

**ALCALDIA MAYOR DE BOGOTA D.C.  
INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO**



**ALCALDIA MAYOR  
DE BOGOTÁ D.C.**  
Instituto  
**Desarrollo Urbano**

**CONTRATO  
BM-122-2006**

**OBJETO:** ESTUDIO DE COSTOS DE MANTENIMIENTO DE ACUERDO CON LAS CONFIGURACIONES DE EJES EQUIVALENTES DE RUTAS ALIMENTADORAS DEL SISTEMA TRANSMILENIO

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**



**INFORME FINAL**

Bogotá D.C., Octubre de 2008



---

## CONTENIDO

---

	<b>Pág.</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2 ANALISIS DE VIBRACIONES</b>	<b>2</b>
2.1 EFECTO DE LAS VIBRACIONES EN LAS ESTRUCTURAS	4
2.2 EFECTO DE LAS VIBRACIONES EN LAS PERSONAS	4
2.3 INTERPRETACIÓN DE LAS MEDICIONES	5
<b>3 MODELACIÓN NUMÉRICA</b>	<b>12</b>
3.1 PRINCIPIO DEL MODELO	13
3.2 CARGAS ANALIZADAS	14
3.2.1 Medición y Pesaje de Buses Alimentadores (sin pasajeros)	14
3.2.2 Cálculo de las cargas por eje de cada bus con pasajeros	16
3.2.3 Grupos de cargas a analizar	18
3.3 ESTRUCTURAS ANALIZADAS	21
3.4 CÁLCULO DEL DAÑO	23
3.4.1 Deformaciones de tensión en la capa asfáltica	24
3.4.2 Deformaciones verticales en la subrasante	25
3.4.3 Daño por fatiga en la capa asfáltica	26
3.4.4 Daño por deformaciones permanentes en la subrasante	31
3.4.5 Daño Relativo por Fatiga y por Ahuellamiento	34
<b>4 ANALISIS DE COSTOS</b>	<b>35</b>



---

<b>4.1</b>	<b>CÁLCULO DE LA VIDA ÚTIL</b>	<b>37</b>
<b>4.2</b>	<b>CÁLCULO DE COSTOS DE MANTENIMIENTO</b>	<b>41</b>
<b>4.3</b>	<b>ANÁLISIS DE COSTOS</b>	<b>43</b>
<b>5</b>	<b>PISTA DE PRUEBA</b>	<b>46</b>
<b>5.1</b>	<b>Ensayo de carga acelerado (pista de prueba)</b>	<b>47</b>
<b>5.2</b>	<b>Estructura de prueba</b>	<b>48</b>
<b>5.3</b>	<b>Cargas de prueba</b>	<b>50</b>
<b>5.4</b>	<b>Funcionamiento del equipo</b>	<b>52</b>
<b>5.5</b>	<b>Seguimiento y Auscultación durante el ensayo</b>	<b>53</b>
5.5.1	Mediciones de ahuellamiento o deformaciones permanentes	54
5.5.2	Mediciones de densidad de fisuración	57
<b>5.6</b>	<b>Comparación del daño por fatiga experimental y teórico</b>	<b>59</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>66</b>
<b>6.1</b>	<b>En cuanto a las vibraciones</b>	<b>66</b>
<b>6.2</b>	<b>En cuanto al análisis de daño</b>	<b>66</b>
<b>6.3</b>	<b>En cuanto al análisis de costos</b>	<b>70</b>
<b>6.4</b>	<b>En cuanto a la pista de prueba</b>	<b>72</b>
<b>6.5</b>	<b>Conclusiones generales</b>	<b>72</b>
<b>7</b>	<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>73</b>



---

## LISTA DE ANEXOS

---

- Anexo A. REGISTRO DE VIBRACIONES
- Anexo B. CARACTERÍSTICAS BUSES ALIMENTADORES
- Anexo C. DEFORMACIONES UNITARIAS EN LA CAPA ASFÁLTICA
- Anexo D. DEFORMACIONES UNITARIAS EN LA SUBRASANTE
- Anexo E. PROBABILIDAD DE FALLA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE EJES
- Anexo F. COSTOS DE MANTENIMIENTO EN FUNCIÓN DE PASAJEROS TRANSPORTADOS
- Anexo G. INVERSIÓN DE RECURSOS EN EL MANTENIMIENTO DE LAS ESTRUCTURAS ANALIZADAS EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN DE PASAJEROS TRANSPORTADOS POR LOS BUSES ALIMENTADORES RESPECTO A LOS PASAJEROS TRANSPORTADOS POR LA BUSETA
- Anexo H. DIAGRAMAS FLUJO DE INVERSIÓN EN REHABILITACIÓN DE LAS DIFERENTES ESTRUCTURAS DE LOS BUSES ALIMENTADORES RESPECTO A LA BUSETA (GRUPO GB9)
- Anexo I. DIAGRAMAS FLUJO DE INVERSIÓN EN REHABILITACIÓN DE LAS DIFERENTES ESTRUCTURAS DE LOS BUSES ALIMENTADORES RESPECTO AL GRUPO DE BUSES GB7 (MENOR DAÑO POR FATIGA)
- Anexo J. REGISTRO FOTOGRÁFICO DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA PISTA
- Anexo K. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES DE LA PISTA DE PRUEBA
- Anexo L. DEFORMACIÓN PERMANENTE Y REPETICIONES DE CARGA SOBRE CADA EJE TRANSVERSAL
- Anexo M. DENSIDAD DE FISURACIÓN
- Anexo N. RESULTADOS DEPAV



---

## 1 INTRODUCCIÓN

---

La degradación en los pavimentos por fatiga es producida por la repetición de cargas dinámicas a la que son sometidos durante su vida útil. Este proceso de degradación depende fundamentalmente de los materiales que conforman cada una de las capas de la estructura del pavimento y de las cargas que debe soportar. Es así como la vida útil de un pavimento o el número de repeticiones de carga que debe soportar la estructura del pavimento está estrechamente ligada a la magnitud de la carga en cada uno de los ejes. La degradación aparece de manera gradual a lo largo de la vida útil de las estructuras y son numerosas las variables que intervienen en la velocidad a la que avanza este proceso, razón por la cual se debe recurrir a una combinación de estudio de las propiedades de los materiales, modelación numérica de la estructura del pavimento y observación en pistas de prueba.

Es por esto que el Instituto de Desarrollo Urbano IDU contrató a la Universidad de Los Andes para llevar a cabo un estudio que evalúe los costos de mantenimiento de acuerdo a la configuración de los ejes equivalentes de los vehículos utilizados para la alimentación del Sistema Transmilenio, así como el efecto que puede tener el cambio de la tipología de estos vehículos sobre la operación del sistema, sobre el tránsito y sobre la infraestructura vial de la ciudad de Bogotá D.C., todo esto con el fin de establecer alternativas que puedan generarle mayores beneficios a la calidad de vida de los bogotanos.



---

## 2 ANALISIS DE VIBRACIONES

---

El objetivo de evaluar las vibraciones in-situ producidas por el paso de vehículos alimentadores del sistema Transmilenio y vehículos de transporte público en general es el de determinar si los niveles de vibración generados por el paso de estos vehículos representan algún peligro para las estructuras de viviendas aledañas y el confort de los habitantes.

Las vibraciones generadas por fuentes externas, en este caso por el paso de vehículos, pueden con el tiempo deteriorar estructuras potencialmente críticas como es el caso de edificaciones antiguas. Adicionalmente este tipo de vibraciones puede ser percibido por los habitantes vecinos a las vías por donde estos vehículos transitan y pueden alterar de forma considerable sus actividades cotidianas al generar problemas de concentración, insomnio y/o estrés, y creando inconformidad y temor en la comunidad.

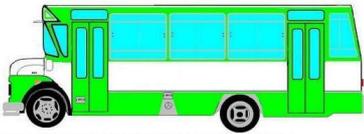
Para garantizar la seguridad de personas y estructuras es necesario determinar el nivel de las vibraciones registradas en las viviendas y determinar si estas llegan a represar un riesgo potencial para sus habitantes. Lo anterior implica realizar medidas de aceleración en diferentes puntos y obtener el nivel de vibración in situ y compararlo con los niveles de vibración establecidos por diferentes normas internacionales (DIN 4150, 1999, BS 7385. 1990. 1993, ANSI S3.29-1983).

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizaron medidas en las localidades de Kennedy, Suba, Ciudad Bolívar, Rafael Uribe, Engativá y Usme. El registro de estas vibraciones se presenta en el Anexo A.



El nivel de vibración depende de la distancia y de la frecuencia de excitación de la fuente externa respecto al punto de medición. El espectro generado por el paso de los vehículos contiene diferentes componentes frecuenciales, las cuales varían en función de la distancia, la velocidad del vehículo y el estado de la vía. La Tabla 1 muestra a manera de ejemplo algunos datos obtenidos de un estudio donde se registraron vibraciones para diferentes condiciones de movilidad y tipos de vehículo.

**Tabla 1. Niveles de frecuencia para diferentes tipos de vehículos (Barneich 1985)**

Tipo Vehículo	Velocidad		Frecuencia		Rugosidad
	min	Max	min	max	$\text{in}^{1/2}$
 Automóvil	32	56	3	14	< 0.03
	80	97	30		< 0.03
	24	64	20		< 0.03
	40	56	10	30	0.06 - 0.15
	32	48	12	17	0.4 - 0.5
 Bus	16	72	13	20	< 0.03
	16	56	11	14	< 0.03
	16	56	10	12	< 0.03
	32	97	11	27	< 0.03
	40	80	10	21	0.06 - 0.15
	40	80	10	16	0.06 - 0.15
	40	80	12	15	0.06 - 0.15
	72	79	9	17	0.2 - 0.35
	32	64	10	20	0.4 - 0.5
32	0	7	10	0.5 - 0.6	
 Camión	40	56	10	13	< 0.03
	48	80	20	35	< 0.03
	80	97	13	30	< 0.03
	40	56	15	35	0.06 - 0.15
	66	72	12	15	0.2 - 0.35
	63	71	11	15	0.3 - 0.5

Dependiendo de la frecuencia fundamental del espectro registrado el nivel de percepción por parte de personas y estructuras puede ser crítico en zonas cercanas a la fuente de excitación.

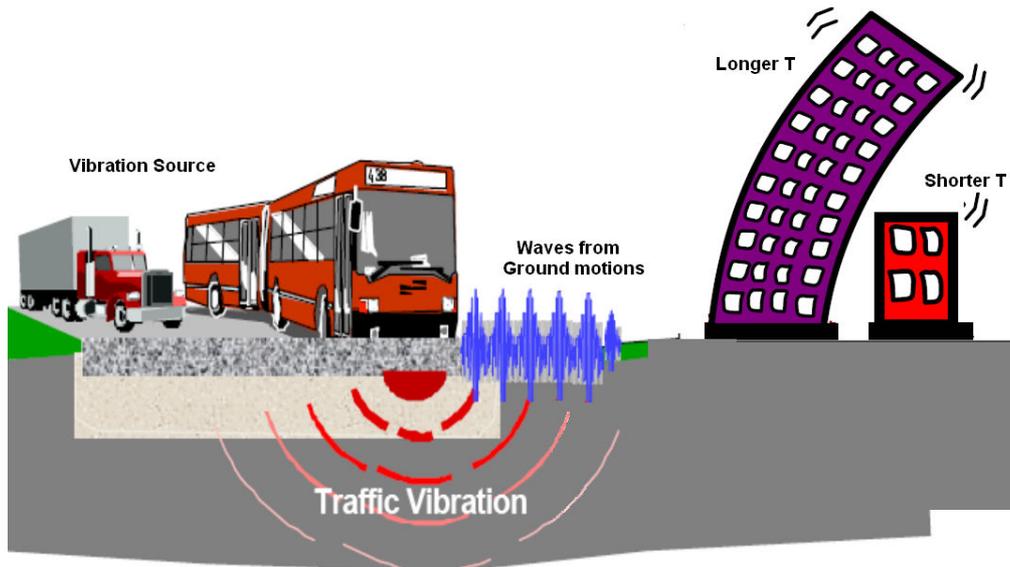


Figura 1. Vibraciones inducidas por el trafico (Murillo, 2007)

## 2.1 EFECTO DE LAS VIBRACIONES EN LAS ESTRUCTURAS

El efecto de las vibraciones sobre las estructuras se puede analizar con base en el nivel de vibraciones medido en el sitio y los umbrales de vibraciones establecidos en diferentes normas. Tal como se describe mas adelante, las mediciones realizadas muestran que las estructuras en los sitios medidos no se ven afectadas por el paso de los vehículos en el sector.

## 2.2 EFECTO DE LAS VIBRACIONES EN LAS PERSONAS

Diferentes estudios (Raina et al, 2004, and Siskind, 1981) han demostrado que las personas son extremadamente sensibles a las vibraciones. Estudios llevados a cabo en zonas residenciales de vibraciones generadas por obras de construcción y paso de vehículos muestran alteraciones sicológicas y físicas en los habitantes (Barkan, 1962). El efecto de las vibraciones en los habitantes puede desmejorar la calidad de vida, reducir la capacidad laboral, afectar la concentración en los niños y personas de edad, generar estrés y



problemas de conciliación de sueño, lo cual puede traer consecuencias mas graves en personas con enfermedades mentales y nerviosas.

La tolerancia a estas vibraciones es subjetiva y depende de diferentes condiciones del medio como factores socio-económicos y psicológicos. Por ejemplo, si en las viviendas se encuentran objetos como cuadros, repisas o ventanas en mal estado, el paso de un vehiculo será mas notorio que en una vivienda con las mismas características estructurales pero sin este tipo de objetos que pueden influenciar al receptor.

Los rangos de tolerancia han sido establecidos por la norma ANSI (1983) y se relacionan en la Tabla 2.

**Tabla 2. Nivel de percepción establecido por la norma ANSI (1983)**

Percepción	Velocidad particular
	mm/s
Leve	0,5
Intermedio	5
Severo	17,8

### 2.3 INTERPRETACIÓN DE LAS MEDICIONES

La medición de las vibraciones para cada ensayo se realizaron con tres sensores ubicados sobre el andén de la edificación de interés. Los sensores utilizados permiten medir las aceleraciones registradas en cada uno de los tres puntos. Cada registro se inició cuando el bus o vehículo se encontraba cerca al punto de medición, continuándose hasta que el vehículo se alejaba del objetivo, obteniendo así todo el rango de desplazamiento de la fuente de vibración.

A manera de ejemplo se presentan en la Figura 2 y Figura 3 las mediciones y procesamiento de señales correspondientes al ensayo número 9, estas son: la señal en el dominio del tiempo y su respectivo espectro de Fourier.



En cada punto de medición se realizaron tres registros, cada uno para una condición diferente de tráfico. Los resultados de estos registros se pueden apreciar en la Tabla 3.

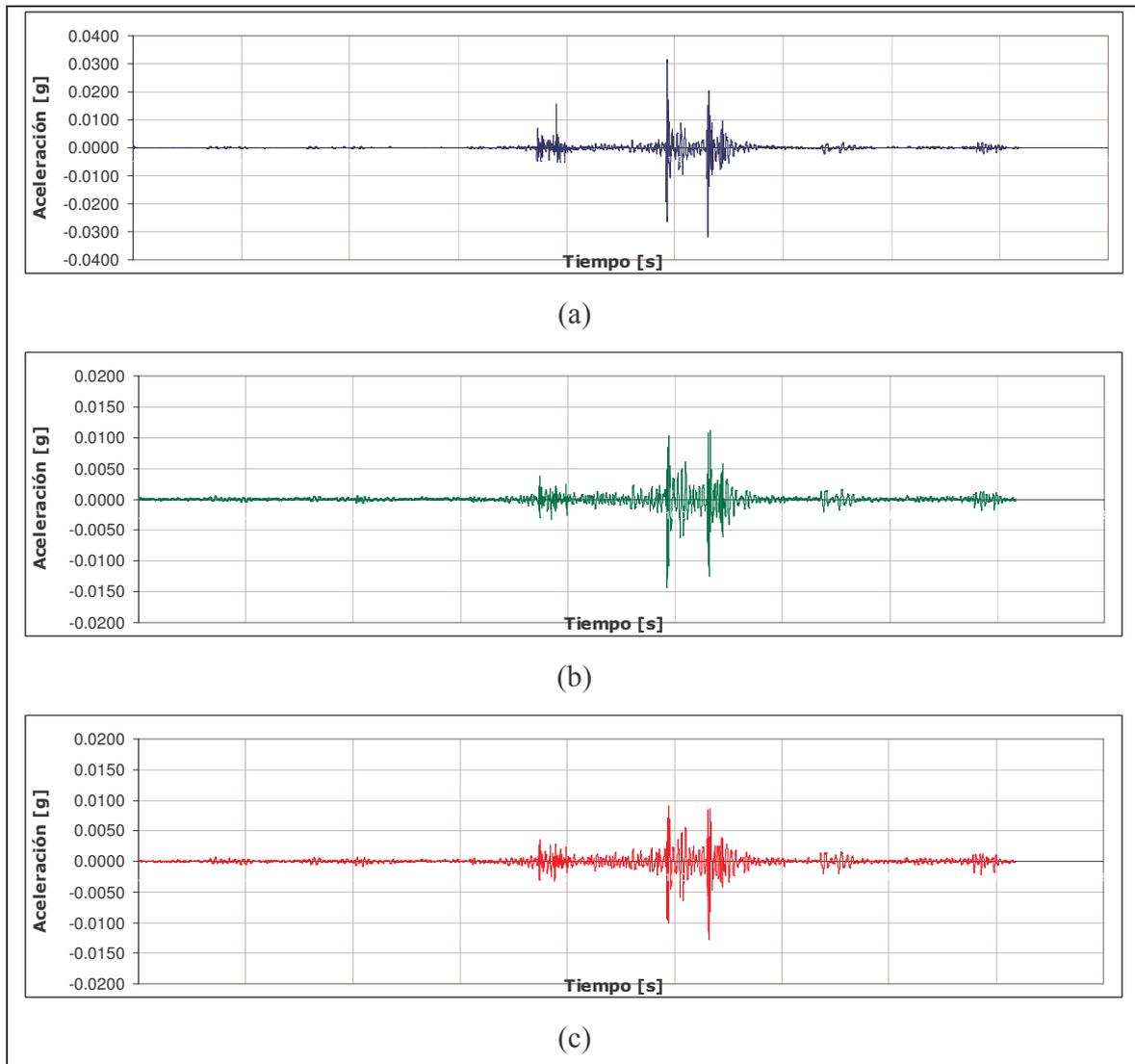


Figura 2. Registros en el tiempo de las vibraciones al paso de un bus alimentador para el (a) acelerómetro 1 (b), acelerómetro 2, y (c) acelerómetro 3 en el ensayo 9

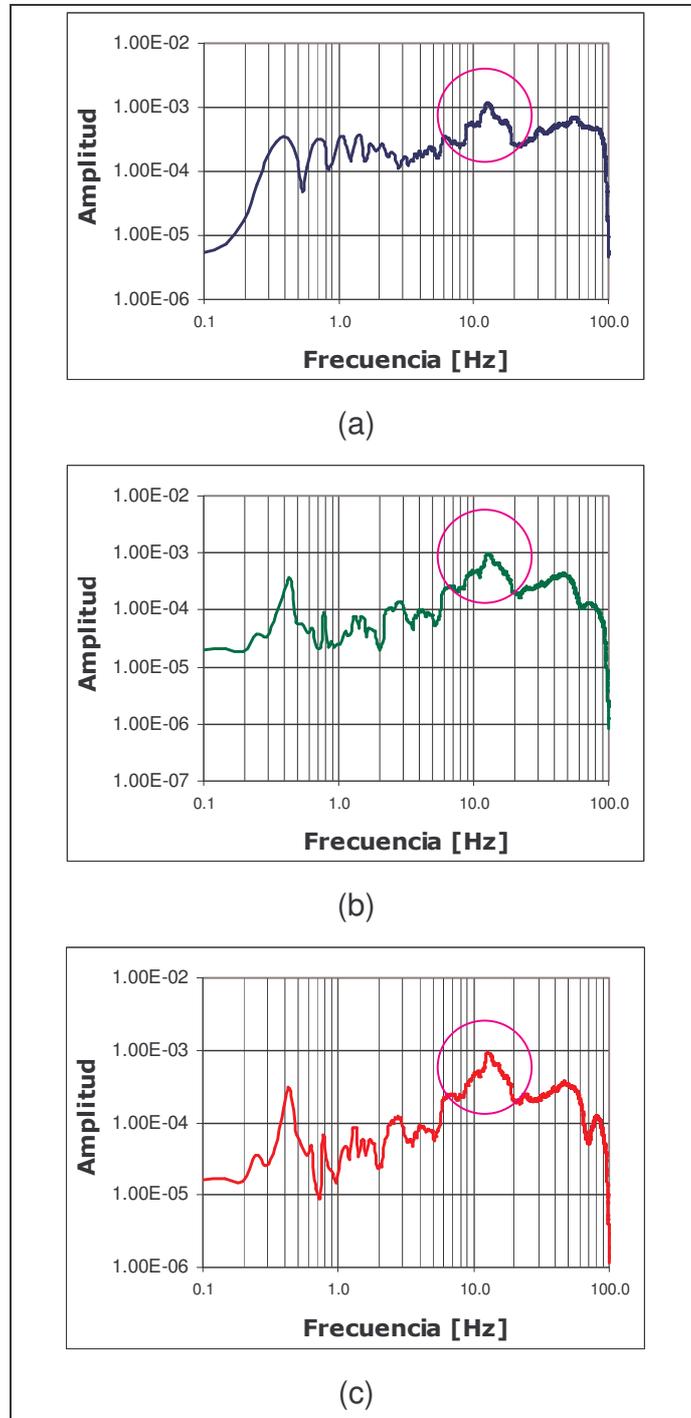


Figura 3. Espectro de Fourier de las vibraciones al paso de un bus alimentador para el (a) acelerómetro 1 (b), acelerómetro 2, y (c) acelerómetro 3 en el ensayo 9



**Tabla 3. Parámetros de las vibraciones registradas en cada ensayo**

Registro No.	Dirección Localidad	Dirección del Análisis	Desplazamiento Máximo [m]	Frecuencia Dominante [Hz]	Condiciones de Ensayo
Ensayo 1	Cll 127D bis A con Cr 92	Acelerómetro 1	1.65E-05	1.66	Registro Ambiental
		Acelerómetro 2	9.90E-06	2.05	
		Acelerómetro 3	1.08E-05	2.05	
Ensayo 3	Cll 127D bis A con Cr 92	Acelerómetro 1	6.46E-05	13.28	Paso de bus Alimentador
		Acelerómetro 2	1.03E-04	9.72	
		Acelerómetro 3	4.82E-05	9.72	
Ensayo 4	Cll 127D bis A con Cr 92	Acelerómetro 1	1.82E-04	2.98	Paso de volqueta
		Acelerómetro 2	1.08E-04	2.93	
		Acelerómetro 3	1.25E-04	2.54	
Ensayo 6	Cr 80 No. 7F - 04	Acelerómetro 1	2.43E-05	2.54	Registro Ambiental
		Acelerómetro 2	1.80E-05	8.01	
		Acelerómetro 3	2.14E-05	8.01	
Ensayo 7	Cr 80 No. 7F - 04	Acelerómetro 1	1.14E-05	14.65	Paso de buseta
		Acelerómetro 2	2.22E-05	14.65	
		Acelerómetro 3	2.14E-05	14.75	
Ensayo 9	Cr 80 No. 7F - 04	Acelerómetro 1	1.66E-04	12.65	Paso de bus Alimentador
		Acelerómetro 2	9.03E-05	12.60	
		Acelerómetro 3	7.86E-05	12.60	
Ensayo 10	Diagonal 9 con Tv 78D Esquina	Acelerómetro 1	3.33E-05	2.64	Registro Ambiental
		Acelerómetro 2	8.38E-05	0.39	
		Acelerómetro 3	1.44E-04	0.39	
Ensayo 11	Diagonal 9 con Tv 78D Esquina	Acelerómetro 1	2.32E-05	4.69	Paso de volqueta
		Acelerómetro 2	3.27E-05	4.39	
		Acelerómetro 3	3.24E-05	4.59	
Ensayo 12	Diagonal 9 con Tv 78D Esquina	Acelerómetro 1	4.17E-05	12.79	Paso de bus Alimentador
		Acelerómetro 2	9.53E-05	0.78	
		Acelerómetro 3	1.56E-04	0.54	
Ensayo 13	Cr 78 con Cll 3	Acelerómetro 1	6.44E-06	16.70	Registro Ambiental
		Acelerómetro 2	7.61E-06	13.57	
		Acelerómetro 3	8.81E-06	12.70	
Ensayo 15	Cr 78 con Cll 3	Acelerómetro 1	9.09E-05	12.45	Paso de bus Alimentador
		Acelerómetro 2	3.54E-05	16.36	
		Acelerómetro 3	5.40E-05	12.84	
Ensayo 16	Cr 78 con Cll 3	Acelerómetro 1	2.22E-05	17.87	Tráfico mixto de colectivos y vehículos particulares
		Acelerómetro 2	1.33E-05	16.46	
		Acelerómetro 3	2.04E-05	16.75	



Continuación Tabla 3

Registro No.	Dirección Localidad	Dirección del Análisis	Desplazamiento Máximo [m]	Frecuencia Dominante [Hz]	Condiciones de Ensayo
Ensayo 17	Cr 73D con Cll 26 sur	Acelerómetro 1	8.04E-06	13.96	Registro Ambiental
		Acelerómetro 2	9.45E-06	13.57	
		Acelerómetro 3	7.53E-06	2.54	
Ensayo 18	Cr 73D con Cll 26 sur	Acelerómetro 1	3.77E-05	14.75	Tráfico mixto de busetas y vehículos particulares
		Acelerómetro 2	2.72E-05	14.75	
		Acelerómetro 3	3.16E-05	14.67	
Ensayo 19	Cr 73D con Cll 26 sur	Acelerómetro 1	5.06E-05	14.84	Paso de bus Alimentador
		Acelerómetro 2	1.86E-05	14.45	
		Acelerómetro 3	2.13E-05	14.89	
Ensayo 20	Cll 73A sur Cr 18B	Acelerómetro 2	1.05E-05	0.49	Registro Ambiental
		Acelerómetro 3	6.69E-06	1.36	
Ensayo 21	Cll 73A sur Cr 18B	Acelerómetro 2	7.82E-05	4.83	Paso de bus Alimentador
		Acelerómetro 3	9.29E-06	18.04	
Ensayo 24	Cr 1d este No. 75b-22 sur	Acelerómetro 1	3.69E-06	2.58	Registro Ambiental
		Acelerómetro 2	1.84E-06	2.63	
		Acelerómetro 3	3.02E-06	0.34	
Ensayo 25	Cr 1d este No. 75b-22 sur	Acelerómetro 1	1.67E-04	0.78	Paso de bus Alimentador
		Acelerómetro 2	1.22E-04	0.34	
		Acelerómetro 3	1.00E-04	1.07	
Ensayo 27	Cr 77b bis No 77A-47	Acelerómetro 1	2.22E-04	0.34	Paso de bus Alimentador
		Acelerómetro 2	4.21E-05	12.84	
		Acelerómetro 3	5.35E-05	16.99	
Ensayo 28	Cr 77b bis No 77A-47	Acelerómetro 1	7.68E-05	2.25	Paso de buseta de servicio público
		Acelerómetro 2	3.71E-05	2.25	
		Acelerómetro 3	5.18E-04	0.34	
Ensayo 29	Cr 77b bis No 77A-47	Acelerómetro 1	1.11E-05	2.34	Registro Ambiental
		Acelerómetro 2	1.26E-05	2.37	
		Acelerómetro 3	2.85E-03	0.32	
Ensayo 34	Cr 20 No. 37-62 sur	Acelerómetro 1	9.16E-07	0.59	Registro Ambiental
		Acelerómetro 2	2.32E-06	10.18	
		Acelerómetro 3	1.94E-05	0.34	
Ensayo 35	Cr 20 No. 37-62 sur	Acelerómetro 1	1.01E-05	0.59	Paso de bus Alimentador
		Acelerómetro 2	3.96E-05	12.99	
		Acelerómetro 3	1.72E-05	12.16	
Ensayo 36	Cr 20 No. 37-62 sur	Acelerómetro 1	8.99E-07	0.56	Paso de buseta de servicio público
		Acelerómetro 2	3.92E-05	14.55	
		Acelerómetro 3	1.26E-04	0.37	



Continuación Tabla 3

Registro No.	Dirección Localidad	Dirección del Análisis	Desplazamiento Máximo [m]	Frecuencia Dominante [Hz]	Condiciones de Ensayo
Ensayo 39	Cll 42 sur No. 23-08	Acelerómetro 1	1.30E-06	0.59	Registro Ambiental
		Acelerómetro 2	1.39E-05	2.78	
		Acelerómetro 3	3.86E-06	2.78	
Ensayo 40	Cll 42 sur No. 23-08	Acelerómetro 1	6.91E-07	0.78	Paso de bus Alimentador
		Acelerómetro 2	7.57E-05	13.28	
		Acelerómetro 3	2.44E-05	12.99	
Ensayo 41	Cll 42 sur No. 23-08	Acelerómetro 1	6.58E-07	0.73	Paso de vehículo particular
		Acelerómetro 2	7.33E-05	0.39	
		Acelerómetro 3	4.57E-04	0.39	

La Figura 4 resume las vibraciones medidas para los diferentes tipos de fuentes de vibración (vehículos alimentadores, vehículos particulares y ruido ambiental). En esta figura se puede observar que los intervalos de vibración registrados para las mediciones ambientales se ubican en el límite no perceptible para los habitantes. Igualmente muestran que en efecto las vibraciones percibidas por los habitantes son intensas, sin embargo estas se encuentran por debajo del límite establecido por las normas internacionales. Por lo anterior se puede también concluir que las vibraciones no representan un peligro para las estructuras.

Adicionalmente se observa que las vibraciones mas intensas son las generadas por el paso de los vehículos alimentadores, estas mediciones se ubican en el intervalo intenso para personas, especialmente cuando la componente frecuencial es superior a los 10 Hz, la cual es la velocidad promedio de un vehículo que circula entre 50 y 60 km/h.

Para reducir el nivel de vibraciones en sectores donde estas causen inconformidad se sugiere la implementación de obras complementarias sobre las vías que hagan que los vehículos disminuyan la velocidad. Adicional a esto es fundamental conservar en perfectas condiciones el estado superficial del pavimento de tal forma que el Índice de Rugosidad Internacional IRI no supere 3.5 m/km.. Otras alternativas que permiten mitigar los efectos de las vibraciones en los habitantes y edificaciones es la instalación de barras que ayuden



a minimizar el nivel de la vibración, sin embargo el costo de su implementación supera el costo de mejorar el pavimento, por lo que no se considera viable económicamente.

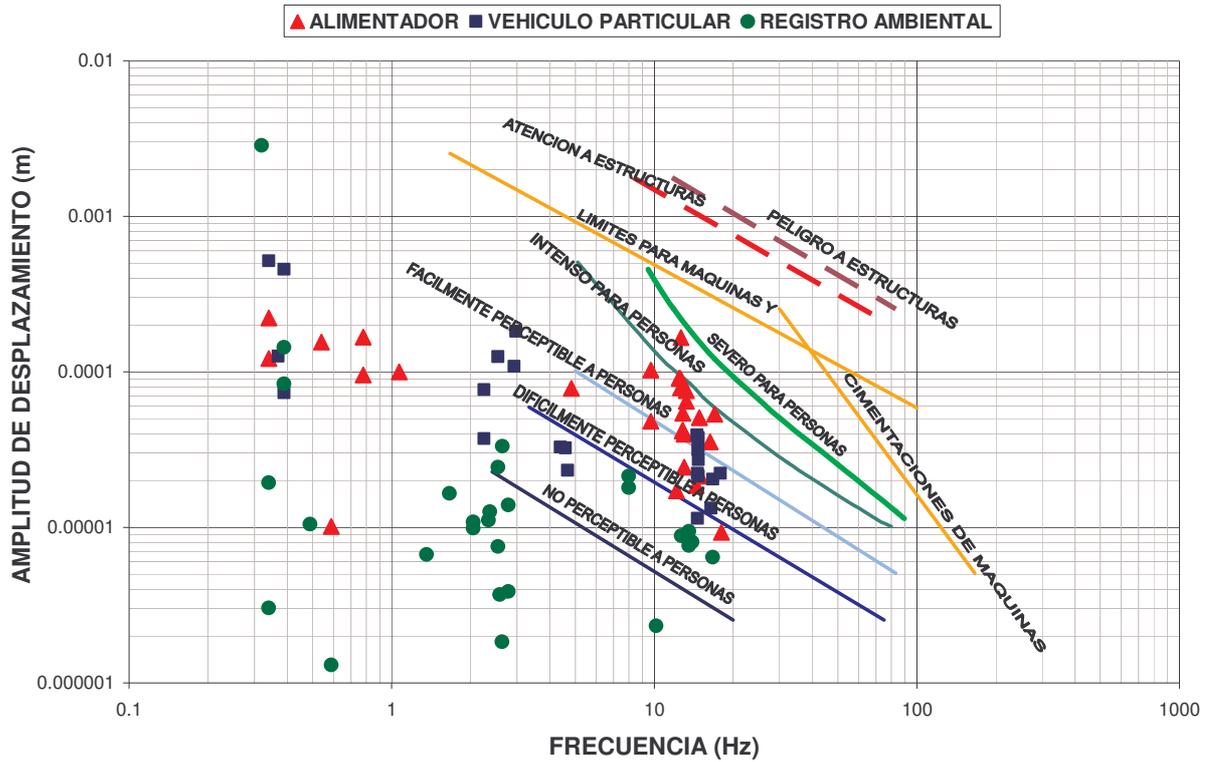


Figura 4. Amplitudes limites de vibración



### 3 MODELACIÓN NUMÉRICA

La modelación numérica se concentró en el cálculo de esfuerzos y deformaciones en las diferentes capas de las estructuras de pavimento para determinar su vida útil bajo diferentes condiciones de carga. Con el análisis anterior se logró una estimación del daño causado en función de las cargas por eje para cada tipo de bus. En este análisis el cálculo de esfuerzos y deformaciones en las capas de pavimento se realizó con el programa AlizéWin. Este programa permite realizar cálculos que involucran la geometría y las cargas reales de un vehículo sobre la estructura de pavimento.

