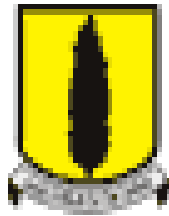


UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL
MAESTRIA EN INGENIERIA CIVIL
INFRAESTRUCTURA VIAL



TESIS

**MODELO DE OPTIMIZACION PARA MEDIR LA
VULNERABILIDAD DE LA RED DE TRANSMILENIO**

PRESENTADO POR: ADRIANA JIMENEZ FLOREZ

**ASESORES DE TESIS: Ph.D MAURICIO SANCHEZ
MsC GERMAN LLERAS**

Bogotá. Enero de 2005

JUS TIFICACION	4
INTRODUCCION	5
OBJETIVOS	7
Objetivo General	7
Objetivos espec ficos	7
CAPITULO I. DESARROLLO DEL MODELO DE OPTIMIZACION	8
1.1 FUNDAMENTO S DEL MODELO	8
1.2 EXPLICACION E INTERPRETACION DE LAS VARIABLES:.....	9
1.2.1 TASA DE FALLA	9
1.2.2 TASA DE REPARACION	10
1.2.3 PROBABILIDAD DE OPERACIÓN DE UN TRAMO	10
1.2.4 COSTO DE LA INTERVENCION	11
1.2.5 RUTAS.....	11
1.2.5.1 Probabilidad de operación de una ruta	11
1.2.5.2 Costo de viajar por una ruta	11
1.2.5.3 Probabilidad de tomar otra opción de ruta	12
1.2.6 COSTO ESPERADO.....	12
1.2.7 SALIDAS DEL MODELO	13
1.3 PROCEDIMIENTO DEL MODELO.....	14
Conclusión capítulo:	16
CAPITULO II. APLICACION DEL MODELO A UN SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO	17
2.1 PRESENTACION DE LA RED DE ESTUDIO	17
2.2 SUPO SICIONES Y CONSIDERACIONES PARA EL MODELO DE TRANSMILENIO	19
2.3 INFORMACION SUMINISTRADA POR TRANSMILENIO	20
2.3.1 PARA DETERMINAR LOS NODOS DEFINITIVOS DE LA RED	20
2.3.2 PARA CALCULAR LA PROBABILIDAD DE FALLA	21
2.3.3 OTROS DATOS	21
2.4 PROCEDIMIENTO	21
2.4.1 DATOS REGISTRADOS	21
2.4.2 REGISTRO DE LA PROBABILIDAD DE FALLA Y DE LOS TIEMPOS DE REPARACION	23
2.4.3 AFECTACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE FALLA	24
2.4.4 COSTO DE VIAJAR	25
2.4.5 PROBABILIDAD DE OPERACIÓN DE UN SUBTRAMO	27
2.4.6 DEFINICIÓN DE LAS RUTAS	27
2.4.7 MATRIZ DE COSTO DE ESPERA K.....	28
2.4.8 MATRIZ VOLUMEN DE TRAFICO	29
2.4.9 MATRIZ DE COSTO TOTAL DE LA RED	31
2.4.10 COSTOS DE INTERVENCIÓN	31
2.4.11 GRAFICAS DE LA FRONTERA EFICIENTE	32
Conclusión capítulo:	33
CAPITULO 3: ANALISIS DE RESULTADOS	34
3.1 ANALISIS BAJO DIFERENTES PERSPECTIVAS	34
3.1.1 ANALISIS POR TIPO DE INTERRUPCIONES	34
3.1.1.1 Interrupción por manifestaciones públicas	35

3.1.1.2	Accidentalidad y buses varados	36
3.1.1.3	Invasión de carriles de Transmilenio por particulares	37
3.1.1.4	Problemas en intersecciones	38
3.1.1.5	Otro tipo de interrupciones	38
3.1.2	ANALISIS DE TASAS	39
3.1.2.1	Resultados según tasa de falla	39
3.1.2.2	Resultados según tasa de reparación	40
3.1.3	ANALISIS SECUENCIAL POR CATEGORIAS	40
3.1.3.1	Subtramos	41
3.1.3.2	Tramos	42
3.1.3.3	Rutas	44
3.1.3.4	Sentidos de circulación	45
3.1.3.5	Troncales	46
3.2	RESULTADOS RELEVANTES	47
3.2.1	El TCN OBTENIDO	47
3.2.2	CLASIFICACION TRAMOS CON BASE EN EFECTOS SOBRE TCN	48
3.2.2.1	Por variar tasa de falla	48
3.2.2.2	Por variar tasa de reparación	49
3.2.3	EFICIENCIA DE LAS ACCIONES	49
3.3	VARIACIONES EN EL MODELO	51
3.3.1	EFFECTOS DE LOS PARAMETROS SOBRE EL TCN	51
3.3.2	EFFECTOS DE LAS MEDIDAS CORRECTIVAS	52
3.3.2.1	Efectos de disminuir la tasa de falla	52
3.3.2.2	Efectos de aumentar la tasa de reparación	54
3.3.3	PRESENTACION DE LA MEJOR INVERSION	55
	Conclusión capítulo	55
	CONCLUSIONES	56
	RECOMENDACIONES	58
	GLOSARIO	59
	BIBLIOGRAFIA	61

JUSTIFICACION

La posibilidad de movilizarse de un lado a otro dentro de ciudades urbanas en expansión y cuya población está en continuo crecimiento, es una fuente que garantiza e impulsa el desarrollo económico. Cuando a una persona le toma menos tiempo movilizarse de un punto a otro, está adquiriendo un beneficio en términos de ganancia de tiempo, al obtener un lapso de tiempo adicional que puede ser destinado a producir o a descansar.

Se puede decir en términos de tiempos de recorrido que entre más eficiente sea el sistema de transporte que hace posible dicha movilización, mayores beneficios se están aportando a toda una ciudad.

Además de eficiencia, debe hablarse de confiabilidad: no basta con un servicio rápido, se necesita un nivel de confianza suficiente para que el usuario sienta seguridad de llegar a su destino final durante el tiempo pensado y no busque otras alternativas de transporte diferentes en el caso en que las haya. Si el servicio de transporte en consideración es la única opción para movilizarse, el logro que se persigue es un mayor nivel de satisfacción por parte del usuario.

Surge de esta manera una necesidad de investigar sobre mecanismos que sirvan para garantizar el mejoramiento de la eficiencia y de la confiabilidad de un sistema de transporte; mecanismos que al implementarlos permitan ver los efectos que se obtienen al realizar una determinada inversión en un tramo de la red y que de alguna forma sirvan también para medir la vulnerabilidad de la red de transporte. Estos mecanismos pueden formularse a través de modelos matemáticos basados en teoría probabilística.

Sin embargo para poder cuestionar y evaluar mecanismos que pudieran llegar a implementarse, es necesario encontrar una aplicación a un caso real.

Pensando en Bogotá, una ciudad en la que su población crece día a día, crecimiento que repercute en un incremento en la demanda de transporte público y por consiguiente en una necesidad de implementar nuevas soluciones de transporte, y una ciudad en la que ha se ido implementando un sistema de transporte masivo en los últimos cinco años, se llegó a la idea de lo útil que sería aplicar el modelo al caso de Transmilenio.

Es ante estas necesidades y consideraciones que se formula y que se orienta la investigación.

INTRODUCCION

El servicio de transporte urbano hace posible que un gran número de ciudadanos pueda llegar a sus lugares de trabajo y llevar a cabo las actividades cotidianas que mueven la economía de una sociedad.

En Bogotá, la cobertura del sistema Transmilenio se ha ido aumentando y se seguirá aumentando con cada una de las fases de construcción de las troncales del sistema y con las rutas alimentadoras.

A octubre del 2004¹, Transmilenio cuenta con 772.061.594 pasajeros totales; durante la hora pico se transportan 67.492 pasajeros dentro del sistema, a una velocidad promedio de viaje de 26.70 km/hora y existen actualmente 55 kilómetros de vía en operación troncal. Se cuentan 144.264.770 kilómetros recorridos por las troncales con una flota disponible hoy en día de 599 buses.

De esta manera, Transmilenio es un sistema de transporte masivo que trae implicaciones directas sobre la productividad de los bogotanos, teniendo en cuenta que hoy en día se están movilizandando cerca del 16% de ciudadanos diariamente².

Cifras de este tipo demuestran que invertir en la red para su óptimo funcionamiento es invertir directamente en favor de la economía de la ciudad.

Problemática: cómo invertir y cómo reconocer los tramos de una red que se deben intervenir con el fin de proporcionar un mayor beneficio global en toda la red?

Para dar respuestas a este tipo de cuestionamientos, la investigación se ha orientado hacia la determinación de una inversión *óptima* cuyo fin es mejorar el funcionamiento global de una red.

Inicialmente se pensaba aplicar la metodología a tramos específicos de la malla vial nacional teniendo en cuenta que el modelo que se presentará más adelante, se centra en características propias a redes viales nacionales; sin embargo no se tomó este ejemplo de red y se decidió adaptar y aplicar el modelo de optimización de inversión a la red de Transmilenio. Esta decisión se tomó teniendo en cuenta que el estudio puede resultar muy beneficioso para la ciudad y también que hay una facilidad para conseguir los datos de entrada necesarios para el modelo, puesto que existen numerosos registros históricos del sistema durante el tiempo en que ha estado funcionando. Estos registros son el resultado de la automatización que Transmilenio ha implementado desde su centro de control y de estudios que se han ido realizando con el objetivo final de mejorar el servicio ofrecido.

¹ Cifras publicadas por Transmilenio S.A. en la dirección electrónica: www.transmilenio.gov.co, en cifras, última actualización octubre de 2004.

² Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá. Consulta en página Web: www.transitobogota.gov.co, en estadísticas, actualización noviembre de 2004

El contenido de la investigación se desarrolla de manera gradual para llegar finalmente a los resultados objeto de análisis para la red de Transmilenio.

La primera parte del presente documento se enfoca en la descripción del procedimiento utilizado en el desarrollo de la investigación, incluyendo la definición y presentación del modelo base: *Efficiency-based strategy or allocating resources to transport networks*”, Mauricio Sánchez-Silva, Mauricio Daniels, Department of Civil and Environmental Engineering, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2002, sus suposiciones y fundamentos, así como la identificación de cada una de las variables de entrada del modelo y del significado de los datos de salida.

La segunda parte se basa en la aplicación del modelo a una red de transporte real. Se expone al principio del capítulo la red de estudio y sus características, para luego con la presentación de la información recopilada y con la descripción de la metodología implementada para ingresar los registros dentro del modelo, obtener los resultados que se analizan en el siguiente capítulo de este documento.

En la tercera parte se incluye todo lo referente al análisis de resultados del modelo, a la interpretación de los mismos y a la optimización de la inversión frente a diferentes valores del costo total final. De este capítulo se derivan las propuestas más importantes obtenidas de la aplicación del modelo.

Finalmente se presentan las conclusiones más relevantes de los resultados de la investigación y se exponen algunas recomendaciones orientadas hacia el mejoramiento del servicio de la red de Transmilenio en Bogotá y hacia la disminución de su vulnerabilidad.

OBJETIVOS

Objetivo General

El propósito de la investigación es establecer un modelo adecuado para optimizar la asignación de recursos dentro de la red de Transmilenio; un modelo que permita determinar en qué tramo es más conveniente intervenir desde la perspectiva de vulnerabilidad de la red, con el fin de garantizar la generación del mayor beneficio sobre toda la red.

Objetivos específicos

Los objetivos de la investigación para las dos etapas Tesis 1 - Tesis 2 son:

- Estudiar, aplicar y perfeccionar el modelo probabilístico de asignación eficiente de recursos que se va a implementar dentro de la investigación.
- Con base en el modelo estudiado, realizar las adaptaciones necesarias para que a partir de una metodología inicialmente aplicable a mallas viales nacionales, se pueda demostrar su aplicación a redes de transporte urbano obteniendo resultados útiles y relevantes.
- Definir la red de estudio conformada por las troncales de Transmilenio y recopilar los registros de Transmilenio y la información necesaria para la modelación del sistema.
- Establecer la influencia de las condiciones actuales propias a cada tramo sobre la operación de todo el sistema Transmilenio. Se pretende tener una visión amplia sobre cómo interactúan los tramos para hacer posible día a día el funcionamiento del sistema e identificar un conjunto de tramos cuyo efecto sobre la operación de la red y sobre el costo de viajar por la red sea dominante.
- Determinar los tramos en los que se debe invertir dentro de la red de estudio de Transmilenio y entender los efectos globales de la inversión sobre toda la red.
- Proponer y recomendar medidas para disminuir la vulnerabilidad del sistema de Transmilenio por la ocurrencia de interrupciones.

CAPITULO I. DESARROLLO DEL MODELO DE OPTIMIZACION

El desarrollo de modelos que permiten simular el comportamiento de las redes de transporte se ha ido acentuando en las últimas décadas en diferentes países, puesto que la necesidad de contar con un sistema de transporte confiable es cada vez más notoria y así mismo exigente.

Este primer capítulo tiene como fin exponer el modelo de optimización que se implementará dentro del desarrollo gradual de la investigación, con el objetivo de formular una metodología de inversión eficiente dentro de una red de transporte. Se fundamenta en el estudio detallado del modelo matricial de optimización en la asignación de recursos propuesto en el artículo *Efficiency-based strategy or allocating resources to transport networks*, Sánchez, M., & Daniels M., *Department of Civil and Environmental Engineering, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2002*. Este modelo representa una herramienta muy útil para identificar la incidencia de una inversión en un tramo sobre toda una red y así poder reconocer la mejor acción a poner en marcha.

El interés de aplicar y perfeccionar este modelo de optimización de inversión de recursos para un sistema de transporte es un factor determinante dentro del desarrollo de esta investigación.

1.1 FUNDAMENTOS DEL MODELO

El modelo fue desarrollado en la universidad de los Andes y resalta la importancia de la asignación de recursos dentro de la operación de una red. Este estudio marca una pauta puesto que a diferencia de otras investigaciones que se dedican a estudiar la probabilidad de falla de un tramo en particular, el modelo considera los efectos e impactos sobre toda una red.

El modelo busca generar el mayor beneficio el cual se traduce en ocasionar la mayor disminución del costo total de viajar por la red; este costo se conoce en el modelo como el TCN (*“the cost of the network”*). De esta manera, el TCN es el punto de referencia para evaluar el impacto de cualquier acción, y como se verá más adelante se calcula como la suma de los costos de viajar de los usuarios que llegaron a su destino final.

El mayor beneficio se logra encontrando la mejor forma de invertir dadas unas condiciones actuales de la red y considerando esencialmente dos tipos de intervención como lo son disminuir la probabilidad de falla y aumentar la tasa de reparación. Estas dos intervenciones y su determinación se detallarán más adelante dentro de este capítulo.

Un sistema de transporte se cataloga como un sistema dinámico puesto que el estado de sus tramos oscila permanentemente entre operación y falla. Y es aún más variable si se tiene en cuenta que el comportamiento y las decisiones del usuario están también constantemente cambiando.

Dentro del artículo de consulta este dinamismo se expresa matemáticamente como un vector estado variable del sistema como sigue: $X(t) = (X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t))$ en función del tiempo y del estado de cada tramo.

Un sistema de transporte entra en un estado de falla cuando el funcionamiento de la red se paraliza parcial o totalmente, impidiendo la circulación por uno o por varios tramos de la red por diferentes causas.

Por otro lado, cabe anotar que el modelo a estudiar no contempla la posibilidad de que los eventos de falla y reparación puedan ocurrir simultáneamente.

1.2 EXPLICACION E INTERPRETACION DE LAS VARIABLES:

1.2.1 TASA DEFALLA

El primer tipo de intervención consiste en disminuir la tasa de falla λ de un determinado tramo, lo cual se logra mediante una inversión en infraestructura con el fin de reducir las causas de las interrupciones. Ejemplos de este tipo de intervención pueden ser mejorar las condiciones de seguridad de la vía, realizar obras de ingeniería a mayor escala para limitar los detonantes de las interrupciones, intensificar el mantenimiento preventivo de una vía, incrementar exigencias en especificaciones de materiales de construcción, etc.

La tasa de falla λ se determina a partir de información de registros históricos y se calcula como el número de eventos de falla sobre un intervalo de tiempo preestablecido, como por ejemplo días al año.

$$\lambda = O / T \quad (\text{Ecuación 1.1(a)})$$

Donde: O es el número de días en los que ocurrió una determinada falla y T es el tamaño de la muestra o total de días para los que se tiene registros.

De igual modo, λ se expresa en términos de tasa como el inverso del tiempo de frecuencia de ocurrencia de interrupciones o tiempo promedio entre fallas T_F .

Por lo tanto:
$$\lambda = 1 / T_F \quad (\text{Ecuación 1.1 (b)})$$

La probabilidad de falla propia a cada tramo es función de todos los tipos de falla que se consideren dentro del modelo y se puede calcular una vez se determinen numéricamente todas las formas de falla F_i y sus tasas λ_i .

La tasa de falla para un tramo j está expresada como una función:

$$\lambda_j = f(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4) \quad (\text{Ecuación 1.2})$$

Para cada tipo de falla F_i y para cada tramo j se obtiene una probabilidad de falla $P(F_{ij})$ diferente.

Como se verá más adelante cada tramo tiene una probabilidad de falla sobre la cual se efectuarán las variaciones para observar los efectos globales sobre el modelo.

1.2.2 TASA DE REPARACION

El otro tipo de intervención se relaciona con la posibilidad de aumentar la tasa de reparación μ ante la ocurrencia de una falla. Esto implica una inversión en la operación dadas unas condiciones existentes de infraestructura. Algunos ejemplos para este caso son el incremento en la velocidad y capacidad de respuesta ante una emergencia, la localización de más puntos de atención a lo largo de una vía, el mejoramiento y mantenimiento de las condiciones de los equipos de atención, la rotación y modernización de estos equipos, etc.

Con esta medida se incrementa la capacidad de respuesta para que las interrupciones sean reparadas más pronto y oportunamente.

Los valores de μ se determinan con información sobre el tiempo transcurrido entre la ocurrencia de la falla y la normalización en la operación del tramo.

La tasa de reparación es función de los tipos de intervención i que se pueden ofrecer y su cálculo es posible cuando se determinen todos los tiempos y costos de reparación T_i y C_i , respectivamente.

Es decir que: $\mu_i = f(T_i, C_i)$ y $\mu = f(\mu_1, \mu_2, \mu_i \dots)$

Y se calcula como:

$$\mu_i = 1 / T_i \quad (\text{Ecuación 1.3})$$

Cabe anotar que los tramos que presentan los mayores valores de μ son en general los que tienen una mayor probabilidad de operación porque un μ grande implica eficiencia en la reparación, si se tiene en cuenta que μ está expresado en términos de tasa como $1 / \text{tiempo de reparación promedio } T_i$, es decir tiene unidades de [1/seg. o 1/min.].

1.2.3 PROBABILIDAD DE OPERACIÓN DE UN TRAMO

La probabilidad de operación de un tramo q_m se determina como el cociente entre el inverso de la tasa de falla y la suma de los inversos de la tasa de falla y la tasa de reparación:

$$P(q_m) = (1 / \lambda_m) / ((1 / \lambda_m) + (1 / \mu_m)) \quad (\text{Ecuación 1.4})$$

Con esta ecuación puede verse que la probabilidad de operación es mayor cuando las expresiones $(1/\mu)$ y $(1/\lambda)$ son pequeñas lo que ocurre si μ y λ se incrementan.

Como se verá más adelante el cálculo de la probabilidad de operación de un tramo es el punto de partida para determinar las probabilidades de utilización de las rutas por parte de los usuarios.

1.2.4 COSTO DE LA INTERVENCION

Cada intervención, sea a nivel de la tasa de falla o sea a nivel de la tasa de reparación, requiere un tipo de reparación específico y por lo tanto presenta un costo asociado C_i . El costo de cada tipo de intervención es un dato de entrada del modelo y su determinación es compleja puesto que varía según el tipo de intervención, su magnitud y el tramo en el que se ejecute tal intervención.

A su vez, los costos de intervención pueden ser diferentes para un mismo tramo según el sentido en el que se viaje y bajo consideraciones diversas tales como pendiente y características propias de la vía.

Los costos de las intervenciones son por lo tanto valores de entrada que varían de tramo a tramo por las condiciones propias de cada uno. Estos costos se determinan para cada posible solución según el tipo de falla que ocurra y representan como se describe en el artículo de consulta los *inputs* del modelo.

1.2.5 RUTAS

Dentro de una red existen por lo general varias posibilidades para ir de un punto a otro. De esta manera se definen en el modelo las posibles rutas y se seleccionan las rutas más razonables que son aquellas que un usuario tendría en consideración en el momento de realizar un viaje por la red. Se define una ruta razonable como aquella ruta en la que no le implique al usuario devolverse ni pasar por muchos puntos intermedios antes de alcanzar su destino final.

Para una ruta es necesario determinar cada uno de los parámetros definidos por tramo.

1.2.5.1 Probabilidad de operación de una ruta

La probabilidad de operación de una ruta r_k se determina como la probabilidad de que cada uno de los tramos que la componen esté funcionando:

$$P(r_k) = P(q_1) * P(q_2) * P(q_n) \dots \quad (\text{Ecuación 1.5})$$

Siendo $P(q_1)$ la probabilidad de operación del tramo q_1 y n el número total de tramos que conforman la ruta.

1.2.5.2 Costo de viajar por una ruta

El costo de viajar por una ruta es función del monto que un usuario estaría dispuesto a pagar al obtener una ganancia de tiempo total de viaje. Este costo

varía de tramo a tramo y depende en gran parte del propósito del viaje. El beneficio obtenido al realizar el viaje es en algunos casos difícil de cuantificar.

El artículo de consulta considera que los valores de costo por viaje (o por tramo) para el caso de redes viales nacionales de intercambio de comercio terrestre se podrían contabilizar en función del valor de la venta que el comerciante dejaría de ganar si no pudiese viajar por el tramo.

