
- [38] Gobierno de la Ciudad de México, “Ciudad resiliente.,” pp. 1–275, 2020.
- [39] Agencia de Resiliencia de la Ciudad de Mexico, “Aprender del Sismo para ser más

- Resilientes,” 2018. Accessed: Mar. 29, 2020. [Online]. Available: www.tn.com.ar
- [40] 100 Resilient Cities, “About Us,” 2019. <https://www.100resilientcities.org/> (accessed Mar. 30, 2020).
- [41] W. Steele and C. Legacy, “Critical Urban Infrastructure,” *Urban Policy Res.*, vol. 35, no. 1, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1080/08111146.2017.1283751.
- [42] FEMA, “Critical infrastructure,” *Strateg. Foresight Initiat.*, no. June, p. 7, 2013, doi: 10.1007/978-1-4020-4399-4_341.
- [43] ASCE, *Guiding Principles for the Nation’s Critical Infrastructure*. 2009. Accessed: Mar. 30, 2020. [Online]. Available: www.pubs.asce.org
- [44] E. Reinoso, P. Quinde, L. Buendía, and S. Ramos, “Intensity and damage statistics of the September 19, 2017 Mexico earthquake: Influence of soft story and corner asymmetry on the damage reported during the earthquake,” *Earthq. Spectra*, 2020, doi: 10.1177/8755293020981981.
- [45] Servicio Sismológico Nacional (SSN), “Red de estaciones sismológicas | UNAM, México,” 2021. <http://www.ssn.unam.mx/acerca-de/estaciones/> (accessed Jul. 30, 2021).
- [46] IINGEN-UNAM, “Base de datos de registros acelerográficos de la Red Sísmica Mexicana,” 2018. <https://aplicaciones.iingen.unam.mx/acelerogramasrsm/redacelerografica.aspx> (accessed Jul. 30, 2021).
- [47] USGS, “Earthquake Hazards Program - M 7.1 - 1 km S of Matzaco, Mexico,” 2020. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us2000ar20/shakemap/pgs> (accessed Jul. 30, 2021).
- [48] Infobae, “Después del terremoto, caos de tránsito: el infierno del regreso a casa para miles de mexicanos.,” 2017. <https://www.infobae.com/america/mexico/2017/09/19/despues-del-terremoto-caos-de-transito-el-infierno-del-regreso-a-casa-para-miles-de-mexicanos/> (accessed Mar. 30, 2020).

- [49] Excélsior, “Tras sufrir daños, transporte con suspensiones provisionales en CDMX,” 2017. <https://www.excelsior.com.mx/comunidad/2017/09/24/1190480> (accessed Mar. 26, 2020).
- [50] Agencia de Resiliencia de la Ciudad de Mexico - Bain & Company, “Marco teórico para identificar iniciativas para Incrementar la Resiliencia Sísmica de una Ciudad,” p. 35, 2018.
- [51] CENAPRED, “Atlas Nacional de Riesgos,” 2020. <http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/eventos.html> (accessed Mar. 26, 2020).
- [52] U. Fayyad, G. Piatetsky-Shapiro, and S. Padhraic, “From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 9078, no. 3, pp. 637–648, 2015, doi: 10.1007/978-3-319-18032-8_50.
- [53] D. Liang, L. Wang, F. Chen, and H. Guo, “Scientific big data and Digital Earth,” *Chinese Sci. Bull.*, vol. 59, no. 12, pp. 1047–1054, 2014, doi: 10.1360/972013-1054.
- [54] Forbes, “175 Zettabytes By 2025,” 2018. <https://www.forbes.com/sites/tomcoughlin/2018/11/27/175-zettabytes-by-2025/?sh=74e5699e5459> (accessed Aug. 17, 2021).
- [55] P. V. Subba Reddy, “Data Mining and Fuzzy Data Mining Using MapReduce Algorithms,” *Intech*, p. 13, 2021, doi: [Http://dx.doi.org/10.5772/55358](http://dx.doi.org/10.5772/55358).
- [56] F. A. Rahman, S. M. Shamsuddin, S. Hasan, and N. A. Haris, “A review of KDD-data mining framework and its application in logistics and transportation,” *Int. J. Supply Chain Manag.*, vol. 5, no. 2, pp. 77–84, 2016.
- [57] S. Wang and C. F. Eick, “A data mining framework for environmental and geo-spatial data analysis,” *Int. J. Data Sci. Anal.*, vol. 5, no. 2–3, pp. 83–98, 2018, doi: 10.1007/s41060-017-0075-9.
- [58] Informatica, “What is Data Quality,” 2021.