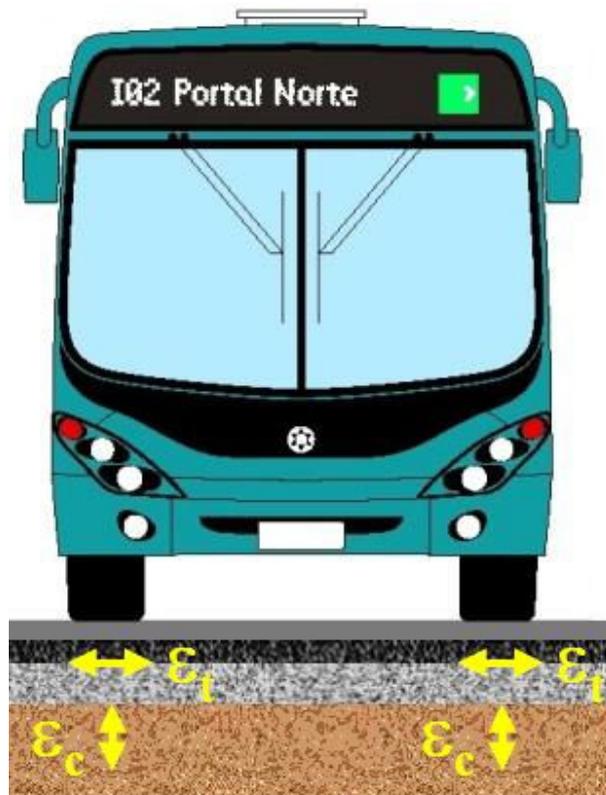


Figura 5. Deformaciones de tensión y compresión en la capa asfáltica y subrasante



### 3.1 PRINCIPIO DEL MODELO

Para la determinación de los esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en capas de pavimento flexibles, los métodos y modelos más empleados en la práctica son los basados en asimilar dichos pavimentos a un sistema multicapa que funcionan en el rango de comportamiento elástico del material.

Las hipótesis más habituales para sistemas multicapa son las establecidas por Burmister, que se pueden resumir en las siguientes:

- Se trabaja con cargas distribuidas uniformemente sobre un área circular en la superficie del pavimento.
- Cada capa queda definida por su módulo de elasticidad  $E$  y su coeficiente de Poisson  $\mu$ , siendo homogénea, isótropa y de espesor constante e indefinido horizontalmente.
- El apoyo entre capas es continuo.
- No se considera el efecto de los gradientes térmicos.
- Los desplazamientos en el sistema son pequeños.

Para este método multicapa es necesario conocer las características de cada uno de los materiales del pavimento.

Estableciendo el equilibrio elástico en el macizo multicapa, por ejemplo con las hipótesis de Burmister, se plantean las ecuaciones que permiten calcular los valores de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos. Estos valores deben ser comparados con los correspondientes a los valores admisibles de cada uno de los materiales. Los modelos basados en leyes de fatiga son los más utilizados para determinar las condiciones en las que se llega al límite estructural del pavimento. Mediante las leyes de fatiga se determinan el número  $N$  de aplicaciones de una carga tipo que puede soportar el material antes de llegar a



la falla estructural si cada aplicación individual produce una determinada tensión o deformación.

Los resultados de daño generado por los buses alimentadores de Transmilenio que actualmente se encuentran en circulación se compararán con el daño generado por un bus de menor capacidad (busesta) que podría implementarse para mitigar el daño en las vías locales causado por la circulación de los buses alimentadores actuales.

### **3.2 CARGAS ANALIZADAS**

Puesto que no existe registros sobre el daño que los buses alimentadores de Transmilenio puedan producir sobre los pavimentos en las vías de Bogotá, el análisis que se presenta en este informe se basa en el cálculo y la comparación de los esfuerzos y deformaciones que sobre las estructuras de pavimento típicas pueden producir los diferentes tipos de buses alimentadores. El cálculo de esfuerzos y deformaciones en la estructura del pavimento es la base para calcular el daño que sobre cada estructura producen los diferentes buses alimentadores.

#### **3.2.1 Medición y Pesaje de Buses Alimentadores (sin pasajeros)**

Con el objeto de determinar las cargas transferidas por estos buses a la estructura del pavimento, el 16 de Junio de 2007 se procedió a medir y pesar los diferentes buses alimentadores que se encontraron disponibles esa fecha en el patio de la Calle 6 con Avenida Caracas. En total se encontraron catorce tipos diferentes de buses alimentadores. A cada bus se le midió la distancia entre ejes y la distancia entre las llantas traseras, medidas necesarias para los datos geométricos de las cargas en el Modelo, y otras medidas internas necesarias para el cálculo de las cargas con pasajeros, ya que el pesaje de los buses se realizó con el bus desocupado. Estos resultados se presentan en el Anexo B.



**Fotografía 1. Medición y pesaje de los buses alimentadores**

En la Figura 6 se hace una comparación del peso por eje de los diferentes buses medidos. Los buses se han codificado con la letra B acompañada de un número que identifica a cada uno de los catorce buses medidos. Igualmente el bus medido correspondiente a cada código podrá consultarse en el Anexo B.

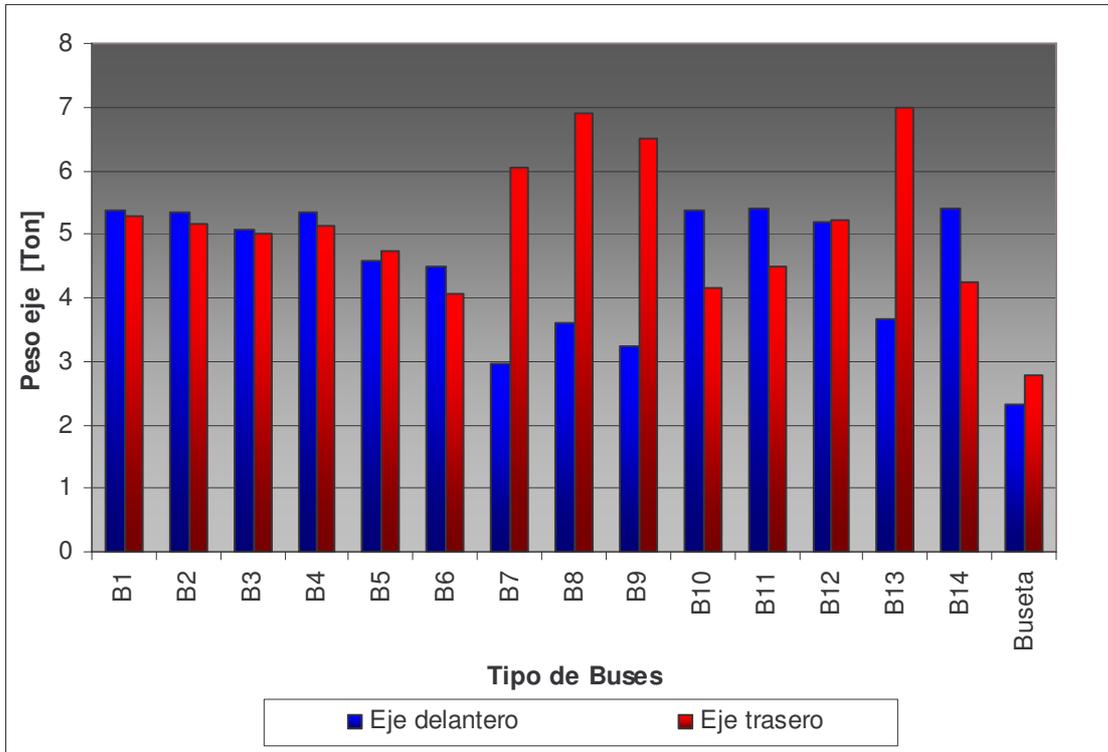


Figura 6. Peso por eje en toneladas de cada bus alimentador medido

### 3.2.2 Cálculo de las cargas por eje de cada bus con pasajeros

El cálculo de la carga viva por eje para cada bus se hizo de acuerdo a su capacidad total de pasajeros (sentados y parados) y con un peso promedio por persona de 70 kg. Con estos valores se calculó una carga uniformemente distribuida a lo largo del área disponible para pasajeros dentro del bus y con esta la respuesta en cada eje.

En la Figura 7 y Figura 8 se presenta una comparación entre los pesos por eje del bus desocupado y el bus con pasajeros en su capacidad total.

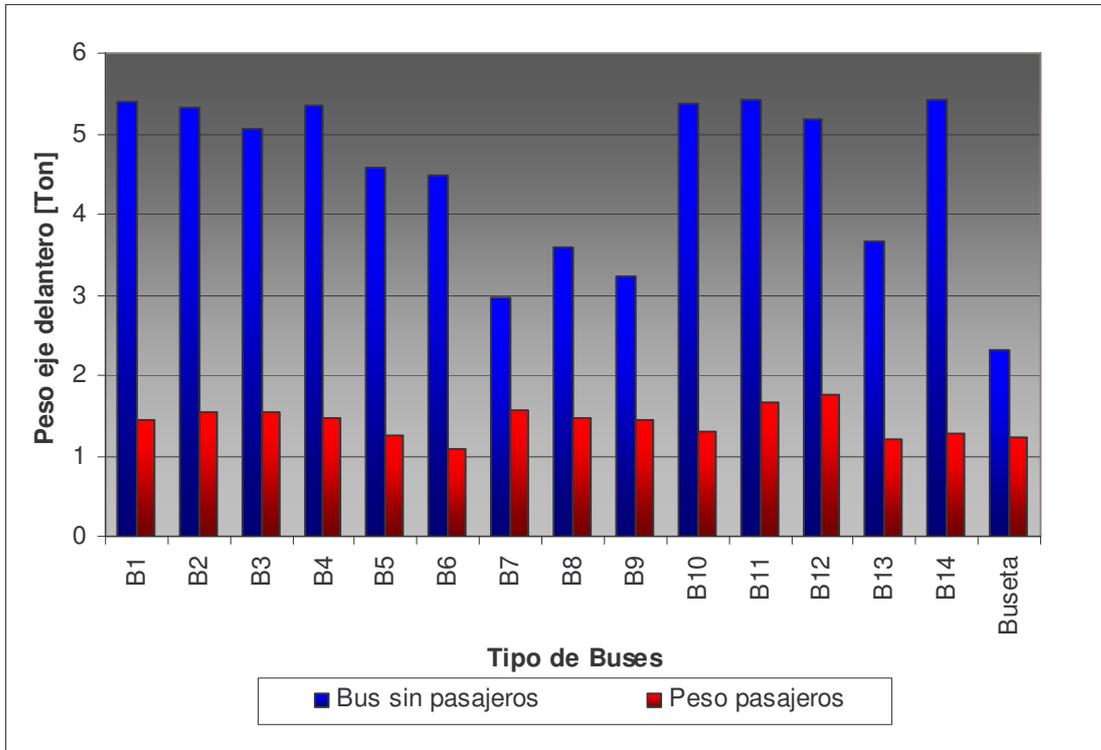


Figura 7. Peso en toneladas del eje delantero de cada bus alimentador medido

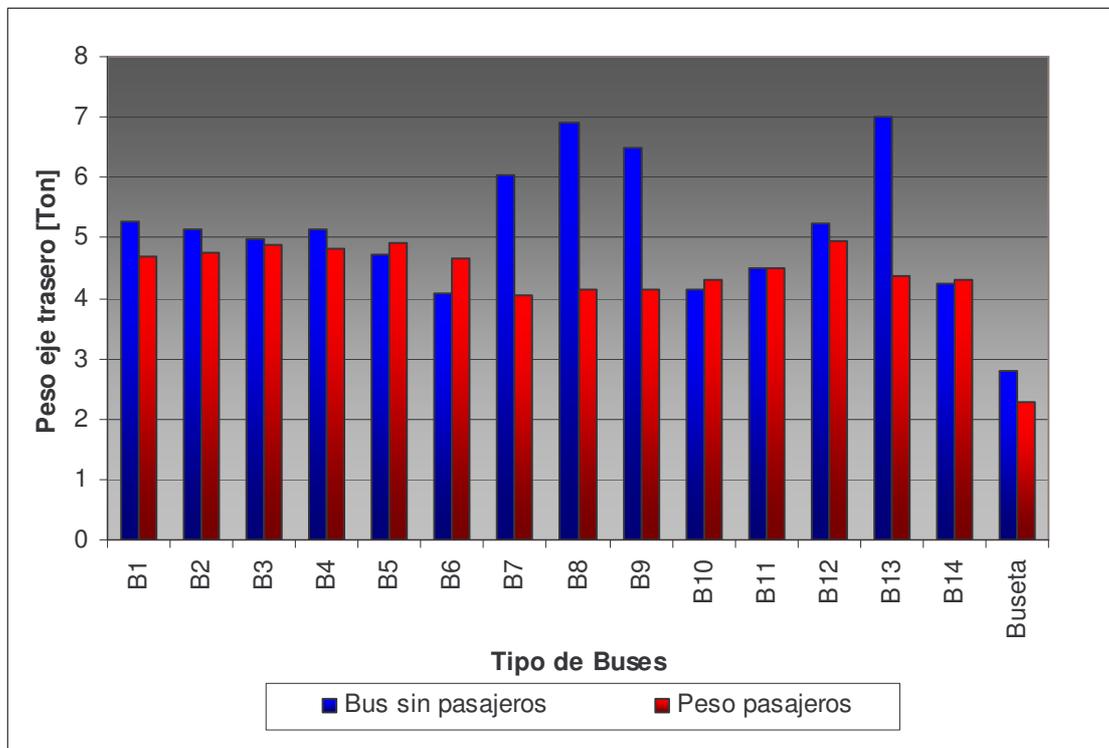


Figura 8. Peso en toneladas del eje trasero de cada bus alimentador medido



### 3.2.3 Grupos de cargas a analizar

Debido a que entre algunos de los buses alimentadores medidos presentaron similitudes entre las distancias entre ejes y ruedas traseras, y entre las cargas totales (entiéndase por carga total la suma de los pesos del bus desocupado mas los pasajeros) de los ejes delantero y trasero, se decidió reunir estos en 8 grupos diferentes, tal como se muestra en la Tabla 4 y en la Figura 9 y Figura 10 . Así entonces, la configuración de las cargas de acuerdo a su magnitud y distancia entre ejes será el valor medio para cada grupo conformado. El grupo nueve corresponde al bus de menor capacidad, el cual no hace parte del sistema de buses alimentadores de Transmilenio.

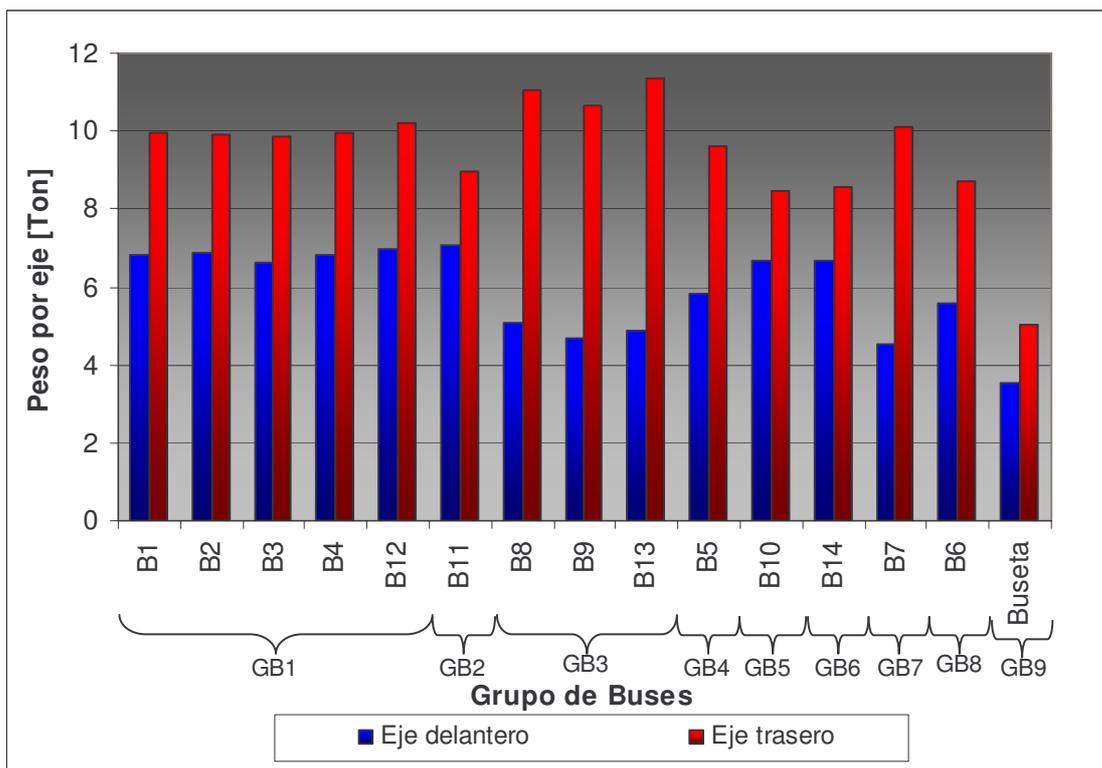


Figura 9. Agrupación de buses por cargas en ejes y distancia entre ejes

La Figura 10 presenta los valores de carga promedio por cada eje para cada grupo de buses, y la Figura 11 muestra como ejemplo la configuración de las cargas sobre la estructura E1 (ver Figura 13).

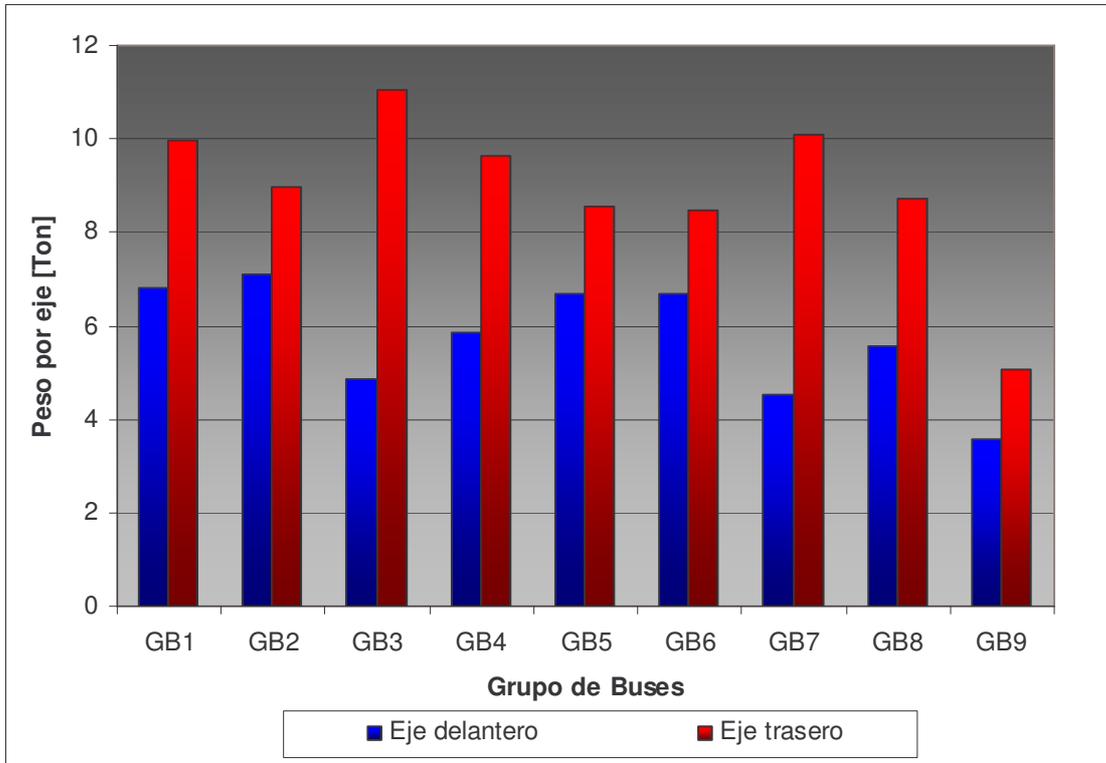


Figura 10. Cargas por eje promedio para cada grupo de buses

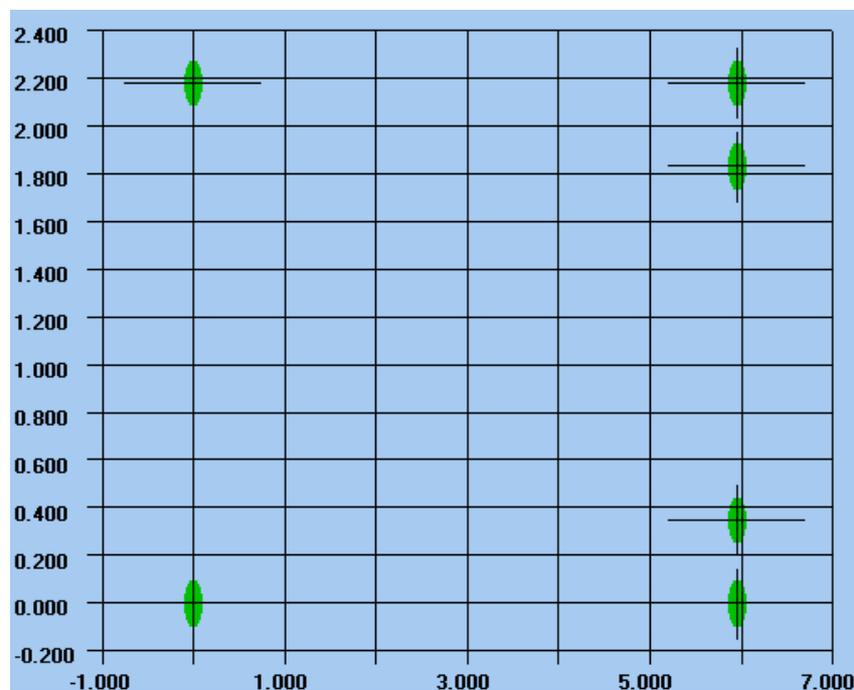


Figura 11. Geometría del tren de cargas en un plano XY para el grupo de buses GB1

Tabla 4. Agrupación de buses por Valores medios y Desviaciones Estándar de los pesos y medidas ente ejes

Código	Peso eje delantero				Peso eje trasero				Distancia entre ejes				Distancia entre ruedas traseras			
	Grupo	Bus	peso MN	$\mu$ MN	$\sigma$ MN	peso MN	$\mu$ MN	$\sigma$ MN	dist. m	$\mu$ m	$\sigma$ m	dist. m	$\mu$ m	$\sigma$ m		
GB1		B1	0.0671	0.0669	0.0012	0.0978	0.0980	0.0012	5.95	5.95	0.01	1.82	1.83	0.01		
		B2	0.0674			0.0973			5.96			1.82				
		B3	0.0649			0.0969			5.94			1.83				
		B4	0.0669			0.0977			5.94			1.84				
		B12	0.0681			0.1001			5.95			1.82				
GB2	B11	0.0695	0.0695	-	0.0880	0.0880	-	5.95	5.95	-	1.82	1.82	-			
GB3		B8	0.0497	0.0478	0.0019	0.1083	0.1082	0.0035	5.25	5.24	0.02	1.83	1.84	0.01		
		B9	0.0459			0.1046			5.22			1.85				
		B13	0.0479			0.1116			5.26			1.85				
GB4	B5	0.0573	0.0573	-	0.0944	0.0944	-	5.23	5.23	-	1.83	1.83	-			
GB5	B10	0.0445	0.0445	-	0.1060	0.1060	-	4.82	4.82	-	1.84	1.84	-			
GB6	B14	0.0657	0.0657	-	0.0841	0.0841	-	4.78	4.78	-	1.84	1.84	-			
GB7	B7	0.0443	0.0443	-	0.0990	0.0990	-	4.97	4.97	-	1.81	1.81	-			
GB8	B6	0.0547	0.0547	-	0.0855	0.0855	-	4.79	4.79	-	1.84	1.84	-			
GB9	Buseta	0.0349	0.0349	-	0.0495	0.0495	-	4.05	4.05	-	1.68	1.68	-			



### 3.3 ESTRUCTURAS ANALIZADAS

Como es natural, las estructuras de pavimento que hacen parte de los corredores propuestos deben tener una gran variabilidad en su tipología (espesores y tipo de materiales). Por esta razón, este estudio se restringe al análisis de algunas estructuras típicas para pavimentos flexibles conformadas por Capa Asfáltica (CA), Base granular (BG) y Sub-Base Granular (SBG), tal como se presenta en la Figura 12, donde S es la Subrasante. Las estructuras se escogieron variando el espesor de la capa de sub-base granular para  $e = 0, 30, \text{ y } 50 \text{ cm}$ , y el módulo de la subrasante para  $E_s = 30, 50, 70, 100 \text{ y } 150 \text{ MPa}$ .

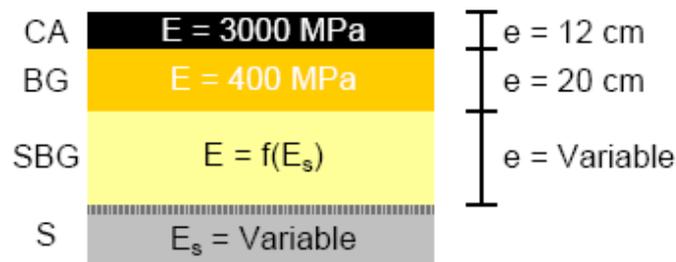


Figura 12. Estructura típica analizada

La capa de sub-base granular se divide en capas de 25 cm de abajo hacia arriba y el módulo de cada capa es igual al producto entre un coeficiente de proporcionalidad  $K$  que depende del tipo de material (ver Tabla 6) por el módulo de la capa inmediatamente inferior, siendo para la primera capa el producto de este factor por el módulo de la subrasante. Sin embargo el módulo de la sub-base granular no debe ser mayor a 360 MPa.

Tabla 5. Parámetros de las capas de pavimento

Capa	Espesor [cm]	Módulo [MPa]	Poisson
CA	12	3000	0.35
BG	20	400	0.35
SBG	0, 30, 50	$E_i = E_{(i-1)}K < 360$ $E_1 = E_s K < 360$	0.35
S	-	S1, S2, S3, S4, S5 <sup>1</sup>	0.35

<sup>1</sup> Ver valores de Módulos en la Tabla 7



En este estudio se utilizó un coeficiente de proporcionalidad  $K$  de 2.5 correspondiente a materiales de calidad intermedia.

**Tabla 6. Valores del coeficiente de proporcionalidad  $K$**

$K$	Espesor [cm]
3.0	% trituración, IP=0, Tamaño máximo 3/4", LA<25, solidez 12%
2.5	% trituración, IP<2, Tamaño máximo 3/4", LA<30, solidez 12%
2.0	20% trituración, IP<6, Tamaño máximo 1 3/4", LA<35, solidez 12%

La Figura 13 presenta las 10 estructuras a analizar resultantes de variar el espesor de la capa de sub-base granular (sentido horizontal en la figura) y el módulo resiliente de la subrasante (sentido vertical en la figura), donde los módulos para cada tipo de subrasante son los mostrados en la Tabla 7.

**Tabla 7. Módulo Resiliente por tipo de subrasante**

Categoría subrasante	Módulo Resiliente [MPa]
S1	30
S2	50
S3	70
S4	100
S5	150

El propósito de este estudio es establecer el daño que producen los buses sobre cada estructura en términos relativos (comparación del daño causado por un bus con respecto a otro). Por esta razón, tal como se podrá observar más adelante, la influencia del tipo de estructura sobre el daño relativo no es significativa. Esto justifica el haber escogido un número limitado de estructuras para el presente análisis.



**Figura 13. Estructuras analizadas**

### **3.4 CÁLCULO DEL DAÑO**

Tal como ya se anotó, los parámetros que condicionan el comportamiento de un pavimento flexible son fundamentalmente la deformación por tensión en la base de la capa asfáltica y la deformación por compresión en la subrasante. En este sentido el primer parámetro de



---

comparación es la magnitud de las deformaciones que sobre una estructura de pavimento producen cada uno de los buses analizados.

El deterioro de un pavimento es el resultado de una acumulación del daño producido por el paso de las cargas repetidas. En ese sentido el segundo parámetro de comparación es el daño acumulado producido por cada uno de los buses tanto por fatiga (deformación por tensión en la capa asfáltica) como por deformación permanente (deformación por compresión en la subrasante).

### **3.4.1 Deformaciones de tensión en la capa asfáltica**

La Figura 14 representa la envolvente conformada por diferentes perfiles de deformaciones unitarias por tensión en la capa asfáltica para una estructura y configuración de carga dados. Las diferentes curvas de deformación corresponden a perfiles longitudinales tomados cada 5 cm en el sentido transversal y están dibujadas en unidades de micro deformación, lo cual corresponde a la deformación unitaria multiplicada por  $10^6$ .

En el Anexo C se presentan los diagramas similares al de la Figura 14 para las deformaciones de tensión en la capa asfáltica de cada uno de los grupos de buses en cada estructura analizada.

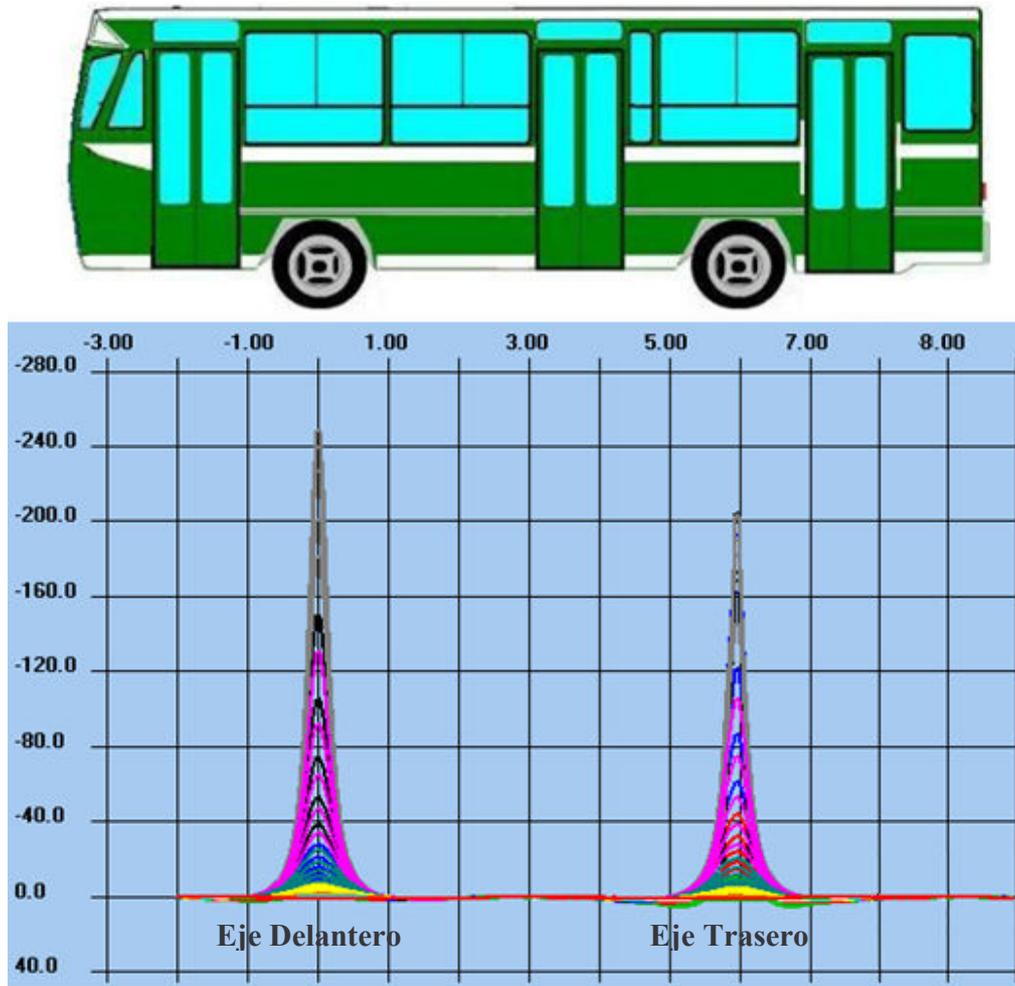


Figura 14. Deformaciones tangenciales bajo la capa asfáltica

En el Anexo D se presentan los diagramas para las deformaciones verticales en la subrasante generadas por cada uno de los grupos de buses en cada una de las estructuras analizadas.

### 3.4.2 Deformaciones verticales en la subrasante

La Figura 15 representa la envolvente conformada por diferentes perfiles de deformaciones unitarias por compresión en la capa de subrasante para una estructura y configuración de carga dados. En este caso también las diferentes curvas de deformación corresponden a



perfiles longitudinales tomados cada 5 cm en el sentido transversal. La unidad de deformación en esta figura es también micro deformación.