A partir de los costos de viajar por cada tramo, se calcula el costo de viajar por una ruta $C(r)$, como:

$$C(r) = C(q_1) + C(q_2) + C(q_n) \dots \quad (\text{Ecuación 1.6})$$

Con $C(q_1)$ el costo de viajar por el tramo q_1 y n el número total de tramos que componen la ruta en estudio.

1.2.5.3 Probabilidad de tomar otra opción de ruta

La probabilidad de tomar una determinada ruta $P(r_K)$ que en orden de prioridad no está clasificada como la primera posibilidad, sino que es posterior a las rutas $r_1, r_2 \dots$ hasta r_{k-1} , se determina como:

$$P(r_K) = P(r_1^c, r_2^c, \dots, r_{k-1}^c, r_K) \quad (\text{Ecuación 1.7})$$

Donde $P(r_1^c)$ es el complemento de que la ruta r_1 esté operando, es decir la condición de falla de la ruta r_1 .

1.2.6 COSTO ESPERADO

Para determinar el costo esperado de viajar es necesario conocer primero el costo de no viajar, denotado como K . Este costo de no viajar K debe ser mayor al costo de viajar para que la realización del viaje tenga sentido para el usuario. En caso contrario un usuario razonable preferiría no realizar el viaje.

El costo de esperar se determina de la siguiente manera:

$$K = K_w P(r_1^c, r_2^c, \dots, r_{k-1}^c, r_K) \quad (\text{Ecuación 1.8})$$

Donde K es el costo de no tomar ninguna ruta y K_w es el costo de esperar ante la ocurrencia de una interrupción, el cual se multiplica por la probabilidad de tomar la ruta r_K .

El costo esperado de viajar entre los puntos i y j es función del costo de tomar cada ruta, la probabilidad de tomar la ruta y el costo de esperar. Se calcula como:

$$E(C_{i,j}) = (\sum C(r_K) P(r_K)) + K \quad (\text{Ecuación 1.9})$$

Donde $E(C_{i,j})$ es el costo esperado de viajar entre i y j , K es el costo esperado de no tomar ninguna ruta y $P(r_K)$ es la probabilidad de tomar la ruta r_K .

El costo total de la red **TCN** se calcula a partir del costo esperado y del volumen vehicular $N_{i,j}$ registrado durante el intervalo de tiempo definido al principio (ejemplo días al año):

$$\text{TCN} = \sum \sum N_{ij} E(C_{ij}) \quad (\text{Ecuación 1.10})$$

Donde TCN es el costo esperado de la red y $N_{i,j}$ es el tráfico promedio de vehículos viajando entre i y j por unidad de tiempo.

1.2.7 SALIDAS DEL MODELO

Las salidas (u *outputs*) del modelo $\rho_{\lambda i}$ y $\rho_{\mu i}$ son los cambios en el costo total de la red y se determinan como sigue:

$$\rho_{\lambda i} = \text{TCN}(\lambda_1, \mu_1, \lambda_i - \Delta\lambda_i, \mu_1, \dots, \lambda_n, \mu_n) - \text{TCN}(\lambda_1, \mu_1, \lambda_i, \mu_1, \dots, \lambda_n, \mu_n) \quad (\text{Ecuación 1.11})$$

$$\rho_{\mu i} = \text{TCN}(\lambda_1, \mu_1, \lambda_i, \mu_i + \Delta\mu_i, \dots, \lambda_n, \mu_n) - \text{TCN}(\lambda_1, \mu_1, \lambda_i, \mu_i, \dots, \lambda_n, \mu_n) \quad (\text{Ecuación 1.12})$$

donde las expresiones $\rho_{\mu i}$ y $\rho_{\lambda i}$ son la diferencia entre el TCN resultante luego de la intervención y el TCN inicial; $\rho_{\mu i}$ y $\rho_{\lambda i}$ son unas funciones de producción y representan el cambio en el costo de la red cuando sólo uno de los parámetros tasa de reparación o tasa de falla cambia.

Por lo tanto las intervenciones en la red se pueden modelar como una función de producción en la que el costo de cada intervención (definido en el numeral 1.2.4) representa una entrada (o *input*) y el cambio en el costo de toda la red es una salida (o *output*) del modelo.

Una función de producción es la relación entre un bien producido y los recursos usados y establece una relación decreciente a escala.

Para este caso, las funciones son desconocidas; identificar los puntos para trazar estas curvas es uno de los intereses de esta investigación en caso de que los valores obtenidos del modelo se puedan asemejar realmente a una función de producción. Cada punto representa una posible acción (incrementar μ o disminuir λ), acción que se conoce dentro del modelo como una DMU (Decision Making Unit).

Estas funciones de producción se presentan en la siguiente gráfica:

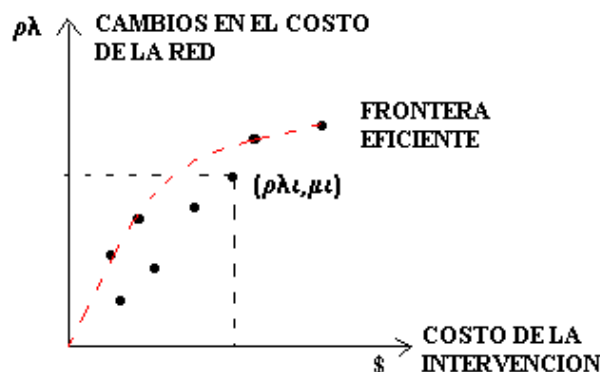


FIG. 1

Existe una función para las acciones sobre μ y otra función para las acciones sobre λ , lo que implica que no es posible comparar los dos tipos de acciones simultáneamente. Se requiere de un análisis por separado para cada una de las dos variables puesto que cada función de producción demanda de unos recursos específicos representados en la gráfica en el eje de las abscisas.

De la gráfica se puede determinar la frontera eficiente que según la definición del artículo de consulta, está conformada por el conjunto de acciones más eficientes.

Para comparar los efectos de cada acción se determina la eficiencia de las acciones que se establece mediante las ecuaciones:

$$E_{\lambda_i} = \rho \lambda_i / C_{\lambda_i} \quad (\text{Ecuación 1.13 (a)}) \quad E_{\mu_i} = \rho \mu_i / C_{\mu_i} \quad (\text{Ecuación 1.13 (b)})$$

Donde E_{λ_i} y E_{μ_i} representan la eficiencia de cada acción según el caso en el que se modifique λ o μ .

1.3 PROCEDIMIENTO DEL MODELO

Al final del documento es posible consultar un glosario con todos los términos aquí empleados.

Con base en el seguimiento del ejemplo complementario al artículo de estudio, se puede resumir la secuencia de pasos del modelo matricial de la siguiente manera:

1. Definir todos los componentes de la red tales como centroides, nodos y tramos, y elaborar un esquema de la red que muestre como se interconectan los nodos y centroides entre sí.
2. Numerar claramente los nodos y los tramos que conforman la red para facilitar su posterior identificación dentro del modelo.
3. Asignarle a cada tramo una probabilidad de falla λ_i , una tasa de reparación μ_i y un costo de viajar por el tramo C_i y conformar con estos datos una matriz de datos de entrada.
4. Calcular la probabilidad de operación de cada tramo a partir de la ecuación 1.4 presentada anteriormente.
5. Seleccionar un centroide i de partida, y definir todas las posibles rutas razonables en orden de preferencia del usuario para llegar desde el centroide i a cada uno de los demás centroides que conforman la red. De esta forma se conforman matrices de rutas posibles para viajar entre el

centroide i y los demás nodos. Se obtendrá un conjunto de matrices diferente para cada centroide i conectado con los otros nodos.

6. Determinar la matriz de costos de todas las rutas a considerar para viajar desde el centroide i . Se considera el costo total de viajar por cada ruta como la suma de los costos de viajar por cada tramo que la conforman según ecuación 1.6. Se obtendrá una matriz de costos para cada centroide interconectado con los demás nodos.
7. Determinar la probabilidad de operación de cada ruta con base en la ecuación 1.5, conociendo la probabilidad de operación de cada tramo calculada en el paso 4.
8. Con la ecuación 1.7 calcular las probabilidades de tomar cada ruta desde el centroide i y conformar las matrices de probabilidad para cada caso denominadas en el artículo como matrices PF_i
9. Se repite todo el procedimiento desde el paso 6 para el siguiente centroide (considerando todas las demás posibles conexiones), y así sucesivamente con todos los centroides existentes.
10. Definir una matriz de costo de espera K por tramos como dato de entrada. Esta matriz incluye el costo de esperar entre cada dos nodos, es decir que la matriz tiene el tamaño en filas y columnas del número total de nodos considerados en la red.
11. Determinar una matriz de volumen anual de vehículos N (matriz origen-destino) conformada por el volumen de tráfico establecido a partir de conteos vehiculares. Estos valores son valores conocidos de entrada.
12. Considerando la matriz de costo para cada centroide (encontrada en el paso 6) y la matriz del costo de esperar K del paso 10, determinar la matriz de costo total de la red CTR aplicando las ecuaciones 1.8 y 1.9.
13. Calcular el costo total de viajar por la red TCN sumando los valores de la matriz de costo total de la red CTR y multiplicando por la matriz de tráfico N determinada en el paso 11 siguiendo la ecuación 1.10.
14. Construir la matriz denominada en el ejemplo del artículo matriz MCR que representa los costos de las acciones asociadas a las intervenciones en términos de μ y de λ como valores de entrada conocidos previamente.
15. Determinar las matrices ρ_λ y ρ_μ con las diferencias entre el TCN modificado y el TCN inicial. ρ_λ y ρ_μ muestran en cuanto se reduce el costo de la red cuando se modifican λ y μ respectivamente.
16. Graficar ρ_λ Vs. MCR y ρ_μ Vs. MCR

17. Identificar en la gráfica la frontera eficiente conformada por un conjunto de acciones que demandan menores recursos reflejados en los costos de intervención y que causan las mayores disminuciones en el costo total de la red TCN

Conclusión capítulo:

Como se vio en este capítulo, el modelo incluye diferentes variables de entrada para las cuales se debe tener especial cuidado de conservar las mismas unidades de tiempo de manera a garantizar la obtención de resultados consistentes.

Una vez conocido el algoritmo y comprendido el procedimiento, el modelo puede ser utilizado como una herramienta poderosa para estudiar y comprender el funcionamiento de redes viales, obteniendo resultados aún más significativos para los casos en los que se alimente el modelo con información obtenida a partir de registros reales.

Sería interesante que futuras investigaciones se orientaran hacia el problema de evaluar las acciones específicas que se llevan a cabo para cambiar las tasas de falla y de reparación, mostrando qué tipos de acciones específicas son más eficientes y deben por lo tanto llevarse a la práctica.

Ampliar el alcance del modelo y la búsqueda de su perfeccionamiento son propuestas que dan origen a temas extensos en el desarrollo de futuras investigaciones.

CAPITULO II. APLICACION DEL MODELO A UN SISTEMA DE TRANSPORTE MASIVO

El objetivo de este capítulo es aplicar el modelo matricial descrito anteriormente a una red de transporte real, que obedece a los parámetros ya definidos y que además es de gran cercanía e importancia para Bogotá; esta “familiaridad” puede implicar un mejor entendimiento de los resultados y un más fácil manejo e interpretación de las medidas finales a implementar.

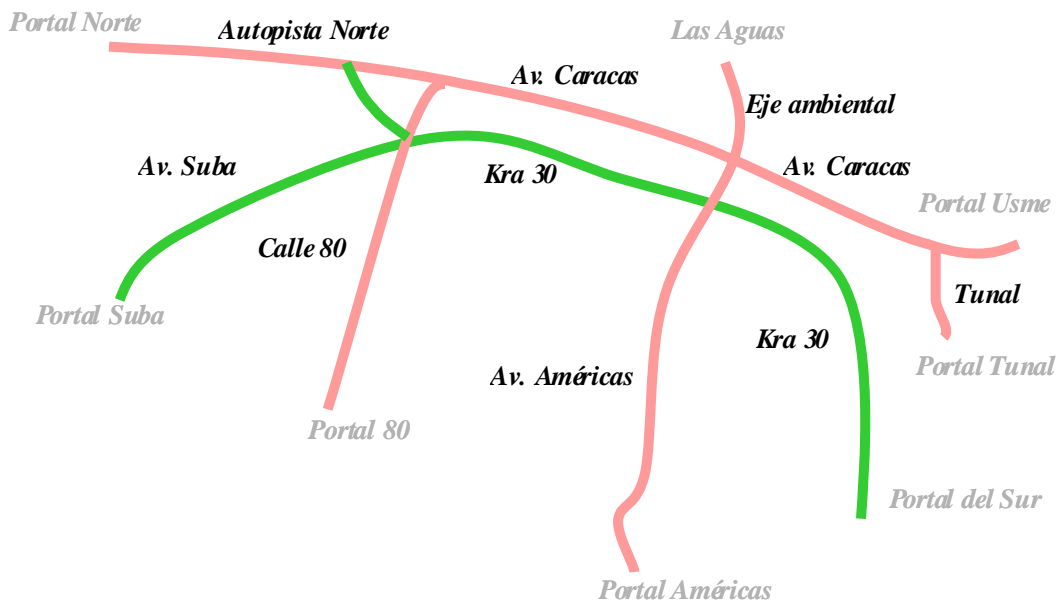
Cabe anotar que la etapa de definición de la red es en realidad la etapa más importante de la modelación puesto que de este paso depende la utilidad de los resultados que se buscan y el efecto y la viabilidad de las medidas que se propongan al final.

El sistema de Transmilenio con su expansión en la ciudad adquiere cada día mas importancia y mayor centralidad en la movilidad de los ciudadanos. Ello implica que la ocurrencia de interrupciones en el sistema afecte a gran escala la movilidad de los bogotanos y que la amenaza del colapso del sistema a largo plazo sea una preocupación de mayor magnitud y motivo de atención.

2.1 PRESENTACION DE LA RED DE ESTUDIO

La red que se va a considerar en el modelo comprende las troncales de Transmilenio en funcionamiento actualmente a saber la Avenida Caracas, la Avenida de Las Américas, la Autopista Norte, la Calle 80, el tramo hacia el Tunal y el eje ambiental de la Avenida Jiménez.

Adicionalmente, y con la finalidad de que la investigación tenga un mayor alcance, se incluirán los tramos hoy en día en construcción como lo son los tramos de la carrera 30 y de la Avenida Suba; y su estudio se basará en proyecciones. A continuación se presenta la red general de estudio:



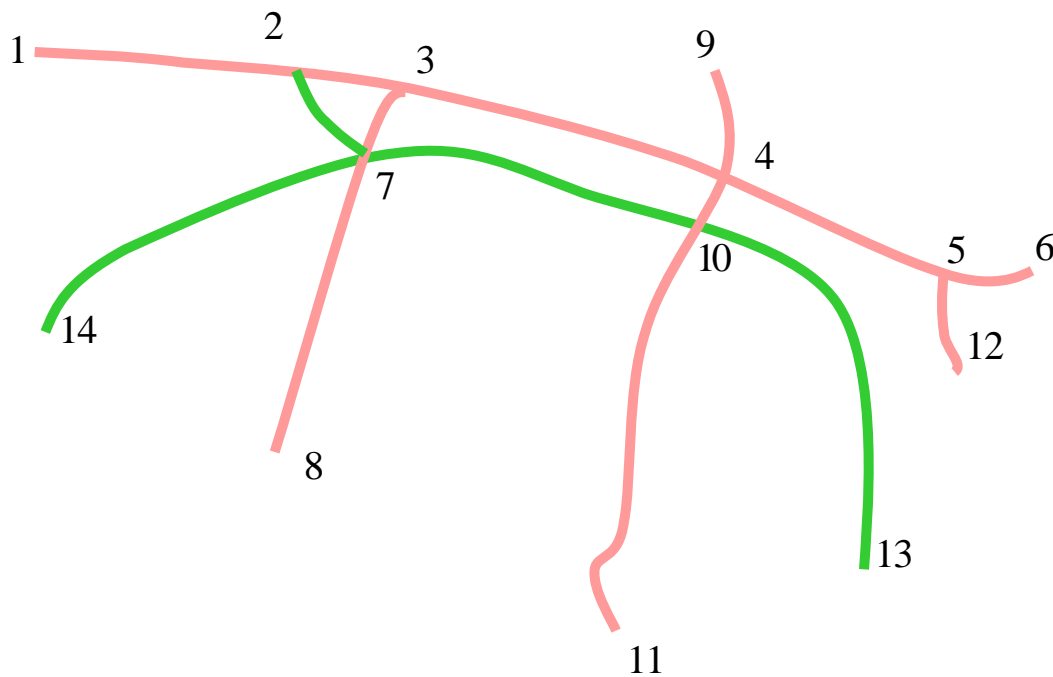
ESQUEMA No. 2.1

De esta manera la red de estudio definitiva comprende las troncales de Fase 1 y parte de las troncales de Fase 2 del proyecto de Transmilenio.

Con base en cifras publicadas por Transmilenio S.A., actualmente se encuentran en funcionamiento 78 estaciones entre las cuales se diferencian tres tipos³ de estaciones a saber: estaciones sencillas, estaciones de integración intermedias y estaciones de integración de cabecera como lo son los portales; cada una de estas estaciones se tendrá en cuenta para la definición de nodos y de centroides de la red.

Aunque dentro del modelo se integran la información de cada uno de los tramos comprendidos entre dos estaciones contiguas, los nodos principales numerados a continuación corresponden a los puntos extremos (portales) y a los puntos de intersección de troncales, y es bajo esta numeración que se posibilitará la identificación de los tramos.

Se presenta la red de estudio con sus respectivos nodos:



ESQUEMA No.2.2

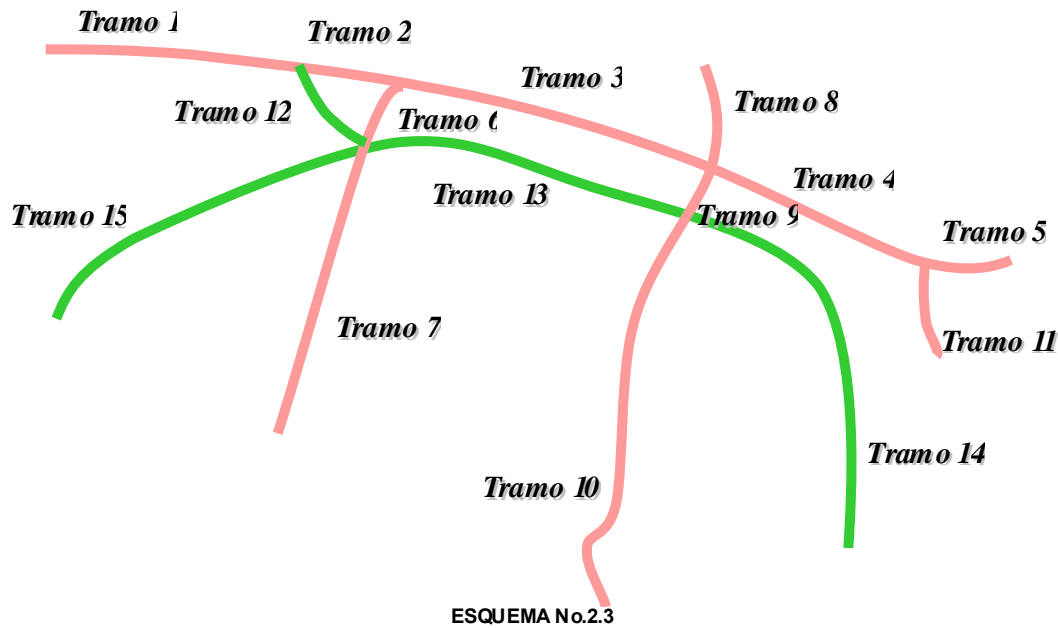
Al realizar esta asignación numérica, se obtuvo un total de 14 centroides lo que simplificará el manejo de datos dentro del análisis.

Un centroide dentro de la red del modelo puede no ser un solo punto en la red real, sino que puede representar un conjunto de estaciones próximas. Sin embargo se considera como un sólo nodo dentro de la modelación puesto que con las soluciones en infraestructura que se están planteando tales como deprimidos y rotondas, se garantiza la conexión de los tramos al brindar la

³ Transmilenio S.A., consulta abril 2004, www.transmilenio.gov.co

posibilidad a los usuarios de hacer trasbordos y de trasladarse fácilmente de una troncal a otra.

Adicionalmente, se asignó una numeración a cada tramo para facilitar la diferenciación, puesto que resulta más sencillo referirse a un tramo por su número que por sus puntos inicio – fin. Por este motivo se presenta la red con los tramos numerados como se muestra a continuación, obteniendo un total de 15 tramos:



A su vez hay un total de 115 subtramos dentro de la red los cuales se detallarán en el tercer capítulo.

2.2 SUPOSICIONES Y CONSIDERACIONES PARA EL MODELO DE TRANSMILENIO

Para definir el modelo y el alcance del mismo es necesario realizar una serie de simplificaciones, adaptaciones y suposiciones que se describen a continuación:

No se van a considerar dentro del modelo las rutas alimentadoras, únicamente se analizará la troncal de Transmilenio. El sistema de interés en esta investigación es el correspondiente a las troncales por donde circulan los buses articulados.

No se va a hacer una distinción entre servicios expresos y corrientes, puesto que se saldría del alcance que se pretende con la investigación. Se considerará un volumen total de buses comprendido por rutas expresas y rutas corrientes circulando a lo largo de un corredor vial.

En el sistema de Transmilenio actual no hay redundancia que permita considerar una amplia selección de preferencia de rutas por parte del usuario, esto demandará algunos ajustes en el modelo porque no habrán tantas posibilidades razonables de viajar entre dos puntos. Con seguridad y para futuras investigaciones habrán más posibilidades con la culminación del proyecto de Transmilenio hasta el año 2016, puesto que se incluirán corredores varios ofreciendo más alternativas para ir de un punto a otro.