<https://www.informatica.com/resources/articles/what-is-data-quality.html> (accessed Aug. 20, 2021).

- [59] C. Batini and M. Scannapieco, *Data Quality Dimensions*. 2016. doi: 10.1007/978-3-319-24106-7_2.
- [60] C. Batini, A. Rula, M. Scannapieco, and G. Viscusi, “From data quality to big data quality,” *J. Database Manag.*, vol. 26, no. 1, pp. 60–82, 2015, doi: 10.4018/JDM.2015010103.
- [61] A. Anwar, W. Zeng, and S. M. Arisona, “Time-space diagram revisited,” *Transp. Res. Rec.*, vol. 2442, no. 2442, pp. 1–7, 2014, doi: 10.3141/2442-01.
- [62] G. Carreón, C. Gershenson, and L. A. Pineda, “Improving public transportation systems with self-organization: A headway-based model and regulation of passenger alighting and boarding,” *PLoS One*, vol. 12, no. 12, Dec. 2017, doi: 10.1371/JOURNAL.PONE.0190100.
- [63] C. Bhanuprakash, Y. S. Nijagunarya, and M. A. Jayaram, “A Simple Approach to SQL Joins in a Relational Algebraic Notation,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 104, no. 4, pp. 18–26, 2014, doi: 10.5120/18190-9099.
- [64] J. Nguyen, S. T. Powers, N. Urquhart, T. Farrenkopf, and M. Guckert, “An overview of agent-based traffic simulators,” *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.*, vol. 12, p. 100486, 2021, doi: 10.1016/j.trip.2021.100486.
- [65] T. Azevedo, P. J. M. de Araújo, R. J. F. Rossetti, and A. P. C. Rocha, “JADE, TraSMAPI and SUMO: A tool-chain for simulating traffic light control,” no. January 2015, 2016, doi: 10.13140/2.1.2739.4886.
- [66] P. A. Lopez *et al.*, “Microscopic Traffic Simulation using SUMO,” *IEEE Conf. Intell. Transp. Syst. Proceedings, ITSC*, vol. 2018-Novem, pp. 2575–2582, 2018, doi: 10.1109/ITSC.2018.8569938.
- [67] L. Sebastian-Coleman, “Data Life Cycle Processes,” *Meet. Challenges Data Qual.*

Manag., pp. 257–280, 2022, doi: 10.1016/b978-0-12-821737-5.00011-0.

- [68] C. Gershenson, “Self-Organization Leads to Supraoptimal Performance in Public Transportation Systems,” *Cit. Gershenson C*, vol. 6, no. 6, p. 21469, 2011, doi: 10.1371/journal.pone.0021469.
- [69] E. Vassev, “Autonomous and Adaptive Systems | Lero,” 2021. <https://lero.ie/research/autonomousandadaptivesystems> (accessed May 09, 2022).
- [70] E. Rello, “Propuesta para reducir los tiempos de viaje del modo de transporte público Metrobús mediante el uso del sistema de prioridad semafórico,” UNAM, 2020. [Online]. Available: <http://132.248.9.195/ptd2020/febrero/0800450/Index.html>
- [71] S. Stephenson, “Automotive applications of high precision GNSS,” no. December, pp. 1–203, 2016, [Online]. Available: <http://eprints.nottingham.ac.uk/38716/>
- [72] A. Calderón, “Pautas para el diseño de estrategias de movilidad.” p. 114, 2020.

*“Always remember,
your focus determines your reality”*

ANEXOS

Solicitudes de Información al Metrobús

Ciudad de México a 12 de noviembre de 2019

Lic. Olivia Soberanis Moreno

Área de Atención Ciudadana

Responsable del área de atención a usuarios

P R E S E N T E

Por este medio aprovecho para presentarme, enviarle un cordial saludo, así como solicitarle información relacionada al sistema de transporte METROBÚS. Mi nombre es **Luis Eduardo Chávez Arredondo**, soy estudiante de noveno semestre de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Actualmente, me encuentro realizando mi tesis de licenciatura, la cual lleva por título **“Elaboración de Protocolos de Emergencia para el Sistema BRT de la Ciudad de México: Metrobús. En caso de desastres ocasionados por fenómenos de origen natural”**.