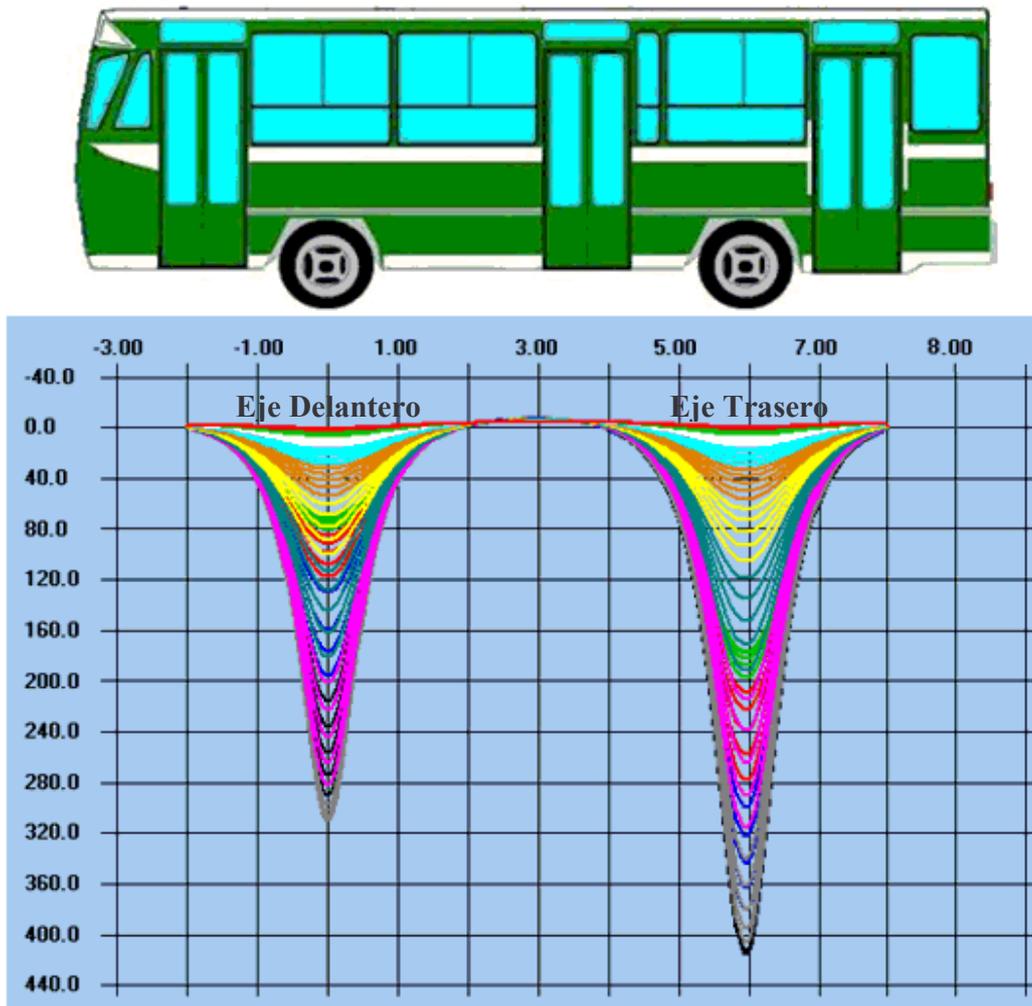


Figura 15. Deformaciones verticales en la subrasante

### 3.4.3 Daño por fatiga en la capa asfáltica

Aunque las deformaciones por tensión en la capa asfáltica son diferentes para cada tipo de bus alimentador, la acumulación de daño por fatiga depende del nivel de deformación y del número de ejes de cada bus. Así entonces, el daño generado por cada bus al pavimento se



calcula mediante la ley de fatiga para materiales asfálticos. De esta ley de fatiga podemos obtener el daño con la Ecuación 1.

$$\frac{1}{N} = \frac{1}{10^6} \left( \frac{\epsilon_6 K_t}{\epsilon_t} \right)^{1/b}$$

**Ecuación 1**

$K_t$  es un coeficiente corrector destinado a tener en cuenta la influencia de la temperatura. El valor de este coeficiente puede determinarse con base en la variación del módulo en función de la temperatura como muestra la Ecuación 2.

$$K_t = \sqrt{\frac{E(\theta = 15^\circ C)}{E(\theta = \theta_{eq})}}$$

**Ecuación 2**

$N$  es el número de repeticiones de carga,  $\epsilon_6$  es la deformación de tracción en flexión que corresponde a  $10^6$  ciclos de carga y depende del tipo de mezcla asfáltica,  $\epsilon_t$  es la deformación de tracción en flexión bajo la capa asfáltica calculada,  $b$ : es la pendiente de la ley de fatiga. El valor adoptado para estos parámetros se presenta en la Tabla 8.

**Tabla 8. Parámetros de cálculo del daño por fatiga en la Carpeta Asfáltica**

Parámetro	Valor
$E(15^\circ C, 10Hz)$	8000 MPa
$E(25^\circ C, 10Hz)$	3000 MPa
$\epsilon_6(15^\circ C, 25Hz)$	1.00E-04
$b$	-0.20

En la Figura 16 y Figura 17 se muestran las curvas de daño que producen los diferentes grupos de buses sobre las estructuras analizadas. Estas curvas están expresadas en dos formas diferentes:

- Daño por fatiga generado por cada grupo de buses (Figura 16),
- Daño por fatiga por cada pasajero en cada grupo de buses (Figura 17).



El propósito de este estudio es establecer el daño que producen los buses alimentadores sobre cada estructura en términos relativos (comparación del daño causado por un bus con respecto a otro). Por esta razón será más útil comparar el daño relativo de cada bus que el daño en términos absolutos que producen los vehículos sobre el pavimento. En este caso se está comparando el daño relativo del grupo de buses alimentadores que menor daño absoluto presentó (grupo GB7) respecto al daño generado por los otros grupos de buses alimentadores incluyendo la buseta analizada (GB9). En la Figura 18 y Figura 19 se presentan las curvas de daño relativo causado por cada bus y el causado por cada pasajero, respectivamente. La Figura 20 muestra el daño relativo promedio por fatiga de la capa asfáltica.

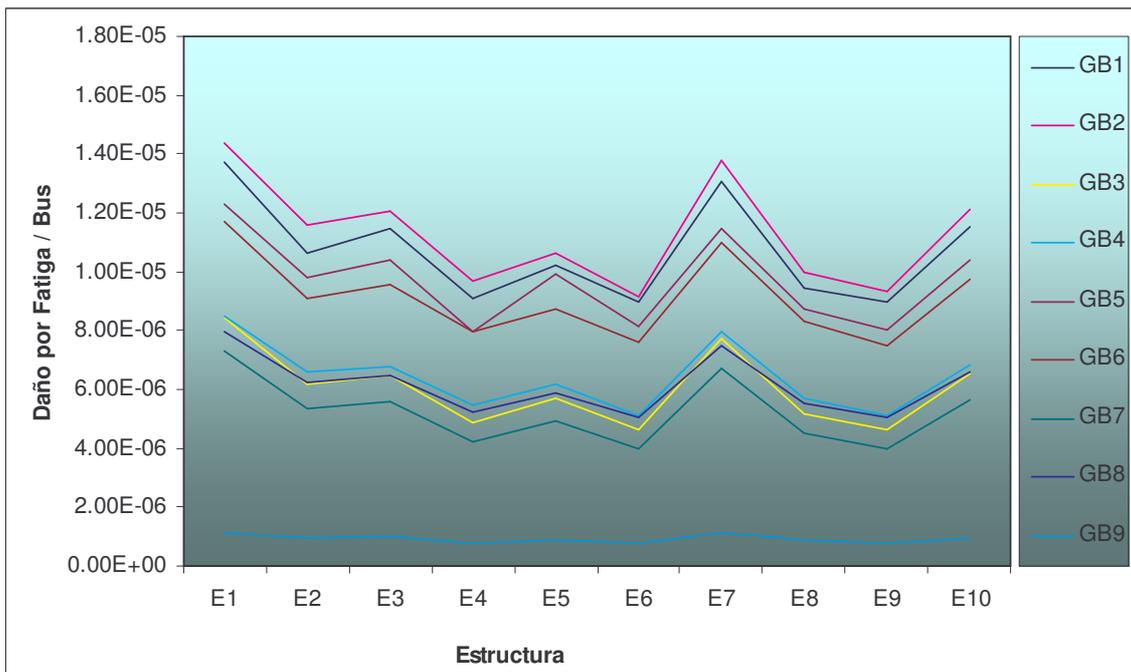


Figura 16. Daño por fatiga / bus

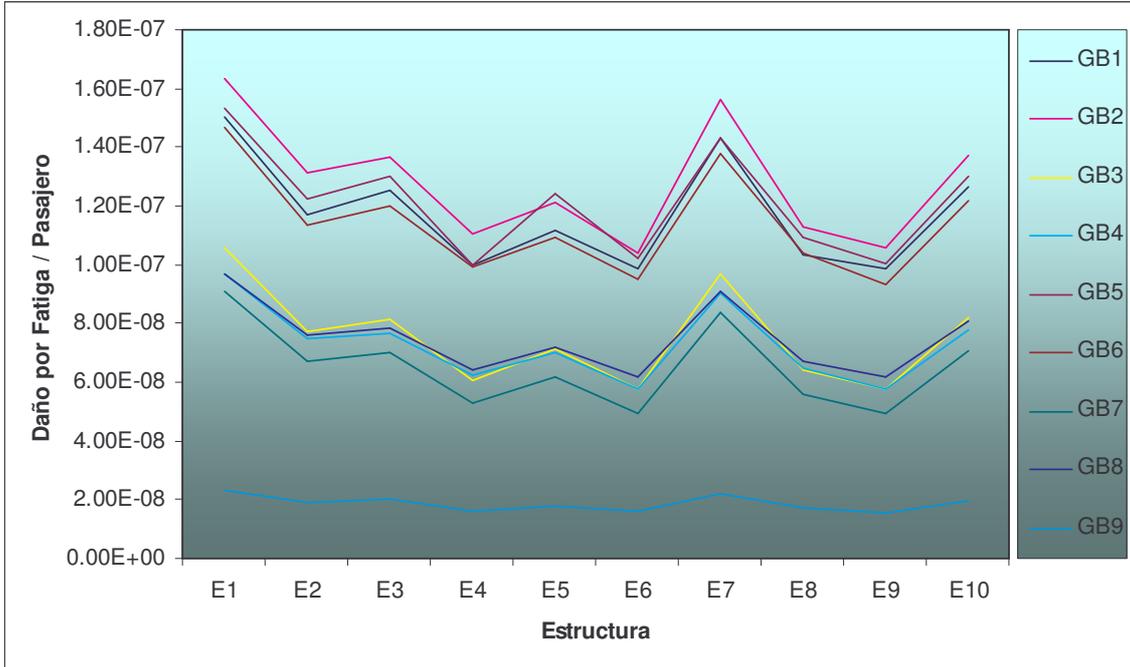


Figura 17. Daño por fatiga / pasajero

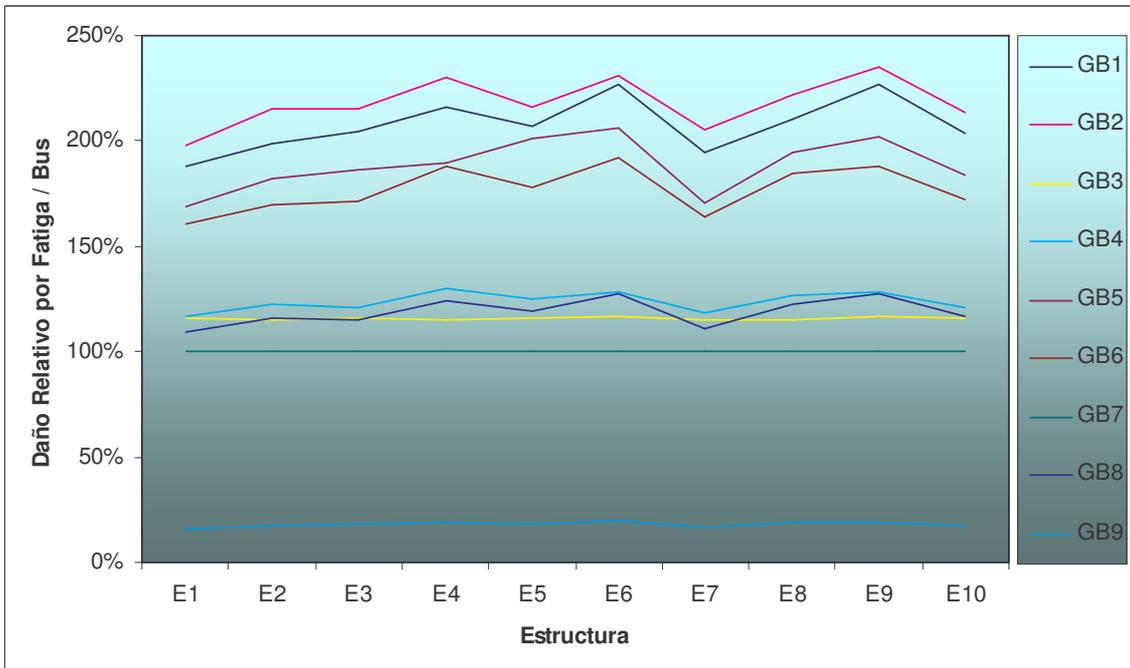


Figura 18. Daño relativo por fatiga / bus

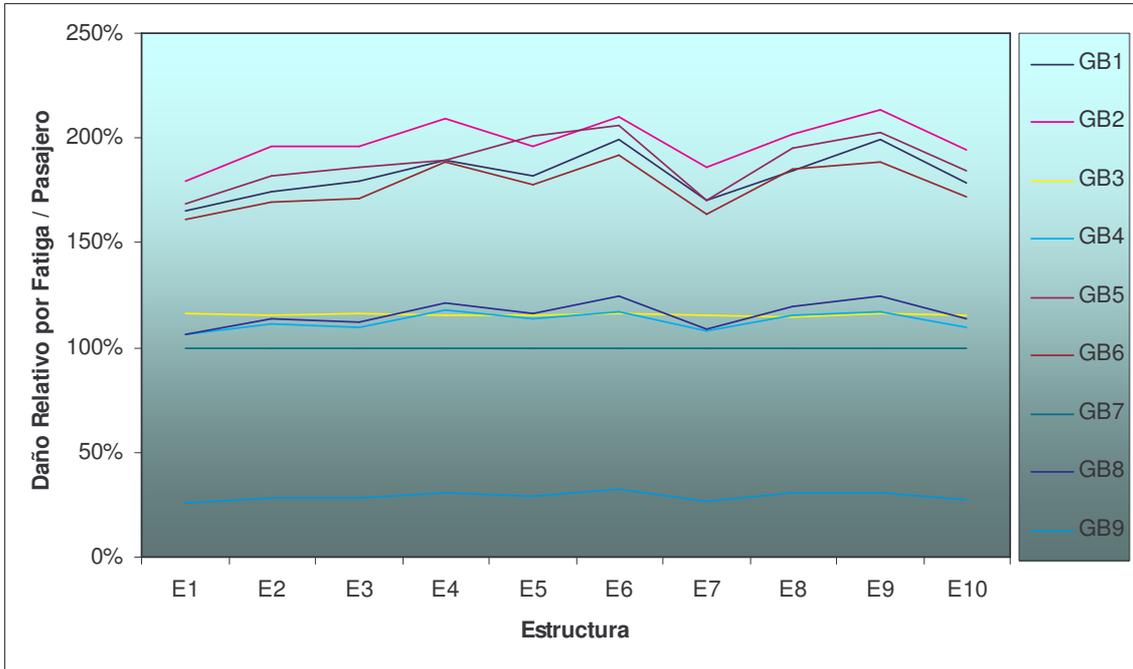


Figura 19. Daño relativo por fatiga / pasajero

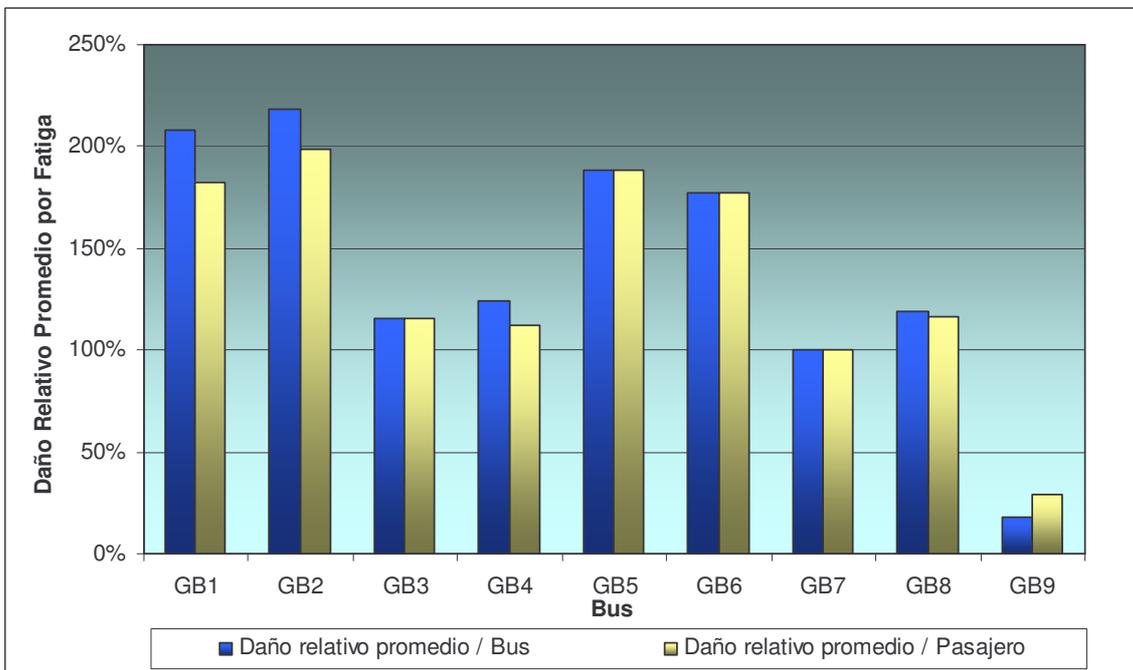


Figura 20. Daño relativo promedio por fatiga para cada grupo de buses



### 3.4.4 Daño por deformaciones permanentes en la subrasante

El daño generado por cada bus en relación al ahuellamiento en la subrasante es el debido a la acumulación de deformaciones plásticas. Este daño se calcula mediante la expresión en la Ecuación 3, donde  $\epsilon_z$  es la deformación vertical calculada.

$$\frac{1}{N} = \frac{1}{10^6} \left( \frac{\epsilon_z}{0.012} \right)^{1/0.222}$$

Ecuación 3

En la Figura 21 y Figura 22 se muestran las curvas de daño que producen los diferentes grupos de buses sobre las estructuras analizadas, para el daño generado por cada grupo de buses y el daño por cada pasajero, respectivamente.

Para calcular el daño relativo (Figura 23 a Figura 25) se dividió el daño absoluto de cada vehículo por el daño absoluto del grupo GB7.

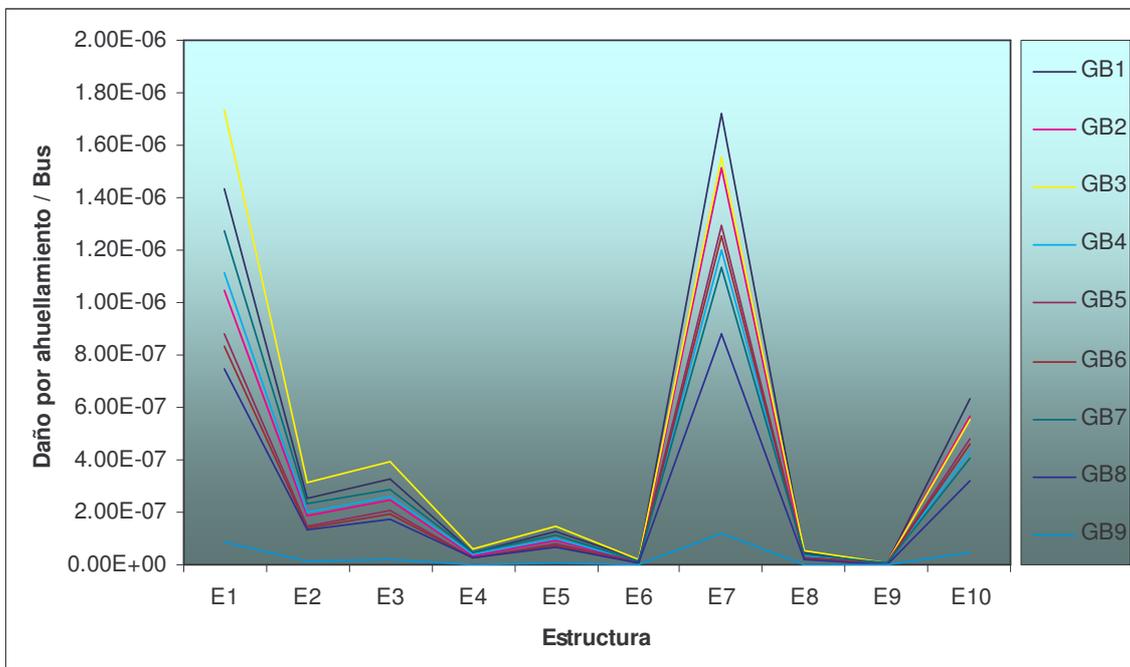


Figura 21. Daño por ahuellamiento / bus

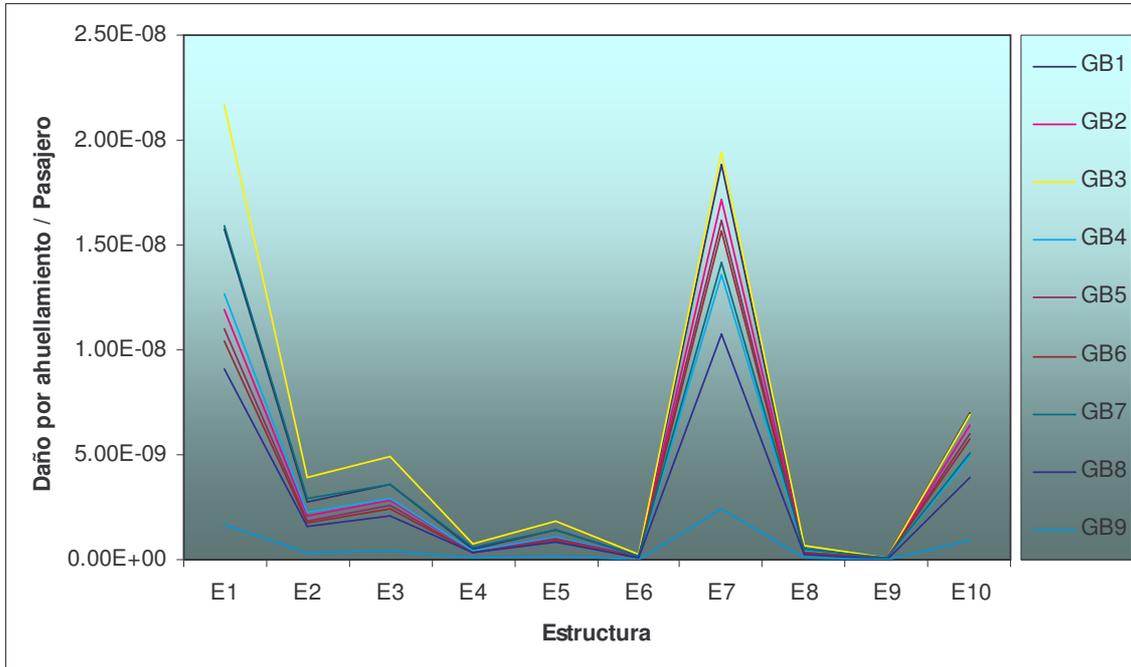


Figura 22. Daño por ahuellamiento / pasajero

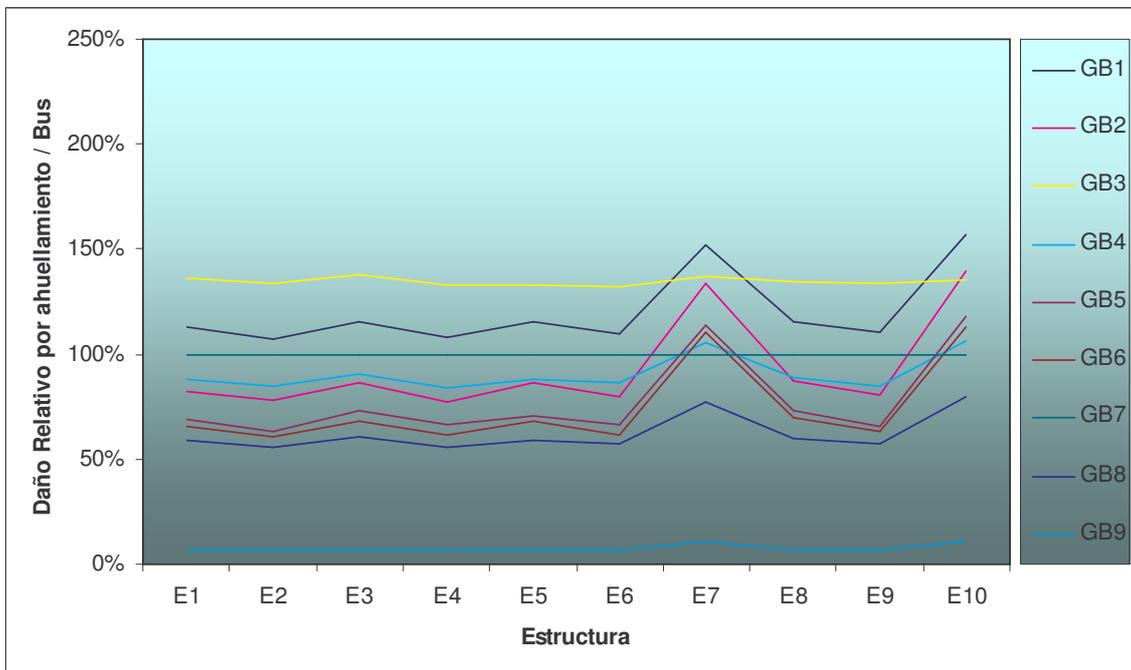


Figura 23. Daño relativo por ahuellamiento / bus

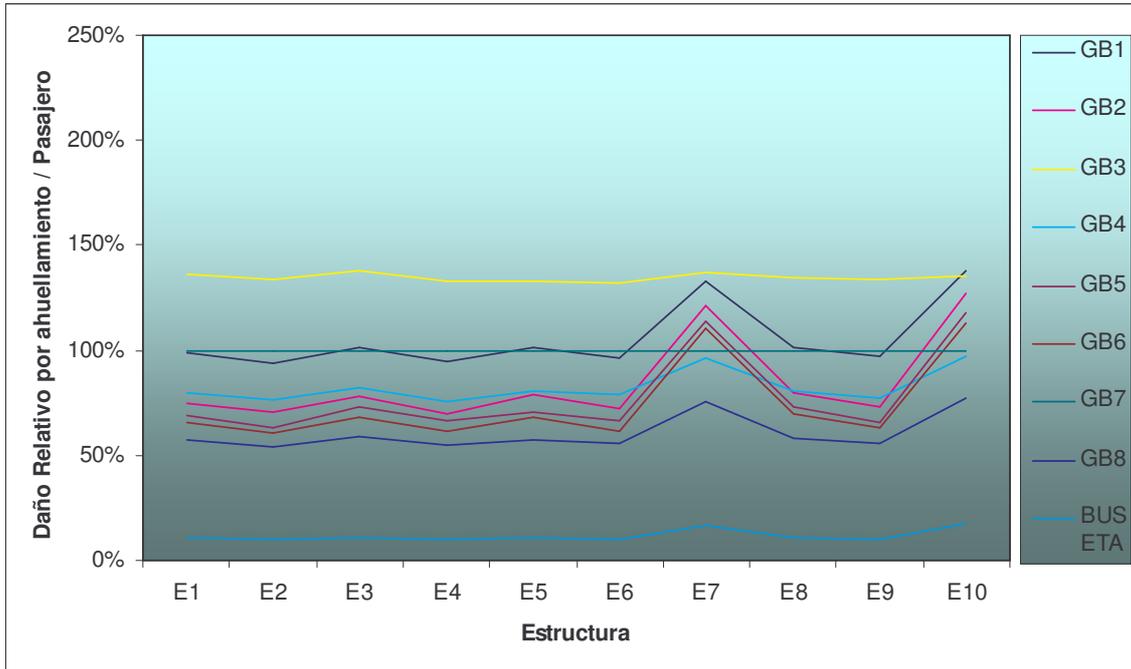


Figura 24. Daño relativo por ahuellamiento / pasajero

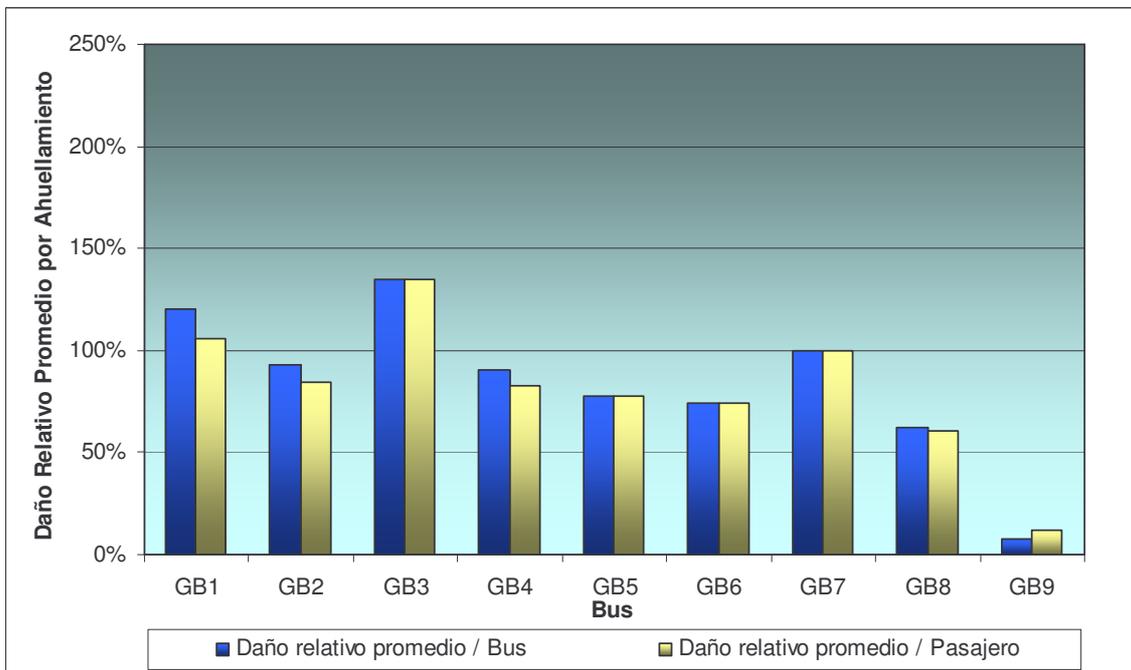


Figura 25. Daño relativo promedio por ahuellamiento para cada grupo de buses



### 3.4.5 Daño Relativo por Fatiga y por Ahuellamiento

La Figura 26 relaciona los daños por fatiga y ahuellamiento generados por pasajero transportado en cada uno de los grupos de buses analizados incluyendo el bus de menor capacidad.

Como modo de explicación a los resultados presentados en esta gráfica, se comparará el daño causado por pasajero transportado por el grupo de buses GB7, que es el que menor daño por fatiga causa, y el daño generado por el bus de menor capacidad (la buseta ó GB9). Aquí la vida útil de una estructura de pavimento será 71% inferior cuando circula este bus alimentador que si por el pavimento circulara la buseta, igualmente el daño por ahuellamiento sería un 88% inferior con la buseta.

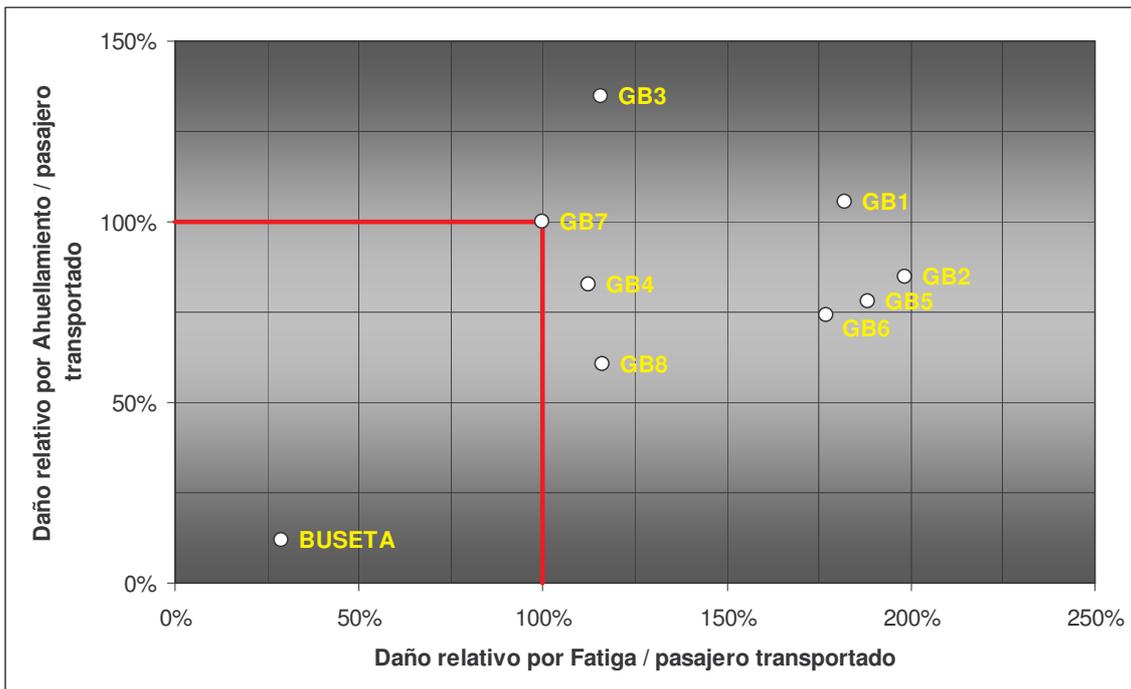


Figura 26. Daño relativo promedio por fatiga y ahuellamiento para cada grupo de buses



---

## 4 ANALISIS DE COSTOS

---

Con el fin de analizar los costos de mantenimiento de las distintas familias de pavimento, fue necesario estudiar el efecto que tienen las cargas de los diferentes buses alimentadores del sistema Transmilenio sobre su velocidad de degradación o vida útil.

El cálculo de la vida útil para cada estructura considerada se realizó utilizando una metodología en fundamentada en las deformaciones por tensión en la capa asfáltica. Las deformaciones admisibles se calcularon utilizando modelos basados en las leyes de fatiga del material, y las deformaciones actuantes se obtuvieron utilizando métodos mecanicistas en función de las características de los materiales, la estructura de pavimento, y las cargas reales de los buses alimentadores. Las cargas y estructuras analizadas son las que se presentan en la Figura 10 y Figura 13 respectivamente.

Como se presentará más adelante, para el cálculo de la vida útil de las dos estructuras estudiadas en función de las cargas estudiadas, es necesario considerar la deformación unitaria por tensión en la capa asfáltica. Estos valores son el resultado de la modelación en AlizéWin, y se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Deformación de tensión en la capa asfáltica  $\varepsilon_i \times 10^6$

Estructura	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
<b>GB1</b>										
Eje delantero	257	246	250	240	244	240	255	241	240	250
Eje trasero	217	202	204	192	200	190	213	195	190	205
<b>GB2</b>										
Eje delantero	268	258	260	250	254	247	266	251	248	260
Eje trasero	196	182	184	172	178	170	193	174	170	185
<b>GB3</b>										
Eje delantero	184	178	178	173	176	171	184	174	171	179
Eje trasero	238.5	222	225	210	218	208	233	213	208	225
<b>GB4</b>										
Eje delantero	222	213.6	214	208	211	205	220	209	205	215
Eje trasero	214	200	202	190	197	187	210	192	187	202
<b>GB5</b>										
Eje delantero	259	249	252	240	251	241	256	244	240	252
Eje trasero	192	178	181	167	173	168	187	172	168	181
<b>GB6</b>										
Eje delantero	256	245	247	239	243	237	253	241	236	248
Eje trasero	192	177	181	170	176	168	189	172	168	181
<b>GB7</b>										
Eje delantero	177	170	171	164	168	163	175	165	163	170
Eje trasero	232	217	219	206	213	203	228	209	203	220
<b>GB8</b>										
Eje delantero	224.3	216	217	210	214	209	222	212	209	218
Eje trasero	204	191	193	182	188	180	201	184	180	194
<b>GB9 (BUSETA)</b>										
Eje delantero	157	152	154	148	151	148	156	150	147	153
Eje trasero	131	123	124	117	121	117	129	120	115	124



#### 4.1 CÁLCULO DE LA VIDA ÚTIL

Para el cálculo de la vida útil de un pavimento se considera la deformación relativa de tracción por flexión  $\varepsilon_t$  en la base de la capa del material tratado con ligante asfáltico. Conociendo las deformaciones que se producen en esta capa, se utiliza una ley de fatiga para encontrar la probabilidad de falla en función de un número de repeticiones de carga que la estructura pueda soportar.