Para el caso de Transmilenio, el usuario tiene un alto grado de conocimiento acerca del estado del sistema por los sistemas de información que se han implementado. Existe un centro de control que mantiene continuamente informados a los conductores sobre el funcionamiento de toda la red. Este factor permite que el usuario tome decisiones en el momento de seleccionar una u otra ruta.

Cabe la pena anotar que en el registro suministrado no todos los eventos implican una interrupción total en la red, gran parte de los casos ocasionan una situación de paso restringido que luego se normaliza, pero que sin embargo para efectos del modelo se discrimina como una interrupción.

2.3 INFORMACION SUMINISTRADA POR TRANSMILENIO

La selección de los parámetros de entrada es muy importante para la etapa final de optimización de los resultados. Los registros deben ser actuales y reflejar una tendencia real para que así mismo los resultados del modelo sean útiles y pertinentes.

De esta manera se hizo una selección de los datos de entrada del modelo y dicha información necesaria se solicitó a Transmilenio S.A. Se clasifica a continuación la información solicitada y se describe su utilidad dentro del modelo.

2.3.1 PARA DETERMINAR LOS NODOS DEFINITIVOS DE LA RED

- Matriz origen-destino de pasajeros⁴: utilizada para identificar los nodos más frecuentados por los usuarios del sistema y para seleccionar los principales nodos dentro de la red.
- Localización, nombres, y distancias entre futuras estaciones a lo largo de la carrera 30 y de la avenida Suba y conexiones entre la red existente y la futura: de manera a incluir dentro de la red las troncales actualmente en construcción y establecer su conexión.
- Número de carriles exclusivos de Transmilenio en cada corredor para las futuras troncales de la Avenida Suba y de la Kra. 30: permite diferenciar grados de vulnerabilidad de falla según el número de carriles transitables.
- Longitud comprendida entre estaciones consecutivas: permite considerar la mayor probabilidad de falla para tramos más extensos.
- Velocidad promedio de viaje en la red: dato de entrada del modelo para el cálculo de los tiempos de viaje dentro del costo de viajar.

⁴ Transmilenio S.A, Matriz Origen Destino de Fase 1 para dos horas pico 6:30-8:30 am, Febrero de 2003

2.3.2 PARA CALCULAR LA PROBABILIDAD DE FALLA

Transmilenio S.A. suministró un registro que incluye fecha, tiempo de la interrupción, lugar de ocurrencia para los siguientes tipos de interrupción:

- accidentalidad
- manifestaciones públicas
- varadas por falla mecánica de buses
- Invasión de carriles de Transmilenio por particulares
- interrupciones en las intersecciones de vías vehiculares
- problemas de drenaje y obras de mantenimiento de la infraestructura

2.3.3 OTROS DATOS

Alguna información adicional suministrada por Transmilenio fue:

Zonas vulnerables a ocurrencia de accidentes, incidentes y percances: estas cifras son útiles para establecer un paralelo con los resultados obtenidos en el modelo.

Número de rutas que paran por estación y origen-destino de cada ruta⁵: necesario para contabilizar los volúmenes de buses que se incluyen dentro de la matriz de tráfico.

Relaciones entre estrato económico y valor subjetivo de tiempo de viaje VSTV para un usuario: justifica el valor de VSTV utilizado dentro del cálculo del costo de viajar.

2.4 PROCEDIMIENTO

2.4.1 DATOS REGISTRADOS

A continuación se presenta el procedimiento utilizado para el registro de datos dentro del modelo desarrollado y los supuestos que se hicieron:

El modelo se realizó de tal manera que permitiera ver los efectos y la situación de cada subtramo. En el momento de modelar la red, estos subtramos se reagruparon en tramos específicos con el fin de simplificar la inserción de datos y obtener matrices de más fácil manejo. Sin embargo es importante recalcar que los cambios en los datos de entrada para comparar los resultados que arroja el modelo se hacen a nivel de las tasas de falla y de reparación de los subtramos. Esto implica un mayor alcance del modelo permitiendo obtener resultados más puntuales.

De los datos históricos suministrados por Transmilenio S.A.⁶ se utilizaron los registros para cada estación dentro del primer semestre del presente año (del 3

⁵ Mapa guía para los usuarios de Transmilenio y horarios de rutas, folleto público, “Transmilenio un centenar de servicios”

⁶ Bitácora por tipo de nota, interrupciones en el servicio, desde 03/01/2004 hasta 30/06/2004, Planeación, Transmilenio S.A.

de enero al 30 de junio del 2004). Esta información contiene todas las interrupciones ocurridas en cada componente de la red y la descripción de lo ocurrido. Entre las causas principales se diferencian: manifestaciones públicas, accidentalidad de buses de Transmilenio (bus articulado con bus articulado, o bus articulado con vehículo particular), problemas en las intersecciones y en la semaforización, varadas de buses de Transmilenio, congestión en la troncal en la zona de estaciones, invasión del carril exclusivo de Transmilenio por parte de carros particulares, obras de mantenimiento dentro de la troncal y otros eventos diversos que se clasificaron en un grupo aparte. Con base en la manera como se recibió esta información se realizó la categorización de los diferentes tipos de falla. Esta información está discriminada según el sentido de la troncal y para algunos eventos se tiene datos de tiempos de ocurrencia de la falla y tiempos en que se normaliza la operación, lo que permitió calcular una tasa de reparación promedio por tramo y por tipo de falla.

Al final de esta investigación se adjunta un registro típico que se puede consultar en el apéndice 2.1.

A manera de ejemplo se presentan los siguientes cuadros con los datos de cuatro tramos para ilustrar la forma como se registraron los datos de falla y de reparación.

ESTACIONES EN TRONCAL SUR-NORTE / NORTE-SUR

TIEMPOS EN MINUTOS

EJEMPLO DE ESTACIONES EN FUNCIONAMIENTO	OCURRENCIAS / TIEMPO REPARACION	MANIFESTACION DISTURBIO M		INVASION DE CARRIL POR PARTICULAR P		BUSES DE TRANSMILENIO VARADOS V		ACCIDENTES BUSES TRANSMILENIO A		OBRAS EN EL SISTEMA O		INTERSECCIONES S + SEMAFOROS I		TRANCON		OPERATIVOS ROBOS		OTROS	
		S-N	N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N	N-S	S-N	N-S
		O	T	O	T	O	T	O	T	O	T	O	T	O	T	O	T	O	T
Cl. 63	O	0	0	8	6	1	0	1	1	1	3	18	14	16	7	0	0	0	0
	T	0.00	0.00	7.22	0.00	3.66	0.00	0.00	17.52	0.00	0.00	1267	13	10.13	6.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Milros	O	2	2	8	10	1	0	0	1	0	0	0	0	2	3	0	0	0	0
	T	36.99	36.99	14.66	6.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	28.08	28.00	0.00	0.00	0.00	0.00

ESTACIONES EN TRONCAL ORIENTE-OCCIDENTE / OCCIDENTE-ORIENTE

TIEMPOS EN MINUTOS

EJEMPLO DE ESTACIONES EN FUNCIONAMIENTO	OCURRENCIAS / TIEMPO REPARACION	MANIFESTACION DISTURBIO M		INVASION DE CARRIL POR PARTICULAR P		BUSES DE TRANSMILENIO VARADOS V		ACCIDENTES BUSES TRANSMILENIO A		OBRAS EN EL SISTEMA O		INTERSECCIONES + SEMAFOROS I		TRANCON		OPERATIVOS, ROBOS		OTROS	
		E-W	W-E	E-W	W-E	E-W	W-E	E-W	W-E	E-W	W-E	E-W	W-E	E-W	W-E	E-W	W-E	E-W	W-E
		O	T	O	T	O	T	O	T	O	T	O	T	O	T	O	T	O	T
Av. Jiménez	O	3	3	3	4	0	1	0	1	2	1	9	8	3	3	2	2	1	1
	T	10.00	10.00	12.45	12.45	0.00	10.00	0.00	1.98	9.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00	10.00	5.00	5.00
Biblioteca	O	0	1	15	14	1	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	T	0.00	0.00	18.57	14.96	0.00	0.00	0.00	0.00	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

OCURRENCIAS	O
TIEMPO PROMEDIO DE REPARACION	T

TABLA No.21

Como puede verse se registraron por un lado el número de eventos u ocurrencias y por otro lado las tasas de reparación resultantes de descontar el

tiempo de ocurrencia del tiempo de normalización. Este procedimiento se hizo para ambos sentidos de circulación de la flota y separadamente para las estaciones ubicadas en troncales en dirección oriente-occidente y troncales en dirección norte-sur. Para aquellos tramos en los que no hay eventos registrados se colocó cero (que se interpreta como ningún registro).

En algunos casos un evento se registró en ambos sentidos cuando se considera que se presenta doble afectación como por ejemplo en el bloqueo de intersecciones por el cual puede suceder que se interrumpan ambos flujos en los dos sentidos.

La Avenida Jiménez está doblemente contabilizada puesto que esta estación se encuentra ubicada a lo largo de la troncal de la Caracas y a su vez en esta estación nace la troncal de las Américas en sentido sur-norte-sur y oriente-occidente respectivamente; por lo tanto se tienen registros separados según el caso.

2.4.2 REGISTRO DE LA PROBABILIDAD DE FALLA Y DE LOS TIEMPOS DE REPARACION

El registro de la interrupción se le atribuye al tramo de la estación en cuestión, y se hace una diferenciación en la tabulación de datos para los dos sentidos norte-sur y oriente-occidente de manera a dejar la posibilidad de hacer un análisis posterior por separado.

Dentro de la información suministrada, algunos tramos no presentan ningún registro de eventos de falla, para este caso se asignó una probabilidad de falla promedio con respecto a los datos reales (tasa promedio de 0.0000658). Esto considerando que ningún tramo está exento de presentar una falla en la operación, y que existe también, como se verá más adelante, una componente importante de aleatoriedad presente en los eventos tales como accidentes y varadas de buses.

Dentro de los registros hay algunas interrupciones sin información de tiempo; para estos casos, los tramos en los que no se tienen datos de tiempos de reparación, se les asigna un tiempo promedio de reparación de 5 minutos con base en el patrón de tiempos que se obtuvo de los tramos que sí presentan registro de tiempo.

Para el caso en el que se tienen varios tiempos de reparación se calcula el tiempo promedio para cada subtramo y para cada tipo de falla dentro del modelo.

Los tiempos de reparación de las fallas que se registraron dentro del ítem *obras en el sistema* no corresponden a la reparación de la infraestructura sino a los tiempos que tardan en remediarse situaciones desencadenadas por la ejecución de las obras como por ejemplo la caída de las colombinas que interrumpen el paso de los buses o maquinaria atravesada en la vía.

El modelo hace el cálculo con una tasa de falla promedio y con una tasa de reparación promedio de todos los tipos de falla, esto para cada tramo que comprende diferentes subtramos. Para determinar las tasas de falla y las tasas

de reparación definitivas, las cuales contemplan para cada subtramo todos los tipos de falla se realizó el siguiente cálculo:

$$\lambda = 1 - \sum \Pi (1 - \lambda_i) \quad \text{(Ecuación 2.1)}^7$$

Con esta ecuación se determinan de manera precisa las tasas finales de reparación y de falla para los subtramos y posteriormente para los tramos.

Como el registro suministrado únicamente permite determinar tasas de falla y de reparación para los tramos que conforman las troncales hoy en día en funcionamiento, se hace necesario llevar a cabo una metodología para estimar las tasas de los tramos comprendidos entre la NQS y la Avenida Suba. El mecanismo consistió en tomar las tasas promedio dentro de los registros con los que se cuenta y asignarlas a cada tramo futuro.

TABLA TIEMPOS DE REPARACION DE LA FALLA (en minutos)

ESTACIONES	Tasa de reparación del subtramo	MANIFESTACION DISTURBO M	INVASION DE CARRIL POR PARTICULAR P	BUSES DE TRANSMILENIO VARIADOS Y	ACCIDENTES BUSES TRANSMILENIO A	OBRAS EN EL SISTEMA O	INTERSECCIONES Y SEMAFOROS I	INUNDACION DRENAJE DR	TRANCON TP68	OPERATIVOS ROBOS	OTROS	SUMA	TIEMPO DE REPARACION DEFINITIVO	Valor de μ : TASA DE REPARACION
Calle 63	1119	0.0000	7.2200	3.8600	17.5200	0.0000	12.8333	0.0000	8.0670	0.0000	0.0000	9.8601	9.8601	0.1014192
Molinos	141	36.3900	10.0146	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	28.0400	0.0000	0.0000	25.0149	25.0149	0.0399762
Avenida Jimenez	158	10.0000	12.4500	10.0000	1.9800	9.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	10.0000	5.0000	8.3471	0.1198015
Biblioteca	126	0.0000	16.7608	0.0000	0.0000	4.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	10.3804	10.3804	0.0963352
Gratamira	128	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1000000
Sena	129	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	10.0000	0.1000000

TABLA No.22

Para las estaciones de Gratamira y Sena localizadas en las futuras troncales se utilizaron los valores medios de las tasas de falla y de reparación de 0.000065789 y 0.1000 respectivamente. Los cuadros completos con todos los tramos se pueden consultar en los apéndices 2.2 y 2.3 al final del documento.

ESTACIONES	Tasas de falla del tramo	MANIFESTACION DISTURBO M	INVASION DE CARRIL POR PARTICULAR P	BUSES DE TRANSMILENIO VARIADOS Y	ACCIDENTES BUSES TRANSMILENIO A	OBRAS EN EL SISTEMA O	INTERSECCIONES Y SEMAFOROS I	INUNDACION DRENAJE DR	TRANCON TP68	OPERATIVOS ROBOS	OTROS	SUMA	Valor de μ : TASA DE FALLA
Calle 63	1119	0.00000000	0.00007218	0.00000516	0.00001031	0.00002062	0.00016497	0.00000000	0.00011857	0.00000000	0.00000000	0.00039176	0.000391757
Molinos	141	0.00002062	0.00020622	0.00000516	0.00000516	0.00000000	0.00000000	0.00002062	0.00003093	0.00001031	0.00000000	0.00029899	0.000298991
Avenida Jimenez	158	0.00003093	0.00003609	0.00000516	0.00000516	0.00001547	0.00008784	0.00000000	0.00003093	0.00002062	0.00001031	0.00024228	0.000242280
Biblioteca	126	0.00000516	0.00014951	0.00000516	0.00000516	0.00000516	0.00000000	0.00000000	0.00001031	0.00000000	0.00000000	0.00018043	0.000180434
Gratamira	128	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.000065789
Sena	129	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.00000000	0.000065789

2.4.3 AFECTACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE FALLA

Adicionalmente se involucra el hecho de que en algunos tramos del sistema hay un carril y en otros dos carriles lo que se traduce en una mayor o menor probabilidad de falla, y lo que también implica una u otra solución.

Por lo tanto teniendo en cuenta que la probabilidad de falla es diferente según el número de carriles exclusivos para la circulación de Transmilenio, se asignó

⁷ Introducción a la confiabilidad de la evaluación de riesgos, Ph.D Mauricio Sánchez Silva.

un coeficiente de afectación por este concepto; para aquellas troncales en que hay un sólo carril exclusivo de Transmilenio se tomó un mayor coeficiente elevando la probabilidad de falla a la potencia 1, y para las troncales de doble carril se le elevó la probabilidad de falla a la potencia 1.5.

Bajo esta consideración se da por entendido que es más probable la ocurrencia de un bloqueo total del paso en aquellas troncales en las que hay un solo carril para Transmilenio que en aquellas en las que hay un par de carriles (ver columnas 6 y 8 del apéndice 2.4).

Bajo las mismas consideraciones, se tiene en cuenta que para tramos más largos la probabilidad de falla es mayor, razón por la cual se calculó un coeficiente que también se le aplica a la probabilidad de falla final, y que se determinó porcentualmente según la longitud del tramo con respecto a la longitud total de la red (ver columnas 7 y 8 del apéndice 2.4).

2.4.4 COSTO DE VIAJAR

Para el cálculo del costo de viajar por la red se utilizó el siguiente procedimiento⁸:

A partir de la ecuación de costo generalizado de viaje:

$$C = Tv + 2Ta + 2Te + \text{tarifa} / VSTV \quad (\text{Ecuación 22})^9$$

En donde:

VSTV: Es el valor subjetivo del tiempo de viaje que permite establecer una equivalencia entre el tiempo de viaje y el costo del servicio; Según estudios realizados a partir de encuestas de Preferencias Declaradas el valor del VSTV varía según el estrato socio económico, en promedio este valor equivale a 40 pesos por minuto. Se presenta en el siguiente cuadro la variación del VSTV en función de rangos de los estratos socio-económicos definidos por Transmilenio. Como puede verse se toma el valor de 40 pesos por minuto que corresponde al valor intermedio de las categorías con mayor porcentaje con respecto a la demanda total.

Estrato socio económico	VSTV	Porcentaje de la demanda total
1.0-1.5	15 \$/min	2%
1.5-2.5	30 \$/min	32%
2.5-3.5	45 \$/min	65%
3.5-6.0	80 \$/min	1%

TABLA No.2.3- Fuente: Datos Transmilenio S.A.

Tv: Es el tiempo de viaje en el vehículo

⁸ Diapositivas estudio Steer Davies Gleave

⁹ Nota: En esta ecuación se propone una penalización adicional en transbordos en Transmilenio de 2.5 minutos

Ta: Es el tiempo que tarda el usuario andando hacia la estación más cercana para acceder al sistema de transporte.

Te: Es el tiempo de espera dentro de la estación

Tarifa: Corresponde al valor del pasaje de un viaje dentro del sistema de Transmilenio actualmente equivalente a 1100 pesos.

Sin embargo el último término de la expresión (ecuación 2.2) es una constante dentro del cálculo del costo puesto que en el estudio se incluyen únicamente usuarios de Transmilenio que pagan la misma tarifa para ingresar al sistema y con un VSTV promedio, lo que llevaría a la conclusión que la consideración de este factor no altera las variaciones finales; no obstante la magnitud de los costos si se afecta por este término lo cual como se verá en los resultados, trae implicaciones importantes en el modelo.

Se asumió un tiempo promedio de llegada a la estación de 3 minutos¹⁰, y un tiempo promedio de espera de la ruta de 1.5 minutos¹¹, considerando que las rutas vienen espaciadas entre 3 minutos lo que implica que los dos casos extremos son: quien llega a la estación e inmediatamente aborda al bus (no espera nada) o quien llega a la estación sin alcanzar a coger la ruta lo que le demanda un tiempo de espera adicional de tres minutos suponiendo que las rutas llegan perfectamente espaciadas en el tiempo. Para mayor exactitud, se consideraron el número de rutas que paran en cada estación, y con un tiempo de espera de 3 minutos se repartió este tiempo según el número de buses y según su destino porque a una misma persona muy seguramente no le sirven todas las rutas.

A partir de la ecuación 2.2, conociendo las longitudes de los tramos y para una velocidad promedio de 26.7km por hora¹² fue posible calcular los tiempos y con ello el costo de viajar de los usuarios.

Para mantener unidades comunes en las variables se multiplicó el costo de viajar por 160 personas asumiendo un número máximo de pasajeros por bus.

Hay que tener en cuenta que el proceso de relacionar el costo con el tiempo de viaje presenta algunas dificultades si se consideran aspectos tales como el propósito del viaje, los ingresos de los pasajeros, la longitud del viaje, entre otros.

¹⁰ No existen a la fecha estudios detallados sobre tiempos promedio de caminata de los usuarios hacia las estaciones de Transmilenio; se estima en este caso un tiempo promedio de 3 minutos para el cálculo del costo de viajar.

¹¹ Con base en información de Transmilenio las rutas corrientes salen cada 3 minutos en promedio y las rutas expresas cada 2 o 3 minutos.

¹² Transmilenio S.A, consulta octubre 2004, www.transmilenio.gov.co

2.4.5 PROBABILIDAD DE OPERACIÓN DE UN SUBTRAMO

Teniendo para cada subtramo m un valor de tasa de reparación μ_m y de probabilidad de falla λ_m se determina la probabilidad de operación del subtramo mediante la ecuación:

$$P(q_m) = (1 / \lambda_m) / ((1 / \lambda_m) + (1 / \mu_m))$$

Con todas las consideraciones anteriores se llega a la siguiente tabla resumen que muestra todos los parámetros necesarios para calcular la probabilidad de operación de cada subtramo y los demás datos de ingreso al modelo. El cuadro completo puede consultarse en los apéndices 2.4 (a) y 2.4 (b).

No. Subtramo	No. Tramo	Desde	Hasta	No. de carriles por tramo	Coef. De afectación según longitud	Tasa de Falla del subtramo λ	Tasa de reparación subtramo μ	Longitud subtramo (metros)	Tiempo en vehículo en subtramo t_v (min)	tiempo andando hacia estación t_a (min)	número de rutas que paran en estación	tiempo en espera (min)	Costo de viajar por cada subtramo (en min)	Probabilidad de operación del subtramo
18	3	Flores	Calle 63	2	1.00964369	0.000001484	0.104563773	792	1.862798302	3	5	1.50	6138	0.999965805
19	3	Calle 63	Calle 57	2	1.00743876	0.000007841	0.101418183	611	1.437083497	3	9	1.50	6070	0.999922696
40	5	Consuelo	Molinos	2	1.00514452	0.000000538	0.200000000	423	0.933727950	3	2	3.00	6479	0.999937311
41	5	Molinos	Portal Usme	2	1.03684116	0.000000540	0.039976236	2944	6.323167385	3	5	1.50	6948	0.999963678
57	8	Museo del Oro	Av. Jimenez	1	1.01127532	0.0000057348	0.066669136	926	2.177969424	3	2	3.00	6669	0.999140564
58	9	Av. Jimenez	De la Sabana	2	1.00170591	0.000003781	0.119801472	140	0.329517836	3	11	1.50	5893	0.999968442
75	11	Santa Lucia	Biblioteca	1	1.00974475	0.000072878	0.066853299	800	1.882320659	3	6	1.50	6141	0.998911072
76	11	Biblioteca	Parque	1	1.00737462	0.000181765	0.096335247	606	1.424500196	3	2	3.00	6548	0.998116761
92	14	Santa Isabel	SENA	1	1.00876699	0.000066366	0.158807937	720	1.693453548	3	2	3.00	6591	0.999582273
93	14	SENA	NQS-1° Mago	1	1.01009421	0.000066453	0.158807937	829	1.949823599	3	2	3.00	6632	0.999581723
105	15	Terrazas	Gratamira	1	1.00874881	0.000066365	0.158807937	719	1.689943083	3	2	3.00	6590	0.999582280
106	15	Gratamira	Suba-Bogacá	1	1.00874881	0.000066365	0.158807937	719	1.689943083	3	2	3.00	6590	0.999582280

TABLA No.24

En el siguiente capítulo se presenta una interpretación detallada de los resultados de esta tabla. No obstante puede verse que las probabilidades obtenidas para los tramos que se tomaron como ejemplo son muy similares y cercanas a la unidad.