Los datos que me permito solicitarle son dos, **la ubicación de autobuses y la llegada de autobuses a cada estación en tiempo real** para el lapso del **19 al 26** de septiembre de **2017**. Sin mas por el momento, me despido reiterando mi cordial saludo y deseándole tenga una excelente semana.

A T E N T A M E N T E

LUIS EDUARDO CHÁVEZ ARREDONDO

Lic. Olivia Soberanis Moreno

Área de Atención Ciudadana

Responsable del área de atención a usuarios

P R E S E N T E

Por este medio aprovecho para presentarme, enviarle un cordial saludo, así como solicitarle información relacionada al sistema de transporte METROBÚS. Mi nombre es **Luis Eduardo Chávez Arredondo**, soy estudiante de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Actualmente, me encuentro realizando mi tesis de licenciatura, la cual lleva por título **“Elaboración de Protocolos de Emergencia para el Sistema BRT de la Ciudad de México: Metrobús. En caso de desastres ocasionados por fenómenos de origen natural”**.

Los datos que me permito solicitarle son dos, **la ubicación de autobuses y la llegada de autobuses a cada estación en tiempo real en formato xlsx**. Dicha información para el lapso del **12 al 18** de septiembre de **2017**, los días **3, 5, 10, 12, 17, 19, 24, 26 y 31** de octubre de **2017** y los días **7, 14 y 21 de noviembre de 2017**. Sin más por el momento, me despido reiterando mi cordial saludo y deseándole tenga una excelente semana.

A T E N T A M E N T E

LUIS EDUARDO CHÁVEZ ARREDONDO

Ciudad de México a 30 de noviembre de 2020.

Lic. Olivia Soberanis Moreno

Área de Atención Ciudadana

Responsable del área de atención a usuarios

P R E S E N T E

Por este medio aprovecho para presentarme, enviarle un cordial saludo, así como solicitarle información relacionada al sistema de transporte METROBÚS. Mi nombre es **Luis Eduardo Chávez Arredondo**, soy estudiante de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Actualmente, me encuentro realizando mi tesis de licenciatura, la cual lleva por título **“Elaboración de Protocolos de Emergencia para el Sistema BRT de la Ciudad de México: Metrobús. En caso de desastres ocasionados por fenómenos de origen natural”**.

Los datos que me permito solicitarle son dos, **la ubicación de autobuses y la llegada de autobuses a cada estación en tiempo real en formato xlsx**. Dicha información para el lapso del **27 de septiembre al 2 de octubre de 2017**. Sin más por el momento, me despido reiterando mi cordial saludo y deseándole tenga una excelente semana.