La deformación admisible de una capa de pavimento depende del número de repeticiones de carga (relación dada por la ley de fatiga). Esta deformación admisible está afectada además por otras variables como son la temperatura, la probabilidad de falla, y un factor de calibración que relaciona el número de repeticiones de carga aplicado en laboratorio con los aplicados en campo. La deformación admisible está dada por la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon(N, \theta_{eq}, f) \cdot K_r \cdot K_c \cdot K_s \quad \text{Ecuación 4}$$

donde:

- $\varepsilon_{t,ad}$  es la deformación admisible de la capa asfáltica,
- $K_r$  es un factor de reducción que depende de la probabilidad de falla,
- $K_c$  es un coeficiente de calibración para los materiales asfálticos,
- $K_s$  es un coeficiente de reducción que tiene en cuenta la heterogeneidad de la subrasante,

y  $\varepsilon(N, \theta_{eq}, f)$  es la relación que representa la ley de fatiga de los materiales asfálticos, la cual es igual a:

$$\varepsilon(N, \theta_{eq}, f) = \varepsilon_6(\theta_{eq}, f) \left( \frac{N}{10^6} \right)^b \quad \text{Ecuación 5}$$



donde:

- $\varepsilon_6$  es la deformación correspondiente a un millón de ciclos en la ley de fatiga,  
 $N$  es el número de repeticiones de carga de un eje estándar,  
 $b$  es la pendiente de la ley de fatiga,

La variación de la resistencia a la fatiga para un millón de ciclos en función de la temperatura se obtiene con base en los ensayos de fatiga realizados a diferentes temperaturas. Estos resultados se normalizan con respecto a una temperatura de referencia de  $15^{\circ}\text{C}$  y una frecuencia de 25 Hz, de este modo,  $\varepsilon_6(\theta_{eq}, f)$  está dado por:

$$\varepsilon_6(\theta_{eq}, f) = \varepsilon_6(\theta = 15^{\circ}\text{C}, 25\text{Hz}) \cdot K_t \quad \text{Ecuación 6}$$

donde:

- $K_t$  es un coeficiente que depende de la temperatura,

El valor del coeficiente  $K_t$  puede determinarse con base en la variación del módulo en función de la temperatura mediante la Ecuación 2.

Para las capas de pavimento se considera usualmente que la frecuencia característica de las sollicitaciones es del orden de 10 Hz. Sin embargo la influencia de la frecuencia en el valor de  $\varepsilon_6$  es despreciable para las temperaturas que corrientemente se encuentran en un pavimento.  $\varepsilon(N, \theta_{eq}, f)$  es entonces igual a:

$$\varepsilon(N, \theta_{eq}, f) = \varepsilon_6(\theta = 15^{\circ}\text{C}, 25\text{Hz}) \cdot K_t \cdot \left(\frac{N}{10^6}\right)^b \quad \text{Ecuación 7}$$

La deformación admisible en la capa asfáltica es por consiguiente igual a:



$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon_6 \cdot \left( \frac{N}{10^6} \right)^b \cdot K_t \cdot K_r \cdot K_c \cdot K_s$$

**Ecuación 8**

Donde  $K_c$  y  $K_s$  dependen de la característica de los materiales de la estructura, los cuales se presentan en la Tabla 10 y Tabla 11 respectivamente.

**Tabla 10. Deformación de tensión en la capa asfáltica**

Material	$K_c$
Rodadura asfáltica	1.1
Base asfáltica	1.3

**Tabla 11. Deformación de tensión en la capa asfáltica**

Módulo de la sub-rasante [MPa]	$E < 50$	$50 < E < 120$	$E > 120$
$K_s$	1/1.2	1/1.1	1

El coeficiente  $K_r$  ajusta el esfuerzo admisible a la probabilidad de falla, y se calcula de la siguiente forma:

$$K_r = 10^{-ub\delta}$$

**Ecuación 9**

donde:

- $u$  es el fractil de la ley normal correspondiente a una probabilidad de falla dada,
- $b$  es la pendiente de la ley de fatiga.

El parámetro  $\delta$  es la desviación estándar de la dispersión total, y se calcula como sigue:

$$\delta = \sqrt{\sigma_N^2 + \sigma_H^2 \left( \frac{C}{b} \right)^2}$$

**Ecuación 10**



donde:

- $\sigma_N$  es la desviación estándar de la ley de fatiga expresada en logaritmo decimal del número de ciclos. Para un material granular - ligante asfáltico este parámetro es igual a 0.3
- $\sigma_H$  es la desviación estándar de los espesores del material colocado *in situ*,
- $C$  es una constante igual a 0.02 para materiales asfálticos.

Los posibles valores de  $\sigma_H$  se presentan en la Tabla 12.

**Tabla 12. Desviación estándar de los espesores de las capas**

Material	Intervalo espesores	$K_c$
Granular – ligante asfáltico	12 a 20 cm	2.5 a 3 cm
Concreto asfáltico	6 a 8 cm	1 cm

La probabilidad de falla se calcula entonces despejando el parámetro  $K_r$  de la Ecuación 8 e igualándolo con la Ecuación 9, tal como se muestra a continuación.

$$10^{-ub\delta} = \frac{\epsilon_{t,ad}}{\epsilon_6} \cdot \left(\frac{N}{10^6}\right)^{-b} \cdot \frac{1}{K_t \cdot K_c \cdot K_s} \quad \text{Ecuación 11}$$

De la Ecuación 11 se despeja el fractil  $u$  de la ley normal centrada. La probabilidad de falla se calcula mediante la Ecuación 13, la cual retorna la distribución normal estándar acumulada para un fractil  $u$  dado. Esta distribución tiene una media de cero y una desviación estándar de uno.

$$u = \frac{-1}{b \cdot \delta} \cdot \log_{10} \left[ \frac{\epsilon_{t,ad}}{\epsilon_6} \cdot \left(\frac{N}{10^6}\right)^{-b} \cdot \frac{1}{K_t \cdot K_c \cdot K_s} \right] \quad \text{Ecuación 12}$$

$$P_{falla}(N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^N \exp\left[-\frac{u^2}{2}\right] \cdot du \quad \text{Ecuación 13}$$



Los parámetros de la carpeta asfáltica utilizados para los cálculos se presentan en la Tabla 8.

**Tabla 13. Parámetros de cálculo del daño por fatiga en la Carpeta Asfáltica**

Parámetro	Valor
$\sigma_N$	0.30
$\sigma_H$	1.00 cm
$C$	0.02
$b$	-0.20
$\delta$	0.32
$\epsilon_6(15^\circ C, 25Hz)$	100E-6
$E(15^\circ C, 10Hz)$	81549 kg/cm <sup>2</sup>
$E(25^\circ C, 10Hz)$	30581 kg/cm <sup>2</sup>
$K_s$	0.8
$K_c$	1.1
$K_t$	1.6

La probabilidad de falla en función del número de ejes para cada estructura y cada tipo de carga analizada se presentan en el Anexo E.

## 4.2 CÁLCULO DE COSTOS DE MANTENIMIENTO

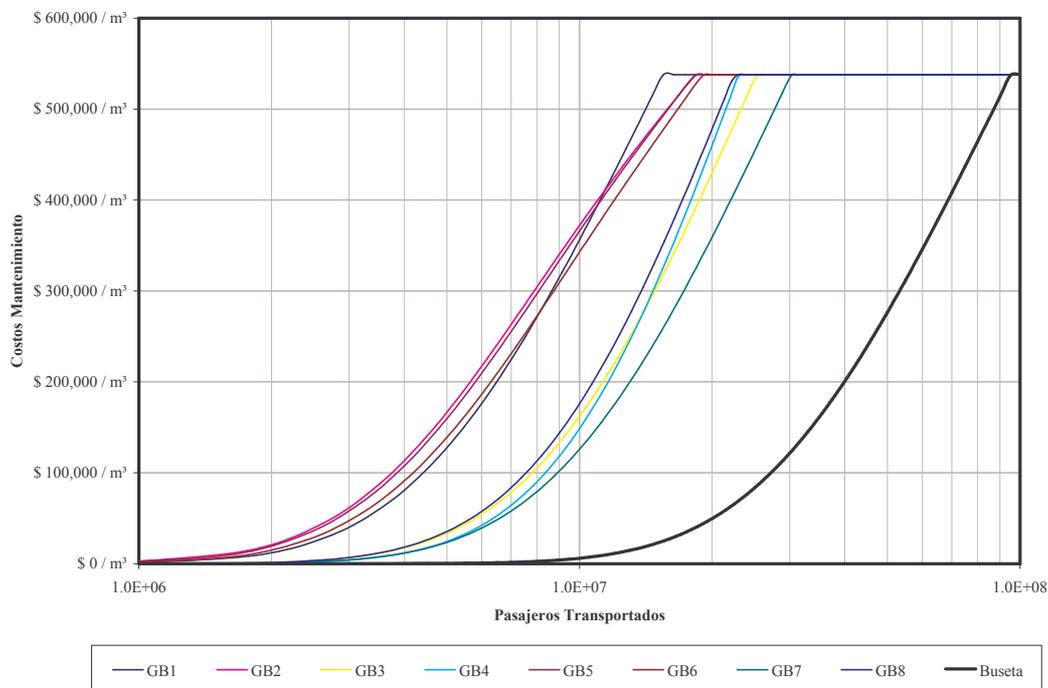
Los costos de mantenimiento se calcularon en función de la probabilidad de falla multiplicada por el costo de por metro cúbico de reparación de la carpeta asfáltica. Estos costos se obtuvieron de acuerdo a los Precios de Referencia de Actividades de Obra publicados en la página Web del Instituto de Desarrollo Urbano para los ítems listados en la Tabla 14.



**Tabla 14. Precios de Referencia de Actividades de Obra (Fuente: [http://www.idu.gov.co/contratacion/Download/2008/listado\\_precios\\_ref\\_actividades\\_obra.pdf](http://www.idu.gov.co/contratacion/Download/2008/listado_precios_ref_actividades_obra.pdf))**

Item	Descripción	Valor
3010	DEMOLICION PAVIMENTO ASFALTICO (Incluye Cargue)	\$ 15,052.52 / m <sup>3</sup>
3017	TRANSPORTE Y DISPOSICION FINAL DE ESCOMBROS EN SITIO AUTORIZADO POR EL DAMA	\$ 12,167.00 / m <sup>3</sup>
3864	IMPRIMACION CON EMULSION ASFALTICA CRL-0 (Suministro, Barrido Superficie y Riego)	\$ 14,715.86 / m <sup>3</sup>
4255	MEZCLA DENSA EN CALIENTE MDC-2 Asfalto 80-100 (Suministro, Extendido, Nivelación y Compactación)	\$495,847.45 / m <sup>3</sup>
<b>Total costo Mantenimiento por metro cúbico de obra</b>		<b>\$537,782.83 / m<sup>3</sup></b>

Las curvas de costos de mantenimiento que se muestran en el Anexo F para cada estructura y cada tipo de carga analizada se presentan en función del número de pasajeros transportados por cada tipo de bus. Como ejemplo, en la Figura 27 se muestran los costos de mantenimiento en función de los pasajeros transportados para la estructura E6.



**Figura 27. Costos de mantenimiento en función de pasajeros transportados para la estructura E6**



### 4.3 ANÁLISIS DE COSTOS

Las curvas en la Figura 60 a la Figura 69 en el Anexo F muestran tres grandes grupos de buses, los cuales para un mismo número de pasajeros transportados, presentan diferentes niveles de costos de mantenimiento. Estos grupos están conformados de la siguiente forma: un primer grupo constituido por la buseta que optimiza los costos de rehabilitación y mantenimiento de los pavimentos; un grupo intermedio conformado por los buses de los grupos GB3, GB4, GB7 y GB8; y finalmente el grupo del que hacen parte los buses de los grupos GB1, GB2, GB5 y GB6, los cuales son los que mayor daño causan al pavimento y por ende los que demandan mayor inversión de recursos en el mantenimiento de las vías para un mismo número de pasajeros transportados.

Como se observa en las Figuras del Anexo F, la buseta puede llegar a transportar mayor número de pasajeros que los buses Alimentadores para un mismo costo de mantenimiento en todas las estructuras analizadas. Con estos datos se calculó el número de pasajeros que puede llegar a transportar un bus alimentador respecto a los transportados por la buseta (Figura 70 a la Figura 79 en el Anexo G). Este análisis se hizo para 5 niveles de mantenimiento o porcentaje de inversión de recursos, los cuales fueron del 10%, 20%, 30%, 40% y 50%. Estos porcentajes de inversión de recursos corresponden a una proporción de los costos de reconstrucción total de la carpeta asfáltica, los cuales están directamente relacionados con la pérdida de servicialidad del pavimento.

En el peor de los casos, el grupo de buses alimentadores GB2, para un mismo nivel de mantenimiento en la estructura E7, transportará solo el 12% de los pasajeros transportados por la buseta, como se muestra en la Figura 28. Y en el mejor de los casos, los buses alimentadores del grupo GB7 transportarán tan solo el 33% de los pasajeros que transportaría la buseta para un mismo nivel de mantenimiento de la estructura de pavimento E6 (Figura 29).

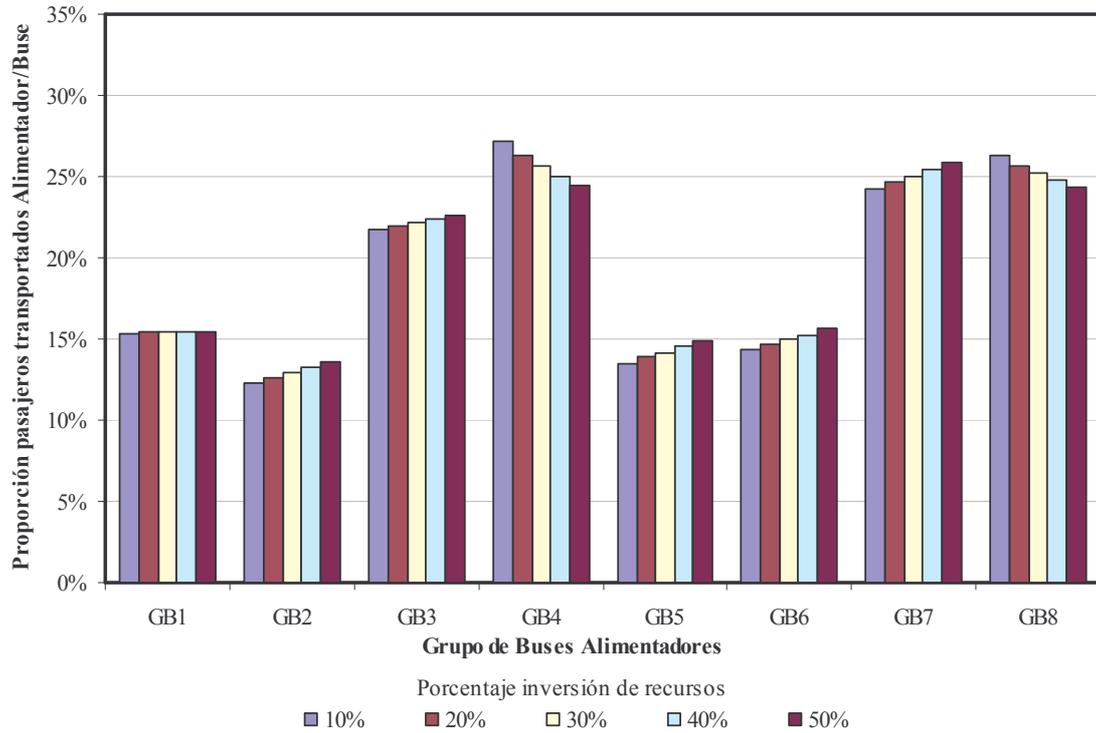


Figura 28. Inversión de recursos de Mantenimiento para la estructura E7 en función de la relación de pasajeros transportados por los buses alimentadores respecto a los transportados por la buseta

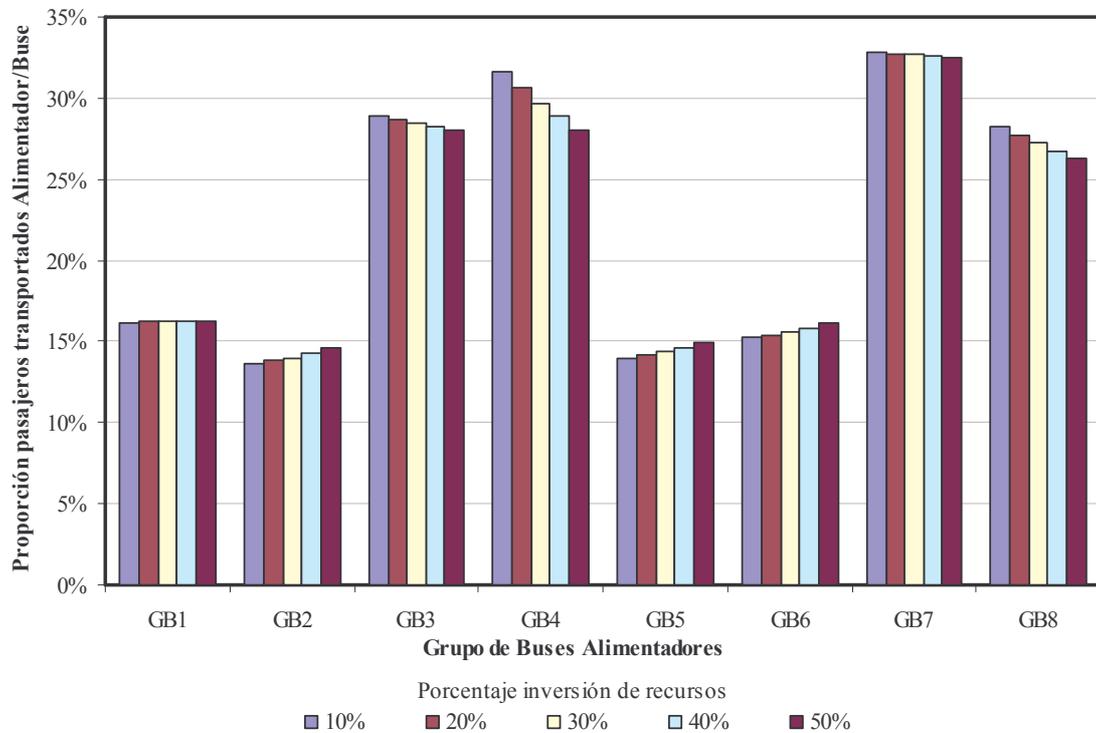
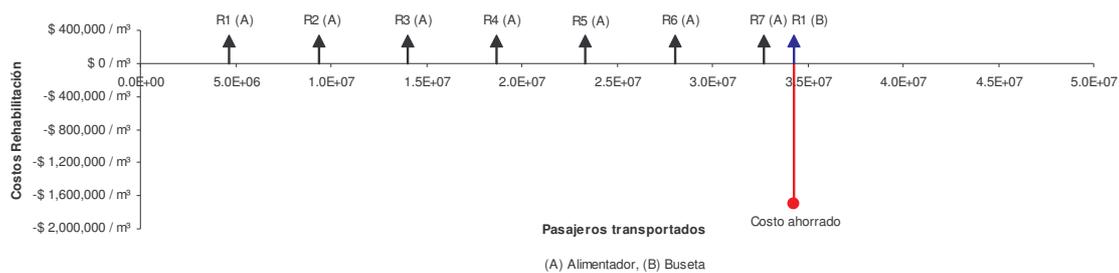


Figura 29. Inversión de recursos de Mantenimiento para la estructura E6 en función de la relación de pasajeros transportados por los buses alimentadores respecto a los transportados por la buseta



En el Anexo H se presentan los flujos de inversión en rehabilitación (denotada por la letra R) para cada estructura analizada, comparando la inversión demandada por cada grupo de bus alimentador (letra A) con la buseta (letra B), y el correspondiente ahorro inducido si se cambiara la tipología de bus existente por la buseta.

Estos flujos de inversión se calcularon considerando una rehabilitación cuando el pavimento ha alcanzado una pérdida de servicialidad del 50%. Así entonces, cada rehabilitación corresponde al 50% de los costos de reconstrucción total de la carpeta asfáltica, y el número de pasajeros transportados en el cual se requiere cada rehabilitación es el número de pasajeros transportados cuando la probabilidad de falla del pavimento ha llegado al 50%. El costo ahorrado simplemente es la diferencia entre la primera rehabilitación por los daños causados por la buseta, y la sumatoria de todas las rehabilitaciones que fueron necesarias al transitar el bus alimentador. Como ejemplo se muestra en la Figura 30 que para la estructura E1, en el momento de realizar la primera intervención en el caso de que se implementara la buseta, ya se han realizado siete intervenciones al transitar por esta estructura el grupo de buses alimentadores GB2. Por lo tanto el ahorro si se implementa la buseta es el correspondiente a seis intervenciones para un mismo número de pasajeros transportados.



**Figura 30. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E1 para el grupo de buses alimentadores GB2 y la buseta**

Estos flujos de inversión se calcularon también comparando la inversión demandada por el grupo de buses alimentadores que menor daño causa por fatiga al pavimento (grupo GB7) y los otros grupos de buses alimentadores, estos flujos de inversión para una rehabilitación cuando el pavimento ha alcanzado una pérdida de servicialidad del 50% se presentan en el Anexo I.



---

## 5 PISTA DE PRUEBA

---

Para conocer las leyes de degradación de los pavimentos y evaluar con precisión su desempeño durante su vida útil, es necesario considerar ciertas variables que gobiernan el comportamiento del pavimento como son la conformación de la estructura, la calidad de los materiales de construcción, la temperatura ambiente, la humedad del terreno, y las condiciones de carga como son sus magnitudes y frecuencias de aplicación. Para cumplir lo anterior es necesario hacer un seguimiento adecuado de la estructura en estudio conociendo y controlando estas variables. Para esto se puede recurrir a dos tipos de pruebas: el primero es un ensayo en tiempo real RLT (Real Time Loading) que consiste en realizar un seguimiento a un tramo de prueba, el otro es un ensayo acelerado ALT (Accelerated Loading Test) en el que sobre una pista de prueba se aplica una carga artificial que reproduce los efectos de una circulación de tráfico normal.

Aunque el ensayo RLT presenta resultados de su desempeño en condiciones reales, su desventaja radica en que la obtención de resultados para predecir la vida útil de un pavimento puede tardar varios años, al igual que demandaría una mayor inversión de recursos para adelantar un adecuado seguimiento. Por otro lado, en un ensayo ALT se pueden obtener resultados en un menor tiempo y menores costos al imponer condiciones artificiales a la estructura. Durante la construcción de una pista de prueba en un ensayo ALT se consideran las mismas técnicas de fabricación, colocación y compactación de los materiales tal como se especifica para una obra de pavimentación convencional. Durante la ejecución del ensayo es posible realizar un adecuado seguimiento, control y auscultación del comportamiento del pavimento en función de las sollicitaciones de carga que le han sido impuestas.



El equipo de ensayo acelerado de pavimentos está ubicado en los laboratorios de Estructuras, Geotecnia y Pavimentos de la Universidad de Los Andes. Su pista es de tipo lineal, y las cargas son aplicadas al pavimento mediante un sistema neumático a través de un eje sencillo que puede configurarse con una sola llanta o con llanta doble, y una capacidad máxima de 8.2 toneladas.



**Fotografía 2. Edificio Mario Laserna donde se encuentra ubicada la Pista de Prueba de Pavimentos de la Universidad de Los Andes**

### **5.1 Ensayo de carga acelerado (pista de prueba)**

Los dos ensayos de pista con las dos tipologías de buses estudiadas se realizaron sobre la misma estructura con el fin de garantizar iguales condiciones en cuanto a materiales, espesor y conformación de las diferentes capas; al igual que las mismas condiciones ambientales y de entorno. La ejecución de los dos ensayos sobre la misma estructura fue posible ya que el ancho de la pista permitió que el equipo trabajara en dos carriles independientes. Así entonces, la primera pista se ensayó con una carga representativa de los buses alimentadores que actualmente prestan su servicio, y en la otra una carga mucho menor equivalente a la de un bus de menor capacidad.

## 5.2 Estructura de prueba

La estructura construida para la pista de prueba de este estudio se conformó por una capa granular de 50 cm de espesor según la especificación IDU BG-Gr2 para base granular, y una carpeta asfáltica de rodadura de 7 cm tipo MDC-2 de la especificación INVIAS. El material granular se colocó sobre una capa de arcilla de 2.43 m que simula la subrasante. Se colocaron dos tipos de materiales granulares con el fin de considerar la influencia de su calidad en la evolución del deterioro de la estructura del pavimento, con desgastes del 38% y 31%. Los materiales se colocaron en la mitad de cada pista en sentido horizontal como se muestra en la Figura 31, conservando el mismo tipo de material en la altura de la capa granular.

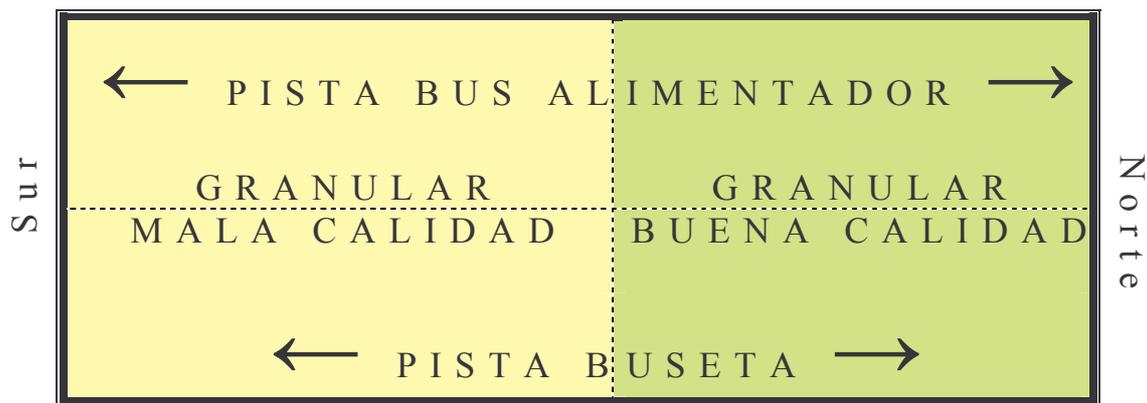
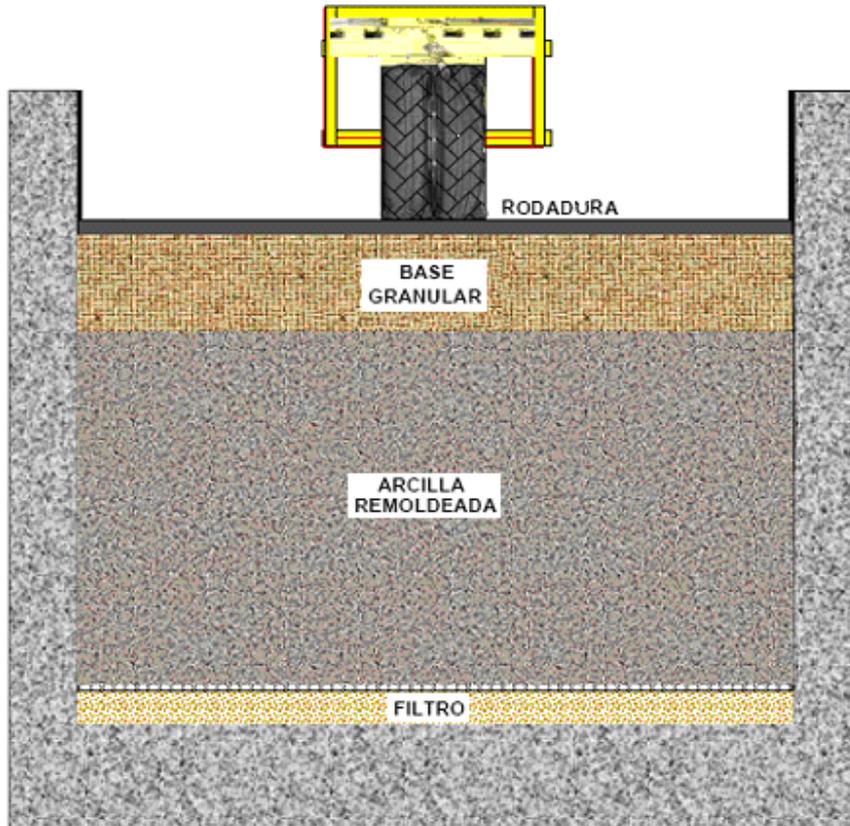


Figura 31. Pistas de prueba y distribución de los dos materiales granulares

La estructura de la pista de prueba se construyó de acuerdo con las condiciones típicas de Bogotá respecto a la subrasante, espesores y calidad de los materiales. La Figura 32 presenta un esquema de la estructura, con espesores de 7 cm en la capa de rodadura, 50 cm en la base granular, y una subrasante conformada por una arcilla con espesor de 243 cm.



**Figura 32. Estructura del pavimento en la pista de prueba**

La arcilla, la cual simula el suelo de subrasante sobre el cual se construyen las vías en la ciudad de Bogotá, se colocó y compactó manualmente. Las capas granulares se conformaron con materiales provenientes de canteras ubicadas en el sector de Soacha y Mondoñedo, sectores reconocidos por la amplia explotación y suministro de este material para la construcción de vías en la ciudad. Su colocación y compactación se hizo igualmente a mano en capas de 10 cm. La gradación de este material se presenta en la Figura 33. Por último se colocó una mezcla densa en caliente MDC-2 de la especificación INVIAS como capa de rodadura. El registro fotográfico del proceso constructivo de la estructura de pavimento y los resultados de los ensayos de caracterización de los materiales se presentan en el Anexo J y Anexo K respectivamente.

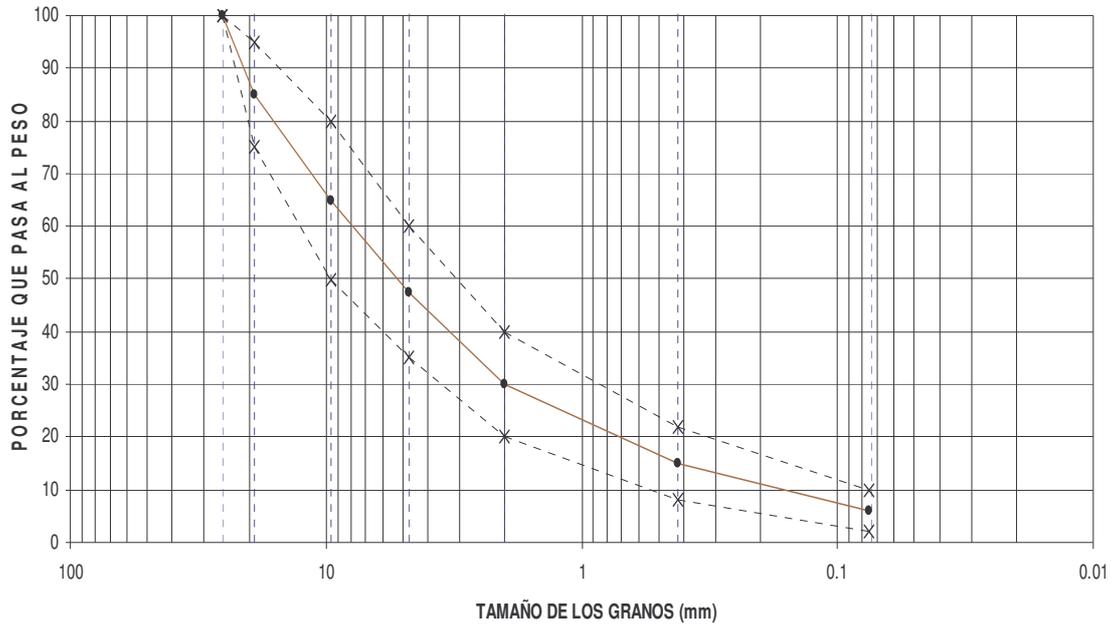


Figura 33. Curva granulométrica del material que conforma la base granular

### 5.3 Cargas de prueba

Las cargas que se seleccionaron para cada una de las pistas a ensayar son la máxima carga (entre la carga del eje trasero y delantero) del promedio de las cargas por eje que se encontró para los buses alimentadores, y la máxima carga por eje de la buseta (Figura 15). Estas cargas corresponden al cálculo de los buses con pasajeros, y coinciden con los ejes traseros de cada tipo de bus. Así entonces, las cargas escogidas para cada pista fueron de 10 Ton/eje y 5 Ton/eje para las pistas 1 y 2 respectivamente (Fotografía 3).