2.4.6 DEFINICIÓN DE LAS RUTAS

Al establecer la red de estudio, y a partir de cada uno de los centroides es posible determinar las diferentes rutas razonables que un usuario podría tomar. Bajo esta consideración se llega a un máximo de 3 posibilidades de rutas. En algunos casos sólo hay una ruta posible puesto que existe un único tramo que conecta dos puntos.

DETERMINACION DE RUTAS PARTIENDO DESDE EL NODO 3 PARA LLEGAR A CUALQUIERA DE LOS DEMAS NODOS													
	hacia 1	hacia 2	hacia 4	hacia 5	hacia 6	hacia 7	hacia 8	hacia 9	hacia 10	hacia 11	hacia 12	hacia 13	hacia 14
matriz de rutas	3-2-1	3-2	3-4	3-4-5	3-4-5-6	3-7	3-7-8	3-4-9	3-7-10	3-7-10-11	3-4-5-12	3-7-10-13	3-7-14
	3-7-2-1	3-7-2	3-7-10-4	3-7-10-4-5	3-7-10-4-5-6	3-2-7	3-2-7-8	3-7-10-4-9	3-4-10	3-4-10-11	3-7-10-4-5-12	3-4-10-13	3-2-7-14
	0	0	0	0	0	3-4-10-7	3-4-10-7-8	0	3-2-7-10	3-2-7-10-11	3-2-7-10-4-5-12	3-2-7-10-13	3-4-10-7-14
total subtramos para la primera opción de ruta.	15	4	12	22	26	2	14	14	12	25	25	24	16
matriz de costo	91537	24245	72687	133423	159433	12321	96683	95690	78024	161255	152766	157116	104417
	92290	24997	103003	163769	189779	36321	111283	116236	97596	180926	183112	176788	129018
	0	0	0	0	0	163399	237761	0	102825	185655	207713	181717	255496
matriz de probabilidades	PP31	PP32	PP34	PP35	PP36	PP37	PP38	PP39	PP3-10	PP3-11	PP3-12	PP3-13	PP3-14
	0.9976132598875	0.9988211035616	0.9997751735820	0.9997472855152	0.9996950411922	0.9999918824864	0.9999497226438	0.9982533682104	0.9968327101315	0.9958103406716	0.9964557307752	0.9908634946699	0.9945874268457
	0.0011764780223	0.0011779024235	0.0002238846327	0.0002238783876	0.0002238666882	0.0000081011733	0.0000081008317	0.0002235438472	0.0000081155121	0.0000081153298	0.0002231412933	0.0000080760156	0.0000080573905
	0.0000000000000	0.0000000000000	0.0000000000000	0.0000000000000	0.0000000000000	0.0000000095276	0.0000000095272	0.0000000000000	0.0000000018138	0.0000000018137	0.0000000018177	0.0000000018047	0.0000000094761

TABLA No.25

Estas rutas se clasificaron en orden de preferencia según el costo total de viajar por la ruta el cual se calculó como se explicó en la descripción del modelo como la suma de los costos de viajar por cada tramo.

Así mismo se determinó la probabilidad de operación de cada ruta como el producto de la probabilidad de operación de cada uno de los tramos que conforman la ruta. Para las rutas de segunda y tercera opción se debe considerar además la probabilidad de que no funcionen los tramos alternos lo que fuerza al usuario a tomar estas rutas.

Se presenta un ejemplo para las rutas que se originan en el nodo 3 hacia los demás nodos. El registro completo se puede consultar en el apéndice 2.6.

En el primer cuadro se especifican las tres posibles rutas para el usuario con la secuencia de los nodos intermedios para llegar al destino final; en el cuadro amarillo se indica el número de subtramos comprendidos entre el nodo 3 y el nodo final en consideración. Con estos valores de subtramos se incluye un factor de ponderación para la matriz de costo de espera que se presentará más adelante. En las filas de fondo verde se establecen los costos totales de viajar por cada ruta; y finalmente en el recuadro anaranjado se muestran las probabilidades de tomar cada ruta para el usuario. Como es de esperarse los costos de viajar aumentan mientras que las probabilidades disminuyen en orden de prioridad de las rutas. Estos datos se comentarán en el siguiente capítulo.

2.4.7 MATRIZ DE COSTO DE ESPERA K

Esta matriz se definió considerando el número de subtramos que componen un tramo y tomando un valor subjetivo de 100 pesos por usuario y por subtramo. Para conservar las mismas unidades entre las variables se multiplicó el costo de esperar para un usuario por 160, suponiendo que los buses van en su carga máxima equivalente a 160 pasajeros. De esta forma se puede considerar un costo de esperar por bus.

MATRIZ COSTO DE ESPERA K														
costo de espera por subtramo de:														
100 pesos														
Total pasajeros en un bus en su máxima capacidad teórica:														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1		176000	240000	432000	592000	656000	208000	400000	464000	368000	576000	640000	560000	432000
2	176000		64000	256000	416000	480000	32000	224000	288000	192000	400000	464000	384000	256000
3	240000	64000		192000	352000	416000	32000	224000	224000	192000	400000	400000	384000	256000
4	432000	256000	192000		160000	224000	224000	416000	32000	64000	272000	208000	256000	448000
5	592000	416000	352000	160000		64000	384000	576000	192000	224000	432000	48000	416000	608000
6	656000	480000	416000	224000	64000		448000	640000	256000	288000	496000	112000	480000	672000
7	208000	32000	32000	224000	384000	448000		192000	256000	160000	368000	432000	320000	224000
8	400000	224000	224000	416000	576000	640000	192000		448000	352000	560000	624000	544000	416000
9	464000	288000	224000	32000	192000	256000	256000	448000		96000	304000	240000	288000	352000
10	400000	192000	192000	64000	224000	288000	160000	352000	96000		208000	272000	192000	384000
11	448000	400000	400000	272000	432000	496000	368000	560000	304000	208000		480000	400000	592000
12	640000	464000	400000	208000	48000	112000	432000	624000	240000	272000	480000		464000	656000
13	560000	384000	384000	256000	416000	480000	352000	544000	288000	192000	400000	464000		576000
14	432000	256000	256000	448000	608000	672000	224000	416000	480000	384000	592000	656000	576000	

TABLA No.2.6

Al comparar estos valores para cada tramo con respecto a los costos se comprueba que el costo de esperar está efectivamente por encima del costo de viajar lo que justifica para los usuarios la realización del viaje.

2.4.8 MATRIZ VOLUMEN DE TRAFICO

La flota actual de Transmilenio está compuesta por 599 buses articulados¹³; la frecuencia de salida de estos buses varía según el día y la hora para atender la demanda de transporte. Este hecho hace que el cálculo aquí presentado sea un cálculo aproximado que no incluye estas variaciones diarias. Sin embargo para el alcance del modelo es suficiente con estimar un volumen global de buses circulando por cada corredor vial durante el semestre en consideración.

Para la matriz de volumen de tráfico se tomaron valores de registros para el semestre únicamente para los tramos definidos dentro de la red, es decir tramos que estén conectados por dos nodos consecutivos. Con este procedimiento se contabiliza una sola vez cada bus.

Estos valores de volúmenes de buses se estimaron con base en el número de horas de funcionamiento del servicio de Transmilenio haciendo la distinción entre horas de operación de días hábiles y de domingos y festivos. Con este cálculo se determinó un total de minutos al semestre de funcionamiento, y tomando un tiempo promedio de salida de cada ruta y conociendo el número de rutas que pasan por una estación, fue posible obtener una cifra representativa del volumen de buses pasando por un tramo durante un semestre. Cada valor de esta matriz de volumen de tráfico está dado por el producto del número de buses que pasan en los minutos que hay en un semestre multiplicado por el total de pasajeros que van en un bus asumiendo la capacidad máxima de un bus articulado equivalente a 160 pasajeros.

La determinación de las horas de funcionamiento al semestre se realizó como se ilustra en la siguiente tabla:

Variables	Descripción cálculo	Tiempos/días
Horario funcionamiento Días hábiles	DE 5:00 AM A 11:00 PM	18 HORAS
Horario funcionamiento Domingos y Festivos	DE 6:00 AM A 10:00 PM	16 HORAS
Total días al semestre	365 DIAS AL AÑO / 2	183
Número de cada día al semestre	183 DIAS / 7	26
Total de días hábiles al semestre	(26 DIAS * 6) - 7 FESTIVOS	149
Total de domingos al semestre	26 DIAS	26
Total de festivos al semestre	DIAS	7
Horas de funcionamiento días hábiles	149 DIAS * 18 HORAS	2682
Horas de funcionamiento festivos	(26 DOMINGOS + 7 FESTIVOS) * 16 HORAS	528
Total horas de funcionamiento al semestre	2682 HORAS + 528 HORAS	3210
Minutos de funcionamiento al semestre	3210 HORAS * 60 MINUTOS	192600

TABLA No.2.7

¹³ Transmilenio S.A, cifra publicada en octubre de 2004 en página Web: www.transmilenio.gov.co

Para este cálculo se tomaron los horarios de funcionamiento más extensos, lo que corresponde a los horarios de las rutas corrientes.

Una vez conocido el total de minutos de funcionamiento del sistema, y tomando una frecuencia de buses de 3 minutos, es posible calcular el volumen de buses con base en las rutas que viajan por cada tramo:

TRAMOS	RUTAS POR TRAMO	VOLUMEN DE BUSES POR TRAMO
1-2	7	449400
2-3	6	385200
3-4	12	770400
4-5	9	577800
5-6	7	449400
3-7	8	513600
7-8	7	449400
9-4	1	64200
4-10	3	192600
10-11	3	192600
5-12	2	128400
2-7	2	128400
7-10	6	385200
10-13	4	256800
14-7	4	256800

* Número de rutas supuesto para futuras troncales

TABLANo.28

Para los tramos que no están actualmente en funcionamiento no hay conocimiento claro por parte de Transmilenio de las rutas que se plantearán por tales tramos. Por esta razón se tomó una cantidad supuesta de rutas para conformar la matriz de volumen de tráfico que se muestra enseguida:

MATRIZ DE TRAFICO N														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1		449400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	449400		385200	0	0	0	128400	0	0	0	0	0	0	0
3	0	385200		770400	0	0	513600	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	770400		577800	0	0	0	64200	192600	0	0	0	0
5	0	0	0	577800		449400	0	0	0	0	0	128400	0	0
6	0	0	0	0	449400		0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	128400	513600	0	0	0		449400	0	385200	0	0	0	256800
8	0	0	0	0	0	0	449400		0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	64200	0	0	0	0		0	0	0	0	0
10	0	0	0	192600	0	0	385200	0	0		192600	0	256800	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	192600			0	0	0
12	0	0	0	0	128400	0	0	0	0	0			0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	256800	0	0			0
14	0	0	0	0	0	0	256800	0	0	0	0	0	0	

* Número de buses al semestre

TABLANo.29

Como se puede observar la matriz de tráfico que se obtuvo es una matriz simétrica bajo la suposición de que el volumen de buses que pasan en un sentido pasan de igual manera en el otro sentido durante su recorrido de regreso.

2.4.9 MATRIZ DE COSTO TOTAL DE LA RED

Siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo anterior se llega al valor del costo total de la red al combinar los resultados de los costos de viajar por cada ruta, las probabilidades de las rutas, los valores de costo de espera y los valores de volúmenes de tráfico:

MATRIZ CTR COSTO TOTAL DE LA RED														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1		67567	92186	165428	226615	252857	80486	155273	179159	147481	231750	247402	229162	174507
2	67567		24363	97435	158499	184690	12748	87387	110978	79176	163292	178894	160181	106021
3	92186	24363		72859	133746	159865	12351	86831	86307	78649	162593	153960	159501	105442
4	165271	97458	72859		60847	86945	85213	159740	13258	25045	108468	80656	105055	179001
5	226401	158349	133746	60847		26092	146101	220636	74258	85897	169326	19479	166409	240433
6	252619	184514	159865	86945	26092		172221	246764	100415	111998	195435	45698	192706	266766
7	80486	12748	12351	85193	146068	172182		74477	98668	66673	150961	166343	128264	92982
8	155273	87387	86831	159704	220587	246709	74477		173360	141955	226250	241253	223611	168105
9	178991	110873	86307	13258	74258	100415	98691	173399		38364	121978	94172	118640	143886
10	153810	79279	79055	25045	85897	111998	66673	141955	38364		83418	105836	79810	161084
11	183983	163464	163344	108468	169326	195435	150961	226250	121978	83418		189678	163857	246043
12	247172	178727	153960	80656	19479	45698	166380	241306	94172	105836	189678		186860	261297
13	229384	160348	160223	105055	166409	192706	147742	223660	118640	79810	163857	186860		243402
14	174507	106021	105442	178962	240381	266708	92982	168105	192739	161084	246043	261241	243402	
SUMA	3.04E+10	4.14E+10	7.19E+10	9.70E+10	4.94E+10	1.17E+11	9.1E+10	3.35E+10	8.51E+08	6.71E+10	1.61E+10	2.50E+09	2.05E+10	2.39E+10
													TCN	5.57E+11

TABLANo.2.10

Se obtiene finalmente el costo total de la red TCN el cual se resalta en fondo verde; en el siguiente capítulo se profundizará sobre su significado e interpretación.

2.4.10 COSTOS DE INTERVENCIÓN

Los costos de las intervenciones que se establecen en este caso son los resultantes al lograr una variación del 1% en las tasas.

Para los costos de incrementar en un 1% la tasa de reparación y a los costos de disminuir en un 1% la probabilidad de falla se tomaron valores con un estimativo de su orden de magnitud. La determinación de esos costos, dado sus diferentes posibles orígenes y dada su variación en cada tramo es un tema extenso que no entra dentro del alcance de esta investigación, resultaría de gran interés investigar sobre este tema más a fondo. Para efectos del modelo se tomaron por lo tanto costos asumidos, teniendo en cuenta que el costo de hacer más eficiente una reparación es menor comparativamente con el de realizar una corrección para disminuir la probabilidad de falla. La aproximación que se hace en este caso es tomar el costo de aumentar la tasa de reparación con órdenes de magnitud de un tercio de los costos correspondientes a intervenciones sobre la infraestructura. Dentro del modelo estos costos se asignaron haciendo uso de una función de aleatoriedad para cada tramo.

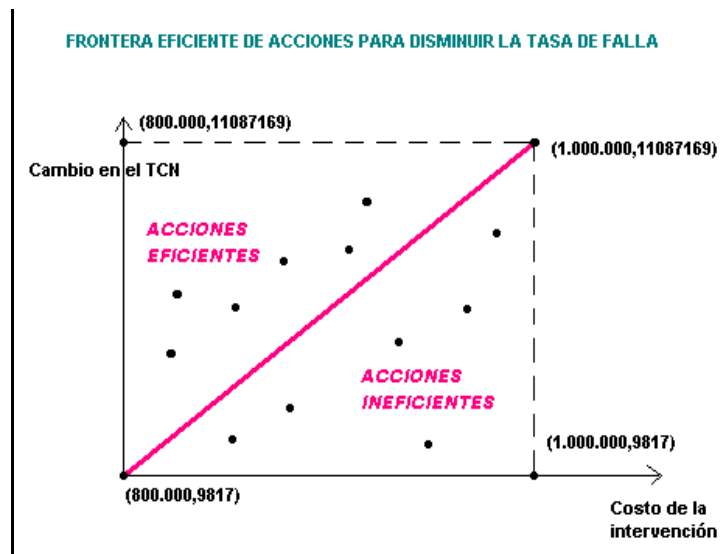
2.4.11 GRAFICAS DE LA FRONTERA EFICIENTE

Se presentan las correspondientes gráficas para un cambio del 1% en la tasa de falla y para un cambio del 1% para la tasa de reparación:

Al tomar los costos de intervención como valores aleatorios se obtienen relaciones permanentemente cambiantes lo que llevó a hacer el siguiente análisis:

Al definir un rango de valores de los costos de intervención para disminuir la tasa de falla (800.000-1.000.000) es posible calcular la ecuación de la recta (aproximando la frontera eficiente a una recta) que separa las acciones eficientes de las acciones ineficientes.

Por otro lado, conociendo el máximo cambio generado en el TCN y el mínimo cambio generado en el TCN se pueden definir los puntos extremos.

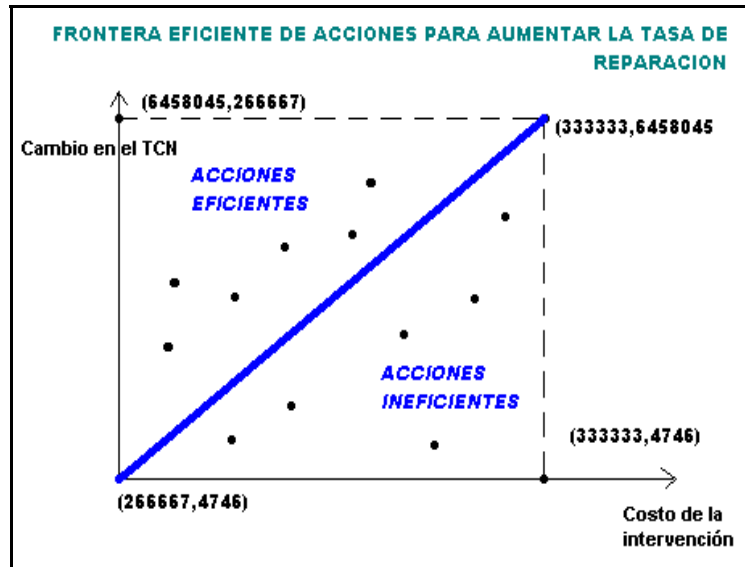


GRAFICA 2.1

De esta manera para cualquier costo de intervención es posible evaluar la eficiencia de una acción puesto que se conocen los cambios en el TCN que resultaron del modelo y se conoce la ecuación de la recta de la frontera eficiente:

$$Y = 555.39 X - 444299591$$

Siguiendo el mismo procedimiento para las acciones sobre la tasa de reparación con un rango entre (2666667-3333333) se obtiene lo siguiente:



GRAFICA 22

Ecuación de la recta de la frontera eficiente:

$$Y = 96,80 X - 25808741$$

Conclusión capítulo:

Queda demostrado con este capítulo que el modelo anteriormente definido es aplicable a la red de Transmilenio bajo algunas adaptaciones y modificaciones.

Las variables de entrada contempladas dentro del modelo son en su mayoría valores con los que se cuenta en la realidad, y que permiten establecer condiciones de funcionamiento del sistema de transporte.

Mejorar la precisión en la determinación de cada una de las variables son temas abiertos de investigación que aportarían a la perfección del modelo y a su aplicación a la red de Transmilenio.

CAPITULO 3: ANALISIS DE RESULTADOS

La interpretación de resultados y las conclusiones que se pueden extraer del modelo son el objetivo primordial y es sobre lo que se busca profundizar en la investigación. Es a partir del análisis de los datos obtenidos que es posible establecer correlaciones entre las condiciones de cada tramo y sus efectos actuales sobre toda la red de Transmilenio; de la misma manera como posteriormente es posible identificar los efectos de invertir en un tramo en particular sobre la totalidad de la red.

De esta forma, en este capítulo se presenta un análisis de los resultados obtenidos a partir de la modelación de la red de Transmilenio.

El modelo arroja una amplia gama de resultados que requieren de interpretación y que al relacionarse entre sí permiten obtener conclusiones y tendencias importantes para tener en cuenta dentro de las políticas de mejoramiento del sistema de transporte.

Teniendo en cuenta además que se cuenta con información a diferentes niveles, como información particular a un subtramo, información para tramos más extensos que comprenden varios subtramos e información acerca de toda la red, se desarrolla gradualmente este capítulo para interpretar la información de manera organizada y categorizada.

Dados los ordenes de magnitud de los valores que se obtienen del modelo, se hace necesaria la utilización de varias cifras decimales para poder detectar los cambios en las variables. Esto sucede especialmente a nivel de las probabilidades.

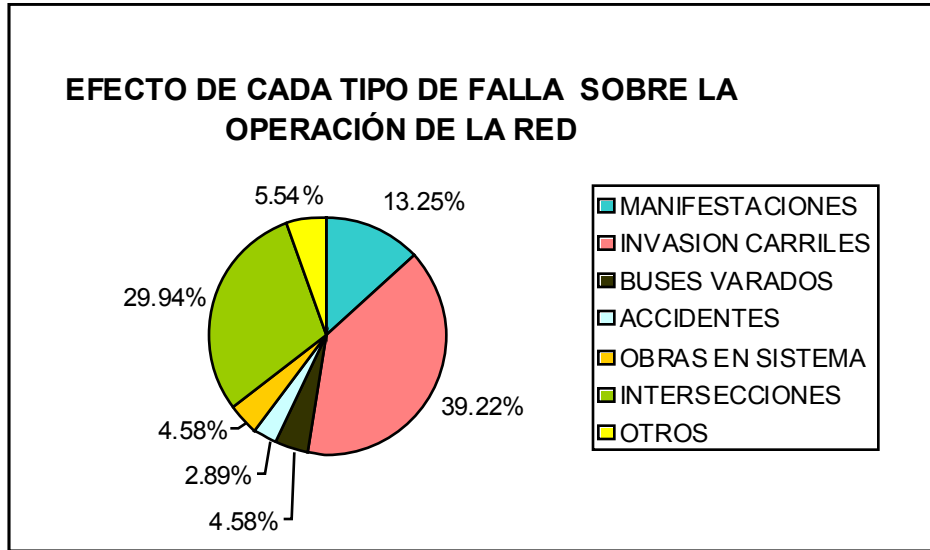
3.1 ANALISIS BAJO DIFERENTES PERSPECTIVAS

Al considerar por a parte cada variable incluida dentro del modelo es posible encontrar mas comportamientos y relaciones que pueden ser significativas para la comprensión del funcionamiento de la red; por esta razón se incluye dentro de este subcapítulo un análisis específico a cada parámetro.