A T E N T A M E N T E

LUIS EDUARDO CHÁVEZ ARREDONDO

Ubicación de las estaciones de Metrobús utilizadas

Clave estación	Nombre estación	Latitud (X)	Longitud (Y)
414	414	492470.126	2152672.6
482	482	492068.604	2152489.31
314M	314. Memorial	490692.71	2156223.42
3ANEG	Tres Anegas	483021.645	2157835.61
416OR	416 Oriente	492549.607	2153005.63
416PO	416 Poniente	491682.16	2153154.84
5MAYO	5 de Mayo	490542.773	2155842.07
AEROT1	Terminal 1 - Aeropuerto	491217.522	2148996.48
AEROT2	Terminal 2 - Aeropuerto	491890.344	2147465.73
ALAMO	Álamos	485031.811	2144496.63
ALTAV	Altavista	480437.211	2139706.42
ALVAR	Puente de Alvarado	483901.383	2149391.74
AMERI	Las Américas	485841.576	2144371.61
AMOLI	Andrés Molina	486440.333	2144852.82
AMORE	Amores	482768.16	2144755.91
APATZ	Constitución de Apatzingán	493713.693	2143894.68
APROV	Ampliación Providencia	492091.168	2153923.03
ARAG5	San Juan de Aragón	489779.577	2153966.69
ARAG6	San Juan de Aragón	489767.839	2153810.01
ARCH4	Archivo General de la Nación	487939.142	2148982.83
ARCH5	Archivo General	487991.727	2149208.69
ARGEN	República de Argentina	486186.168	2149229.23
AYTO	Ayuntamiento	481361.617	2133202.09
BACH1	Colegio de Bachilleres 1	479274.201	2157437.2
BACH9	Colegio de Bachilleres 9	493198.628	2152754.86
BALBU	Hospital Balbuena	487806.597	2147868.8
BALDE	Balderas	484377.258	2148162.13
BAMB	Riobamba	486469.628	2154945.94
BELLA	Bellas Artes	485118.093	2149122.08
BOMBI	Bombilla	480263.589	2139212.77
BRAVO	Nicolás Bravo	494612.666	2144393.88
BROTA	Fuentes Brotantes	481669.84	2132745.78
BVIS1	Buenavista. Línea 1.	483937.085	2150290.6
BVIS3	Buenavista - Línea 3	484032.314	2150199.67
BVIS4	Buenavista. Línea 4	484016.969	2150058.71
CALEM	Casas Alemán	490694.793	2153348.97
CAMIN	El Caminero	482224.363	2131750.69
CAMPE	Campeche	482433.116	2146168.61
CANEL	Canela	488507.941	2144850.73
CCH	CCH Oriente	493626.923	2143190.41
CCU	CCU	480312.667	2135650.15
CDEPO	Ciudad de los Deportes	481514.439	2143171.71
CEMED	Centro Médico	483704.032	2145831.59
CENTR	Eje Central_Metrobús_Línea 4	485160.002	2148448.5
CHILE	República de Chile	485780.551	2149289.52
CHILP	Chilpancingo	482308.566	2145813.76
CHOPO	El Chopo	483772.535	2149864.18
CHURU	Río Churubusco	481050.633	2141676.05
CINTU	Ferrocarril de Cintura	487276.043	2149083.42
CIRC1	Circuito	484882.689	2152003.48
CIRC3	Circuito. Línea 3	484868.291	2152105.84
CIUDA	Museo de la Ciudad	486079.33	2148305.58
CJUAN	Canal de San Juan	494118.53	2144696.33
CNORT	Canal del Norte	488405.872	2150564.92
COLET	Santa Coleta	488790.822	2151484.65

ESCAN	Escandón	481734.026	2145583.62
ETIO2	Etiopía. Línea 2	483653.293	2144637.69
ETIO3	Terminal Etiopía-Plaza de la Transparencia	483618.912	2144702.78
EUZKA	Euzkaro	486594.699	2154218.41
EXPOR	Expo Reforma	484167.94	2148772.01
FCUEV	Felix Cuevas	481228.287	2142252.59
FERRO	Ferrocarriles Nacionales	480091.302	2156725.65
FLORE	Ricardo Flores Magón	484687.848	2150839.45
FRANC	Francia	480671.207	2140490.26
GALEA	Deportivo Los Galeana	491812.47	2153767.58
GALEO	General Antonio de León	494565.124	2143420.81
GCANA	Gran Canal	490301.89	2153585.86
GLVZN	Dr. Gálvez	480045.658	2138549.87
GOMA	Goma	489554.809	2144744.2
GUERR	Guerrero	484540.734	2150154.52
GUSTA	Delegación Gustavo A. Madero	488106.31	2154394.73
HAMBU	Hamburgo	483092.541	2148172.14
HEROE	Héroe de Nacozari	484800.118	2152910.24
HGLV	Hospital General La Villa	489329.911	2154002.25
HGRAL	Hospital General	483764.01	2146681.46
HIDL3	Hidalgo	484548.624	2149071
HIDL4	Hidalgo. Línea 4	484655.246	2149220.23
HILV	Hospital Infantil La Villa	488012.559	2154811.07
HRAZA	Hospital La Raza	484911.196	2152582.17
INSRG	Glorieta Insurgentes	482905.937	2147722.45
IPN	Instituto Politécnico Nacional	486031.222	2155118.12
ISABE	Isabel La Católica	485639.266	2148374.53
IZTAC	Iztacalco	489908.945	2144703.83
JOYA	La Joya	482127.485	2131857.79
JUAR3	Juárez. Línea 3	484455.29	2148567.49
JUAR4	Juárez_Metrobús_Línea 4	484456.907	2148555.65
JUPIT	Júpiter	483301.822	2157081.68
LAZR40	Terminal San Lázaro	487909.592	2148511.85
LAZR4P	Terminal San Lázaro	487883.154	2148534.66
LAZR5	Terminal. San Lázaro. Línea 5	487909.7	2148673.07
LEYES	Leyes de Reforma	493076.606	2143252.24
LINDA	Lindavista-Vallejo	484254.451	2155521.93
LIRA	Parque Lira	480117.114	2145955.12
LORET	Loreto Fabela	491514.055	2152537.03
MACEO	Antonio Maceo	480486.033	2145644.23
MAGDA	Magdalena La Salinas	484320.082	2154248.13
MCARR	Martín Carrera	488885.277	2154196.71
MERCE	La Merced	486778.242	2147908.14
MERMO	Mercado Morelos	488080.079	2149634.76
MGLEZ	Manuel González	484344.781	2151388.37
MINA	Mina	484396.088	2149545.72
MIXCA	Mixcalco	487006.179	2149113.33
MOCTZ	Moctezuma	488244.807	2148067.14
MONT6	Montevideo	483857.038	2155614.56
MONTE	Montevideo	483819.302	2155659.96
MORAL	Del Moral	492556.65	2143340.86
MORAZ	Francisco Morazón	493463.234	2152530.13
MOREL	Morelos	487547.535	2149053.25
MSONO	Mercado de Sonora	487017.523	2147660.61
N45	Norte 45	483357.85	2155715.71
N59	Norte 59	482670.668	2155860.76