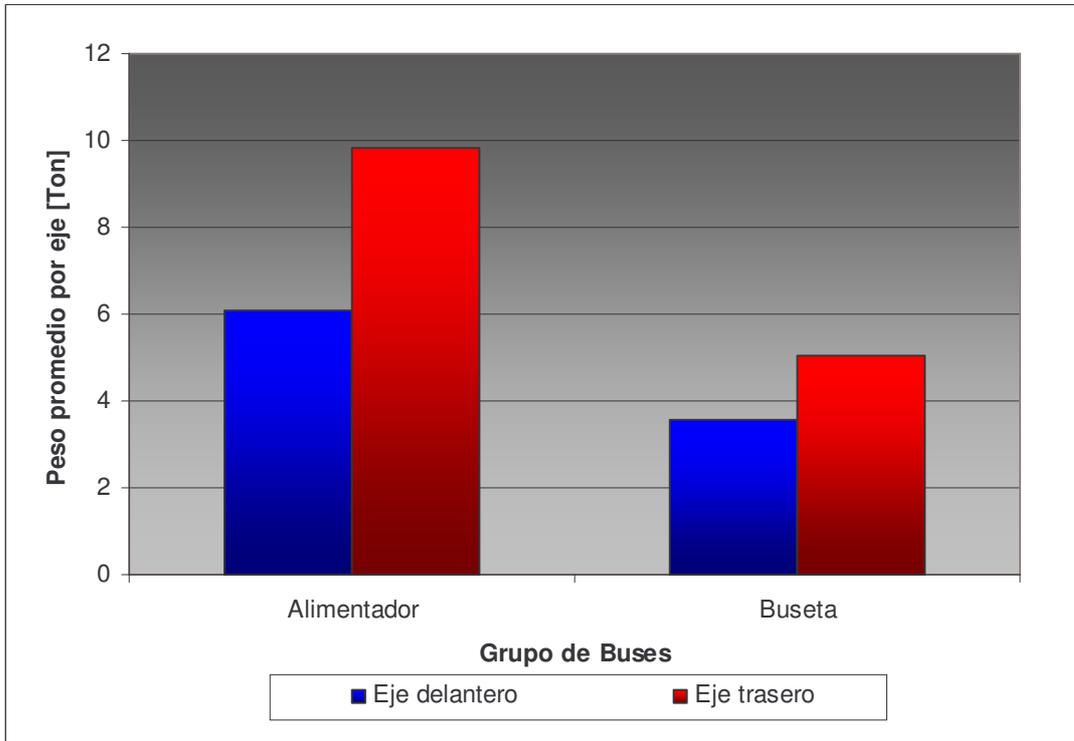
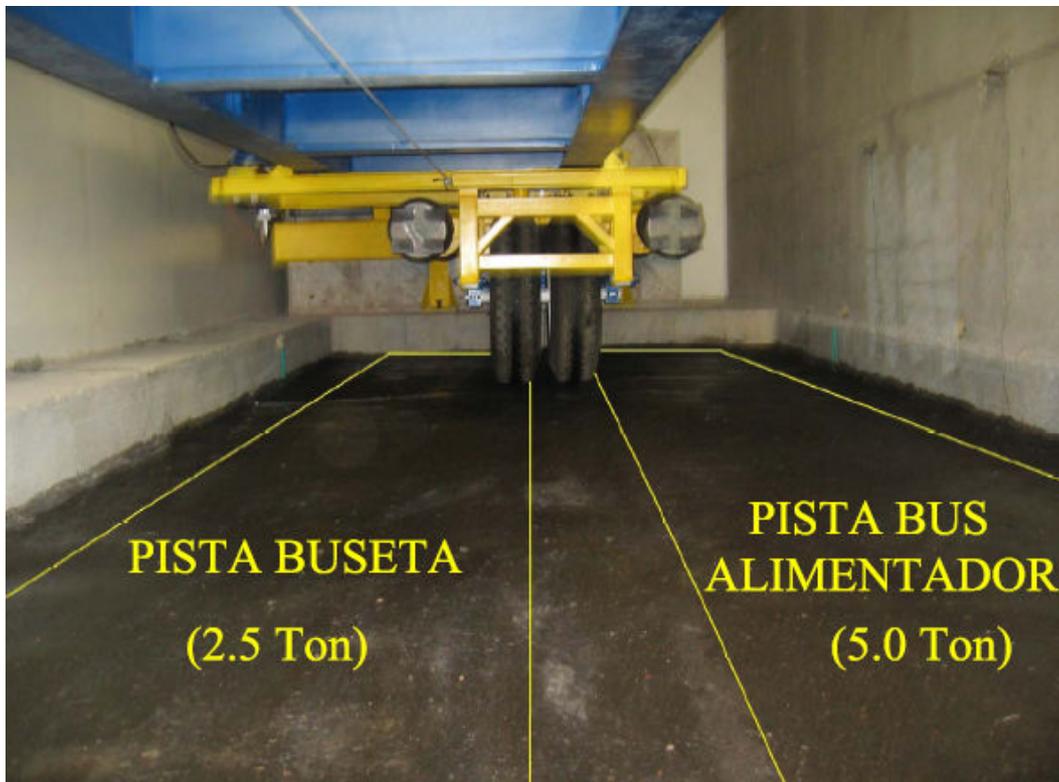


Figura 34. Peso promedio por eje para los buses alimentadote, y peso por eje para la buseta



Fotografía 3. Cargas por pista estudiadas



## 5.4 Funcionamiento del equipo

Con el fin de simular el paso real de las llantas de los vehículos en una vía, las cuales no pasan siempre por un mismo sitio, se decidió variar periódicamente el paso de las llantas del equipo, haciendo que estas pasaran por cinco ejes diferentes separados cada uno 10 cm, con una frecuencia aproximada a la presentada en la Figura 35. La configuración de los ejes por los cuales circularon las llantas en cada una de las pistas es la que se presenta en la Fotografía 4.

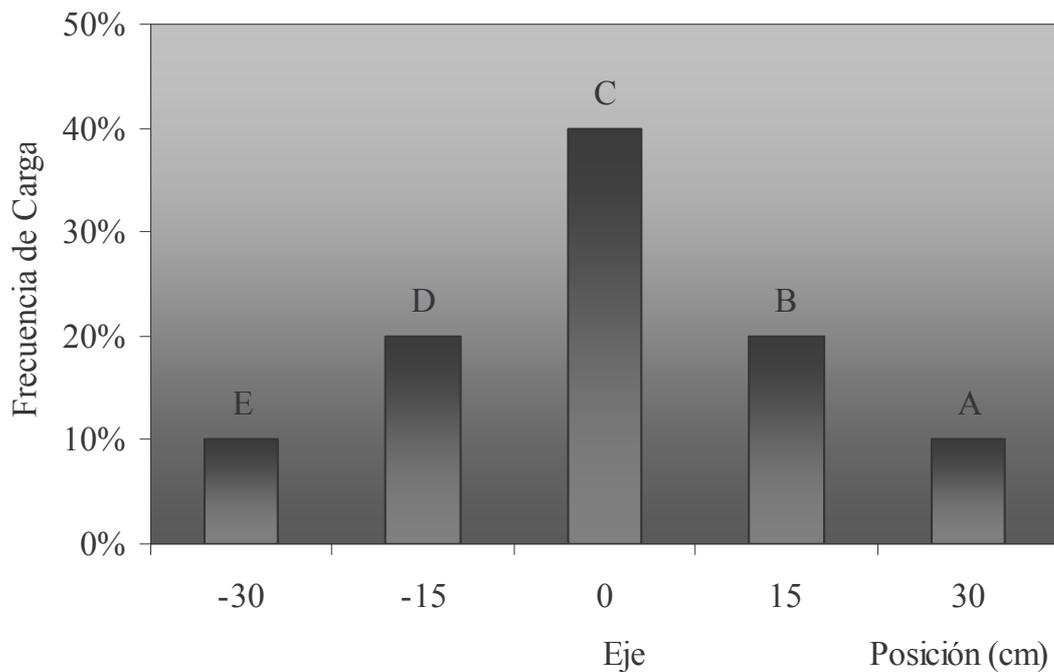
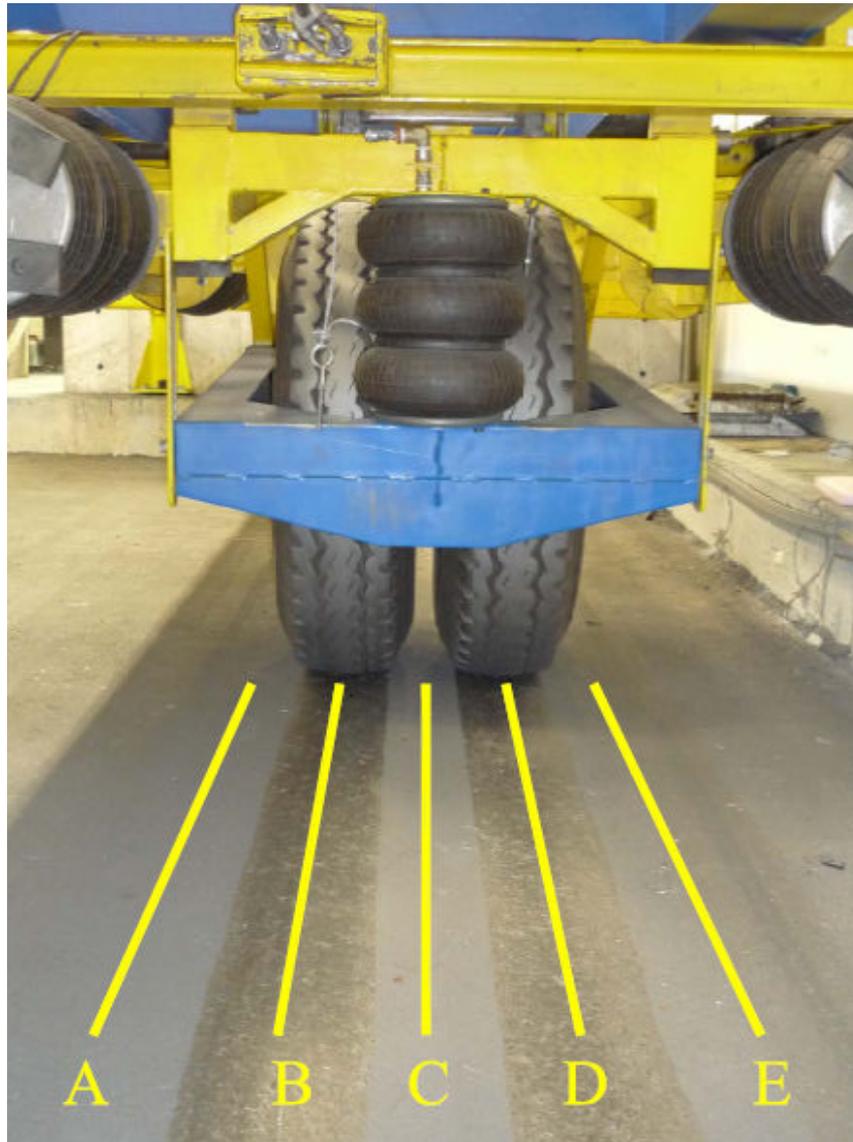


Figura 35. Frecuencia ideal de circulación de las llantas



Fotografía 4. Ejes longitudinales por los cuales circula el equipo de Fatiga

### 5.5 Seguimiento y Auscultación durante el ensayo

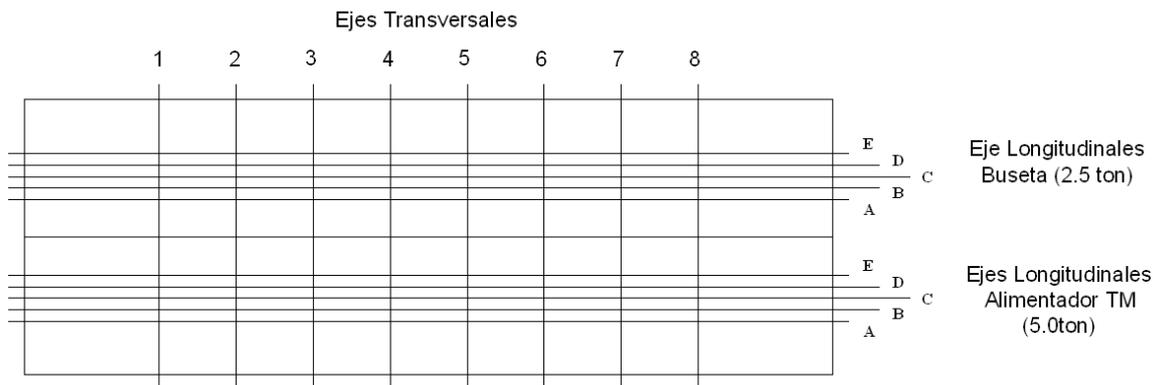
Uno de los aspectos más relevantes en el seguimiento de una pista de prueba es la auscultación del pavimento. Esta se realizó midiendo el ahuellamiento y la densidad de fisuración.



### 5.5.1 Mediciones de ahuellamiento o deformaciones permanentes

Las medidas de ahuellamiento, cuyos resultados se presentan en el Anexo L, se realizaron.

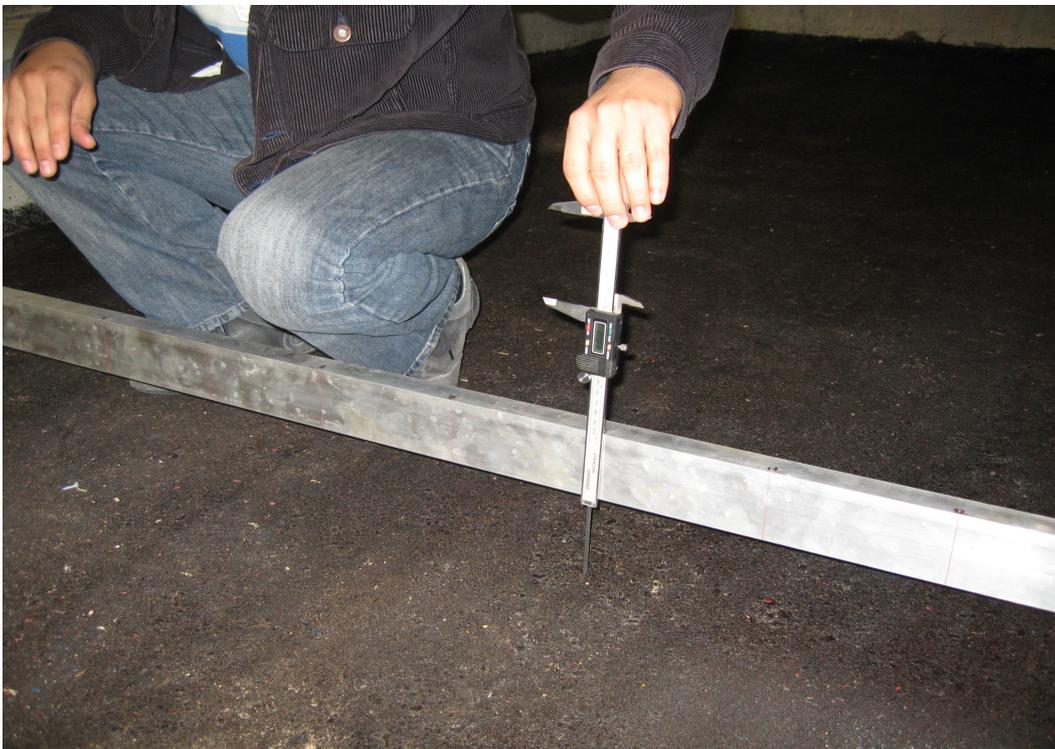
El control del ahuellamiento o deformación permanente de la estructura se realizó sobre ocho ejes transversales como se indica en la Figura 36, mediante el uso de una regla de aluminio debidamente nivelada y colocada siempre en los mismos puntos de apoyo. Las mediciones se realizaron con un calibrador electrónico cada 15 cm.



**Figura 36. Esquema de los ejes longitudinales por los cuales circula el equipo de Fatiga, y los ejes transversales para las mediciones de ahuellamiento**



**Fotografía 5. Medición de deformación permanente o ahuellamiento**



**Fotografía 6. Medición de deformación permanente o ahuellamiento**

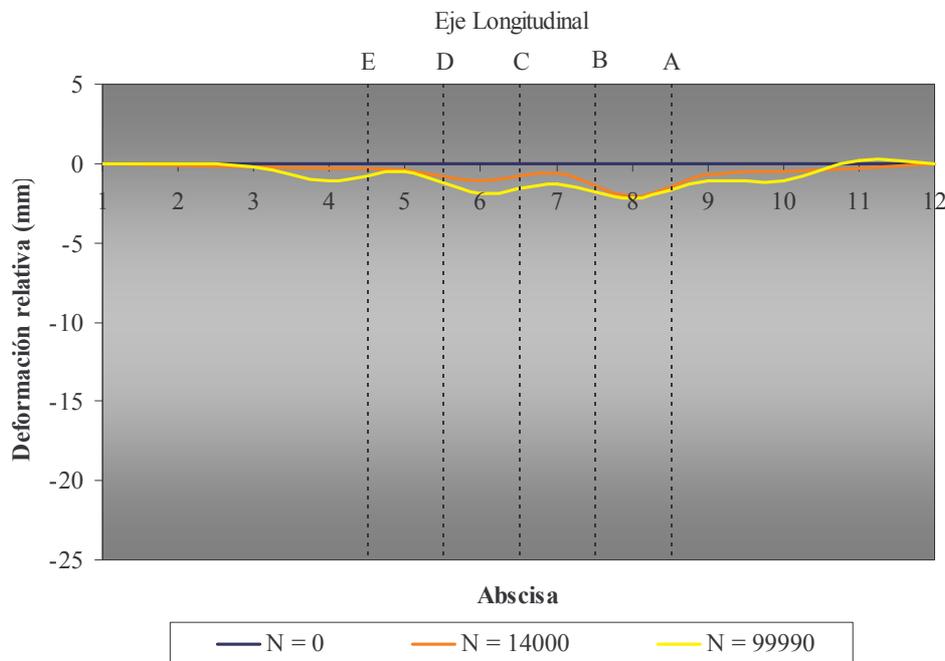


Las deformaciones máximas en cada tramo se presentan en la Tabla 15.

**Tabla 15. Deformaciones máximas por eje en cada tramo**

Eje	Pista Buseta		Pista Bus Alimentador			
	Número de Ejes					
	14000	99990	50045	102000	153000	
Deformación [mm]						
Granular Buena Calidad	1	0.9	2.2	11.3	13.7	17.4
	2	1.4	1.4	6.4	8.2	10.3
	3	2.0	1.9	4.6	5.2	6.9
	4	1.6	0.5	7.7	9.8	17.9
Granular Mala Calidad	5	2.1	2.1	7.4	8.5	11.8
	6	2.2	3.3	7.6	10.1	12.7
	7	2.0	2.8	9.2	10.7	14.0
	8	1.6	2.5	10.0	11.2	15.2

A título de ejemplo, en la Figura 37 y Figura 38 se presentan las curvas de deformación permanente tanto para la pista de la Buseta como para la pista del bus alimentador respectivamente. En estas figuras se observa que, tal como lo indican los cálculos, el bus alimentador produce un ahuellamiento considerablemente superior a la buseta.



**Figura 37. Deformación permanente y repeticiones de carga en la pista de la Buseta.**

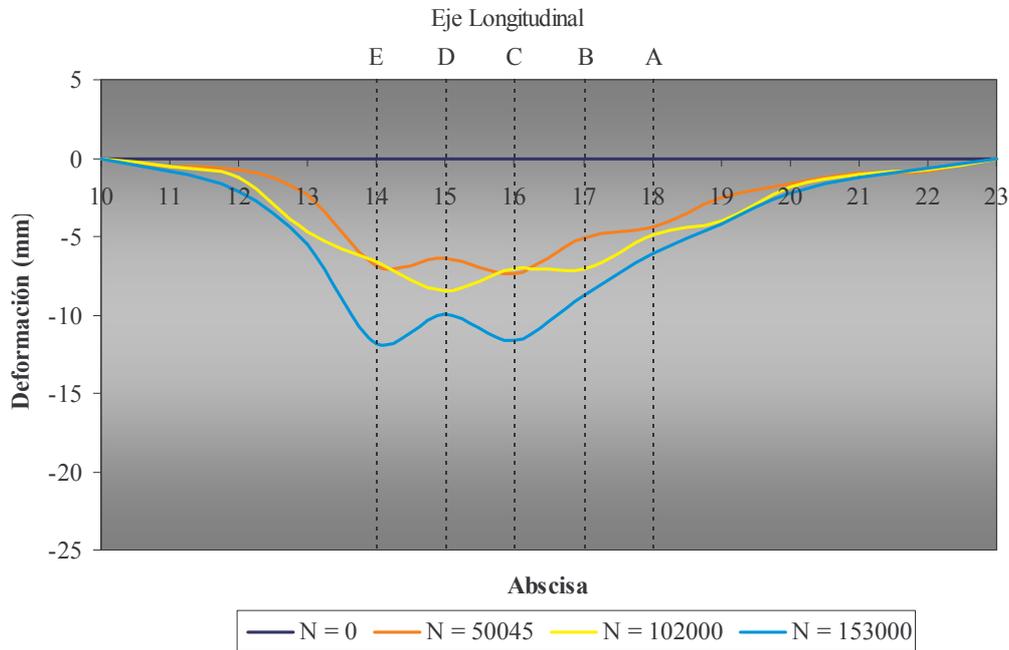


Figura 38. Deformación permanente y repeticiones de carga en la pista del bus alimentador.

### 5.5.2 Mediciones de densidad de fisuración

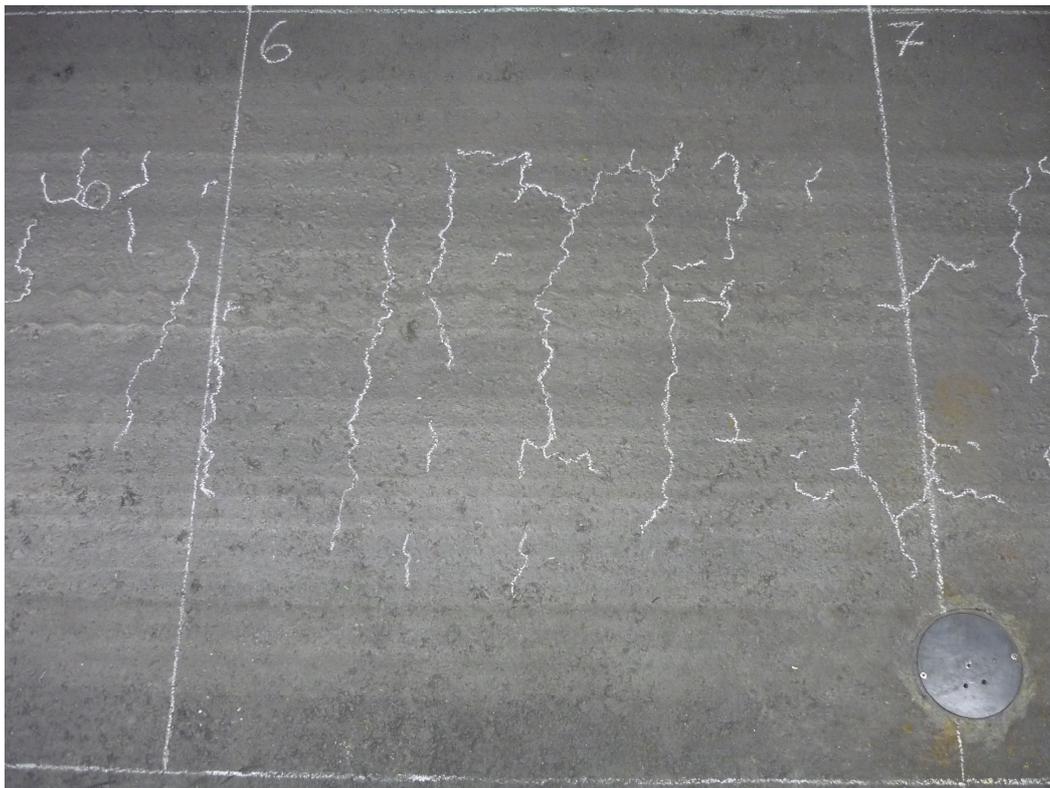
La densidad de fisuración se midió después de haber concluido el ensayo, a 99990 y 153000 repeticiones de carga para la pista de la Busetta y la del Bus Alimentador respectivamente. La densidad de fisuración de cada pista se midió dividiéndolas en áreas pequeñas en las que se registró y midió la longitud de cada fisura, al final se sumó la longitud de todas las fisuras en cada sector y se dividió por el área total. Los resultados de densidad de fisuración se presentan en la Tabla 16. Estos resultados se presentan en el Anexo M.



**Tabla 16. Densidad de Fisuración por eje cada área y por cada tramo**

Área	Pista Buseta		Pista Bus Alimentador		Densidad de Fisuración [cm/m <sup>2</sup> ]
	Número de Ejes				
	99990		153000		
	Densidad de Fisuración [cm/m <sup>2</sup> ]		Densidad de Fisuración [cm/m <sup>2</sup> ]		
Granular Buena Calidad	1	0.00		0.00	
	2	0.00	0.00	0.00	95.88
	3	0.00	(0 %)	105.48	(31 %)
	4	0.00		824.52	
Granular Mala Calidad	4	0.00		97.86	
	5	0.00	0.00	113.51	209.89
	6	0.00	(0 %)	346.13	(69 %)
	7	0.00		298.21	

A título de ejemplo, en la Fotografía 7 se presenta el registro de las fisuras en la pista del bus alimentador.



**Fotografía 7. Medición de la densidad de fisuración**



## 5.6 Comparación del daño por fatiga experimental y teórico

El objetivo de esta parte del trabajo es comparar los resultados de la metodología de modelación numérica utilizada en este estudio con los resultados de la pista de prueba.

La probabilidad de falla de la pista se modeló numéricamente calculando los esfuerzos y las deformaciones en las diferentes capas de la estructura de pavimento. Con las deformaciones de tensión en la capa asfáltica se estimó el daño causado en función de las cargas ensayadas.

En este análisis, el cálculo de los esfuerzos y las deformaciones en las capas de la estructura de la pista se realizó con el programa Depav. El principio del modelo aquí utilizado es igual a lo presentado en el numeral 3.1.

Los módulos de la carpeta asfáltica y de la arcilla que idealiza la subrasante son respectivamente 3000 MPa y 35 Mpa. La capa de material granular se dividió en dos capas de 25 cm cada una, y los módulos se calcularon con el coeficiente de proporcionalidad  $K$ . Este coeficiente se escogió de 2.5 y 2.75 para el material de mala calidad y buena calidad respectivamente. Los parámetros de las diferentes capas para las dos pistas se presentan en la Tabla 17 y la Figura 39.

**Tabla 17. Parámetros de las capas de pavimento**

Capa	Espesor [cm]	Módulo [MPa]	Poisson
CA	12	$E_{CA}=3000$	0.35
BG_2	25	$E_2=E_1K<360$	0.35
BG_1	25	$E_1=E_S K<360$	0.35
S	-	$E_S=35$	0.35

<sup>1</sup> Ver valores de Módulos en la Tabla 7

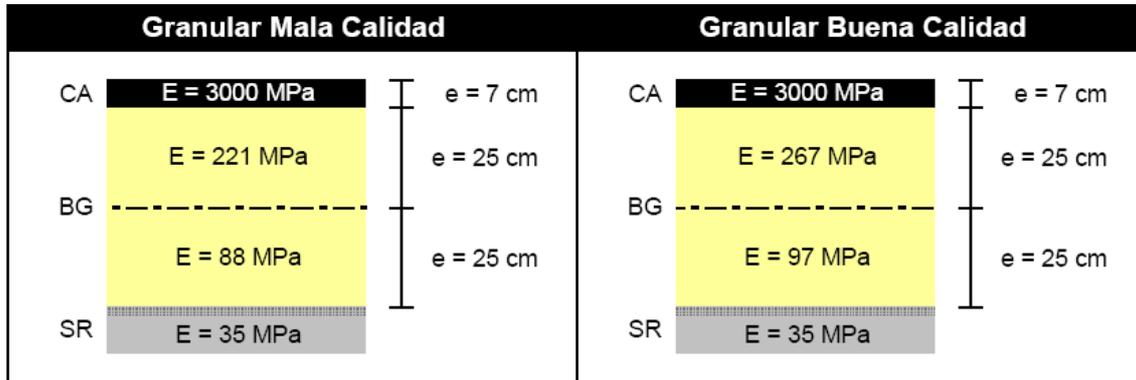


Figura 39. Estructura de las pistas analizadas

El cálculo del daño por fatiga se calculó con base en las deformaciones por tensión en la capa asfáltica  $\varepsilon_f$  obtenidas con el Depav. Así entonces, la probabilidad de falla para un número de ciclos de carga  $N$  se calcula usando la Ecuación 14.

$$P_{falla}(N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^N \exp\left[-\frac{u^2}{2}\right] \cdot du \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde  $u$  es el fractil de la ley normal centrada y está directamente ligado al riesgo, y tiene una media de cero y una desviación estándar de uno. Este fractil se calcula mediante la Ecuación 15, la cual está en función de la pendiente de la ley de fatiga  $b$  de la mezcla asfáltica, y la desviación estándar de la dispersión total  $\delta$ , el calcula como sigue:

$$u = \frac{-1}{b \cdot \delta} \cdot \log_{10}[K_r] \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\delta = \sqrt{\sigma_N^2 + \sigma_H^2 \left(\frac{C}{b}\right)^2} \quad \text{Ecuación 16}$$

donde:



- $\sigma_N$  es la desviación estándar de la ley de fatiga expresada en logaritmo decimal del número de ciclos. Para un material granular - ligante asfáltico este parámetro es igual a 0.3
- $\sigma_H$  es la desviación estándar de los espesores del material colocado *in situ*, el cual para un concreto asfáltico es igual a 1 cm,
- $C$  es una constante igual a 0.02 para materiales asfálticos.

El coeficiente  $K_r$  (Ecuación 17) ajusta el esfuerzo admisible a la probabilidad de falla, y se calcula en función de los ciclos de carga  $N$ , y los coeficientes  $K_c$  y  $K_s$ , los cuales dependen de la característica de los materiales de la estructura, y cuyos valores son 1.1 y 0.83 respectivamente (Tabla 10 y Tabla 11).

$$K_r = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_6} \cdot \left( \frac{N}{10^6} \right)^{-b} \cdot \frac{1}{K_t \cdot K_c \cdot K_s} \quad \text{Ecuación 17}$$

El valor del coeficiente  $K_t$  puede determinarse con base en la variación del módulo en función de la temperatura mediante la Ecuación 2. Los parámetros de la carpeta asfáltica utilizados para los cálculos se presentan en la Tabla 8.

**Tabla 18. Parámetros de cálculo del daño por fatiga en la Carpeta Asfáltica**

Parámetro	Valor
$\sigma_N$	0.30
$\sigma_H$	1.00 cm
$C$	0.02
$b$	-0.24
$\delta$	0.31
$\varepsilon_6(15^\circ\text{C}, 25\text{Hz})$	145E-6
$E(15^\circ\text{C}, 10\text{Hz})$	144000 kg/cm <sup>2</sup>
$E(25^\circ\text{C}, 10\text{Hz})$	69901 kg/cm <sup>2</sup>
$K_s$	0.8
$K_c$	1.1
$K_t$	1.4

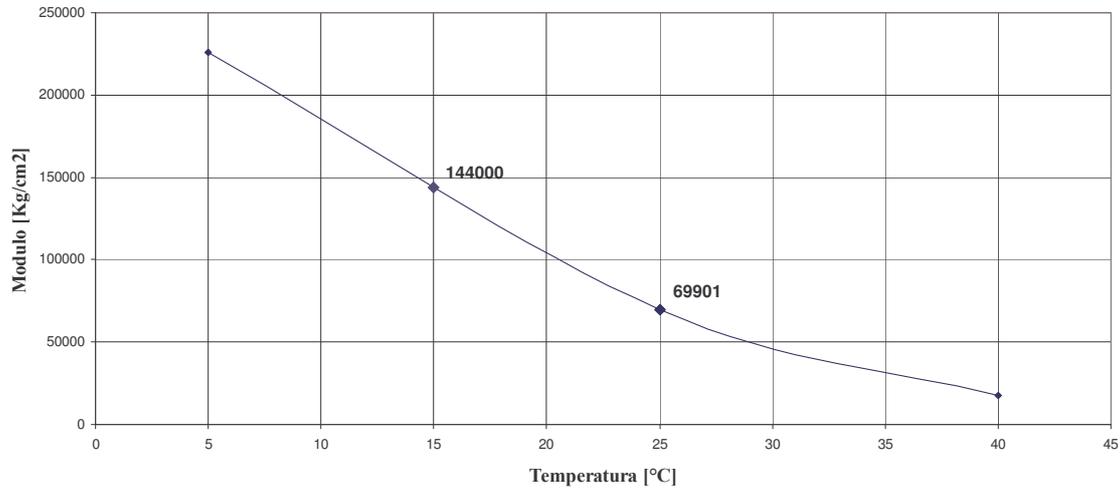


Figura 40. Variación del Módulo Dinámico en función de la temperatura para una frecuencia de ensayo de 10 Hz, para la mezcla asfáltica colocada en la pista

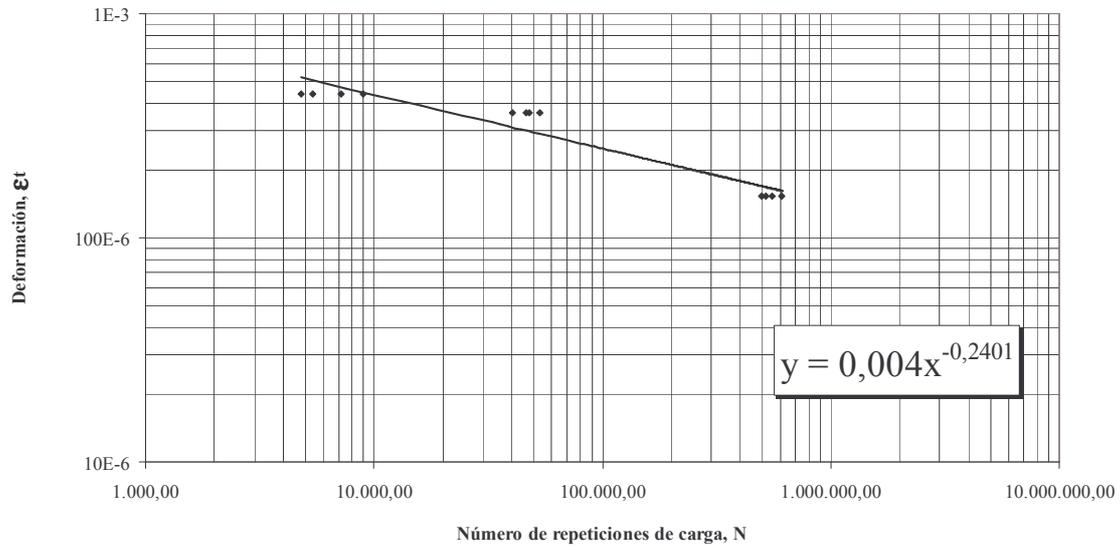


Figura 41. Curva de fatiga para la mezcla asfáltica colocada en la pista

Las alternativas modeladas en el Depav, y cuyos resultados se presentan en el Anexo N, son las siguientes.



**Tabla 19. Información de alternativas modeladas en Depav**

Alternativa No.	Pista	Carga Eje	Calidad Granular	$\epsilon_t$ *
1	Buseta	5.0 Ton	Mala	209E-6
2	Buseta	5.0 Ton	Mala	177E-6
3	Bus Alimentador	10.0 Ton	Buena	330E-6
4	Bus Alimentador	10.0 Ton	Buena	272E-6

\* Estos valores corresponden a la deformación de tensión en la capa asfáltica obtenidos con el Depav.