3.1.1 ANALISIS POR TIPO DE INTERRUPCIONES

A continuación se presenta un seguimiento de la probabilidad de falla y de la tasa de reparación por tipos de interrupciones.

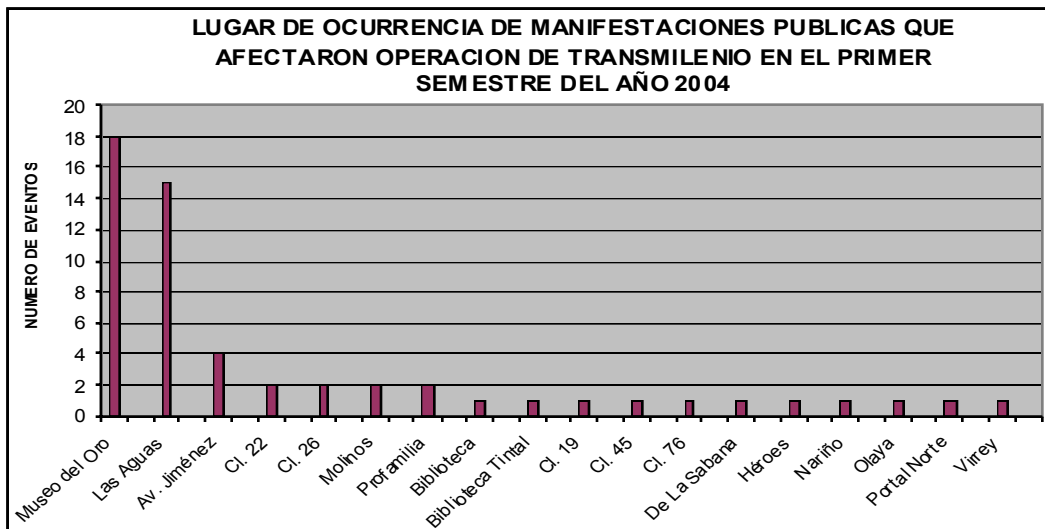
Como primera medida se muestra en la siguiente gráfica el peso que cada tipo de falla tiene sobre el total de eventos registrados en el semestre.



GRAFICA 3.1

3.1.1.1 Interrupción por manifestaciones públicas

Aunque hay un componente de aleatoriedad en este evento y los lugares de ocurrencia varían según los objetivos de las manifestaciones, existen también zonas con intereses particulares que por su localización dentro de la ciudad o por su significado o connotación social resultan más propicias para la realización de manifestaciones públicas; este hecho se refleja dentro de los registros utilizados tal como se presenta en el siguiente gráfico:



GRAFICA 32

Como puede verse las estaciones con mayores registros de manifestaciones públicas son las correspondientes a Avenida Jiménez, Museo del Oro, Las

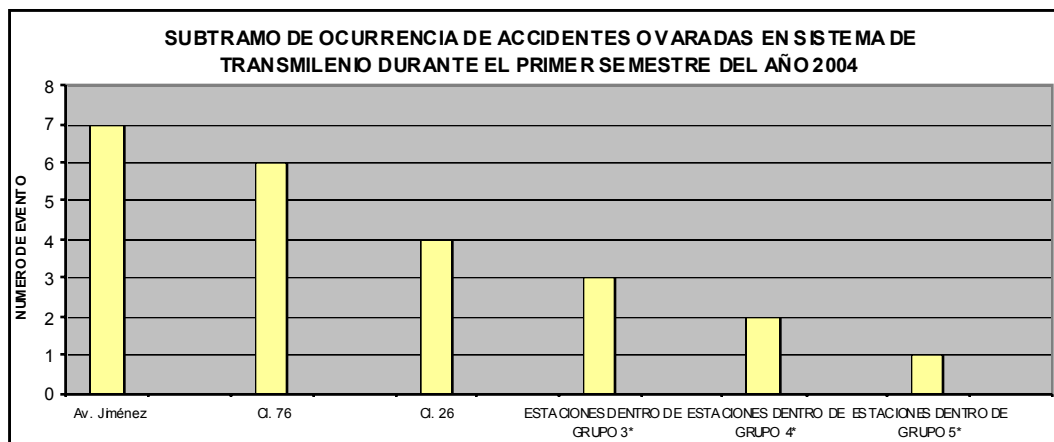
Aguas, Molinos, Cl 22, Cl 26 y Profamilia, la mayoría localizadas en la zona del centro de la ciudad. Cabe anotar que el número de manifestaciones ocurridas en los tramos de Las Aguas y del Museo del Oro está muy por encima de los demás sectores, lo que se traduce en que este tramo tiene una mayor probabilidad de ser interrumpido como consecuencia de manifestaciones.

3.1.1.2 Accidentalidad y buses varados

La ocurrencia de accidentes y de varadas se puede considerar en parte como un evento aleatorio, un accidente puede suceder en cualquier lugar, aunque puede haber tramos en particular más propensos a la ocurrencia de accidentes por congestionamiento en intersecciones o por deficiencias en la señalización.

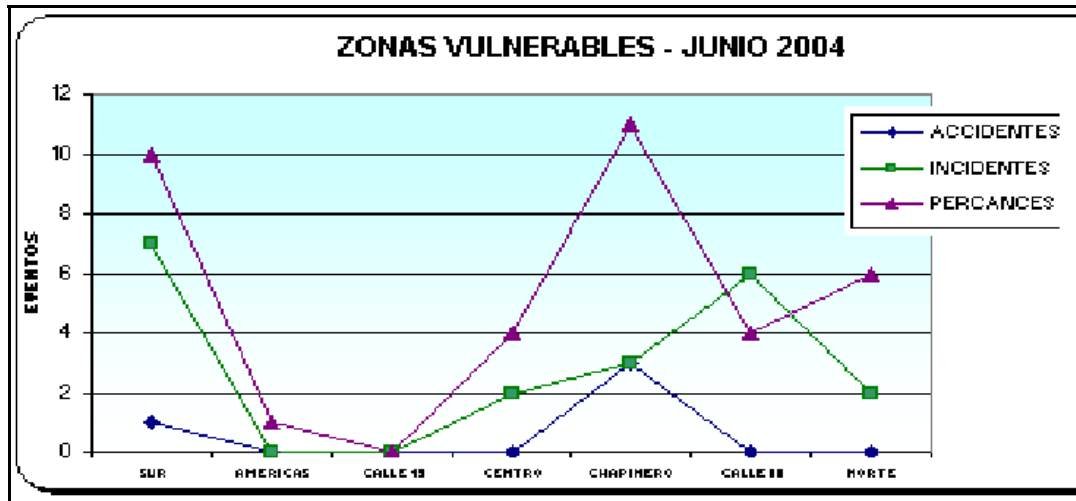
Se presenta a continuación un gráfico en el que es posible ver el lugar de ocurrencia de este tipo de eventos para el periodo de los registros. En este gráfico se sumaron los datos de accidentes y varadas conformando un solo rubro, y como se obtuvieron varias estaciones con el mismo número de ocurrencia de eventos, se reagruparon por categorías facilitando su presentación en la gráfica. Los grupos están compuestos así:

- Grupo 3: Av. 39, CL 19, CL 63, Héroes, Profamilia, Santa Lucia y Virrey
- Grupo 4: Cl. 45, Marly, Molinos y Biblioteca
- Grupo 5: Cl. 22, CL 57, CL 85, CL 100, Flores, Olaya, Prado, Tercer Milenio, Biblioteca Tintal, Cra 77, Escuela Militar, Granja, Pob, Portal 80, Puente Aranda y Quirigua.



GRAFICA 33

Resulta interesante comparar estos resultados con los suministrados por Transmilenio. Los datos con los que cuenta Transmilenio S.A. se exponen en la siguiente gráfica en donde se sectorizan las principales zonas de las troncales:



GRAFICA 34 Fuente: Transmilenio S.A, junio 2004

A partir de esta gráfica puede verse que el lugar donde con mayor frecuencia ocurren accidentes, percances e incidentes corresponde a la zona de Chapinero seguido de la zona sur, lo cual se puede asemejar con lo obtenido del modelo puesto que las estaciones de la zona de Chapinero están en su mayoría incluidas dentro de los grupos definidos en el gráfico 3.2.

3.1.1.3 Invasión de carriles de Transmilenio por particulares

Para este tipo de interrupción si es posible resaltar algunas causas y condiciones específicas que presentan ciertos tramos, las cuales hacen más probable la invasión de los carriles exclusivos de Transmilenio por parte de vehículos particulares. Un ejemplo de esto puede ser a nivel del tramo comprendido entre la estación de Molinos y el Portal Usme en el que no hay una demarcación ni una separación física entre el carril de Transmilenio y los carriles de los vehículos particulares.

Se definieron algunos rangos de eventos con base en lo obtenido a partir de los registros. De esta manera se diferencian cuatro rangos:

RANGO	DEFINICION DEL RANGO	SUBTRAMOS	NUMERO DE EVENTOS DE INVASION DE CARRILES POR PARTICULARES
4	ENTRE 11 Y 29 EVENTOS REGISTRADOS	Biblioteca	29
		Portal de Usme	22
		Molinos	18
		Escuela Militar	16
		Cl. 63	14
		Av. Jiménez	13
		Santa Lucía	10

3	ENTRE 6 Y 10 EVENTOS REGISTRADOS	Ci. 19	9
		Portal de la 80, Portal de las Américas, Puente Aranda, Flores y Museo del Oro	8
			6
2	ENTRE 2 Y 5 EVENTOS REGISTRADOS	Mazurén, Biblioteca Tintal, Parque, Patio Bonito, TV86	5
		Av.39, Ci 40 Sur, Ci 76, Toberín, Las Aguas	4
		Ci. 22, Ci 45, Hortúa, Olaya, Portal Norte y Tercer Milenio	3
		Ci. 26, Ci 57, Ci 72, Ci 106, Ci 127, Ci 146, Hospital, Marly, Pepe Sierra, Prado, Quiroga, Av Cali, De la Sabana, Polo, Portal Tunal, Quirigua	2
1	UN EVENTO REGISTRADO	Alcalá, Ci 85, Ci 100, Ci 142, Nariño, Profamilia, Restrepo, Virrey, Banderas, Ora 47, Ferias y Zona Industrial	1

TABLA. 3.1

Con base en la tabla presentada se puede decir que la invasión de carriles además de ocurrir con frecuencia, sucede en muchos tramos de la red; en realidad todas las troncales actuales están incluidas dentro de la lista. Este tipo de evento está afectando la operación de Transmilenio y requiere de atención.

3.1.1.4 Problemas en intersecciones

La interrupción en intersecciones es un fenómeno más localizado y fácilmente detectable a partir de los registros que se tienen. Al analizar los resultados obtenidos puede verse que los cruces en los que más comúnmente se interrumpe la operación de Transmilenio son: calle 63, calle 19, Héroes, Portal 80 y Avenida Jiménez, y con una menor frecuencia los cruces de la calle 72, calle 57, calle 76 y las Flores. Dentro de los registros de Transmilenio aparecen varios eventos de este tipo en un mismo día y para una sola intersección lo que demuestra una alta frecuencia de ocurrencia. Esta situación puede deberse a la manera como están programados los semáforos, al diseño de las intersecciones e incluso a aspectos sociales tales como la cultura ciudadana y el comportamiento y respeto de las señales de tránsito por parte de los conductores. Cualquiera que sea la razón, estas intersecciones son puntos de conflicto que afectan la operación del sistema de Transmilenio y que deben revisarse.

3.1.1.5 Otro tipo de interrupciones

Otro tipo de interrupciones pueden ser las ocurridas por obras de mantenimiento y de rehabilitación de la infraestructura vial. No obstante, se trata en estos casos de eventos transitorios y ocasionales cuya ocurrencia se limita al lapso de tiempo que dura la obra. De esta manera los registros que se

tiene corresponden a aquellos tramos en los que se plantearon intervenciones durante el primer semestre del 2004 y son: Avenida Jiménez sentido E-W y W-E, Mandalay (E-W y W-E), Museo del Oro (E-W y W-E), Pradera (W-E), Av. 39 (S-N y N-S), Cl 26 (S-N y N-S), Cl 45 (N-S), Cl 63 (S-N, N-S), Cl 72 (N-S), Cl 76 (N-S), Cl 100 (N-S), Marly (N-S), Portal Norte (S-N), Profamilia (S-N y N-S) y Virrey (S-N y N-S).

Las interrupciones debidas a otros inconvenientes como pueden serlo simulacros y robos no están focalizadas en ningún tramo y son muy esporádicas. Este tipo de eventos rara vez llega a bloquear la circulación de los buses parcial o totalmente.

El registro correspondiente a “*trancón*” es una combinación de dos tipos de interrupciones como los son invasión de carriles por particulares y conflictos en intersecciones, y también hace alusión a las filas de buses que se forman en los vagones de aquellas estaciones que a ciertas horas del día, especialmente durante la hora pico, se saturan.

3.1.2 ANALISIS DETASAS

Al observar las tasas de falla y de reparación obtenidas dentro del modelo se pueden hacer algunos comentarios importantes.

3.1.2.1 Resultados según tasa de falla

De los resultados del apéndice 2.2 *Determinación de tasas de falla para cada subtramo de la red de Transmilenio*, se puede decir lo siguiente:

Dentro de los datos de falas puede verse que existen más registros para fallas ocurridas por invasión de carriles por parte de particulares que otros tipos de fallas, este es entonces el tipo de interrupción más frecuente.

Las mayores tasas de falla la presentan los tramos compuestos por las estaciones de los Héroes, la Calle 63, la Calle 19 y Quirigua, todas por problemas en las intersecciones y semáforos. Igualmente para el tramo de la estación de Molinos también hay un tasa de falla elevada con respecto al resto pero por causa de invasión de carriles por particulares. Como se dijo anteriormente la explicación de esto es que actualmente a esta altura no existe una separación física entre carriles por lo tanto el sistema es vulnerable en este sentido en el subtramo comprendido entre Molinos y Portal Usme y está sujeto al comportamiento y a la *educación* del conductor del vehículo particular.

Los subtramos con menor probabilidad de falla corresponden a aquellos para los cuales sólo se presentó un registro de interrupción a lo largo de todo el semestre; es el caso de la Calle 142, Alcalá, Socorro, Banderas, entre otros.

A los tramos para los cuales no hubo eventos se les asignó la tasa promedio considerando un cierto grado de desconocimiento del tramo ante la posibilidad

de ocurrencia de fallas; hay que recordar que ningún tramo está totalmente exento de fallar.

3.1.2.2 Resultados según tasa de reparación

De los resultados del apéndice 2.3 *Determinación de tasas de reparación para cada subtramo de la red de Transmilenio* se encuentran los siguientes puntos importantes:

En este cuadro hay menos registros que en el procesamiento porque muchos eventos contabilizados no presentan información acerca de duración en la reparación.

Para un mismo subtramo se calculó un tiempo de reparación promedio para un tipo de falla y posteriormente un tiempo promedio para todas las fallas.

El tiempo promedio de las tasas con las que se cuenta es de 6.5 minutos, sin embargo para aquellos tramos sin datos de tiempos de reparación se optó por asignarles una tasa de 5 minutos considerando una reparación más eficiente, un poco por encima del promedio.

Los mayores tiempos de reparación lo presentan los tramos en Mazurén, Quiroga, TV 86 y Biblioteca Tintal. Pero este hecho no permite hacer conjeturas puesto que no se está teniendo en cuenta la magnitud del incidente. Aunque si se puede ver que los tiempos mayores se presentan para el tipo de falla de invasión de carriles por parte de particulares, no es posible generalizar y asegurar que en estos tramos la respuesta es más lenta en comparación con otros tramos.

Por otra parte los tramos cuyas estaciones son la del Polo, Zona Industrial y de la Sabana presentan dentro del modelo un tiempo de reparación bajo porque existe un registro que sirve como soporte de que hubo una atención rápida ante un evento ocurrido. Esto podría llevar a decir que hay una respuesta rápida para estos tramos, sin embargo como se dijo antes, la afirmación también depende de la magnitud del evento.

Los mayores tiempos de reparación son los correspondientes a invasión de carriles por particulares seguido de manifestaciones públicas y de accidentes.

3.1.3 ANALISIS SECUENCIAL POR CATEGORIAS

Las categorías que se pueden diferenciar dentro del análisis son: por subtramos, por tramos, por rutas, por sentido y por troncales.

3.1.3.1 Subtramos

Con el fin de hacer posible el seguimiento del análisis y de facilitar la localización de las estaciones que conforman los subtramos, se anexó al final del documento el mapa público de las troncales de Transmilenio (ver apéndice 3.1)

De los apéndices 2.4(a) y 2.4(b) *Información-datos de entrada subtramos red Transmilenio* se hace énfasis en los siguientes aspectos:

Se realizó un ordenamiento de los subtramos por troncal y para cada uno se hizo una caracterización; como se puede ver se obtuvo un total de 115 subtramos entre los existentes y los nuevos.

En la sexta columna del cuadro se indicó el número de carriles exclusivos para Transmilenio; para las futuras troncales al igual que para la Autopista Norte y el tramo hacia el Tunal, se plantea un sólo carril lo que demanda contar previamente con acciones definidas a poner en marcha para estas troncales en el momento en que ocurra una interrupción. Se debe por ejemplo contemplar una fácil adecuación de los carriles contiguos para los buses de Transmilenio.

Adicionalmente en la séptima columna se presenta un coeficiente de afectación de la tasa de falla proporcional a la longitud del subtramo la cual se especifica en la columna 10 del cuadro. Los subtramos más extensos como Portal Norte - Toberín, Prado - Calle 127, Molinos - Portal Usme, Pradera - Marsella, TV 86 - Biblioteca Tintal, Patio Bonito - Portal Américas y Cra 60 - Madelena presentan un mayor coeficiente de afectación de la tasa de falla y según donde se localicen estos tramos esto tiene efectos directos sobre las probabilidades de operación.

Como no fue posible obtener información sobre la longitud de los subtramos de la troncal de Suba se asignó la distancia media entre estaciones para las que si se tienen datos reales.

Para los tiempos utilizados dentro del cálculo del costo de viajar puede verse lo siguiente: el tiempo en el vehículo se calculó con base en la longitud de los tramos y en la velocidad promedio de 26.5 Km/hora. Se hizo la conversión para obtener unidades de tiempo en minutos.

En lo referente a los tiempos andando hacia la estación se tomó una duración común a todos los tramos de 3 minutos; esto es relativo porque el ritmo de caminata varía según el usuario y según la razón de su viaje.

Para la determinación de los tiempos de espera dentro de la estación se tuvieron en cuenta el número de rutas que paran en cada estación. En aquellas estaciones donde únicamente paran una o dos rutas el tiempo de espera promedio es mayor.

Con base en estos tiempos se obtuvo el costo de viajar que está expresado en minutos como una equivalencia del valor en pesos otorgado al tiempo de viaje con el factor de conversión VSTV.

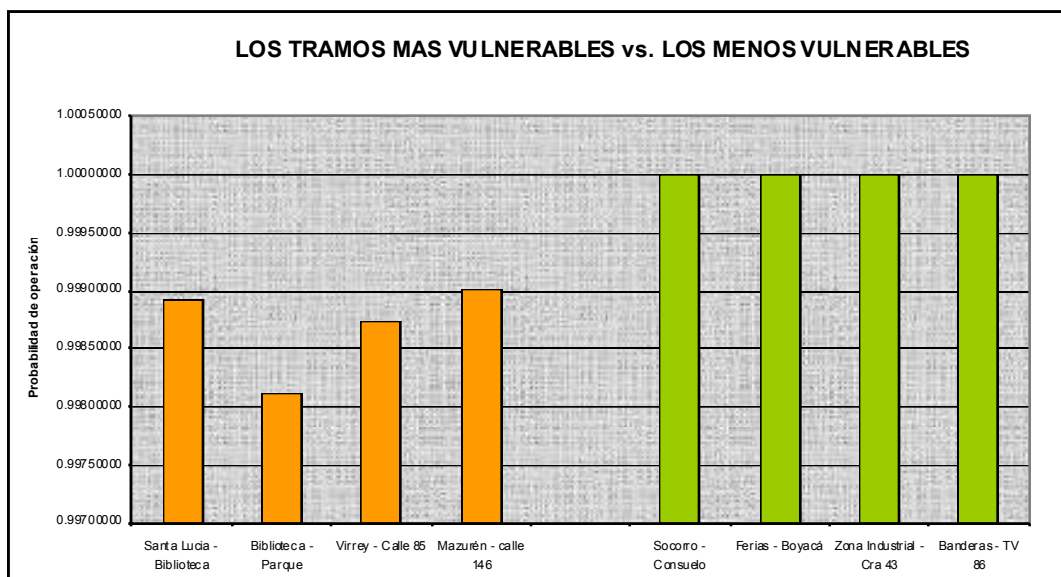
Los subtramos con mayor costo de viajar son los comprendidos entre la TV 86 y Biblioteca Tintal, Patio Bonito y Portal Américas, Mblinos y Portal Usme, los cuales coinciden con ser los tramos de mayor longitud.

Los subtramos con un costo de viajar menor son los subtramos entre la Avenida Jiménez-De la Sabana, Mundo Aventura-Mandalay, Calle 85-Héroes, Flores-Calle 63, Minuto de Dios-Cra 77, Cra 77-Granja y Fucha-Restrepo que a su vez son los subtramos de menor longitud.