NAPOL	Nápoles	481762.855	2143974.47
NLEO1	Nuevo León	482155.089	2145303.35
NLEO2	Nuevo León	482190.55	2145489
O101	Oriente 101	488970.485	2151955.81
OBREG	Álvaro Obregón	482692.57	2146962.08
OBRER	Obrero Mundial	483655.383	2145208.88
OLIMP	Villa Olímpica	480510.357	2133966.59
OLIVO	Olivo	480541.807	2140087.07
PATER	La Patera	483508.649	2156527
PATRI	Patriotismo	481355.24	2145715.24
PERIS	Perisur	480452.44	2134527.21
PETRO	Instituto del Petróleo	484717.02	2155414.08
PHUND	Parque Hundido	481383.542	2142809.02
PIEDA	La Piedad	482013.641	2144861.1
PINOS	Pino Suárez	486060.704	2148043.02
PLSJU	Plaza San Juan	484872.925	2148489.79
PN128	Poniente 128	484071.677	2154955.87
PN134	Poniente 134	483941.551	2155306.31
PN146	Poniente 146	483659.577	2156107.7
POLIF	Poliforum	481891.479	2144390.95
POTRE	Potrero	486096.979	2153570.69
PRADE	La Pradera	492707.447	2153253.43
PREPA	Preparatoria 3	489948.768	2154379.66
PROGR	Progreso Nacional	482843.484	2158272.64
PSJA	Pueblo San Juan de Aragón	490948.441	2152906.78
PUSHK	Jardín Pushkin	483815.106	2147349.65
QUIRO	Vasco de Quiroga	490319.913	2155291.58
RAZA1	La Raza. Línea 1.	485432.495	2152710.55
RAZA3	La Raza	485219.433	2152570.74
REFOR	Reforma	483329.384	2148753.95
REMEMI	Río de los Remedios	490963.562	2156899.27
REPBI	Plaza de la República	483495.451	2149095.39
REPBI	Plaza de la República	483827.928	2149185.16
REVOL	Revolución	483672.966	2149566.5
RFRIO	Río Frío	492214.805	2143712.91
RGUAD	Río Guadalupe	489595.974	2153506.92
RMAYO	Río Mayo	491572.262	2143662.74
ROBEL	Cecilio Robelo	487459.446	2147894.66
RODEO	El Rodeo	490816.289	2144190.47
ROJOG	Rojo Gomez	492011.144	2143343.19
ROSAR	El Rosario	479005.717	2156913.78
RTECO	Río Tecolutla	491283.912	2143863.38
SALLE	De La Salle	480708.31	2145945.41
SALVA	El Salvador	485410.602	2148409.96
SBART	San Bartolo	485444.207	2155257.9
SCARL	Museo San Carlos	484181.652	2149326.98
SCOP	Centro SCOP	484626.465	2144563.81
SIMON	San Simón	484622.136	2151695.97
SJOSE	San José de la Escalera	482612.546	2158697.11
SONOR	Sonora	482546.348	2146550.26
TACUB	Terminal Tacubaya. Metrobús. Línea 2	480392.009	2145301.75
TALIS	Talismán	489374.625	2152947.36
TBLAN	Teatro Blanquita	485353.318	2149357.25
TECNO	Tecnoparque	481444.559	2156309.03
TENAY	Metrobus Tenayuca	482163.504	2159440.82
TEPAL	Tepalcates	495021.129	2144060.14
TINSU	Teatro de los Insurgentes	480913.219	2141225.95
TLACO	Tlacotal	489130.324	2144780.52
TLATE	Tlatelolco	484776.383	2151273.81