Los parámetros adicionales para el análisis de los esfuerzos y deformaciones en las capas del pavimento son la presión de contacto de las llantas  $q$ , el radio de carga  $a$  y la distancia entre llantas  $d$ . El troque del equipo de la pista de prueba es de tipo eje sencillo con llanta doble. Estos parámetros se presentan en la Tabla 20.

**Tabla 20. Parámetros de carga para las dos pistas**

Parámetro	Pista Buseta	Pista Bus Alimentador
Carga por llanta $P$ [kg]	1250	2500
Presión de inflado $q$ [cm/cm <sup>2</sup> ]	5.59	6.01
Radio de carga $a$ [cm]	8.44	11.50
Distancia entre llantas $d$ [cm]	37.5	37.5

Los parámetros de la estructura como módulos, espesores, relación de poisson, y condiciones de liga de las diferentes capas se presenta en la Tabla 21. En esta tabla CA corresponde a la Capa Asfáltica, BG a la Base Granular, y SR a la subrasante.

**Tabla 21. Parámetros de las capas de la estructura de la pista de prueba**

Capas	E [kg/cm <sup>2</sup> ]				Poisson $\nu$	Altura [cm]	Capa Ligada
	Pista Buseta		Pista bus Alimentador				
	Granular Mala Calidad	Granular Buena Calidad	Granular Mala Calidad	Granular Buena Calidad			
CA	69901	69901	69901	69901	0,35	7	Si
BG 2	1214	1897	1214	1897	0,35	25	Si
BG 1	607	759	607	759	0,35	25	Si
SR	303	303	303	303	0,35		

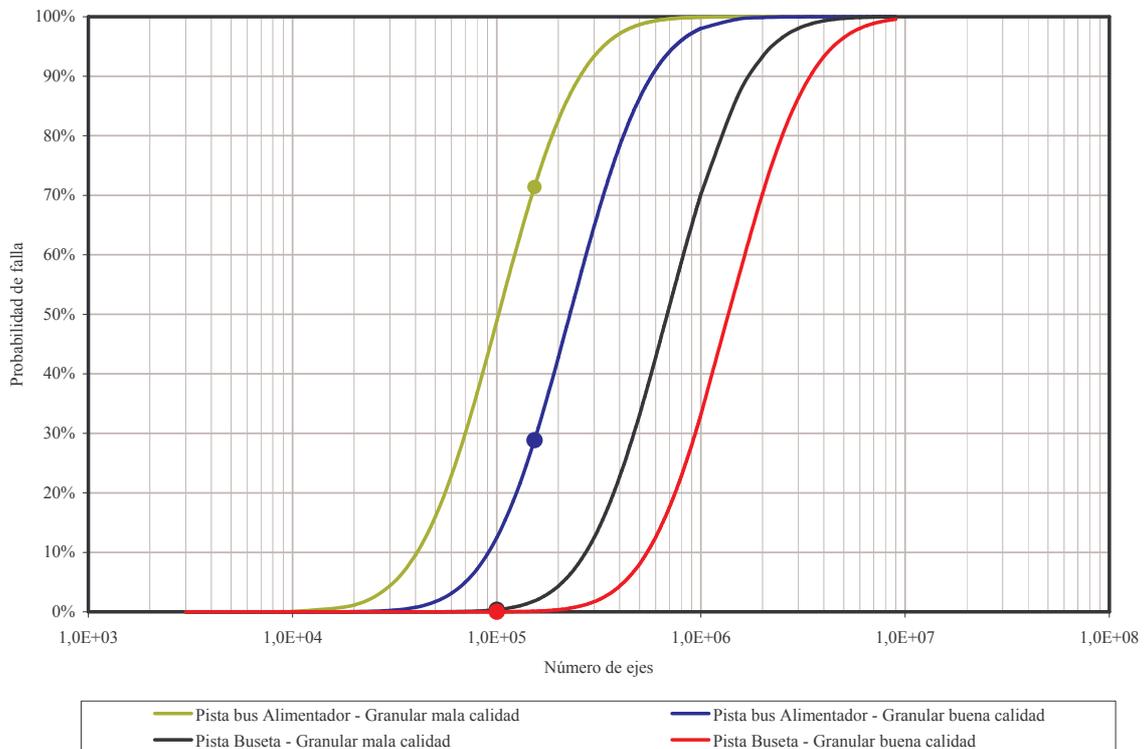
Las curvas de probabilidad de falla para cada uno de los tramos modelados numéricamente se presentan en la Figura 42. Los puntos en esta figura indican la probabilidad de falla



correspondiente al número de ejes totales a los que fue sometida cada pista, cuyos valores se presenta en la Tabla 22.

**Tabla 22. Número de ejes ensayados en cada tramo y Probabilidad de Falla modelada**

Pista	Número de Ejes	Probabilidad de Falla
Buseta – Granular Mala Calidad	99900	0 %
Buseta – Granular Buena Calidad	99900	0 %
Bus Alimentador – Granular Mala Calidad	153000	71 %
Bus Alimentador – Granular Buena Calidad	153000	29 %



**Figura 42. Probabilidad de falla en función del número de ejes de carga para los cuatro tramos modelados**

La Tabla 23 muestra una comparación entre la probabilidad de falla calculada numéricamente y el porcentaje de fisuración medido en la pista de prueba. Esta tabla muestra una muy buena correspondencia entre el cálculo y la pista de prueba, lo cual valida los cálculos de daños y costos presentados en el numeral 4.



**Tabla 23. Número de ejes ensayados en cada tramo y Probabilidad de Falla modelada**

<b>Pista</b>	<b>Probabilidad de Falla calculada</b>	<b>Porcentaje de fisuración medido</b>
Buseta – Granular Mala Calidad	0 %	0 %
Buseta – Granular Buena Calidad	0 %	0 %
Bus Alimentador – Granular Mala Calidad	71 %	69 %
Bus Alimentador – Granular Buena Calidad	29 %	31 %



---

## 6 CONCLUSIONES

---

### 6.1 En cuanto a las vibraciones

Las vibraciones generadas por los diferentes tipos de fuentes (vehículos alimentadores, vehículos particulares, y ruido ambiental) se encuentran por debajo del límite que establecen las normas internacionales. Lo anterior indica que aunque estas sean percibidas por los habitantes, no llegan a representar un peligro para la estructura de sus viviendas. Se encontró también que las vibraciones más intensas, con un componente frecuencial superior a 10 Hz, son las generadas por el paso de los vehículos alimentadores.

Los niveles de vibraciones pueden reducirse implementando obras complementarias sobre las vías para disminuir la velocidad de circulación de los vehículos. También es fundamental conservar en perfectas condiciones el estado superficial del pavimento, de tal forma que el Índice de Rugosidad Internacional IRI no supere 3.5 m/km. La implementación de otras alternativas para mitigar los efectos de las vibraciones en los habitantes y edificaciones, como por ejemplo la instalación de barreas, podrían llegar a no ser viables económicamente debido a que sus costos pueden superar la inversión necesaria en la mejora del pavimento.

### 6.2 En cuanto al análisis de daño

Se analizó el daño por fatiga y por ahuellamiento causado por cada pasajero transportado por los diferentes buses alimentadores y por el posible bus a implementar (buseta). El



análisis de daño se hizo tanto para cada grupo de buses (Tabla 24, Figura 44 y Figura 46) como para el número de pasajeros transportados (Figura 45 y Figura 47).

De los buses alimentadores, el grupo que menor daño combinado causa a la estructura de un pavimento es el GB8, ya que es el que menor daño origina por ahuellamiento, y uno de los que menor daño ocasiona por fatiga en la carpeta asfáltica, aunque el grupo GB7 es el que genera el mínimo daño por fatiga. Sin embargo este último grupo es uno de los que mayor daño produce por deformación permanente en la subrasante.

Comparando el daño ocasionado por la buseta con el grupo de bus alimentador que menor daño genera, se tiene que la vida útil de una estructura de pavimento se verá reducida en un 71% con el grupo GB7 si se considera el daño por fatiga, y en un 81% con el grupo GB8 si se considera el daño por ahuellamiento, tal como se observa en la Figura 43.

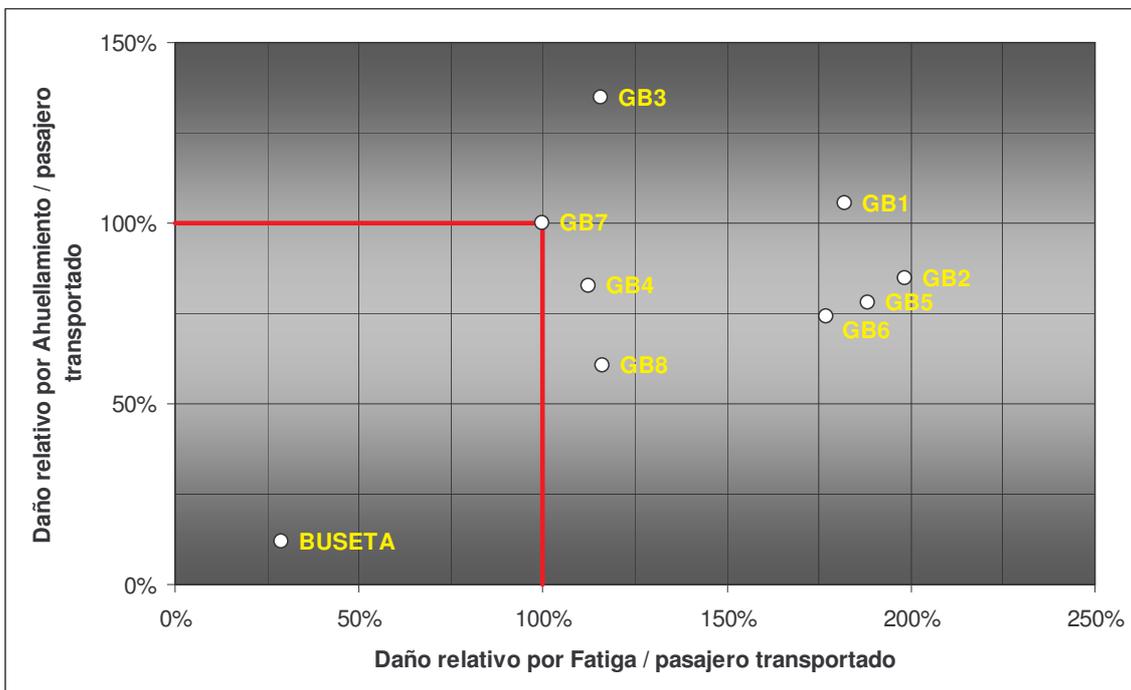


Figura 43. Daño relativo promedio por fatiga y ahuellamiento para cada grupo de buses



Tabla 24. Resumen daño por Fatiga y Ahuellamiento para cada grupo de Buses

Grupo de Buses	Daño por Fatiga	Daño por Ahuellamiento
GB1	1.07E-05	4.62E-07
GB2	1.13E-05	3.74E-07
GB3	6.03E-06	4.83E-07
GB4	6.42E-06	3.39E-07
GB5	9.71E-06	3.16E-07
GB6	9.12E-06	3.03E-07
GB7	5.22E-06	3.55E-07
GB8	6.14E-06	2.38E-07
GB9 (Buseta)	9.30E-07	3.00E-08

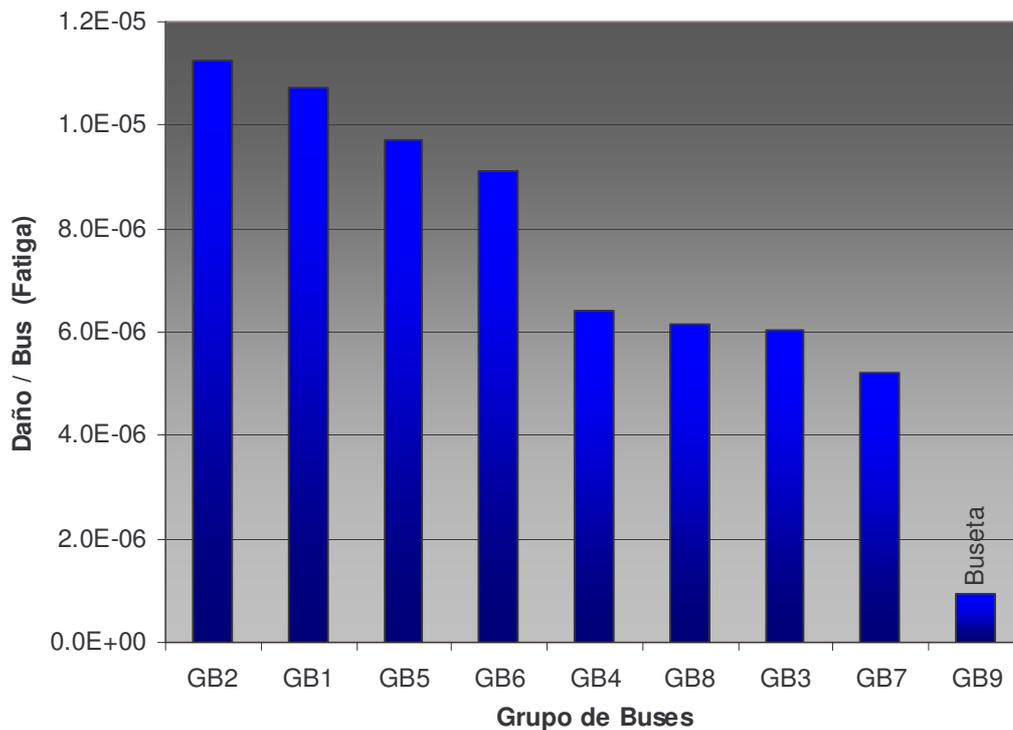


Figura 44. Daño por Fatiga para cada grupo de buses (daño promedio para todas las estructuras analizadas)

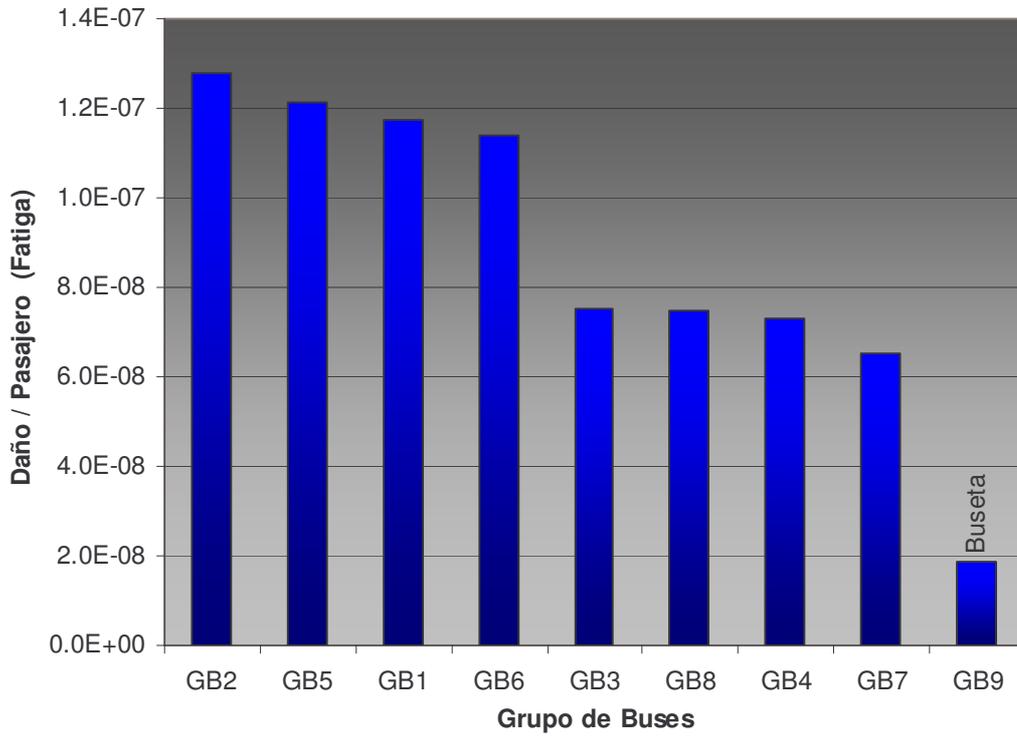


Figura 45. Daño por Fatiga por pasajeros transportados para cada grupo de buses (daño promedio para todas las estructuras analizadas)

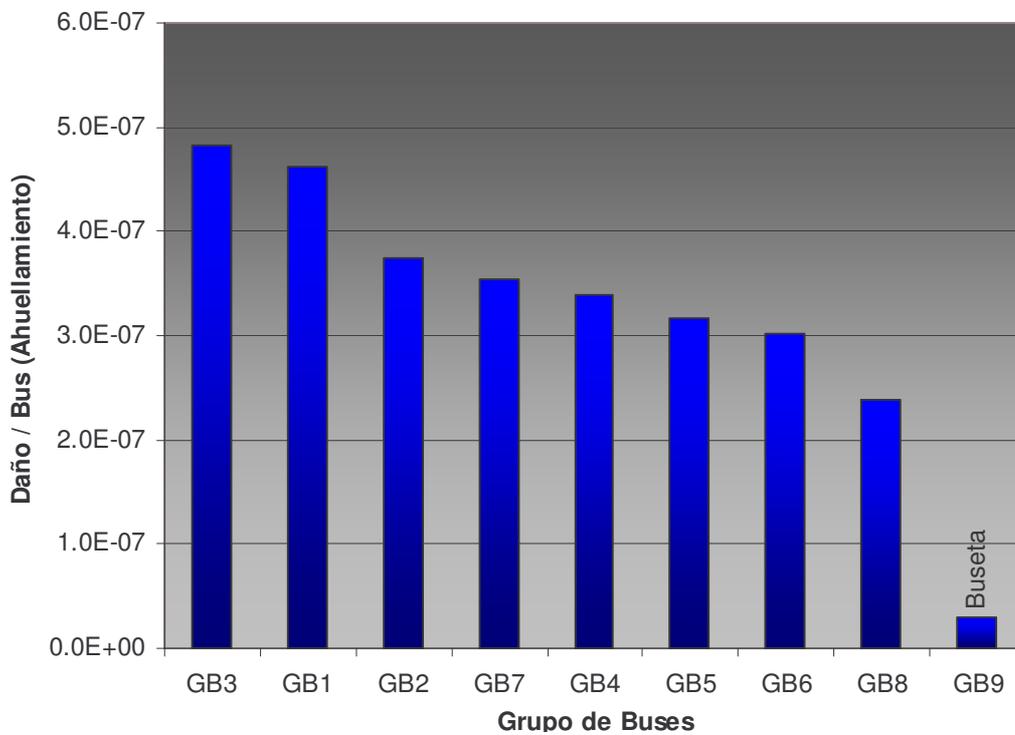


Figura 46. Daño por Ahuellamiento para cada grupo de buses (daño promedio para todas las estructuras analizadas)

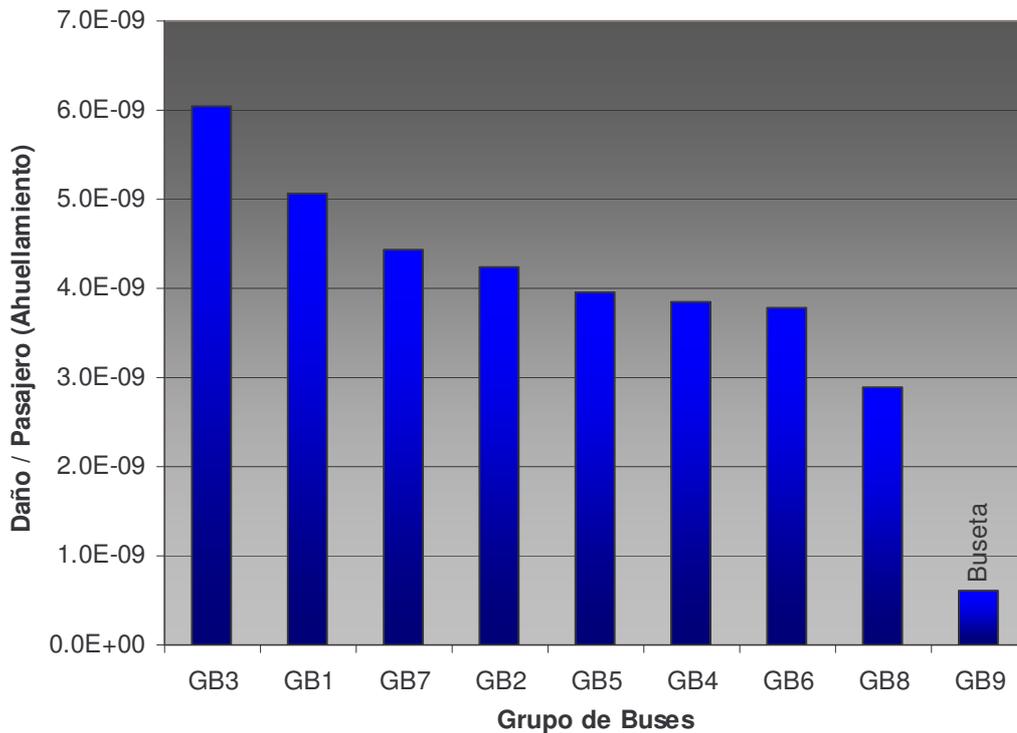
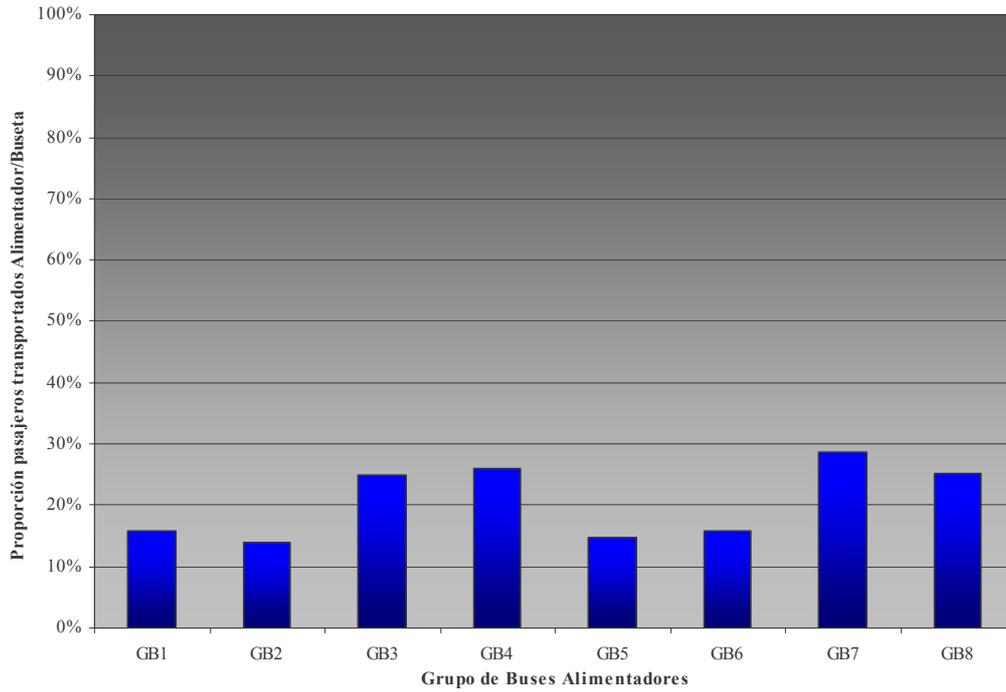


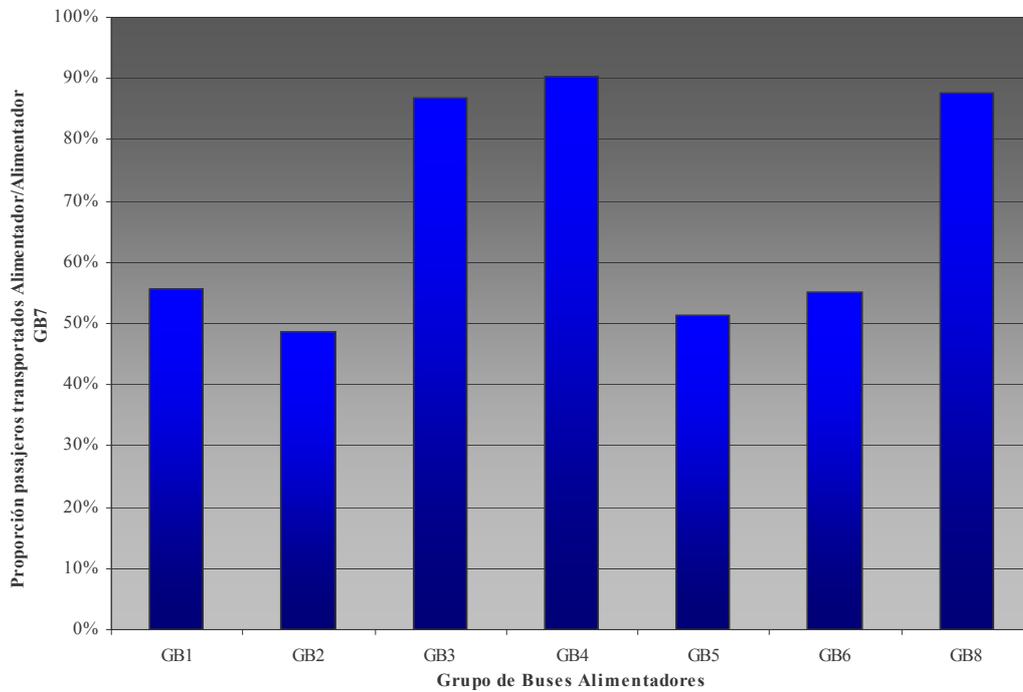
Figura 47. Daño por Ahuellamiento por pasajeros transportados para cada grupo de buses (daño promedio para todas las estructuras analizadas)

### 6.3 En cuanto al análisis de costos

En todos los casos, la buseta es el vehículo para transporte de pasajeros que mejor optimiza la inversión de recursos en el mantenimiento de las estructuras analizadas. Para una misma inversión de recursos en el mantenimiento de los pavimentos y para un índice de servicialidad del 50%, el número de pasajeros transportados por la buseta se vería reducido entre un 71% y un 86% si estos pasajeros fueran transportados por los buses alimentadores actuales, tal como se muestra en la Figura 48. Por otro lado, haciendo el análisis con el bus alimentador que menor daño por fatiga causa, el número de pasajeros transportados por el grupo de buses GB7 se vería reducido entre un 10% y un 51% si estos pasajeros fueran transportados por los otros buses alimentadores, tal como se muestra en la Figura 49.



**Figura 48. Inversión de recursos de Mantenimiento promedio para todas las estructuras en función de la relación de pasajeros transportados por los buses alimentadores respecto a los transportados por la buseta**



**Figura 49. Inversión de recursos de Mantenimiento promedio para todas las estructuras en función de la relación de pasajeros transportados por los buses alimentadores respecto a los transportados por los buses del grupo GB7**



## 6.4 En cuanto a la pista de prueba

La estructura de los pavimentos de las vías locales es muy variado. Por esta razón era inviable simular en pista de prueba todas las posibilidades de estructuras y cargas. Se escogió entonces la alternativa de modelar numéricamente todas las posibilidades de estructuras y cargas, y validar una de ellas en pista de prueba ( una estructura y dos tipos de cargas).

Los resultados que arrojó la pista de prueba coinciden con los arrojados por el modelo numérico utilizado. Con lo anterior podemos considerar que el modelo numérico se encuentra bien calibrado para las condiciones de suelos, materiales, y cargas presentes en la ciudad de Bogotá.

## 6.5 Conclusiones generales

Si bien este estudio concluye que el cambio de tipología de los buses alimentadores del sistema Transmilenio que actualmente transitan por las vías de la malla vial local por busetas induce un ahorro en los costos de mantenimiento de las vías, esta medida incrementaría los costos de operación del sistema de rutas alimentadoras porque se reduciría a menos de la mitad la capacidad de pasajeros transportados por cada bus. Esto requiere que se duplique el parque automotor de buses alimentadores, con las consecuencias de una mayor emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, un incremento en las emisiones de ruido generada por los motores de los vehículos, y una mayor congestión en las vías.

Este estudio demuestra que la tipología de cargas de los buses alimentadores tienen una gran influencia en el deterioro de los pavimentos locales. Dado que la alternativa de utilizar busetas presenta problemas en la operación del sistema, es necesario explorar otras alternativas tales como la limitación de la carga por eje o la utilización de ejes tandem que repartan mejor la carga.



---

## 7 RECOMENDACIONES

---

Con base en los resultados de este estudio se pueden plantear las siguientes recomendaciones:

1. Si bien el estudio muestra que desde el punto de vista de las vibraciones los buses alimentadores no afectan las estructuras, estos si producen vibraciones que pueden afectar la tranquilidad de los vecinos. Por esta razón se recomienda mantener estas vías con un índice de rugosidad adecuado (por ejemplo 3.5 m/km).
2. Con respecto a las cargas, el IDU debe promulgar una política de limitación de las cargas por eje, esta política debe ser gradual y concertada con los fabricantes de vehículos con el fin de que se tenga el tiempo suficiente para implementar nuevas tecnologías en los buses alimentadores.



ALCALDIA MAYOR  
DE BOGOTÁ D.C.  
Instituto  
Desarrollo Urbano



Universidad de los Andes

---

## **Anexo A. REGISTRO DE VIBRACIONES**



ALCALDIA MAYOR  
DE BOGOTÁ D.C.  
Instituto  
Desarrollo Urbano



Universidad de los Andes

---

## **Anexo B. CARACTERÍSTICAS BUSES ALIMENTADORES**



ALCALDIA MAYOR  
DE BOGOTÁ D.C.  
Instituto  
Desarrollo Urbano



Universidad de los Andes

---

## **Anexo C. DEFORMACIONES UNITARIAS EN LA CAPA ASFÁLTICA**



ALCALDIA MAYOR  
DE BOGOTÁ D.C.  
Instituto  
Desarrollo Urbano



Universidad de los Andes

---

## **Anexo D. DEFORMACIONES UNITARIAS EN LA SUBRASANTE**



ALCALDIA MAYOR  
DE BOGOTÁ D.C.  
Instituto  
Desarrollo Urbano



Universidad de los Andes

---

## **Anexo E. PROBABILIDAD DE FALLA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE EJES**

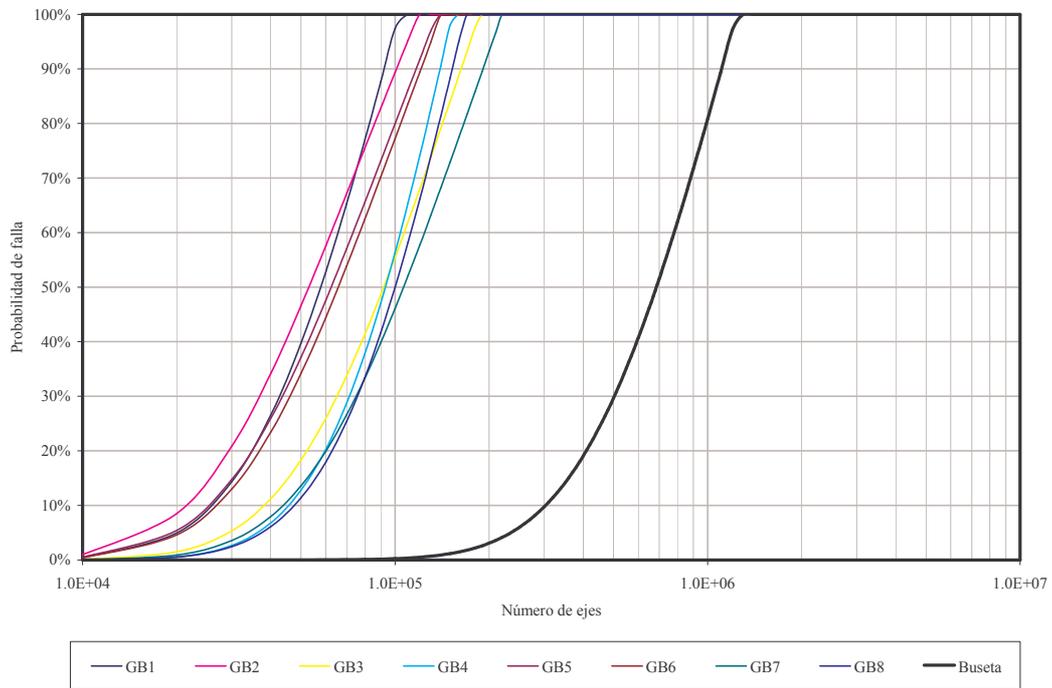


Figura 50. Probabilidad de falla en función del número de ejes de carga para la estructura E1

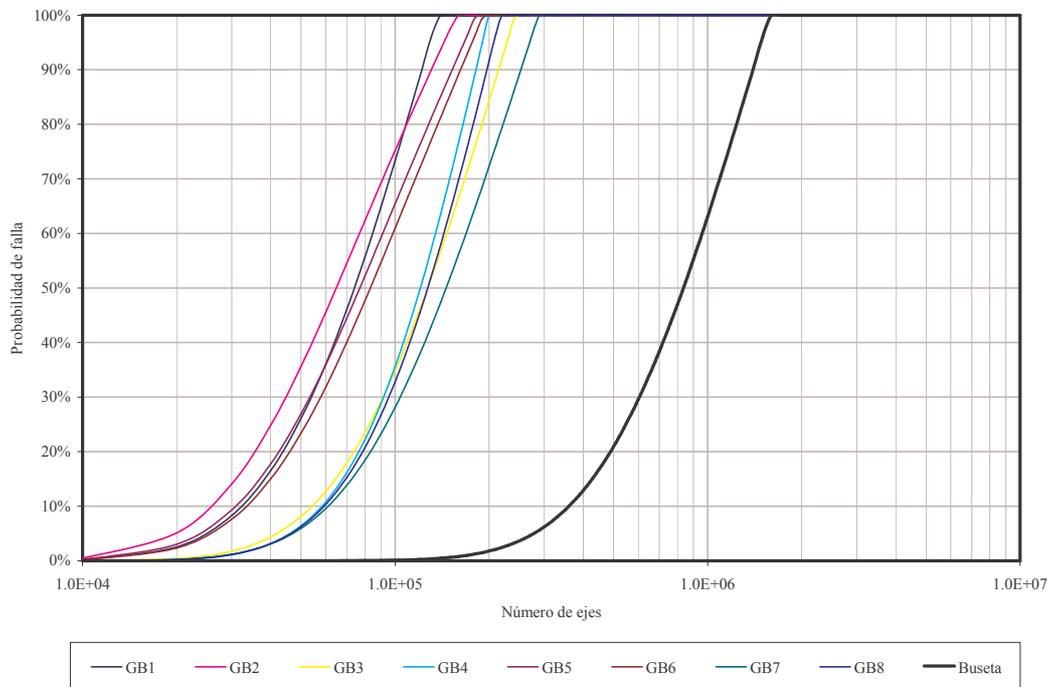


Figura 51. Probabilidad de falla en función del número de ejes de carga para la estructura E2