Como resultado de las tasas de falla y de reparación los subtramos con mayor probabilidad de operación son: Socorro-Consuelo, Ferias-Boyacá, Zona Industrial-Cra 43 y Banderas-TV 86.

Por el contrario los subtramos con menor probabilidad de operación son: Virrey -Calle 85, Santa Lucia-Biblioteca y Biblioteca-Parque. En estos tramos la operación puede ser más interrumpida como consecuencia de la combinación establecida entre la tasa de falla y la tasa de reparación.

Estos resultados se resumen por medio de la siguiente gráfica:



GRAFICA 35

3.1.3.2 Tramos

De los resultados obtenidos por tramo se destacan los siguientes puntos, ver apéndice 2.5 *Información datos tramos de la red de Transmilenio*.

Con base en la metodología aplicada, el tramo cuyo costo de viajar es más elevado es el 14-7 (entre la estación de la Escuela Militar y el Portal de Suba) seguido del tramo 10-11 (Entre la estación Ricaurte y el Portal Américas).

Una razón válida del mayor costo de viaje de estos dos tramos con respecto a los demás es el número total de subtramos que los componen puesto que los

costos de viajar de los tramos se obtuvieron sumando los costos de viajar por los subtramos. De la misma forma los menores costos de viaje corresponden a los tramos 3-7, 9-4, 2-7 y 5-12, que son los de menor longitud.

Las probabilidades de operación que se obtuvieron para todos los tramos están muy cercanas a la unidad, resultado que se esperaba puesto que el sistema Transmilenio está continuamente operando.

La mayor probabilidad de operación la presenta el tramo 3-7 (entre la calle 76 y la Escuela Militar) con 0.99999188 seguido del tramo 4-10 (entre Avenida Jiménez y Ricaurte) con una probabilidad de operación de 0.99997826.

La menor probabilidad de operación la tienen los tramos 14-7 (entre la Escuela Militar y Portal Suba) y 10-13 (entre Ricaurte y Portal del Sur) bajo los supuestos realizados con el cálculo de las tasas promedio de reparación y de falla por tratarse de tramos que aún no existen y de los cuales se carece de datos.

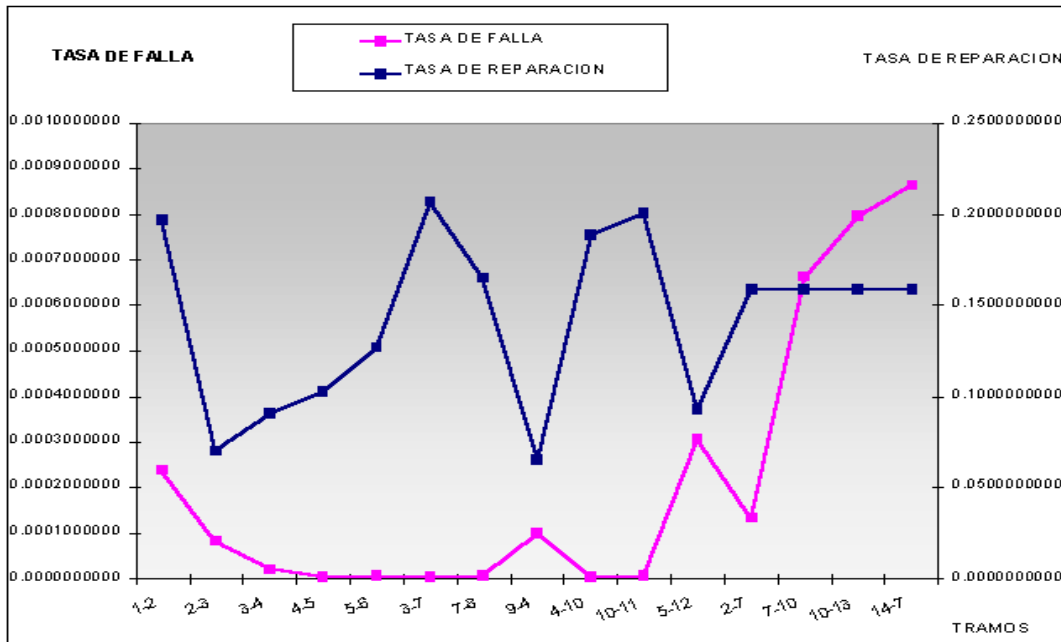
De los tramos existentes la menor probabilidad de operación la presentan los tramos 5-12 (entre Santa Lucía y Portal Tunal) con una probabilidad de funcionamiento de 0.99670761 y 9-4 (en el eje ambiental) con 0.99847785.

La mayor tasa de falla la tienen los tramos 14-7, 10-13 y 7-10 bajo los supuestos realizados para futuras conexiones. De los tramos existentes la mayor tasa de falla corresponde a los tramos 5-12 (de Santa Lucía a Portal Tunal) con 0.0003067945 y 1-2 (de Portal Norte a calle 100) con 0.0002382587 lo que permite postular que en estos tramos puede haber una mayor frecuencia de ocurrencia de fallas. La explicación para el tramo de la autopista norte puede ser la afectación que se le hizo a la tasa de falla por concepto del número de carriles y longitud de los tramos; al haber un sólo carril exclusivo el tramo es más vulnerable.

La mayor tasa de reparación la poseen los tramos 10-11 y 3-7 (tasas de 0.200489126 y 0.206456473 respectivamente) lo que se traduce en que las interrupciones que se presenta en los tramos son rápidamente reparadas y solucionadas.

El tramo de menor tasa de reparación es el 9-4 (de 0.064881304); en este tramo las interrupciones son más duraderas lo cual se comprueba cuando ocurren manifestaciones públicas que obligan a cerrar las estaciones comprendidas en este tramo por periodos de tiempo *considerables*.

Para poder comparar cada tramo con base en las tasas de falla y de reparación simultáneamente se presenta el siguiente gráfico con el que se comprueba que no existe una relación clara entre tasa de falla y tasa de reparación. Los tramos donde más ocurren fallas no son los tramos donde más rápido se reparan.



GRAFICA 3.6

Adicionalmente en el apéndice 2.5 se incluyó la matriz resumen de los datos elementales del modelo como lo son por filas: los centroides inicio y fin de cada uno de los tramos, los valores de λ y de μ , los costos de viajar y las probabilidades de operación de los tramos.

3.1.3.3 Rutas

De los resultados del apéndice 2.6 *Definición de rutas, número de subtramos, costos de viajar por las rutas y probabilidad de tomarlas* se puede resaltar lo siguiente:

La probabilidad de que un usuario tome una u otra ruta de las tres posibles varía bastante. Esto se explica porque la primera opción de ruta va a ser casi siempre la que toma el usuario, puesto que la posibilidad de que funcione esta ruta es muy grande dado que se obtuvieron probabilidades de operación bastante altas.

Así mismo la probabilidad de tomar la tercera opción de ruta es prácticamente nula.

Dentro de la red definida más de la mitad de los tramos no son redundantes (i.e 1-2, 14-7, 9-4, 5-12, 5-6, 10-13, 7-8 y 10-11), todos corresponden a tramos que se conectan con portales. Este hecho hace que por el momento la red sea más vulnerable; sin embargo a futuro se espera que esta *debilidad* se atenúe con la construcción de más troncales que ofrezcan más posibilidades de rutas y que no recarguen toda la probabilidad de funcionamiento de la red a un sólo tramo.

Por otro lado se puede ver que el orden de magnitud entre costos de las tres opciones de rutas se mantiene; es decir que a un usuario no le implica un aumento notorio en el costo de viajar al decidirse o al tener que tomar una u otra ruta, esto a diferencia de los costos del artículo de consulta tratado en el primer capítulo en el que la red base es una red de malla vial nacional.

El costo de viajar por una ruta es el mismo en uno u otro sentido. De igual manera la probabilidad de tomar la primera opción de ruta es la misma en uno u otro sentido, mientras que las probabilidades de tomar una segunda o tercera opción de ruta sí difieren en uno u otro sentido.

Los ordenes de magnitud de las probabilidades de tomar la segunda opción de ruta varían bastante según de que punto a que punto se viaje.

3.1.3.4 Sentidos de circulación

Del procesamiento de interrupciones en el sistema Transmilenio para estaciones en troncal sentido norte-sur, sur-norte, occidente-oriente y oriente-occidente, vale la pena mencionar:

La situación para una misma troncal puede ser muy diferente según el sentido de circulación que se considere teniendo en cuenta que puede haber sentidos mas cargados y con mayor predisposición a ser interrumpidos.

Por ejemplo con referencia al bloqueo en intersecciones la influencia varía según el sentido de la calle que intercepta la troncal, es decir que la interrupción en la red se presenta primordialmente del lado donde se genera la cola de vehículos que no alcanzan a pasar completamente la intersección.

El tipo de falla más común en ambos sentidos de circulación es la invasión de carriles por particulares de los carriles exclusivos de Transmilenio. A este tipo de falla le siguen las relacionadas con dificultades y taponamiento en intersecciones.

Las obras en el sistema ocurren en los tramos de las estaciones de la Avenida Caracas entre Calles 16 y 76, en ambos costados, resultado que se confirma con las obras de rehabilitación y reparación de losas de concreto que se han efectuado durante este año.

Las mayores duraciones en tiempo de reparación son para las manifestaciones públicas en la mayoría de los casos. No obstante la invasión de carriles por parte de particulares también influye en algunos casos en los tiempos de reparación grandes como por ejemplo el caso de aproximadamente 30 minutos en cercanías a la estación de Mazurén.

Ocurren más o menos con la misma frecuencia eventos en uno u otro sentido; para algunos tipos de falla hay más eventos en el sentido sur-norte como por ejemplo en invasión de carriles por particulares, problemas en intersecciones y trancones, mientras que para otros tipos de falla hay una mayor tasa de

ocurrencia de interrupciones en sentido norte-sur como por ejemplo obras de mantenimiento y manifestaciones.

En algunas estaciones no hay ningún registro como por ejemplo en tramos en los que se localizan las estaciones de Cardio infantil, Consuelo y Fucha, lo cual no quiere decir que estos tramos estén exentos de falla puesto que varios tipos de eventos pueden ocurrir en cualquier lugar. Para las troncales ubicadas en dirección occidente-oriente-occidente hay aún más estaciones sin registros.

En contraste, los tramos con mayor registro de eventos en dirección sur-norte y norte-sur son aquellos donde se localizan las estaciones de la Avenida Jiménez, Mblinos, Calle 76 y Calle 63.

Los tramos con más registros en sentido occidente-oriente-occidente son donde se encuentran las estaciones de la Avenida Jiménez, Biblioteca, Museo del Oro y Portal 80.

En general hay menos registros en las troncales dirección occidente-oriente-occidente que en las troncales norte-sur-norte, lo que podría llevar a pensar que las troncales en dirección norte-sur-norte son las que requieren de una intervención para reducir la posibilidad de ocurrencia de interrupciones.

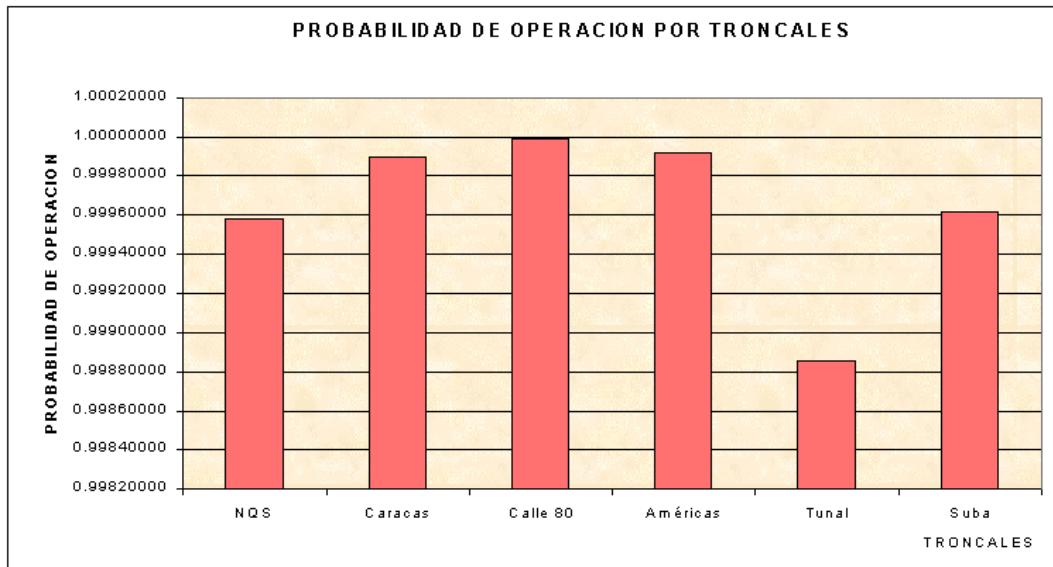
3.1.3.5 Troncales

Es conveniente realizar un análisis en paralelo con algunos datos de Transmilenio. Por esta razón se presenta el siguiente cuadro de pasajeros por hora y por corredor, datos proyectados en un estudio realizado previamente para la etapa de planeación de Transmilenio:

Cargas máximas actuales en corredor	Pasajeros / hora
Avenida Caracas	36.000
Calle 80	25.100
Autopista Norte	16.700
NQS	25.400
Avenida Suba	24.800
Avenida de las Américas	28.800
Total	156.800

valores para el tramo y sentido más cargado en la hora pico am
 TABLA 3.2 Fuente: "Elaboración propia", aforos Frecuencia Ocupación Visual abril 1999
 diapositivas Steer Davies Gleave

Se esperaría que aquellos tramos con mayor volumen de pasajeros (Avenida Caracas y Avenida de las Américas) sean a su vez los menos vulnerables a interrupciones: Sin embargo no hay una dirección directa como se puede ver en la siguiente gráfica en la que se presentan las probabilidades de operación por troncales:



En esta gráfica se puede realizar una comparación entre troncales con respecto a la probabilidad de operación obtenida con base en la probabilidad de operación de todos los subtramos que las componen.

Como puede verse la situación más favorable es para la troncal de la calle 80 seguida de la troncal de las Américas. Estos resultados, sin embargo pueden cambiar cuando entren en funcionamiento las troncales de la NQS y de Suba puesto que el análisis para estas dos troncales está basado en supuestos.

La troncal del Tunal presenta la menor probabilidad de operación. A esto se suma que dos de los tres subtramos que componen la troncal del Tunal son los que presentan menor probabilidad de operación con respecto a todo el resto de subtramos, este hecho lleva a pensar que es necesario buscar alternativas para aumentar su probabilidad de operación y disminuir la vulnerabilidad de toda la troncal.

3.2 RESULTADOS RELEVANTES

3.2.1 EL TCN OBTENIDO

El TCN es el punto de comparación de las decisiones a tomar puesto que es a partir de este que se relacionan y que se confrontan los efectos de intervenir uno u otro tramo teniendo en cuenta que el valor del TCN disminuye al plantearse un aumento en la tasa de reparación o una disminución en la tasa de falla.

Luego de desarrollar el modelo para Transmilenio se obtuvo un costo total de la red TCN de **557022947146**. Esta cifra es el resultado de combinar valores

reales bajo los supuestos que se explicaron en el capítulo anterior, por lo tanto es un valor cercano al costo esperado en la realidad.

3.2.2 CLASIFICACION TRAMOS CON BASE EN EFECTOS SOBRE TCN

3.2.2.1 Por variar tasa de falla

Al proponer reducciones del 1% sobre la tasa de falla de cada tramo, se obtienen diferentes variaciones sobre el TCN. El tramo cuya disminución en la tasa de falla ocasiona la mayor reducción en el TCN puede ser el más favorable para invertir. Se presentan en orden descendente los cambios producidos en el TCN:

TRAMOS	TCN INICIAL	NUEVO TCN CON EL CAMBIO EN λ	EFECTO SOBRE EL TCN POR CAMBIAR λ
7-10	557022947146	557011859977	- 11087169
14-7	557022947146	557016720881	- 6226266
10-13	557022947146	557018025120	- 4922026
1-2	557022947146	557020929483	- 2017663
3-4	557022947146	557021358185	- 1588962
2-3	557022947146	557021931537	- 1015610
5-12	557022947146	557022534302	- 412844
2-7	557022947146	557022742633	- 204514
7-8	557022947146	557022854965	- 92181
4-5	557022947146	557022880988	- 66159
9-4	557022947146	557022884434	- 62712
5-6	557022947146	557022910291	- 36855
4-10	557022947146	557022914507	- 32639
10-11	557022947146	557022924833	- 22314
3-7	557022947146	557022937330	- 9817

TABLA 3.3

Puede verse que los cambios en el TCN varían considerablemente en magnitud entre tramos.

Según el cuadro la intervención del tramo 7-10 (Escuela Militar-Ricaurte) es la que aporta un mayor beneficio en la red. La segunda opción, distanciada de la primera, es la de intervenir en el tramo 14-7 (Escuela Militar-Portal Suba).

La intervención que menos impactos causa sobre el TCN es en el tramo 3-7 (calle 76-Escuela Militar).

Con este procedimiento se están comparando directamente los efectos de un tramo sobre toda la red, recordando que el TCN es el costo total de **toda** la red.

3.2.2.2 Por variar tasa de reparación

De la misma forma al realizar alteraciones a nivel de la tasa de reparación de cada tramo se inducen cambios en el TCN. Aquellos tramos en los que se genere la mayor disminución en el TCN son los que más directamente relacionados están con el beneficio de toda la red. Se presenta en el siguiente cuadro los cambios en el TCN:

TRAMOS	TCN INICIAL	NUEVO TCN CON EL CAMBIO EN μ	EFFECTO SOBRE EL TCN POR CAMBIAR μ
7-10	557022947146	557016489102	- 6458045
14-7	557022947146	557019320742	- 3626405
10-13	557022947146	557020080040	- 2867106
1-2	557022947146	557021771959	- 1175188
3-4	557022947146	557022178961	- 768185
2-3	557022947146	557022362821	- 584325
5-12	557022947146	557022706690	- 240456
2-7	557022947146	557022828029	- 119117
7-8	557022947146	557022902582	- 44564
9-4	557022947146	557022910621	- 36526
4-5	557022947146	557022915163	- 31984
5-6	557022947146	557022929329	- 17818
4-10	557022947146	557022931367	- 15779
10-11	557022947146	557022936359	- 10787
3-7	557022947146	557022942401	- 4746

TABLA 3.4

Como se puede ver la clasificación de los tramos con base en los efectos sobre el TCN es muy similar para ambos tipos de intervenciones, la única diferencia es en los tramos 9-4 y 4-5.

3.2.3 EFICIENCIA DE LAS ACCIONES

En las últimas columnas de los siguientes cuadros se midió la eficiencia de cada posible decisión.

La eficiencia de cada acción se calcula como la relación entre el costo de la intervención y el beneficio obtenido.

Como consecuencia del desconocimiento de los costos de intervención y con base en el procedimiento descrito en el numeral 2.4.11, se determinaron valores de eficiencias para los costos límites ubicados en la línea de frontera eficiente con base en las ecuaciones de las rectas. De esta manera puede decirse que cuando los costos superan los costos límites, la eficiencia disminuye y por lo tanto la acción pasa a ser ineficiente.

CAMBIOS EN LA TASA DE FALLA			
CAMBIOS EN EL TCN PARA CADA TRAMO		VALORES LIMITES DE COSTOS DE INTERVENCION: Cmax	EFICIENCIAS CON Cmax
7-10	11087169	1000000	11.087
14-7	6226266	912237	6.825
10-13	4922026	888689	5.539
1-2	2017663	836251	2.413
3-4	1588962	828511	1.918
2-3	1015610	818159	1.241
5-12	412844	807277	0.511
2-7	204514	803515	0.255
7-8	92181	801487	0.115
4-5	66159	801017	0.083
9-4	62712	800955	0.078
5-6	36855	800488	0.046
4-10	32639	800412	0.041
10-11	22314	800226	0.028
3-7	9817	800000	0.012

Tabla3.5

Las eficiencias en los tramos cuyo efecto sobre el TCN es mayor superan a las eficiencias de las acciones en los otros tramos.

La eficiencia de las primeras acciones pueden estar sobrevaloradas recordando que se tomaron rangos de valores supuestos para los costos de intervención.

CAMBIOS EN LA TASA DE REPARACION			
CAMBIOS EN EL TCN PARA CADA TRAMO		VALORES LIMITES DE COSTOS DE INTERVENCION: Cmax	EFICIENCIAS CON Cmax
7-10	6458045	333333	19.374
14-7	3626405	304081	11.926
10-13	2867106	296237	9.678
1-2	1175188	278758	4.216
3-4	768185	274554	2.798
2-3	584325	272654	2.143
5-12	240456	269102	0.894
2-7	119117	267849	0.445
7-8	44564	267078	0.167
9-4	36526	266995	0.137
4-5	31984	266948	0.120
5-6	17818	266802	0.067
4-10	15779	266781	0.059
10-11	10787	266729	0.040
3-7	4746	266667	0.018

Tabla3.6

Al observar los valores de eficiencia de cada acción puede verse que los casos en los que se toman las mejores acciones corresponden a los tramos 7-10 y 14-7 como ya se había determinado anteriormente.

3.3 VARIACIONES EN EL MODELO

Con el modelo que se desarrolló es posible evaluar diferentes cambios y observar el comportamiento del TCN ante tales cambios. Por esta razón en este subcapítulo se busca profundizar sobre cómo varía el TCN ante diferentes consideraciones.

Los cambios que se efectuaron inicialmente consistieron en variar en un 1% una a una las probabilidades de falla y las tasas de reparación de cada tramo de la red y observar el TCN obtenido y de ahí la diferencia entre el TCN inicial y el modificado. Este cambio se hizo a nivel de los tramos; para una vez identificado el tramo de mayor repercusión sobre el TCN realizar una evaluación y comparación a partir de los subtramos que componen dicho tramo, con el fin de obtener un balance más puntual.