TOLNA	Tolnahuac	484846.248	2151602.72
TPUEB	Teatro del Pueblo	486633.355	2149165.55
UAMAZ	UAM Azcapotzalco	480737.948	2156599.68
UPIIC	UPIICSA	490509.594	2144416.7
URSUL	Santa Úrsula	481549.861	2132235.13
VALLE	Colonia del Valle	481594.886	2143493.08
VARAG	Villa de Aragón	493776.208	2152240.11
VELSC	José María Velasco	480811.101	2140891.11
VERDE	Indios Verdes	487436.501	2155801.37
VERTI	Doctor Vértiz	484108.221	2144601.43
VIADU	Viaducto	482345.714	2145255.81
VICTO	Victoria	489215.812	2152556.73
VIGA	La Viga	486969.852	2144876.89
VILLA	La Villa	487506.237	2154525.48
VOCAC	Vocacional 5	484192.248	2148599.04
VOLCA	Volcán de Fuego	492418.131	2153566.37
XOLA	Xola	485300.892	2144456.02

Detalle de rutas por Línea.

Línea 1

Fecha	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A11	A12	Día
9/12/2017										Martes
9/13/2017										Miércoles
9/14/2017										Jueves
9/15/2017										Viernes
9/16/2017										Sábado
9/17/2017										Domingo
9/18/2017										Lunes
9/19/2017										Martes
9/20/2017										Miércoles
9/21/2017										Jueves
9/22/2017										Viernes
9/23/2017										Sábado
9/24/2017										Domingo
9/25/2017										Lunes
9/26/2017										Martes
9/27/2017										Miércoles
9/28/2017										Jueves
9/29/2017										Viernes
9/30/2017										Sábado
10/1/2017										Domingo
10/2/2017										Lunes
10/3/2017										Martes
10/4/2017										Miércoles
10/5/2017										Jueves
10/6/2017										Viernes
10/7/2017										Sábado
10/8/2017										Domingo
10/9/2017										Lunes
10/10/2017										Martes
10/11/2017										Miércoles
10/12/2017										Jueves
10/13/2017										Viernes
10/14/2017										Sábado
10/15/2017										Domingo
10/16/2017										Lunes
10/17/2017										Martes
10/18/2017										Miércoles
10/19/2017										Jueves
10/20/2017										Viernes
10/21/2017										Sábado
10/22/2017										Domingo
10/23/2017										Lunes
10/24/2017										Martes
10/25/2017										Miércoles
10/26/2017										Jueves
10/27/2017										Viernes
10/28/2017										Sábado
10/29/2017										Domingo
10/30/2017										Lunes
10/31/2017										Martes
11/1/2017										Miércoles
11/2/2017										Jueves

11/3/2017													Viernes
11/4/2017													Sábado
11/5/2017													Domingo
11/6/2017													Lunes
11/7/2017													Martes
11/8/2017													Miércoles
11/9/2017													Jueves
11/10/2017													Viernes
11/11/2017													Sábado
11/12/2017													Domingo
11/13/2017													Lunes
11/14/2017													Martes
11/15/2017													Miércoles
11/16/2017													Jueves
11/17/2017													Viernes
11/18/2017													Sábado
11/19/2017													Domingo
11/20/2017													Lunes
11/21/2017													Martes