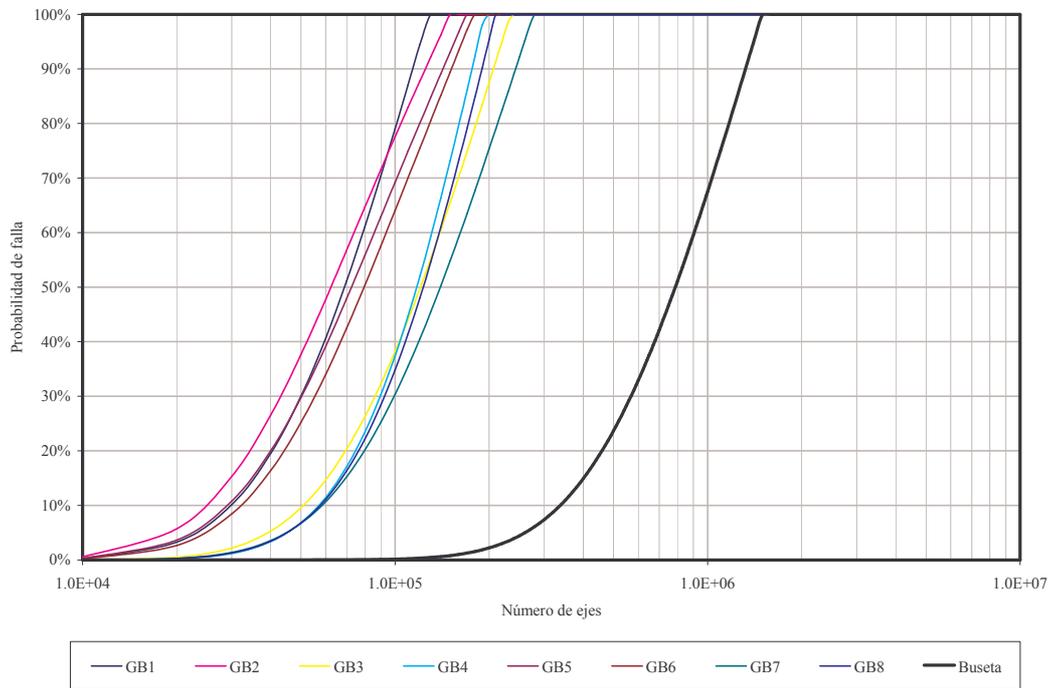


Figura 52. Probabilidad de falla en función del número de ejes de carga para la estructura E3

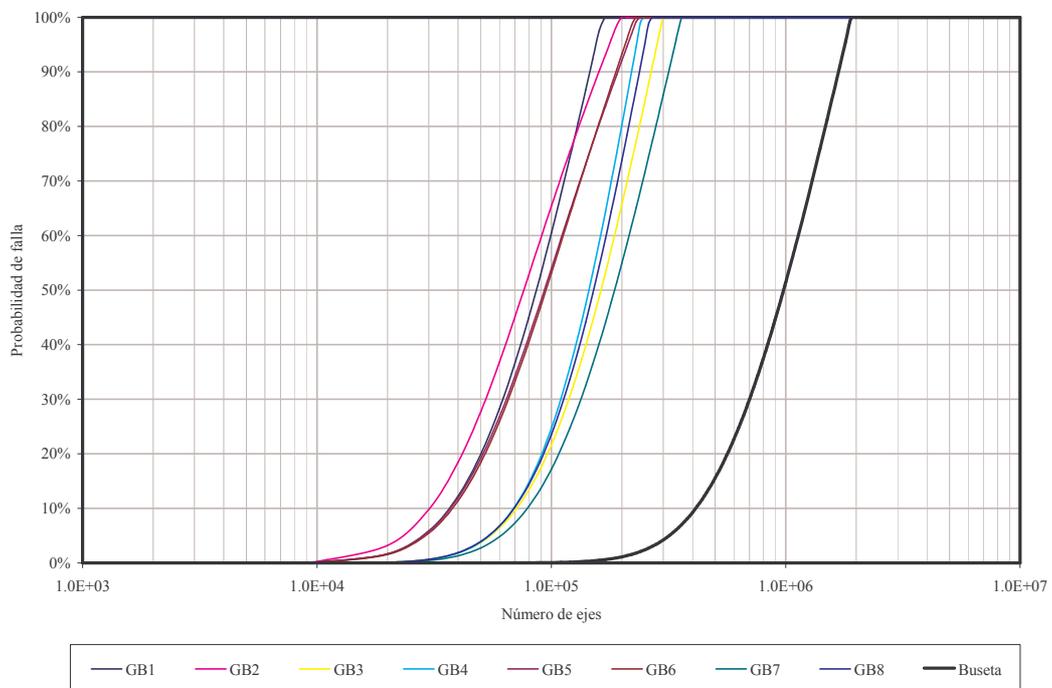


Figura 53. Probabilidad de falla en función del número de ejes de carga para la estructura E4

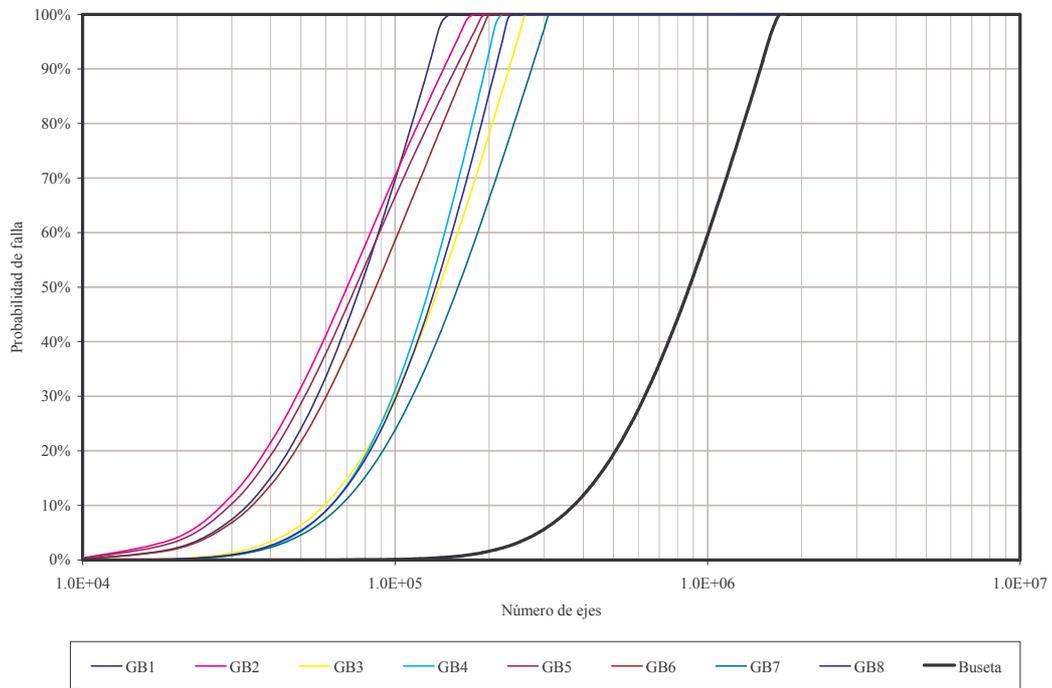


Figura 54. Probabilidad de falla en función del número de ejes de carga para la estructura E5

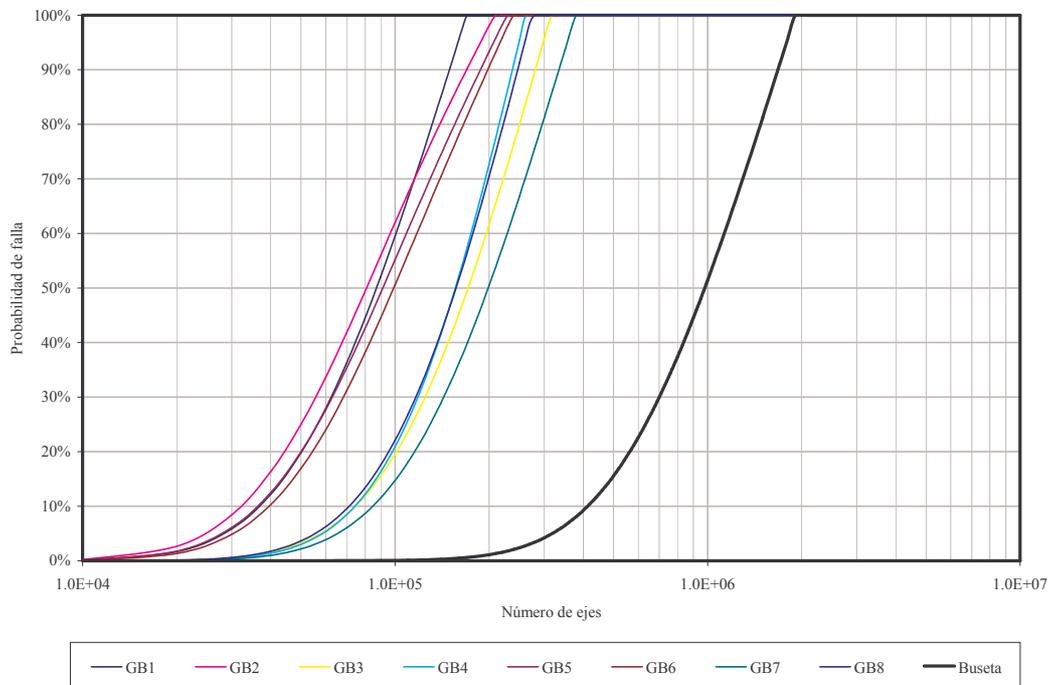


Figura 55. Probabilidad de falla en función del número de ejes de carga para la estructura E6

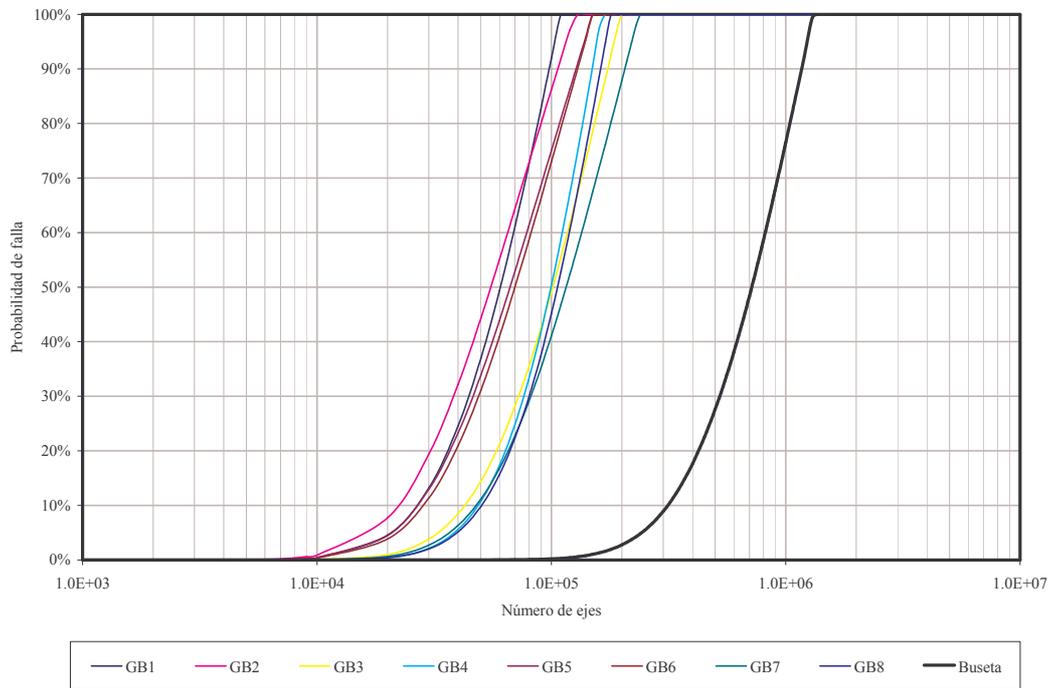


Figura 56. Probabilidad de falla en función del número de ejes de carga para la estructura E7

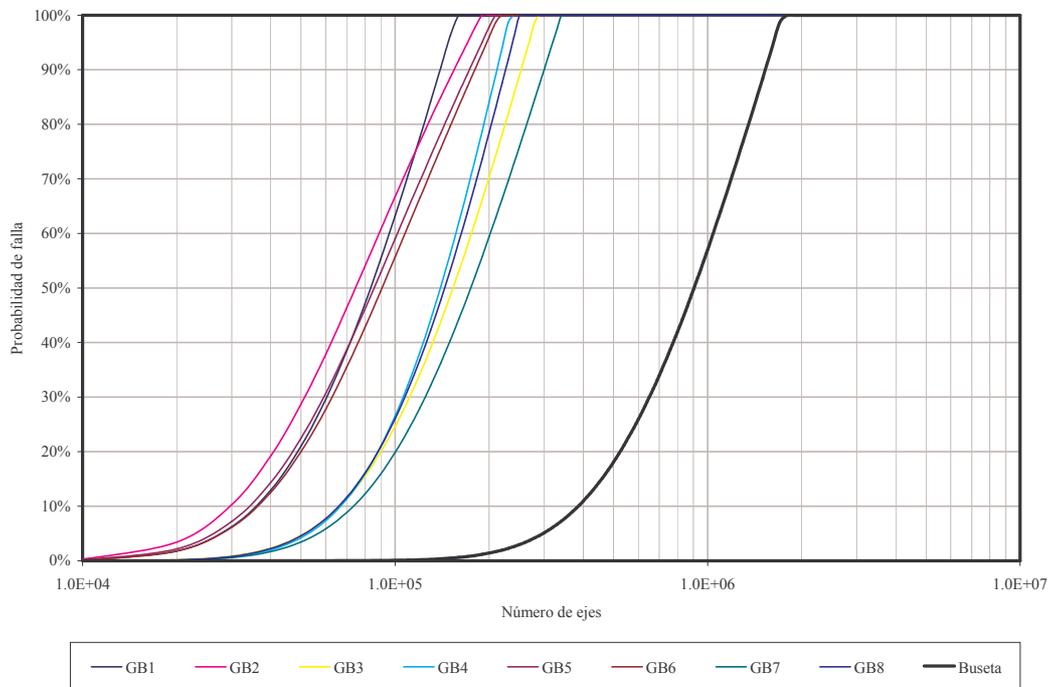


Figura 57. Probabilidad de falla en función del número de ejes de carga para la estructura E8

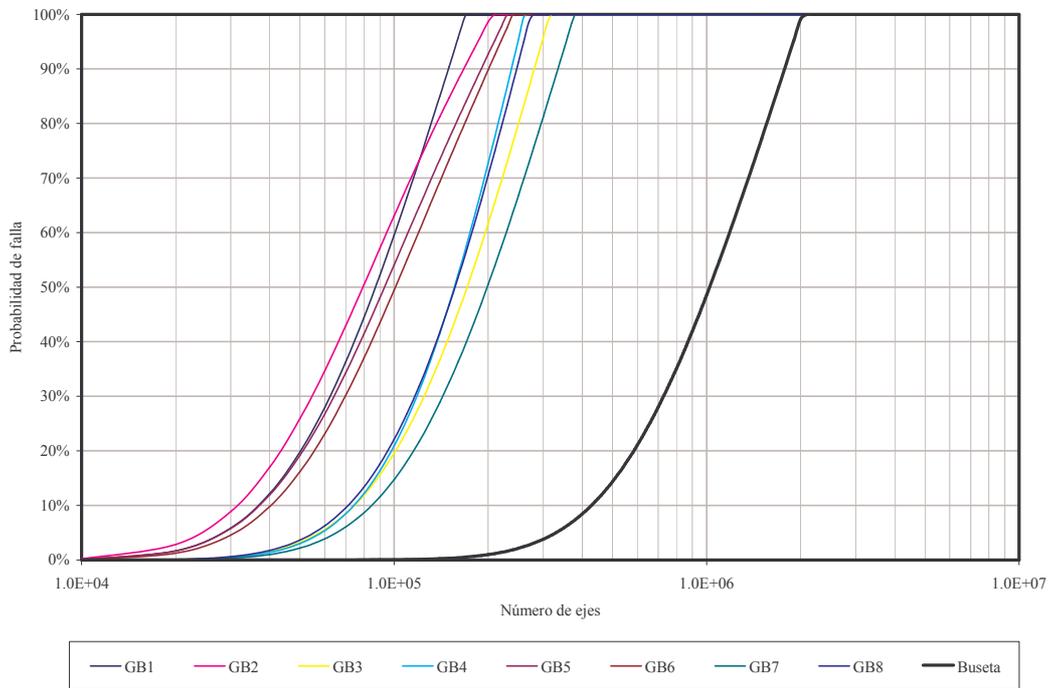


Figura 58. Probabilidad de falla en función del número de ejes de carga para la estructura E9

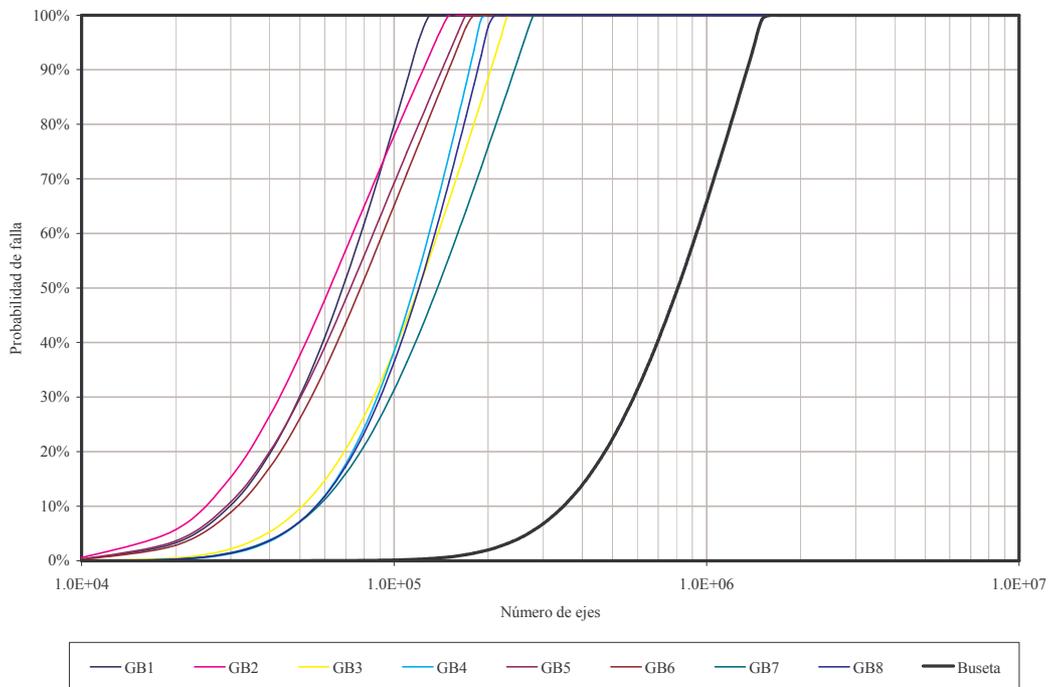


Figura 59. Probabilidad de falla en función del número de ejes de carga para la estructura E10



ALCALDIA MAYOR  
DE BOGOTÁ D.C.  
Instituto  
Desarrollo Urbano



Universidad de los Andes

---

## **Anexo F. COSTOS DE MANTENIMIENTO EN FUNCIÓN DE PASAJEROS TRANSPORTADOS**

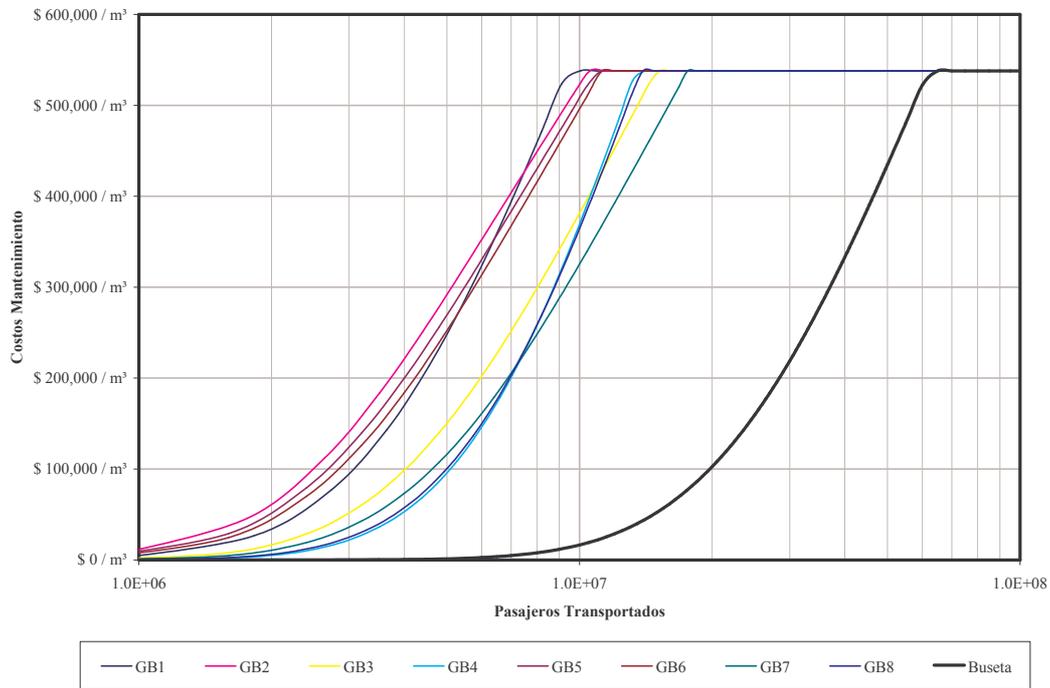


Figura 60. Costos de mantenimiento en función de pasajeros transportados para la estructura E1

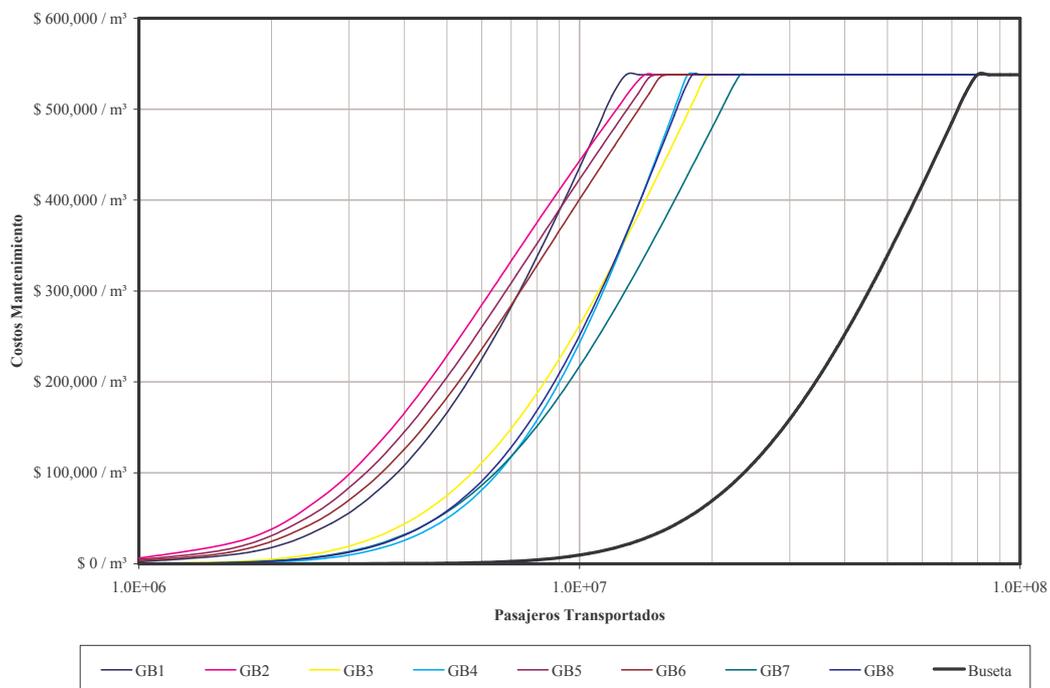


Figura 61. Costos de mantenimiento en función de pasajeros transportados para la estructura E2

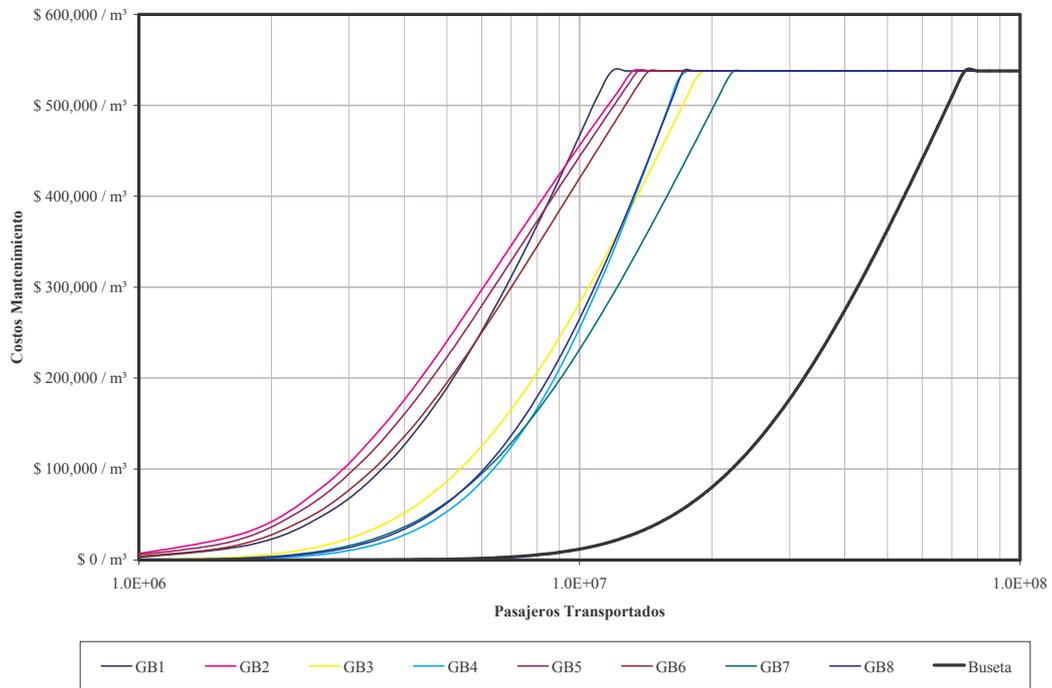


Figura 62. Costos de mantenimiento en función de pasajeros transportados para la estructura E3

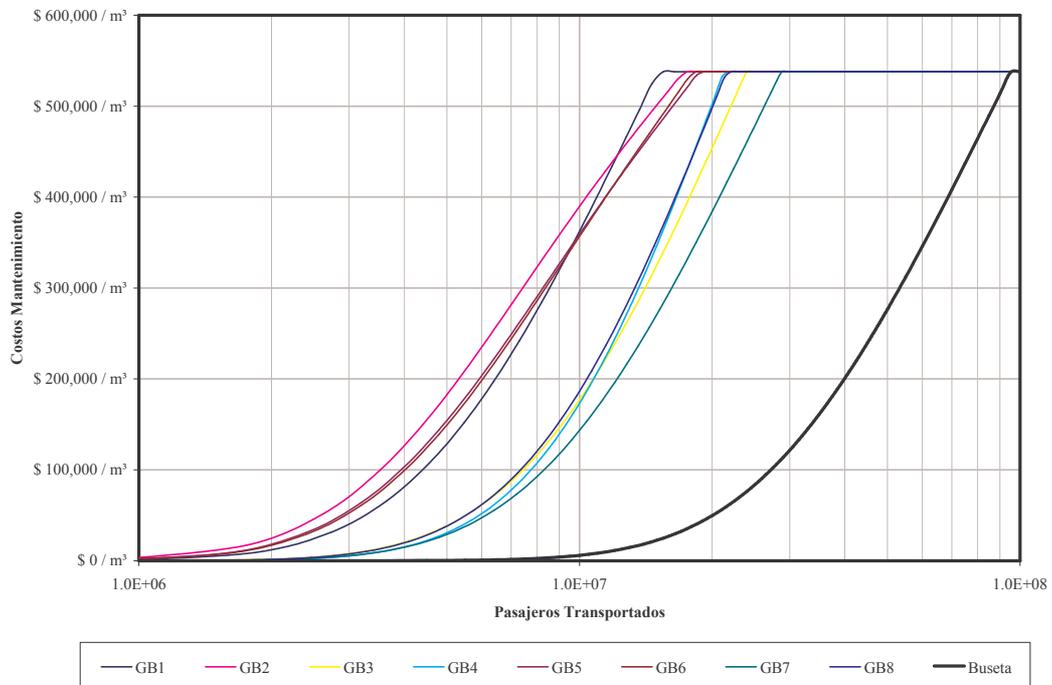


Figura 63. Costos de mantenimiento en función de pasajeros transportados para la estructura E4

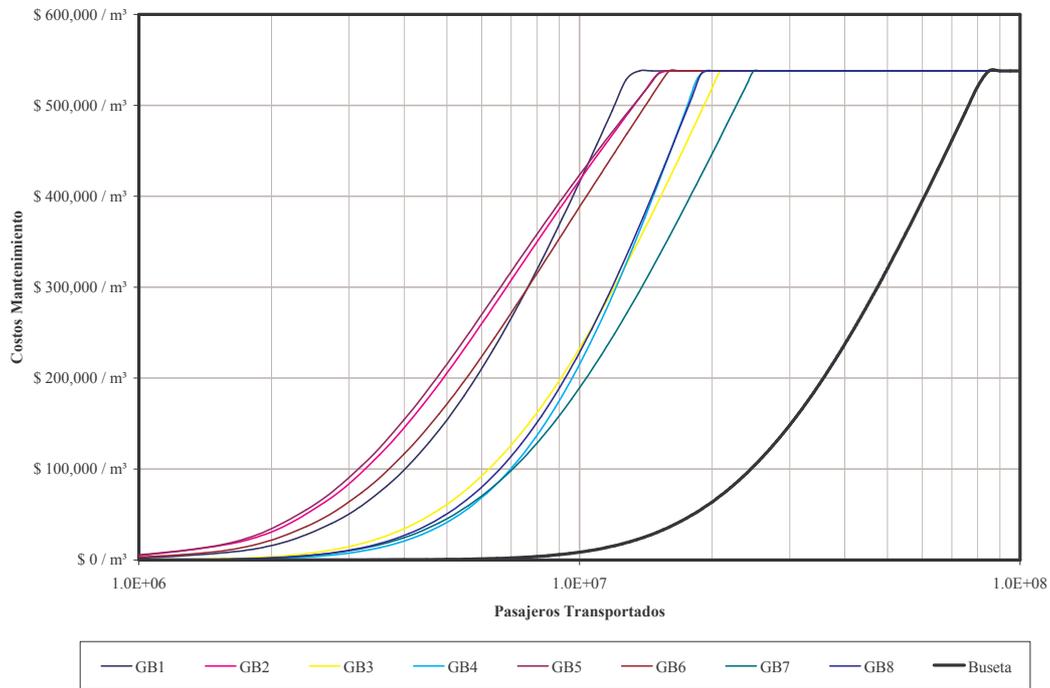


Figura 64. Costos de mantenimiento en función de pasajeros transportados para la estructura E5

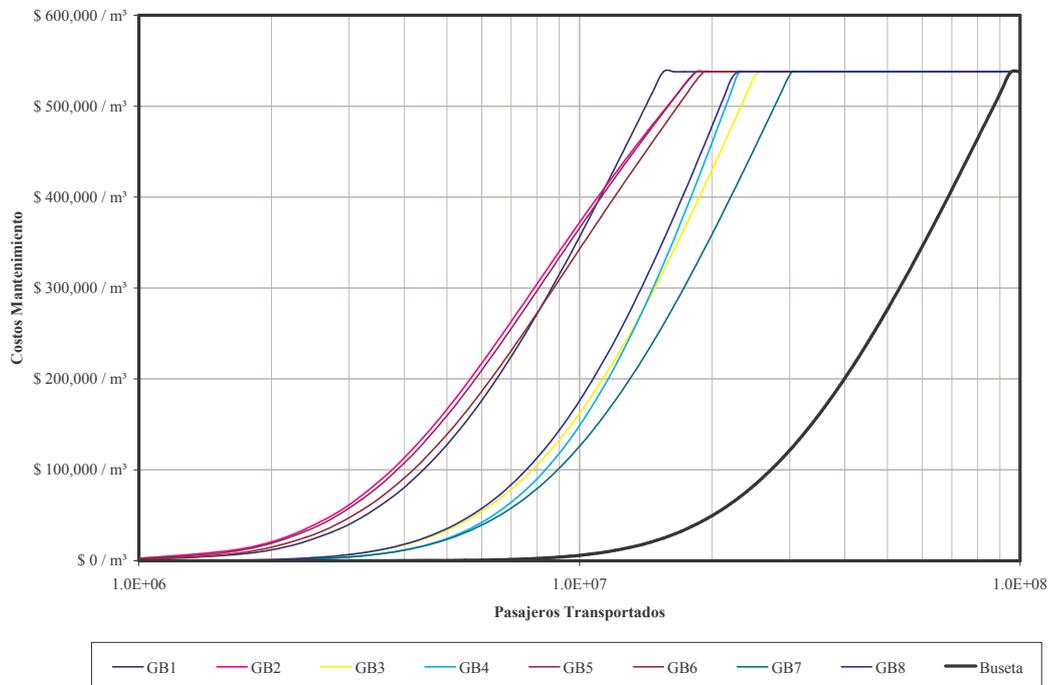


Figura 65. Costos de mantenimiento en función de pasajeros transportados para la estructura E6