3.3.1 EFECTOS DE LOS PARAMETROS SOBRE EL TCN

Con el fin de comparar directamente los efectos de cada tipo de falla sobre el TCN, se hizo un análisis suprimiendo por separado cada uno de los tipos de falla y de esta manera comparar los TCN's obtenidos en cada caso. En el siguiente cuadro se resumen estos valores:

CUADRO COMPARATIVO POR TIPOS DE FALLA		
TIPO DE FALLA	VALOR TCN	DIFERENCIA CON TCN INICIAL
SIN MANIFESTACIONES PUBLICAS	556702068410	320878736
SIN INVASION DE CARRILES	556186588321	836358825
SIN PROBLEMAS EN INTERSECCIONES	556590578438	432368708
SIN OBRAS EN SISTEMA	556837442427	185504719
SIN ACCIDENTES DE BUSES	556847683331	175263815
SIN VARADAS DE BUSES	556862107862	160839284
TCN INICIAL (CON TODOS LOS TIPOS DE FALLA)	557022947146	-

TABLA 3.7

Una vez más se puede ver que la falla generada por la invasión de carriles de Transmilenio por particulares es la que más incrementa el costo total de la red. Si se lograra terminar con este tipo de falla en el sistema actual, el TCN disminuiría considerablemente.

La segunda interrupción en orden de importancia es la ocasionada por taponamiento de las intersecciones, que aunque en menor proporción también tiene una representación importante dentro del TCN.

3.3.2 EFECTOS DE LAS MEDIDAS CORRECTIVAS

Al comparar directamente los efectos de invertir aumentando la tasa de reparación y disminuyendo la tasa de falla puede verse que los efectos de la tasa de falla siempre superan los efectos de la tasa de reparación sobre el TCN

CAMBIOS GENERADOS EN EL TCN		
POR REDUCIR TASA DE FALLA	> < =	POR AUMENTAR TASA DE REPARACION
11087169	>	6458045
6226266	>	3626405
4922026	>	2867106
2017663	>	1175188
1588962	>	768185
1015610	>	584325
412844	>	240456
204514	>	119117
92181	>	44564
66159	>	36526
62712	>	31984
36855	>	17818
32639	>	15779
22314	>	10787
9817	>	4746

TABLA 3.8

3.3.2.1 Efectos de disminuir la tasa de falla

Como se ha visto al disminuir la tasa de falla de un determinado tramo se presenta una disminución en el TCN y la magnitud de esta disminución varía bastante según el tramo donde se considere la disminución de la probabilidad de falla. Sin embargo vale la pena evaluar si los cambios propuestos en la tasa de falla varían proporcionalmente con el TCN. Se presenta a continuación variaciones en la tasa de falla comparadas con los cambios en el TCN:

Tramos	Variación en la tasa de falla del 1%		Variación en la tasa de falla del 5%		Variación en la tasa de falla del 10%		Variación en la tasa de falla del 20%		Variación en la tasa de falla del 50%	
	cambios TCN por λ		cambios TCN por λ		cambios TCN por λ		cambios TCN por λ		cambios TCN por λ	
1-2	2017663	5934988	5934988	11870698	11870698	23744289	23744289	59382424	59382424	
Δ cambio TCN	3917324		5935711		11873590		35638135			
Incremento %	194.152%		100.012%		100.024%		150.091%			
2-3	1015610	2951121	2951121	5902939	5902939	11808668	11808668	29542605	29542605	
Δ cambio TCN	1935511		2951818		5905729		17733937			
Incremento %	190.576%		100.024%		100.047%		150.177%			
3-4	1588962	3879401	3879401	7758966	7758966	15518588	15518588	38801397	38801397	
Δ cambio TCN	2290439		3879565		7759623		23282809			
Incremento %	144.147%		100.004%		100.008%		150.032%			
4-5	66159	161518	161518	323036	323036	646074	646074	1615199	1615199	
Δ cambio TCN	95359		161518		323038		969125			
Incremento %	144.136%		100.000%		100.001%		150.002%			
5-6	36855	89979	89979	179958	179958	359919	359919	899811	899811	
Δ cambio TCN	53124		89979		179960		539992			
Incremento %	144.141%		100.001%		100.001%		150.004%			
3-7	9817	23967	23967	47933	47933	95867	95867	239668	239668	
Δ cambio TCN	14150		23967		47933		143801			
Incremento %	144.138%		100.000%		100.000%		150.001%			
7-8	92181	225051	225051	450103	450103	900210	900210	2250553	2250553	
Δ cambio TCN	132870		225052		450107		1350343			
Incremento %	144.139%		100.000%		100.001%		150.003%			
9-4	62712	184466	184466	368960	368960	738032	738032	1845930	1845930	
Δ cambio TCN	121753		184494		369073		1107897			
Incremento %	194.145%		100.015%		100.031%		150.115%			
4-10	32639	79686	79686	159372	159372	318745	318745	796870	796870	
Δ cambio TCN	47047		79686		159373		478125			
Incremento %	144.143%		100.000%		100.001%		150.002%			
10-11	22314	54476	54476	108952	108952	217904	217904	544764	544764	
Δ cambio TCN	32162		54476		108952		326860			
Incremento %	144.137%		100.000%		100.000%		150.002%			
5-12	412844	1214467	1214467	2429336	2429336	4860284	4860284	12162818	12162818	
Δ cambio TCN	801622		1214870		2430948		7302533			
Incremento %	194.171%		100.033%		100.066%		150.249%			
2-7	204514	601573	601573	1203226	1203226	2406771	2406771	6019317	6019317	
Δ cambio TCN	397060		601653		1203545		3612546			
Incremento %	194.148%		100.013%		100.026%		150.099%			
7-10	11087169	32622907	32622907	65270215	65270215	130638127	130638127	327329812	327329812	
Δ cambio TCN	21535737		32647309		65367912		196691685			
Incremento %	194.240%		100.075%		100.150%		150.562%			
10-13	4922026	14481804	14481804	28970889	28970889	57970924	57970924	145146355	145146355	
Δ cambio TCN	9559778		14489085		29000036		87175430			
Incremento %	194.224%		100.050%		100.101%		150.378%			
14-7	6226266	18317342	18317342	36644659	36644659	73329251	73329251	183623280	183623280	
Δ cambio TCN	12091076		18327317		36684592		110294029			
Incremento %	194.195%		100.054%		100.109%		150.409%			

TABLA 3.9

Se realizaron disminuciones de la tasa de falla en un 1%, en un 5%, en un 10% en un 20% y en un 50% para cada tramo y se calcularon las diferencias entre los cambios del TCN así como el porcentaje de incremento.

Puede verse que los cambios en el TCN no son proporcionales a los cambios en la tasa de falla. Incrementar en un 5% la tasa de falla en vez del 1% no se refleja de la misma manera en el cambio del TCN, sino que tiene un efecto amplificado (casi del doble). Lo mismo sucede entre el 5% y el 10%, entre el 10% y el 20% y entre el 20% y el 50%. Nb hay aparentemente una relación entre las variaciones. Resulta más efectivo pasar a reducir la tasa de falla de un 5% a un 10% que de un 10% a un 20%. Y no se justifica realmente pensar en una variación del 50% puesto que los efectos no son tan significativos. Sin embargo estas consideraciones también depende de la manera como varíen los costos de intervención al aumentar la tasa de falla en un 1% o en un 5% o en un 10%.

Adicionalmente puede verse que los incrementos en el TCN al cambiar el porcentaje de variación de la tasa de falla se mantienen entre tramos.

3.3.2.2 Efectos de aumentar la tasa de reparación

De igual manera al aumentar la tasa de reparación de un tramo específico se obtienen reducciones en el TCN que cambian según el tramo. Al hacer el mismo análisis anterior se obtienen los siguientes resultados:

Tramos	Variación en la tasa de reparación del 1%		Variación en la tasa de reparación del 5%		Variación en la tasa de reparación del 10%		Variación en la tasa de reparación del 20%		Variación en la tasa de reparación del 50%	
	cambio TCN por μ		cambio TCN por μ		cambio TCN por μ		cambio TCN por μ		cambio TCN por μ	
1-2	1175188	5652353	5652353	10791425	10791425	19786104	19786104	39580244		
Δ cambio TCN	4477165		5139072		8994679		19794140			
Incremento %	380.974%		90.919%		83.350%		100.041%			
2-3	584325	2810576	2810576	5366193	5366193	9839782	9839782	19687315		
Δ cambio TCN	2226251		2555618		4473589		9847533			
Incremento %	380.995%		90.929%		83.366%		100.079%			
3-4	768185	3694664	3694664	7053578	7053578	12931975	12931975	25865774		
Δ cambio TCN	2926479		3358914		5878396		12933799			
Incremento %	380.960%		90.913%		83.339%		100.014%			
4-5	31984	153827	153827	293669	293669	538395	538395	1076794		
Δ cambio TCN	121843		139843		244725		538400			
Incremento %	380.953%		90.909%		83.334%		100.001%			
5-6	17818	85694	85694	163598	163598	299932	299932	599869		
Δ cambio TCN	67877		77904		136333		299937			
Incremento %	380.953%		90.910%		83.334%		100.002%			
3-7	4746	22825	22825	43576	43576	79889	79889	159778		
Δ cambio TCN	18080		20750		36313		79889			
Incremento %	380.953%		90.909%		83.334%		100.000%			
7-8	44564	214334	214334	409184	409184	750174	750174	1500358		
Δ cambio TCN	169770		194850		340989		750184			
Incremento %	380.953%		90.909%		83.334%		100.001%			
9-4	36526	175681	175681	335413	335413	614995	614995	1230305		
Δ cambio TCN	139155		159732		279582		615310			
Incremento %	380.980%		90.922%		83.355%		100.051%			
4-10	15779	75891	75891	144884	144884	265621	265621	531244		
Δ cambio TCN	60112		68992		120737		265623			
Incremento %	380.953%		90.909%		83.334%		100.001%			
10-11	10787	51882	51882	99047	99047	181587	181587	363175		
Δ cambio TCN	41094		47165		82540		181588			
Incremento %	380.953%		90.909%		83.334%		100.001%			
5-12	240456	1156626	1156626	2208421	2208421	4049789	4049789	8104059		
Δ cambio TCN	916169		1051795		1841368		4054270			
Incremento %	381.013%		90.937%		83.379%		100.111%			
2-7	119117	572925	572925	1093829	1093829	2005554	2005554	4011993		
Δ cambio TCN	453808		520904		911725		2006439			
Incremento %	380.976%		90.920%		83.352%		100.044%			
7-10	6458045	31068882	31068882	59332525	59332525	108837957	108837957	217947620		
Δ cambio TCN	24610837		28263643		49505432		109109664			
Incremento %	381.088%		90.971%		83.437%		100.250%			
10-13	2867106	13792029	13792029	26335968	26335968	48301005	48301005	96683055		
Δ cambio TCN	10924923		12543939		21965037		48382050			
Incremento %	381.044%		90.951%		83.403%		100.168%			
14-7	3626405	17444861	17444861	33311677	33311677	61096613	61096613	122304272		
Δ cambio TCN	13818457		15866816		27784935		61207659			
Incremento %	381.051%		90.954%		83.409%		100.182%			

TABLA.3.10

Para la tasa de reparación la tendencia es la misma, para cada tramo se mantiene el porcentaje de incremento en la variación del TCN. Sin embargo cabe anotar que estos porcentajes son menores a los anteriores, puesto que como se ha dicho la acción de disminuir la tasa de falla trae mayores implicaciones sobre el TCN que la acción de aumentar la tasa de reparación;

Por otra parte, puede verse que el mayor incremento en la variación del TCN se presenta cuando se aumenta la tasa de reparación de un 1% a un 5%.

Es muy claro además con los resultados obtenidos que resulta más beneficioso pasar a incrementar la tasa de reparación de 5% a 10% que pasar de 10% a 20% (el incremento para este último caso es incluso menor).

3.3.3 PRESENTACION DE LA MEJOR INVERSION

A partir de este modelo y estableciendo una combinación de todos los resultados se llega a este tipo de conclusiones: **la inversión que aporta mayores beneficios dentro de toda la red de Transmilenio corresponde a disminuir en un 5% la tasa de falla generada por la invasión de particulares de los carriles de Transmilenio en el tramo 7-10 (Escuela Militar a Ricaurte).**

Se recomienda disminuir en un 5% la tasa de falla pero puede que al hacer el análisis con otros porcentajes cercanos se encuentre un porcentaje más óptimo.

Adicionalmente es necesario mencionar que el porcentaje del 5% también está supeditado al monto del que se disponga a la hora de invertir.

Conclusión capítulo

El modelo permite entender bastante sobre el comportamiento de la red y así mismo hace posible establecer condiciones que permitan garantizar un óptimo funcionamiento de la red.

Con el fin de optimizar la inversión es posible basarse en metodologías de optimización tales como el Data Envelopment Analysis DEA formulado por Charnes Cooper y Rhodes en 1978. Esta metodología se ha venido utilizando con frecuencia en diferentes áreas y permite evaluar la eficiencia de una acción o de una decisión tomada. Se citan dentro de la bibliografía dos libros que sirven para introducir a quienes se interesen y busquen profundizar en el tema.

Es interesante continuar investigando sobre este tema para poder proponer políticas de inversión y hacer una priorización a lo largo del tiempo. Debe buscarse una metodología que permita comparar directamente los efectos de destinar una parte de la inversión en disminuir la tasa de falla y otra parte en aumentar la tasa de reparación.

CONCLUSIONES

La operación de una red de transporte puede ser vulnerable a fallar ante la ocurrencia de interrupciones. La vulnerabilidad de la red depende de sus características geométricas, de las conexiones entre los nodos y de qué tantos tramos redundantes presente. Dado los altos volúmenes de pasajeros que se movilizan dentro de la red a distintas horas del día, como es el caso de Transmilenio en Bogotá, resulta de gran utilidad establecer metodologías que sirvan para determinar qué tramos son más susceptibles a ser interrumpidos y cuales son las principales causas de tales interrupciones; permitiendo esto emprender soluciones para disminuir la probabilidad de falla de la red.

Con esta investigación se pretende por un lado despertar un interés en el tema de vulnerabilidad de una red aplicado al caso de Bogotá y así mismo proponer una metodología que se pueda ir perfeccionando para obtener resultados más exactos y pertinentes, teniendo en cuenta que este tipo de modelos basado en teoría probabilística no se han implementado aún en Transmilenio.

■ La aplicabilidad de este modelo es muy amplia, no sólo permite estudiar diferentes tipos de redes viales y de transporte sino que también su aplicación se puede extender a la optimización de la asignación eficiente de recursos en proyectos de mantenimiento, mejoramiento y rehabilitación de redes. Adicionalmente, con la aplicación de esta metodología se puede garantizar costos de viajar competitivos, seguridad vial y tiempos de viajes menores lo cual se espera que ofrezca una red vial.

■ Para que el modelo y los resultados tengan sentido no debe perderse de vista la importancia de que el costo de esperar o de no realizar el viaje supere el costo de viajar para que de esta manera un usuario razonable considere la posibilidad de realizar el viaje.

■ La invasión de carriles por parte de particulares está afectando notoriamente la operación de Transmilenio. Con base en lo obtenido en el modelo es el tipo de falla que más se presenta y es a su vez la falla que más demanda tiempo de reparación.

■ Los tramos con menor probabilidad de falla no son necesariamente los tramos con mayor probabilidad de operación, al igual que los tramos con mayor tasa de reparación tampoco son los tramos con mayor probabilidad de operación. La probabilidad de operación es una combinación de ambas tasas.

- La acción de disminuir la tasa de falla ocasiona mayores efectos sobre el TCN que la acción de aumentar la tasa de reparación; sin embargo hay que recordar que también resulta más costoso disminuir la tasa de falla que aumentar la tasa de reparación; se debe buscar por lo tanto un punto de equilibrio.
- Con base en los datos registrados puede verse que dentro del sistema la frecuencia de ocurrencia de interrupciones es similar para ambos sentidos de circulación.
- En general hay menos registros en las troncales en dirección occidente-oriente-occidente que en las troncales sur-norte-sur.
- La magnitud de los cambios ocasionados en el TCN al proponer una determinada inversión varían bastante entre los tramos.
- La clasificación de los tramos en cuanto a los efectos generados sobre el TCN es casi la misma para los dos tipos de intervenciones: reducción de la tasa de falla e incremento de la tasa de reparación

RECOMENDACIONES

La finalidad detrás de esta investigación es generar resultados aplicables e importantes para el sistema de Transmilenio. De esta manera se presentan las diferentes recomendaciones puntuales dentro de la red para un mejor funcionamiento de la misma:

- Establecer vías alternas, de fácil adecuación para el tránsito de buses articulados de Transmilenio ante la ocurrencia de interrupciones tales como manifestaciones públicas. Esto se logra por ejemplo adecuando calles que permitan comunicar troncales, como las calles que pasan a la vez por la Avenida Caracas y la NQS.
- El tipo de falla que más afecta la operación de Transmilenio actualmente es la invasión de carriles por particulares. Además de ocurrir en la mayoría de los tramos de la red, es la que se presenta con más frecuencia y es la que en varias ocasiones demanda más tiempo para ser reparada. Esto se traduce en una necesidad de buscar soluciones como por ejemplo establecer en algunos sitios específicos barreras físicas que impidan que los particulares puedan hacer uso de los carriles de Transmilenio. No obstante con esta medida debe tenerse especial cuidado de no afectar la *flexibilidad* del sistema puesto que se podría complicar la adecuación de carriles de particulares para Transmilenio en el momento de una interrupción.
- Hay problemas que remediar en las estaciones de las Aguas y del Museo del Oro como consecuencia de la ocurrencia frecuente de manifestaciones públicas. Este tramo es muy vulnerable a este tipo de falla y por lo general le toma un tiempo importante para retomar el funcionamiento.
- Una política debe ser disminuir la probabilidad de falla en aquellos tramos que no tienen redundancia y que hasta hoy son la única opción de conexión entre dos centroides. Situación común a los tramos que comunican con los portales.
- Debe hacerse un estudio detallado del nivel de servicio de las intersecciones en las que hay problemas de congestionamiento para buscar soluciones como por ejemplo reestructuración en la programación de semáforos y fases en ambos sentidos, o soluciones en infraestructura o campañas en estas intersecciones para educar a los conductores a no atravesar las intersecciones cuando el espacio no les es suficiente para pasar de lleno la avenida.

GLOSARIO

A continuación se definen cada uno de los términos que conforman parte de la red, así como los conceptos dentro del modelo:

Centroide: Portal o punto de intersección entre dos troncales existentes o futuras del sistema de Transmilenio.

Costo de espera: Es el tiempo expresado en términos de costo de una persona esperando a que se normalice la operación del sistema luego de la ocurrencia de una interrupción, ya sea dentro del bus o dentro de una estación.

Costo de la intervención: Es el costo en el que se incurre por disminuir en una unidad la probabilidad de falla de un tramo o en aumentar la tasa de reparación en una unidad.

Costo de no viajar: Costo en el que incurre el usuario al no realizar el viaje

Costo de viajar por la red: Es el costo que un usuario dejaría de percibir de no realizar el viaje

Falla: Es la situación en la se interrumpe la operación de uno o de mas tramos de una red ocasionando un retraso del flujo vehicular conformado en este caso por los buses de Transmilenio.

Interrupción: Evento cuyas causas son variadas y se estudiarán más adelante, el cual ocasiona una interrupción parcial o total del paso de buses.

Intervención: Acción emprendida para mejorar la operación o la infraestructura actual de un tramo

Nodo: Estación de Transmilenio localizada en cualquiera de las troncales existente o futura

Probabilidad de falla: Probabilidad de ocurrencia de una interrupción dentro de la red

Probabilidad de operación: Probabilidad de funcionamiento durante un lapso de tiempo sin ocurrencia de interrupciones

Red: Es una interconexión de nodos por medio de tramos que permite atender una determinada demanda de transporte.

Ruta: Secuencia de nodos y de tramos contiguos que sigue un usuario para ir de un punto inicial a un punto final de forma racional

Subtramo: Longitud comprendida entre dos estaciones contiguas de Transmilenio

Tasa de reparación: Tiempo que transcurre entre el instante en que ocurre la interrupción y el tiempo en que se normaliza de nuevo la operación

Tramo: Distancia comprendida entre dos centroides.

Usuario: Individuo que se moviliza de un punto a otro dentro de la red, que toma la decisión de viajar o no y que escoge tomar la ruta de su conveniencia.

Valor subjetivo del tiempo de viaje VSTV: Es el equivalente entre el tiempo de viaje y el costo del servicio.

BIBLIOGRAFIA

1. Michael G. H. Bell, *Measuring Network Reliability: A game Theoretic Approach*, Journal of Advanced Transportation, Vol.33, No. 2, pp 135 – 146, 1999.
2. Pindyck Robert S., *Microeconomía*, capítulos 6 y 7, la producción y el coste de producción, 5ª. Ed, Prentice Hall, 2001.
3. Rolf Fare, Shawna Grosskopf, Kluwer Academic Publishers, southern Illinois University at carbondale, Intertemporal production Frontiers: with Dynamic DEA.
4. Sánchez M., & Daniels M.; *Efficiency-based strategy or allocating resources to transport networks*, Department of Civil and Environmental Engineering, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2002.
5. Sánchez M & Daniels M., *Modelación de la confiabilidad y optimización de la inversión en infraestructura Vial* Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental – Universidad de los Andes, Bogotá, CD memorias, Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Medellín, Colombia, 2002.
6. Sánchez M, Daniels M., Lleras G. & Patiño D., *A transport network reliability model for the efficient assignment of resources*, Department of Civil and Environmental Engineering, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia 2004.
7. Sánchez M., *Introducción a la confiabilidad de la evaluación de riesgos*, 2005.
8. Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá STT, consulta noviembre de 2004, página web: www.transitobogota.gov.co, estadísticas.
9. Steer Davies Gleave, Estudio Transmilenio, Formato: diapositivas.
10. Thanassoulis Emmanuel, *Introduction to the theory and Application of Data Envelopment Analysis*, A foundation text with integrated software, Aston University, Birmingham, United Kingdom, Norwell, Mass: Kluwer Academic Publishers, c2001

11. Transmilenio S.A, Consulta página web, octubre de 2004, cifras, www.transmilenio.gov.co
12. Transmilenio S.A. Matriz Origen Destino Fase I para dos horas pico 6:30–8:30 a.m febrero de 2003
13. Transmilenio S.A, Mapa guía para usuarios de Transmilenio y horarios de rutas, catálogo público “Transmilenio un centenar de servicios”, última actualización, diciembre 2004.
14. Transmilenio S.A, *Información estaciones en troncales de fases de construcción I y II.* 2004.
15. Transmilenio S.A, Planeación, *Interrupciones en el Servicio: Bitácora por tipo de nota* Desde 03/01/2004 hasta 30/06/2004.