Línea 2

Fecha	C1	C2	C3	C4	C6	C14	C15	C18	C1b	C2b	C3b	
9/12/2017												Martes
9/13/2017												Miércoles
9/14/2017												Jueves
9/15/2017												Viernes
9/16/2017												Sábado
9/17/2017												Domingo
9/18/2017												Lunes
9/19/2017												Martes
9/20/2017												Miércoles
9/21/2017												Jueves
9/22/2017												Viernes
9/23/2017												Sábado
9/24/2017												Domingo
9/25/2017												Lunes
9/26/2017												Martes
9/27/2017												Miércoles
9/28/2017												Jueves
9/29/2017												Viernes
9/30/2017												Sábado
10/1/2017												Domingo
10/2/2017												Lunes
10/3/2017												Martes
10/4/2017												Miércoles
10/5/2017												Jueves
10/6/2017												Viernes
10/7/2017												Sábado
10/8/2017												Domingo
10/9/2017												Lunes
10/10/2017												Martes
10/11/2017												Miércoles
10/12/2017												Jueves
10/13/2017												Viernes
10/14/2017												Sábado

10/15/2017												Domingo
10/16/2017												Lunes
10/17/2017												Martes
10/18/2017												Miércoles
10/19/2017												Jueves
10/20/2017												Viernes
10/21/2017												Sábado
10/22/2017												Domingo
10/23/2017												Lunes
10/24/2017												Martes
10/25/2017												Miércoles
10/26/2017												Jueves
10/27/2017												Viernes
10/28/2017												Sábado
10/29/2017												Domingo
10/30/2017												Lunes
10/31/2017												Martes
11/1/2017												Miércoles
11/2/2017												Jueves
11/3/2017												Viernes
11/4/2017												Sábado
11/5/2017												Domingo
11/6/2017												Lunes
11/7/2017												Martes
11/8/2017												Miércoles
11/9/2017												Jueves
11/10/2017												Viernes
11/11/2017												Sábado
11/12/2017												Domingo
11/13/2017												Lunes
11/14/2017												Martes
11/15/2017												Miércoles
11/16/2017												Jueves
11/17/2017												Viernes
11/18/2017												Sábado
11/19/2017												Domingo
11/20/2017												Lunes
11/21/2017												Martes

Línea 3

Fecha	D1	D2	D3	D4	D7	DIC	
9/12/2017							Martes
9/13/2017							Miercoles
9/14/2017							Jueves
9/15/2017							Viernes
9/16/2017							Sábado
9/17/2017							Domingo
9/18/2017							Lunes
9/19/2017							Martes
9/20/2017							Miércoles
9/21/2017							Jueves
9/22/2017							Viernes
9/23/2017							Sábado
9/24/2017							Domingo

9/25/2017							Lunes
9/26/2017							Martes
9/27/2017							Miércoles
9/28/2017							Jueves
9/29/2017							Viernes
9/30/2017							Sábado
10/1/2017							Domingo
10/2/2017							Lunes
10/3/2017							Martes
10/4/2017							Miércoles
10/5/2017							Jueves
10/6/2017							Viernes
10/7/2017							Sábado
10/8/2017							Domingo
10/9/2017							Lunes
10/10/2017							Martes
10/11/2017							Miércoles
10/12/2017							Jueves
10/13/2017							Viernes
10/14/2017							Sábado
10/15/2017							Domingo
10/16/2017							Lunes
10/17/2017							Martes
10/18/2017							Miércoles
10/19/2017							Jueves
10/20/2017							Viernes
10/21/2017							Sábado
10/22/2017							Domingo
10/23/2017							Lunes
10/24/2017							Martes
10/25/2017							Miércoles
10/26/2017							Jueves
10/27/2017							Viernes
10/28/2017							Sábado
10/29/2017							Domingo
10/30/2017							Lunes
10/31/2017							Martes
11/1/2017							Miércoles
11/2/2017							Jueves
11/3/2017							Viernes
11/4/2017							Sábado
11/5/2017							Domingo
11/6/2017							Lunes
11/7/2017							Martes
11/8/2017							Miércoles
11/9/2017							Jueves
11/10/2017							Viernes
11/11/2017							Sábado
11/12/2017							Domingo
11/13/2017							Lunes
11/14/2017							Martes
11/15/2017							Miércoles
11/16/2017							Jueves
11/17/2017							Viernes
11/18/2017							Sábado
11/19/2017							Domingo
11/20/2017							Lunes
11/21/2017							Martes