ANEXOS

APENDICE 2.1

Bitácora por Tipo de Nota						Desde	03/01/2004
Tipo de Nota: Interrupciones en el Servicio						Hasta:	30/06/2004
Usuario	Instante	Bus	Línea	Tabla	Conducto	Observaciones	
SCHAVES	03/01/2004 13:01:33	1088	0	0	0	REPORTA QUE ESTA EN TRAV 86 OCC/ ORI EN RUTA CIRCULAR , SE PASO DE DONDE DEBE DAREL RETORNO / INSPECTORES - T.L. MORON	
SCHAVES	03/01/2004 15:58:18	2075	3	26	0	BUS TQ04 BIBLIOTECA ORI/OCC ESTAMOS BLOQUEADOS EN AMBOS SENTIDOS 16.16 SE NORMALIZA LA VÍA	
OCORTES	03/01/2004 16:00:55	0	0	0	0	LA FLOTA INF. QUE A LA ALTURA DEL SEMAFORO ANTES DE BIBLIOTECA OR-OC SE ENCUENTRA UN URBANO TQ04 Y QUEDO BLOQUEANDO EL PASO. SE SACAN LOS TRONCALES AL CARRIL MIXTO EN CRUCE DE SANTA LUCIA OR-OC. (TM10)	
SCHAVES	03/01/2004 17:12:47	0	0	0	0	HORTUA N/STM01 DE PARTICULARES	
SCHAVES	05/01/2004 14:54:44	0	0	0	0	JAIRO /REPORTA QUE UNA RETROEXCAVADORA SE QUEDÓ BLOQUEADA EN BIBLIOTECA EL TINTAL S/N. HACEMOS CONTRAFLUJO Y QUEDAMOS CON DOS MÓVILES PARA RUTA CIRCULAR .S001 DA REVERSA PARA PODER HABILITARLO / DELTA 1 15.20 SE NORMALZA LA VÍA	
SCHAVES	05/01/2004 15:34:05	1043	3	15	40215	E.BIBLIOTECA HACIA TUNAL UN TAXI EN NUESTRA VÍA TOMAMOS MIXTO / TM10 T.C. INSPECTORES FLOTA	

INFORMACION - DATOS TRAMOS DE LA RED DE TRANSMILENIO

No. Estación	No de subtramos por tramo	Estaciones (no dos red)	Tramo	Tramo	Desde	Hasta	Tasa Falla tramo (eventos/min.al semestre)	Tasa reparación tramo (1/minutos)	$\Delta \lambda$ Menos 1% de la tasa de falla del tramo (eventos/min.al	$\Delta \mu$ Mas 1% de la tasa de reparación del tramo	Costo de viajar por el tramo (en min. bus)	Probabilidad de operación del tramo	tramos
1	11	Portal Norte	1	1-2	Portal Norte	Calle 100	0,0002382587	0,1967887621	0,0002358761	0,1987566497	67293	0,99879073	1-2
2	4	Calle 100	2	2-3	Calle 100	Calle 76	0,0000828436	0,0701893445	0,0000820152	0,0708912379	24245	0,99882110	2-3
3	12	Calle 76	3	3-4	Calle 76	Av. Jimenez	0,0000204560	0,0909655070	0,0000202515	0,0918751621	72687	0,99977517	3-4
4	10	Av. Jimenez	4	4-5	Av. Jimenez	Santa Lucia	0,0000028575	0,1024366529	0,0000028289	0,1034610195	60736	0,99997211	4-5
5	4	Santa Lucia	5	5-6	Santa Lucia	Portal Usme	0,0000066218	0,1267073838	0,0000065555	0,1279744576	26011	0,99994774	5-6
6	2	Portal Usme	6	3-7	Calle 76	Escuela Militar	0,0000016759	0,2064564739	0,0000016592	0,2085210386	12321	0,99999188	3-7
7	12	Escuela Militar	7	7-8	Escuela Militar	Portal 80	0,0000069556	0,1649727267	0,0000068860	0,1666224540	74362	0,99995784	7-8
8	2	Portal 80	8	9-4	Las Aguas	Av. Jimenez	0,0000989095	0,0648813044	0,0000979204	0,0655301175	13203	0,99847785	9-4
9	4	Las Aguas	9	4-10	Av. Jimenez	Ricaurte	0,0000040943	0,1882837013	0,0000040534	0,1901665383	25009	0,99997826	4-10
10	13	Ricaurte	10	10-11	Ricaurte	Portal Américas	0,0000045037	0,2004891263	0,0000044587	0,2024940176	83231	0,99997754	10-11
11	3	Portal Américas	11	5-12	Santa Lucia	Portal Tunal	0,0003067945	0,0928762203	0,0003037266	0,0938049825	19344	0,99670761	5-12
12	2	Portal Tunal	12	2-7	Calle 100	Escuela Militar	0,0001327255	0,1588079372	0,0001313983	0,1603960166	12677	0,99916494	2-7
13	10	Portal del Sur	13	7-10	Escuela Militar	Ricaurte	0,0006632736	0,1588079372	0,0006566409	0,1603960166	65704	0,99584079	7-10
14	12	Portal Suba	14	10-13	Ricaurte	Portal del sur	0,0007964274	0,1588079372	0,0007884631	0,1603960166	79092	0,99500999	10-13
	14		15	14-7	Escuela Militar	Portal Suba	0,0008629412	0,1588079372	0,0008543118	0,1603960166	92097	0,99459550	14-7

115

MATRIZ CYP (datos de entrada al modelo)

12	23	34	45	56	37	78	94	410	1011	512	27	210	1013	714
0,000238	0,000083	0,000020	0,000003	0,000007	0,000002	0,000007	0,000099	0,000004	0,000005	0,000307	0,000133	0,000663	0,000796	0,000863
0,196789	0,070189	0,090966	0,102437	0,126707	0,206456	0,164973	0,064881	0,188284	0,200489	0,092876	0,158808	0,158808	0,158808	0,158808
67292,76	24244,67	72687,10	60735,59	26010,66	12320,72	74361,89	13203,06	25008,72	83230,56	19343,69	12676,68	65703,55	79092,13	92096,76
0,99879073	0,99882110	0,99977517	0,99997211	0,99994774	0,99999188	0,99995784	0,99847785	0,99997826	0,99997754	0,99670761	0,99916494	0,99584079	0,99500999	0,99459550



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

APENDICE 2.5

INVESTIGACION: MODELO DE OPTIMIZACION PARA MEDIR LA
VULNERABILIDAD DE LA RED DE TRANSMILENIO

DENIFICION DE RUTAS, NUMERO DE SUBTRAMOS, COSTOS DE VIAJAR POR LAS RUTAS Y PROBABILIDAD DE TOMARLAS

Dado 11														
marz de rutaa	hacia 1	hacia 2	hacia 3	hacia 4	hacia 5	hacia 6	hacia 7	hacia 8	hacia 9	hacia 10	hacia 11	hacia 12	hacia 13	hacia 14
	11-10-7-2-1 11-10-7-3-2 11-10-4-3-2-1	11-10-7-2 11-10-7-3-2 11-10-4-3-2	11-10-7-3 11-10-4-3 11-10-7-2-3	11-10-4 11-10-7-3-4 11-10-7-2-3-4	11-10-4-5 11-10-7-3-4-5 11-10-7-2-3-4-5	11-10-4-5-6 11-10-7-3-4-5-6 11-10-7-2-3-4-5-6	11-10-7-3-4-5-6 11-10-7-2-3-4-5-6 11-10-4-3-2-7	11-10-7-3-4-5-6 11-10-7-2-3-4-5-6 11-10-4-3-2-7	11-10-7-8 11-10-4-3-7 11-10-4-3-2-7	11-10-7-8 11-10-4-3-7 11-10-4-3-2-7	11-10-4-9 11-10-7-3-4-9 11-10-7-2-3-4-9	11-10-4-9 11-10-7-3-4-9 11-10-7-2-3-4-9	11-10-4-12 11-10-7-3-4-5-12 11-10-7-2-3-4-5-12	11-10-13 11-10-7-3-4-5-12 11-10-4-3-7-14
total subtramos para la primera opción de ruta														
costo	25	25	7	7	31	23	35	19	13	30	25	3		
probabilidad	PP11-1	PP 11-2	PP11-3	PP11-4	PP11-5	PP11-6	PP11-7	PP11-8	PP11-9	PP11-10	PP11-11	PP11-12	PP11-13	PP 11-14
probabilidad	0991823384B	0,96499246976	09957053113	0999653955B	0999272803D	0,9997435297	0,9578703275	0,9574272273	0,8842418938	0,8997298921	0,9981160989	0,99462081886	0,9904888893D	0,9904888893D
probabilidad	0000854215B	0,00083408532	00048754685H	00002187822B	000021879216	0,00021878080	0,091875144652	0,09187336800	0,00028442874	0,00000000000	0,00021866686	0,00000000000	0,0046472922E	0,00000000000
probabilidad	0000869262B	0,00084962319	0000000017E	0000000017E	0000000017B	0,000000017B	0,00000034265	0,00000034265	0,0000000789	0,00000000000	0,00000001785	0,00000000000	0,0000003498B	0,0000003498B
Dado 12														
marz de rutaa	hacia 1	hacia 2	hacia 3	hacia 4	hacia 5	hacia 6	hacia 7	hacia 8	hacia 9	hacia 10	hacia 11	hacia 12	hacia 13	hacia 14
	12-5-4-3-2-1 12-5-4-10-7-2-1 12-5-4-10-7-2-1 12-5-4-10-7-2-1	12-5-4-3-2 12-5-4-10-7-2 12-5-4-10-7-2 12-5-4-10-7-2	12-5-4-3 12-5-4-10-7-3 12-5-4-10-7-3 12-5-4-10-7-3	12-5-4 12-5-4-10-7-3 12-5-4-10-7-3 12-5-4-10-7-3	12-5-4 12-5-4-10-7-3 12-5-4-10-7-3 12-5-4-10-7-3	12-5-4 12-5-4-10-7-3 12-5-4-10-7-3 12-5-4-10-7-3	12-5-4 12-5-4-10-7-3 12-5-4-10-7-3 12-5-4-10-7-3	12-5-4-3-7 12-5-4-10-7-8 12-5-4-10-7-8 12-5-4-3-2-7	12-5-4-3-7 12-5-4-10-7-8 12-5-4-10-7-8 12-5-4-3-2-7	12-5-4-9 12-5-4-10-7-8 12-5-4-10-7-8 12-5-4-3-2-7	12-5-4-10 12-5-4-3-7-10 12-5-4-3-7-10 12-5-4-3-2-7-10	12-5-4-10-11 12-5-4-3-7-10-11 12-5-4-3-7-10-11 12-5-4-3-2-7-10-11	12-5-4-10-12 12-5-4-3-7-10-12 12-5-4-3-7-10-12 12-5-4-3-2-7-10-12	12-5-4-10-13 12-5-4-3-7-10-13 12-5-4-3-7-10-13 12-5-4-3-2-7-10-13
total subtramos para la primera opción de ruta														
costo	4	29	25	3	3	7	27	39	15	17	30	29		4
probabilidad	PP12-1	PP 12-2	PP12-3	PP12-4	PP12-5	PP12-6	PP12-7	PP12-8	PP12-9	PP12-10	PP12-11	PP12-12	PP 12-13	PP 12-14
probabilidad	09940243859B	0,95246388081	09964967899B	09966615422D	099684287305	0,99831082469	0,95427603257	0,9537845611	0,951283072870	0,9663248797	0,9981160989	0,99462081886	0,9904888893D	0,9904888893D
probabilidad	0000250592775	0,00023228906	00002556007	00000000000	00000000000	0,00000000000	0,0022517820	0,002250824	0,00000000000	0,0002807607	0,00021866686	0,00021867521	0,0002428418E	0,00000000000
probabilidad	00000018202B	0,00000189346	00000000848E	00000000000	00000000000	0,00000000000	0,00000000000	0,00000000000	0,00000000000	0,00000000000	0,00000000000	0,00000000000	0,00000000000	0,00000000000

MATRICES DE COSTO DE ESPERA, VOLUMEN DE TRAFICO Y CALCULO DEL TCN

MATRIZ DE TRAFICO N

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1		449400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	449400		385200	0	0	0	128400	0	0	0	0	0	0	0
3	0	385200		770400	0	0	513600	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	770400		577800	0	0	0	64200	192600	0	0	0	0
5	0	0	0	577800		449400	0	0	0	0	0	128400	0	0
6	0	0	0	0	449400		0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	128400	513600	0	0	0		449400	0	385200	0	0	0	256800
8	0	0	0	0	0	0	449400		0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	64200	0	0	0	0		0	0	0	0	0
10	0	0	0	192600	0	0	385200	0	0		192600	0	256800	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	192600		0	0	0
12	0	0	0	0	128400	0	0	0	0	0	0		0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	256800	0	0		0
14	0	0	0	0	0	0	256800	0	0	0	0	0	0	

MATRIZ CTR COSTO TOTAL DE LA RED

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1		67567	92186	165428	226615	252857	80486	155273	179159	147481	231750	247402	229162	174507
2	67567		24363	97435	158499	184690	12748	87387	110978	79176	163292	178894	160181	106021
3	92186	24363		72859	133746	159865	12351	86831	86307	78649	162593	153960	159501	105442
4	165271	97435	72859		60847	86945	85213	159740	13258	25045	108468	80656	105055	179001
5	226401	158349	133746	60847		26092	26092	146101	220636	74258	85897	169326	19479	166409
6	252619	184514	159865	86945	26092		172221	246764	100415	111998	195435	45698	192706	266766
7	80486	12748	12351	85193	146068	172182		74477	98668	66673	150961	166343	128264	92982
8	155273	87387	86831	159704	220587	246709	74477		173360	141955	226250	241253	223611	168105
9	179159	110873	86307	13258	74258	100415	98691	173360		38364	121978	94172	118640	143886
10	153810	79279	79055	25045	85897	111998	66673	141955	38364		83418	105836	79810	161084
11	183983	163464	163344	108468	169326	195435	150961	226250	121978	83418		189678	163857	246043
12	247172	178727	153960	80656	19479	45698	166300	241306	94172	105836	189678		186860	261297
13	229384	160348	160223	105055	166409	192706	147742	223660	118640	79810	163857	186860		243402
14	174507	106021	105442	178962	240381	266766	92982	168105	192739	161084	246043	261241	243402	
SUMA	3,04E+10	4,14E+10	7,19E+10	9,70E+10	4,94E+10	11,72E+10	9,10E+10	3,35E+10	8,51E+08	6,71E+10	1,61E+10	2,50E+09	2,05E+10	2,38E+10



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES - DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

APENDICE 2.7

INVESTIGACION: MODELO DE OPTIMIZACION PARA MEDIR LA VULNERABILIDAD DE LA RED DE TRANSMILENIO

DISMINUCIONES EN TASA DE FALLA, INCREMENTOS EN TASA DE REPARACION, EFECTOS SOBRE EL TCN Y COSTOS DE INTERVENCION

tramos	Tasa de Falla tramo (eventos/mi nal semestre)	Tasa reparación tramo (1/minutos)	$\Delta \lambda$ Menos 1% de la tasa de falla del tramo	$\Delta \mu$ Mas 1 % de la tasa de reparación del tramo	COSTO DE REDUCIR λ_j (ALEATORIOS)	COSTO DE AUMENTAR μ_j (ALEATORIOS)	NUEVO TCN CON EL CAMBIO EN λ	NUEVO TCN CON EL CAMBIO EN μ	EFFECTO SOBRE EL TCN POR CAMBIAR λ	EFFECTO SOBRE EL TCN POR CAMBIAR μ	EFICIENCIA DE CADA ACCION $E = \rho_j / C_{\lambda,i}$	EFICIENCIA DE CADA ACCION $E = \rho_j / C_{\mu,i}$
1-2	0,00023995507	0,19678876209	0,00023755552	0,19875664971	9,35000	26,6784	557020929483	557021771959	2017663	1175188	21579	4,4050
2-3	0,00008345127	0,07018934447	0,00008261676	0,07089123791	8,42678	29,4870	557021931537	557022362821	1015610	584325	1,2052	1,9816
3-4	0,0002067490	0,09096550700	0,0002046816	0,09187516207	9,87451	30,1974	557021358185	557022178961	1588962	768185	1,6092	2,5439
4-5	0,0000288806	0,10243665294	0,0000285918	0,10346101946	8,97456	32,4500	557022880988	557022915163	66159	31984	0,0737	0,0986
5-6	0,000069261	0,12670738379	0,0000682568	0,12797445762	9,48762	27,9614	557022910291	557022929329	36855	17818	0,0388	0,0637
3-7	0,0000169386	0,20645647388	0,0000167692	0,20852103852	9,12034	29,7800	557022937330	557022942401	9817	4746	0,0108	0,0159
7-8	0,0000702999	0,16497272669	0,0000695969	0,16662245396	9,97154	31,5789	557022854965	557022902582	92181	44564	0,0924	0,1411
9-4	0,0000961374	0,06488130444	0,00009561761	0,06553011748	8,10000	32,4780	557022884434	557022910621	62712	36526	0,0774	0,1125
4-10	0,0000413810	0,18828370129	0,0000409672	0,19016653831	8,74008	26,7600	557022914807	557022931367	32639	15779	0,0373	0,0590
10-11	0,0000455189	0,20048912631	0,0000450637	0,20249401757	9,67322	32,8409	557022924833	557022936359	22314	10787	0,0231	0,0328
5-12	0,00038997885	0,09287622030	0,000388906	0,09380498250	9,02890	30,6790	557022534302	557022706690	412844	240456	0,4572	0,7838
2-7	0,00013367052	0,15880793721	0,00013233381	0,16039601668	9,94125	31,4967	557022742633	557022828029	204514	119147	0,2067	0,3782
7-10	0,00066799489	0,15880793721	0,00066131494	0,16039601668	9,47639	26,7314	557011859977	557016489102	11087169	6458045	11,6996	24,1590
10-13	0,00080209609	0,15880793721	0,00079407513	0,16039601668	8,79333	29,4300	557018026120	557020080040	492026	2867106	5,5975	9,7263
14-7	0,00086908500	0,15880793721	0,00086039415	0,16039601668	9,96214	31,9784	557016720881	557019320742	6226266	3626405	6,2499	11,3402
					8,00000	26,6667						
					1,00000	33,3333						

TCN
557022947146
557011194137

MATRIZ COSTO DE ESPERA K

Costo de espera por subtramo de:

100 pesos

Total pasajeros en un bus en su máxima capacidad teórica:

160

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1		17,600	24,000	4,320,00	5,920,00	6,560,00	20,800	4,000,00	4,640,00	3,680,00	57,600	6,400,00	5,600,00	4,320,00
2	17,600		6,400	2,560,00	4,160,00	4,800,00	3,200	2,240,00	2,880,00	1,920,00	40,000	4,640,00	3,840,00	2,560,00
3	24,000	6,400		1,920,00	3,520,00	4,160,00	3,200	2,240,00	2,240,00	1,920,00	40,000	4,000,00	3,840,00	2,560,00
4	4,320,00	2,560,00	1,920,00		1,600,00	2,240,00	2,240,00	4,160,00	3,200	64,000	27,200	2,080,00	2,560,00	4,480,00
5	5,920,00	4,160,00	3,520,00	1,600,00		64,000	38,400	5,760,00	1,920,00	2,240,00	43,200	4,800	4,160,00	6,080,00
6	6,560,00	4,800,00	4,160,00	2,240,00	64,000		44,800	6,400,00	2,560,00	2,880,00	49,600	1,120,00	4,800,00	6,720,00
7	20,800	3,200	3,200	2,240,00	3,840,00	4,480,00		1,920,00	2,560,00	1,600,00	36,800	4,320,00	3,200,00	2,240,00
8	4,000,00	2,240,00	2,240,00	4,160,00	5,760,00	6,400,00	19,200		4,480,00	3,520,00	56,000	6,240,00	5,440,00	4,160,00
9	4,640,00	2,880,00	2,240,00	3,200	1,920,00	2,560,00	25,600	4,480,00		96,000	30,400	2,400,00	2,880,00	3,520,00
10	4,000,00	1,920,00	1,920,00	64,000	2,240,00	2,880,00	16,000	3,520,00	96,000		20,800	2,720,00	1,920,00	3,840,00
11	44,800	40,000	40,000	2,720,00	4,320,00	4,960,00	36,800	5,600,00	3,040,00	2,080,00		4,800,00	4,000,00	5,920,00
12	64,000,00	46,400,00	40,000,00	2,080,00	480,000	1,120,00	43,200	6,240,00	2,400,00	2,720,00	48,000		4,640,00	6,560,00
13	56,000,00	38,400,00	38,400,00	2,560,00	4,160,00	4,800,00	35,200	5,440,00	2,880,00	1,920,00	40,000	4,640,00		5,760,00
14	4,320,00	2,560,00	2,560,00	4,480,00	6,080,00	6,720,00	22,400	4,160,00	4,800,00	3,840,00	59,200	6,560,00	5,760,00	



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES - DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

APENDICE 2.8

INVESTIGACION: MODELO DE OPTIMIZACION PARA MEDIR LA VULNERABILIDAD DE LA RED DE TRANSMILENIO

APENDICE 3.1 MAPA RUTAS TRANSMILENIO