Línea 4

Fecha	E1	E2	E3	
9/12/2017				Martes
9/13/2017				Miercoles
9/14/2017				Jueves
9/15/2017				Viernes
9/16/2017				Sábado
9/17/2017				Domingo
9/18/2017				Lunes
9/19/2017				Martes
9/20/2017				Miércoles
9/21/2017				Jueves
9/22/2017				Viernes
9/23/2017				Sábado
9/24/2017				Domingo
9/25/2017				Lunes
9/26/2017				Martes
9/27/2017				Miércoles
9/28/2017				Jueves
9/29/2017				Viernes
9/30/2017				Sábado
10/1/2017				Domingo
10/2/2017				Lunes
10/3/2017				Martes
10/4/2017				Miércoles
10/5/2017				Jueves
10/6/2017				Viernes
10/7/2017				Sábado
10/8/2017				Domingo
10/9/2017				Lunes
10/10/2017				Martes
10/11/2017				Miércoles
10/12/2017				Jueves
10/13/2017				Viernes
10/14/2017				Sábado
10/15/2017				Domingo
10/16/2017				Lunes
10/17/2017				Martes
10/18/2017				Miércoles
10/19/2017				Jueves
10/20/2017				Viernes
10/21/2017				Sábado
10/22/2017				Domingo
10/23/2017				Lunes
10/24/2017				Martes
10/25/2017				Miércoles
10/26/2017				Jueves
10/27/2017				Viernes
10/28/2017				Sábado
10/29/2017				Domingo
10/30/2017				Lunes
10/31/2017				Martes
11/1/2017				Miércoles
11/2/2017				Jueves
11/3/2017				Viernes
11/4/2017				Sábado
11/5/2017				Domingo

11/6/2017				Lunes
11/7/2017				Martes
11/8/2017				Miércoles
11/9/2017				Jueves
11/10/2017				Viernes
11/11/2017				Sábado
11/12/2017				Domingo
11/13/2017				Lunes
11/14/2017				Martes
11/15/2017				Miércoles
11/16/2017				Jueves
11/17/2017				Viernes
11/18/2017				Sábado
11/19/2017				Domingo
11/20/2017				Lunes
11/21/2017				Martes

Línea 6

Fecha	G1	G2	G3	
9/12/2017				Martes
9/13/2017				Miercoles
9/14/2017				Jueves
9/15/2017				Viernes
9/16/2017				Sábado
9/17/2017				Domingo
9/18/2017				Lunes
9/19/2017				Martes
9/20/2017				Miércoles
9/21/2017				Jueves
9/22/2017				Viernes
9/23/2017				Sábado
9/24/2017				Domingo
9/25/2017				Lunes
9/26/2017				Martes
9/27/2017				Miércoles
9/28/2017				Jueves
9/29/2017				Viernes
9/30/2017				Sábado
10/1/2017				Domingo
10/2/2017				Lunes
10/3/2017				Martes
10/4/2017				Miércoles
10/5/2017				Jueves
10/6/2017				Viernes
10/7/2017				Sábado
10/8/2017				Domingo
10/9/2017				Lunes
10/10/2017				Martes
10/11/2017				Miércoles
10/12/2017				Jueves
10/13/2017				Viernes
10/14/2017				Sábado
10/15/2017				Domingo
10/16/2017				Lunes

10/17/2017				Martes
10/18/2017				Miércoles
10/19/2017				Jueves
10/20/2017				Viernes
10/21/2017				Sábado
10/22/2017				Domingo
10/23/2017				Lunes
10/24/2017				Martes
10/25/2017				Miércoles
10/26/2017				Jueves
10/27/2017				Viernes
10/28/2017				Sábado
10/29/2017				Domingo
10/30/2017				Lunes
10/31/2017				Martes
11/1/2017				Miércoles
11/2/2017				Jueves
11/3/2017				Viernes
11/4/2017				Sábado
11/5/2017				Domingo
11/6/2017				Lunes
11/7/2017				Martes
11/8/2017				Miércoles
11/9/2017				Jueves
11/10/2017				Viernes
11/11/2017				Sábado
11/12/2017				Domingo
11/13/2017				Lunes
11/14/2017				Martes
11/15/2017				Miércoles
11/16/2017				Jueves
11/17/2017				Viernes
11/18/2017				Sábado
11/19/2017				Domingo
11/20/2017				Lunes
11/21/2017				Martes
11/22/2017				Miércoles

“Skill is the child of patience”