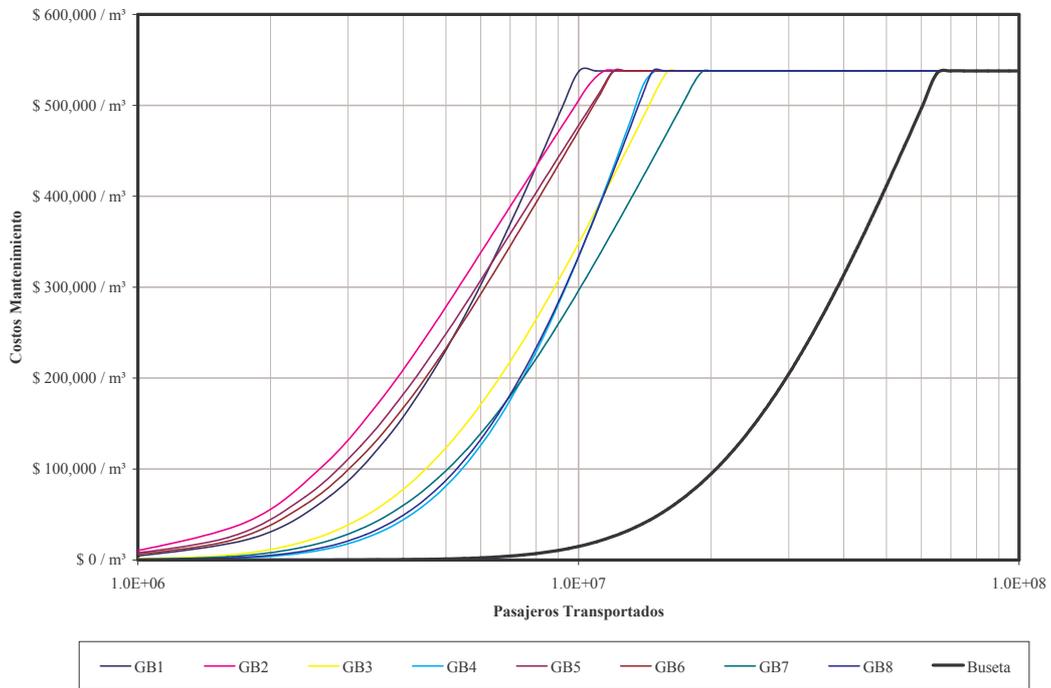


Figura 66. Costos de mantenimiento en función de pasajeros transportados para la estructura E7

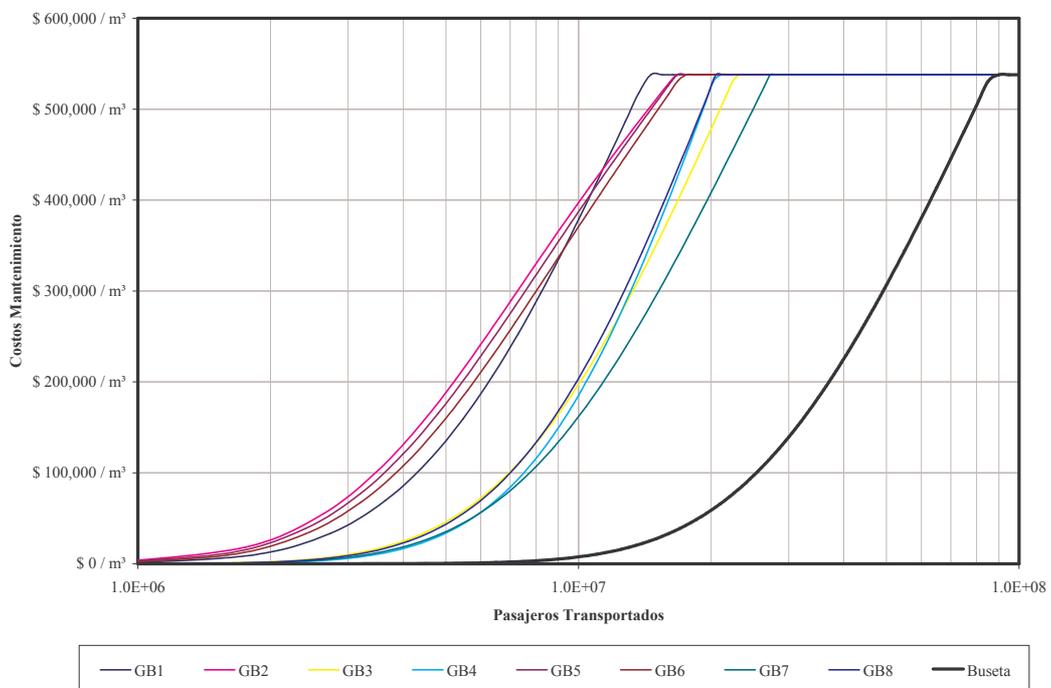


Figura 67. Costos de mantenimiento en función de pasajeros transportados para la estructura E8

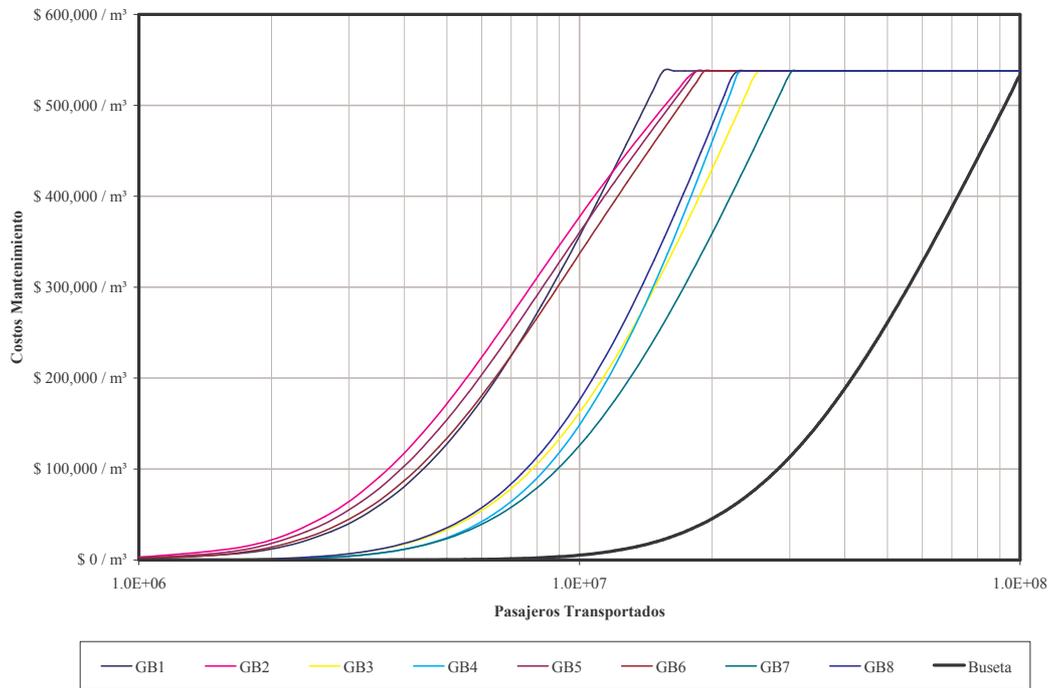


Figura 68. Costos de mantenimiento en función de pasajeros transportados para la estructura E9

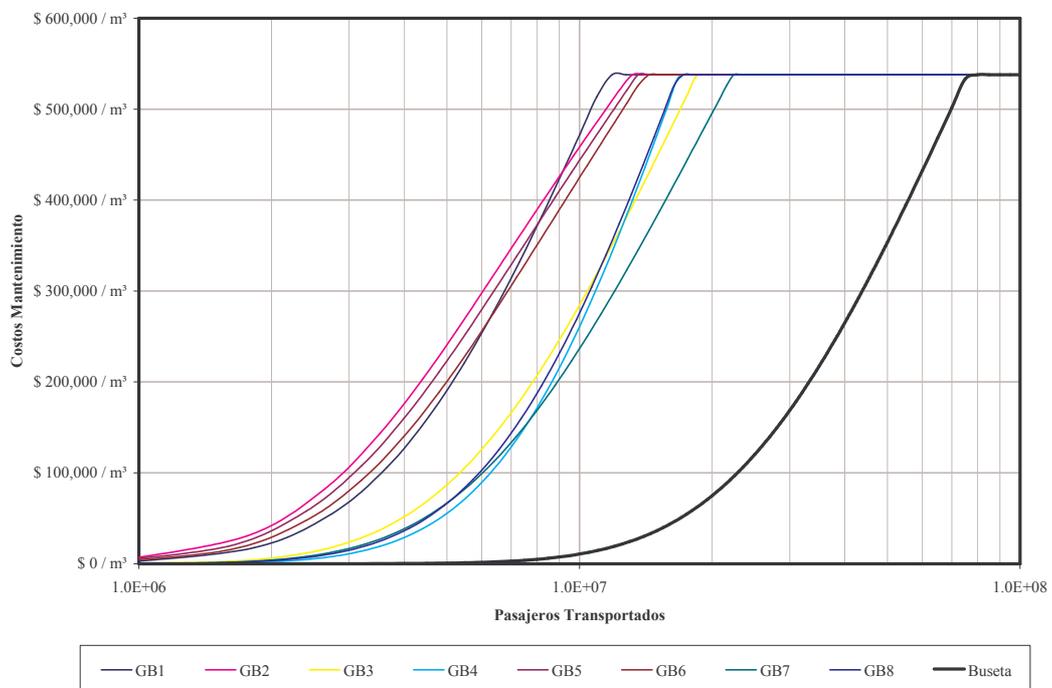


Figura 69. Costos de mantenimiento en función de pasajeros transportados para la estructura E10



ALCALDIA MAYOR  
DE BOGOTÁ D.C.  
Instituto  
Desarrollo Urbano



Universidad de los Andes

---

**Anexo G. INVERSIÓN DE RECURSOS EN EL MANTENIMIENTO DE LAS  
ESTRUCTURAS ANALIZADAS EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN DE  
PASAJEROS TRANSPORTADOS POR LOS BUSES ALIMENTADORES  
RESPECTO A LOS PASAJEROS TRANSPORTADOS POR LA BUSETA**

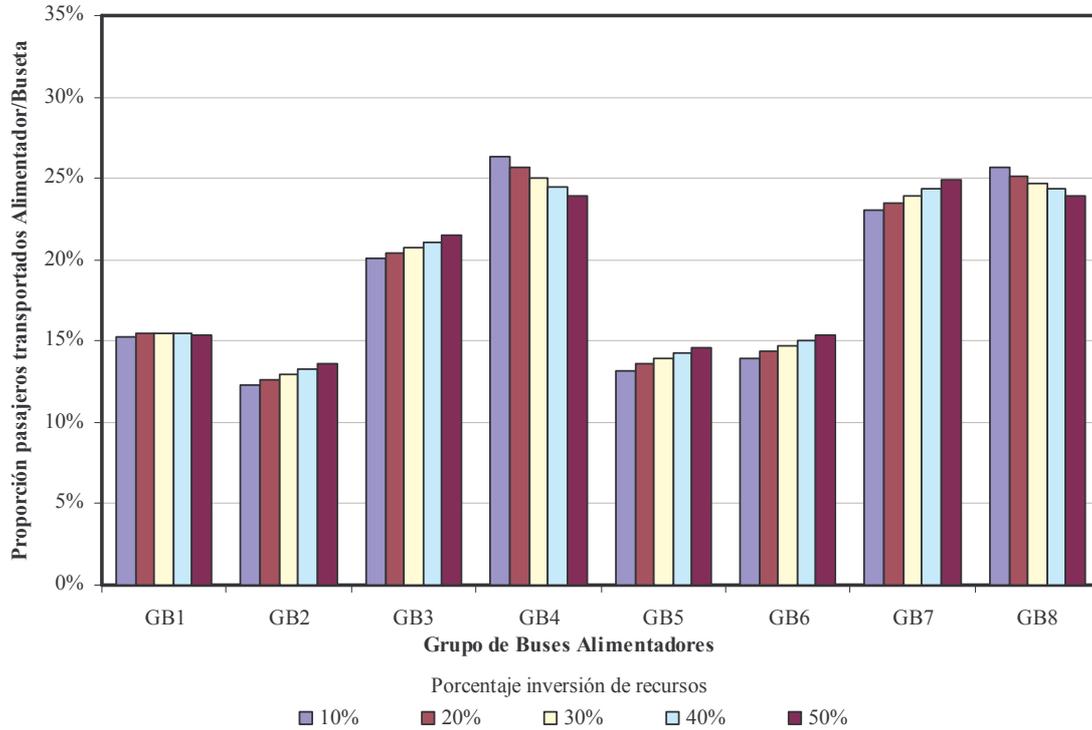


Figura 70. Inversión de recursos de Mantenimiento para la estructura E1 en función de la relación de pasajeros transportados por los buses alimentadores respecto a los transportados por la buseta

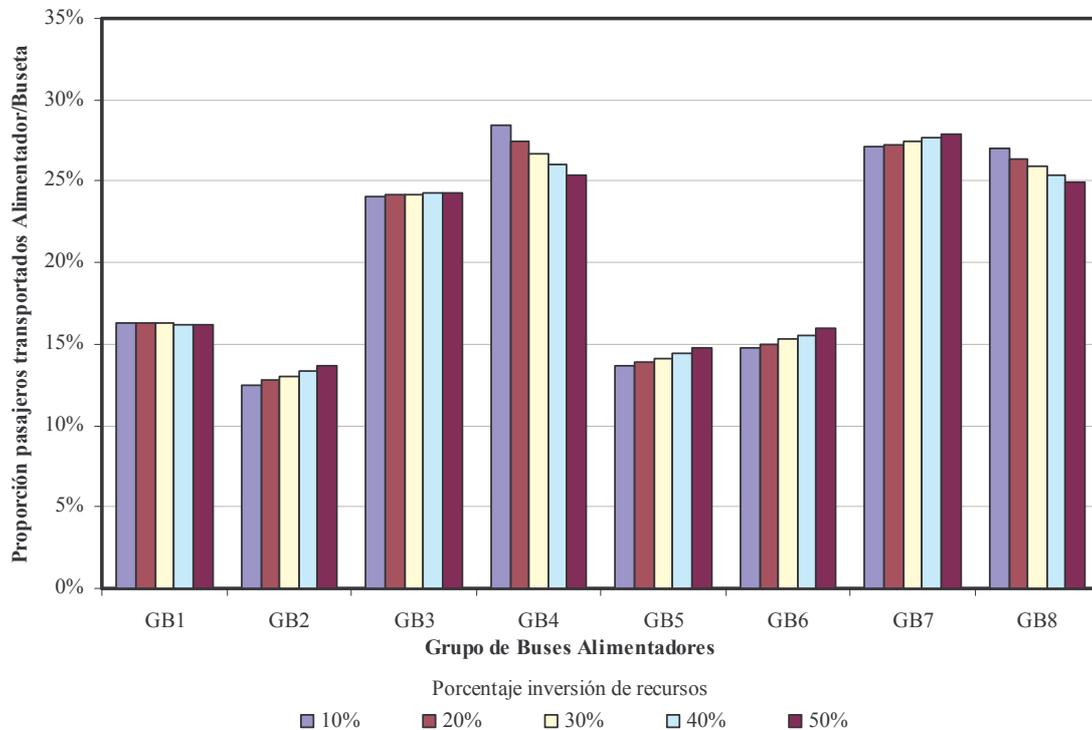


Figura 71. Inversión de recursos de Mantenimiento para la estructura E2 en función de la relación de pasajeros transportados por los buses alimentadores respecto a los transportados por la buseta

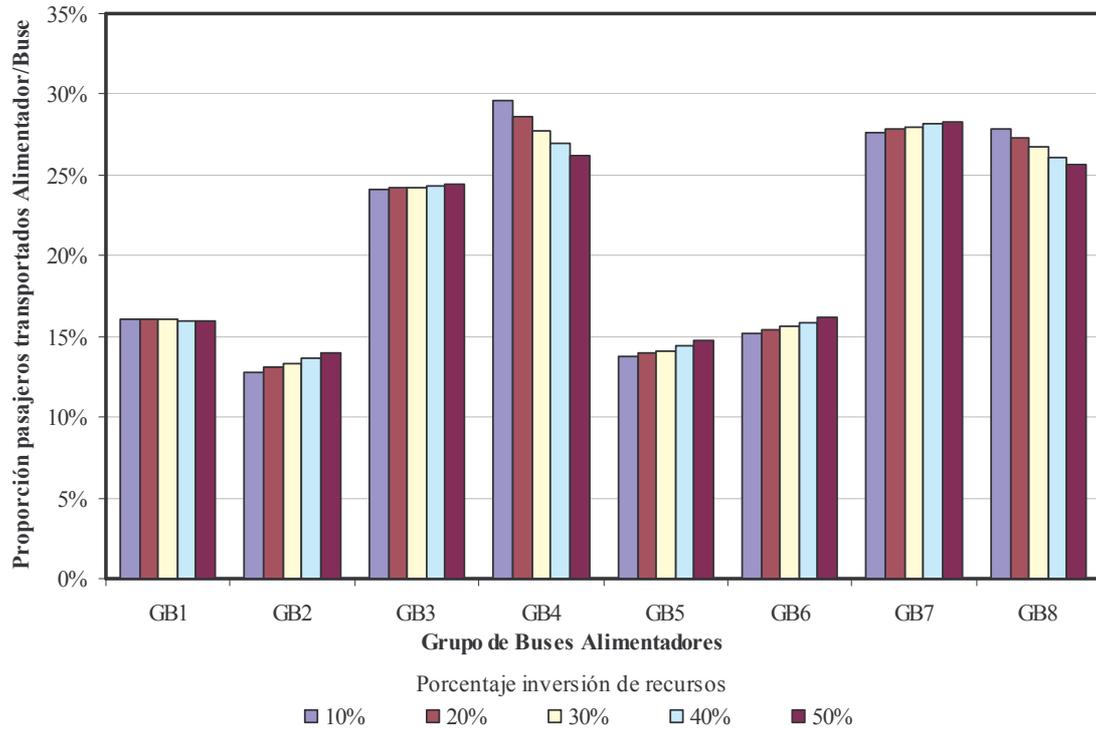


Figura 72. Inversión de recursos de Mantenimiento para la estructura E3 en función de la relación de pasajeros transportados por los buses alimentadores respecto a los transportados por la buseta

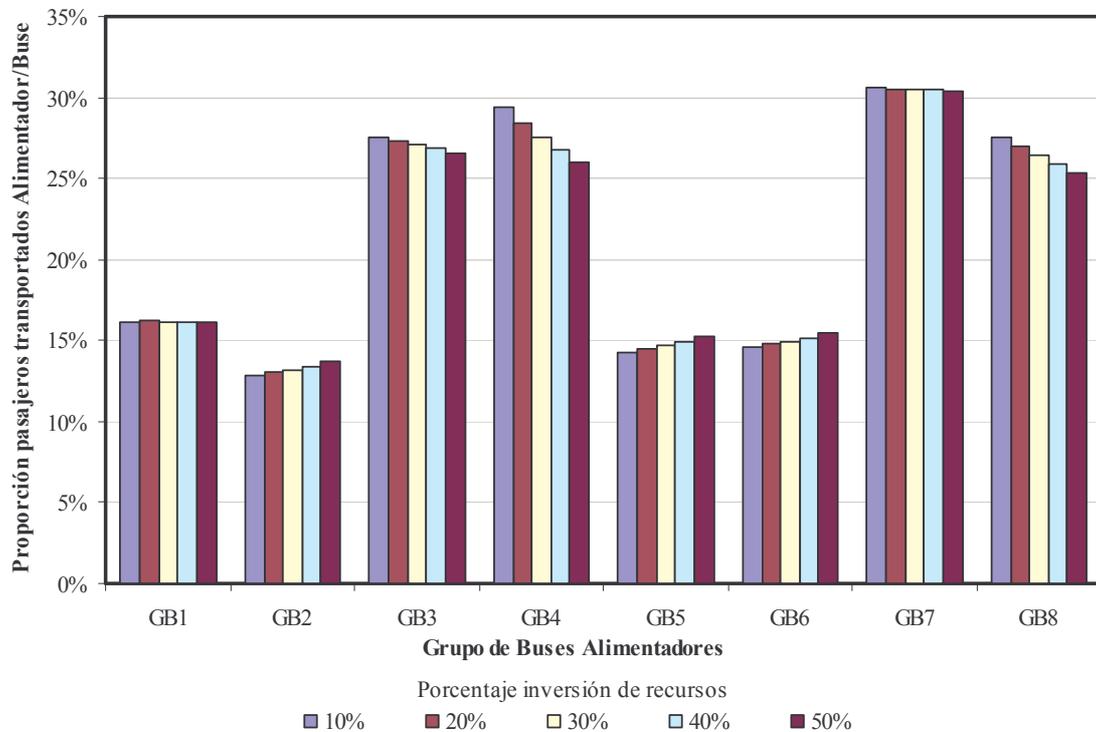


Figura 73. Inversión de recursos de Mantenimiento para la estructura E4 en función de la relación de pasajeros transportados por los buses alimentadores respecto a los transportados por la buseta

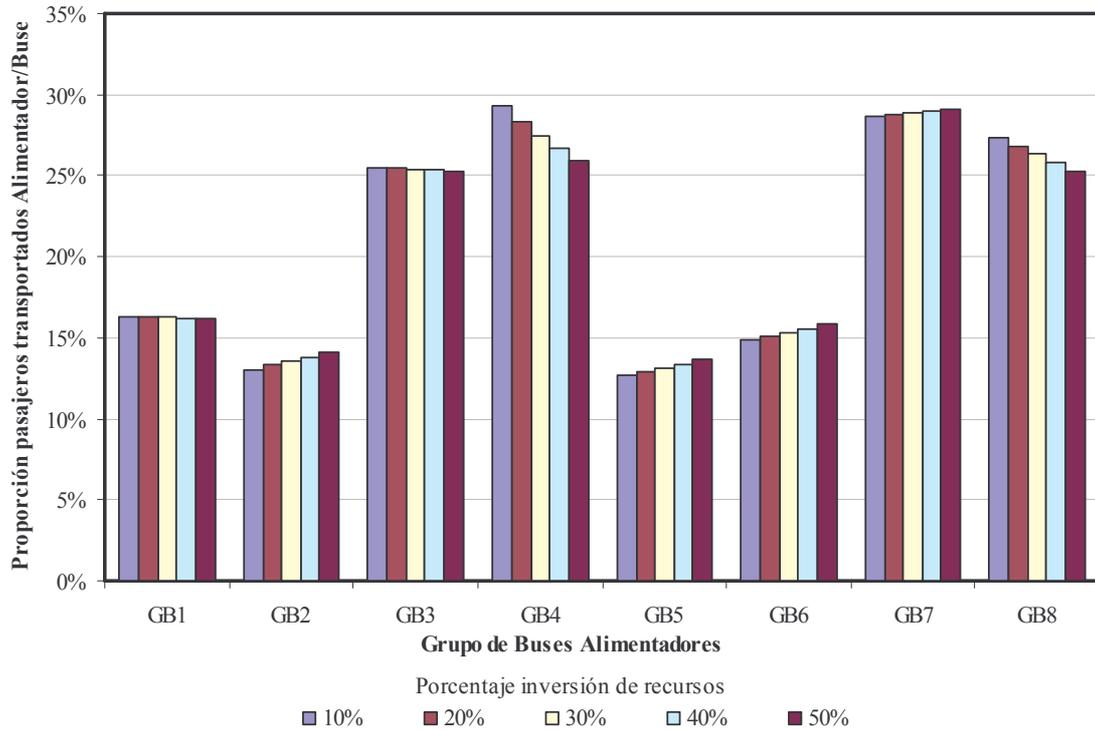


Figura 74. Inversión de recursos de Mantenimiento para la estructura E5 en función de la relación de pasajeros transportados por los buses alimentadores respecto a los transportados por la buseta

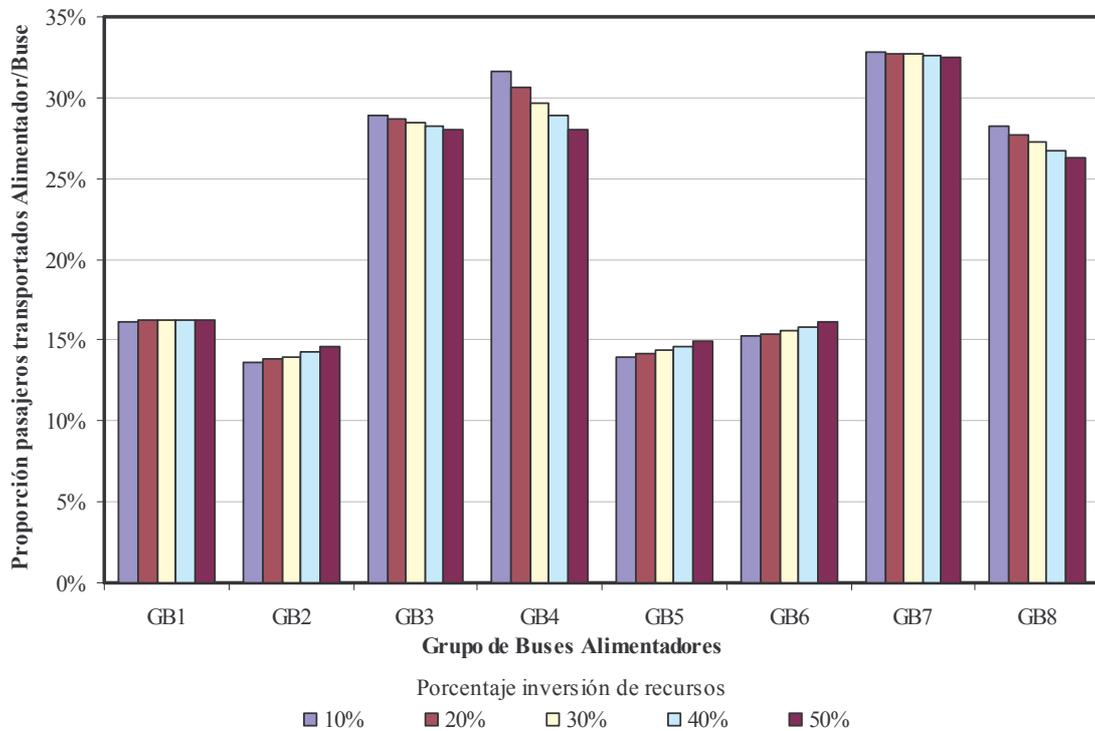


Figura 75. Inversión de recursos de Mantenimiento para la estructura E6 en función de la relación de pasajeros transportados por los buses alimentadores respecto a los transportados por la buseta

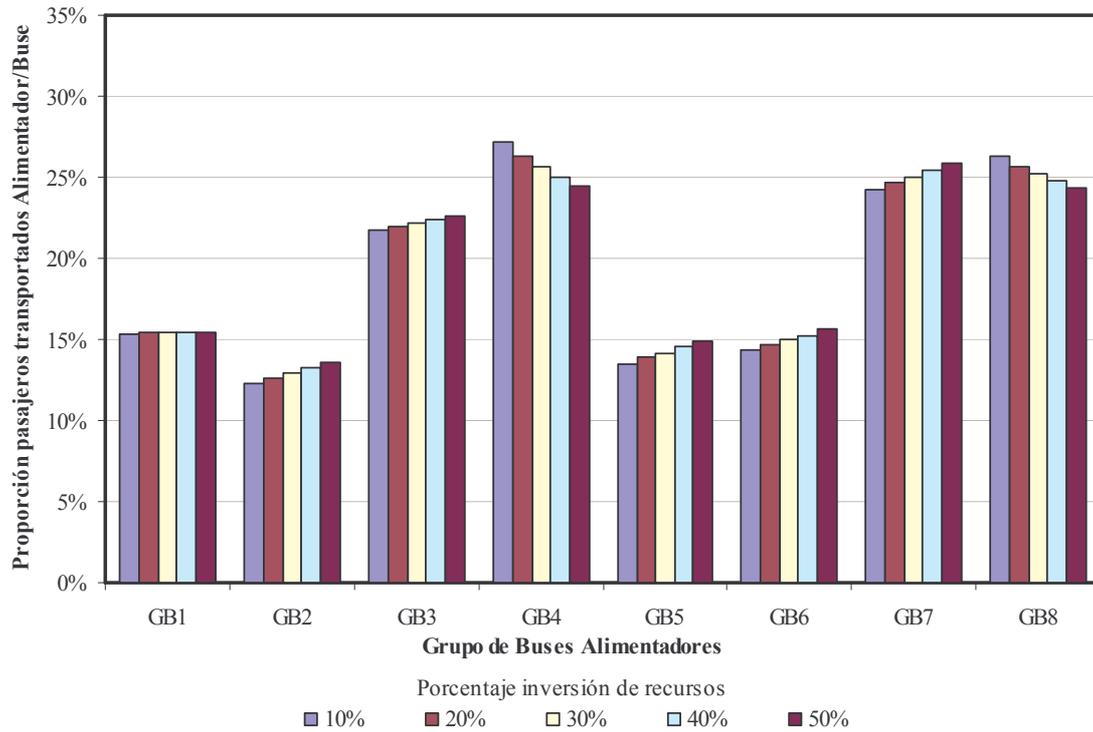


Figura 76. Inversión de recursos de Mantenimiento para la estructura E7 en función de la relación de pasajeros transportados por los buses alimentadores respecto a los transportados por la buseta

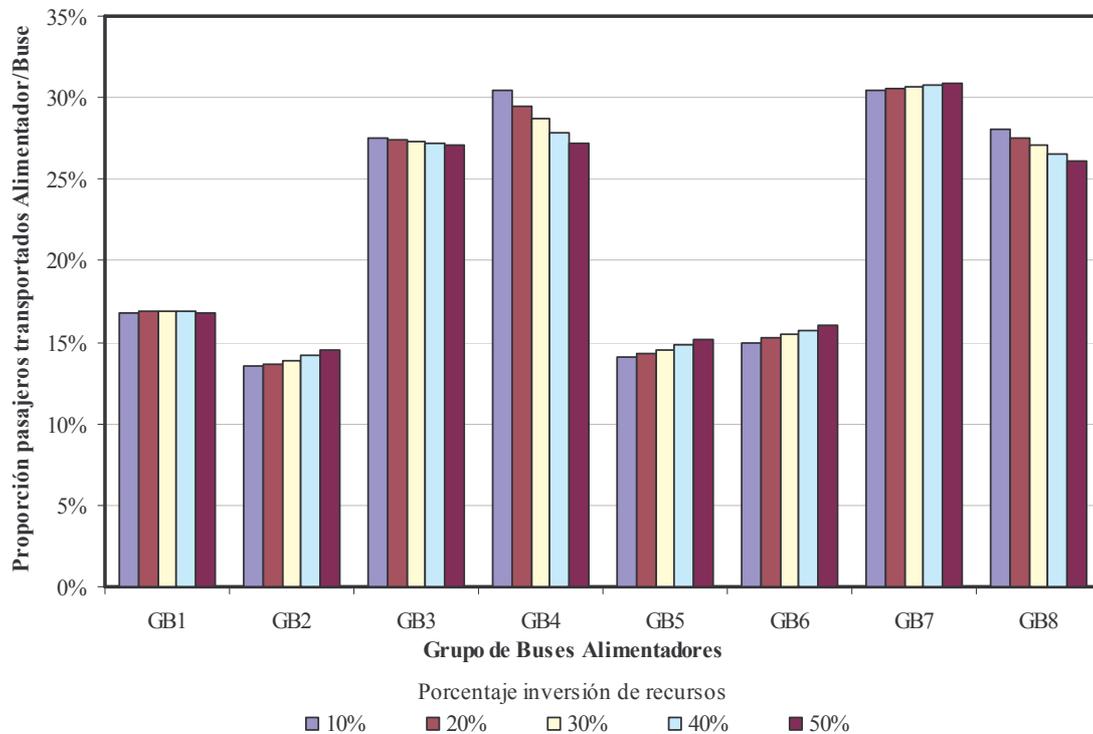


Figura 77. Inversión de recursos de Mantenimiento para la estructura E8 en función de la relación de pasajeros transportados por los buses alimentadores respecto a los transportados por la buseta

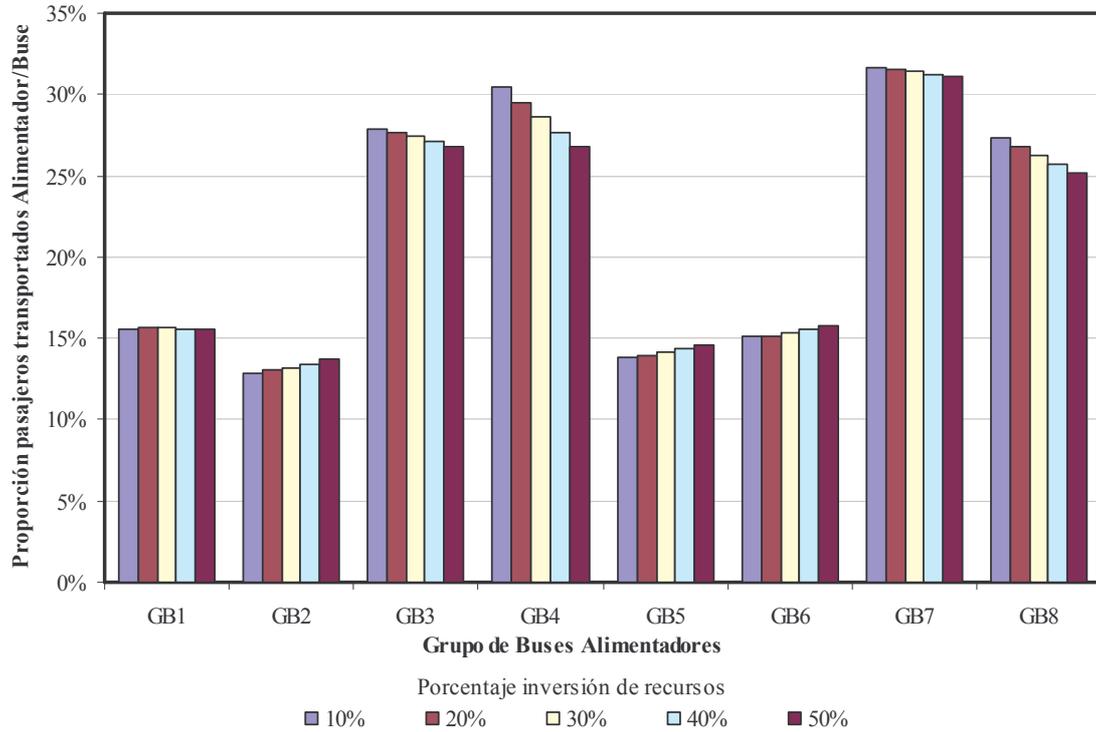


Figura 78. Inversión de recursos de Mantenimiento para la estructura E9 en función de la relación de pasajeros transportados por los buses alimentadores respecto a los transportados por la buseta

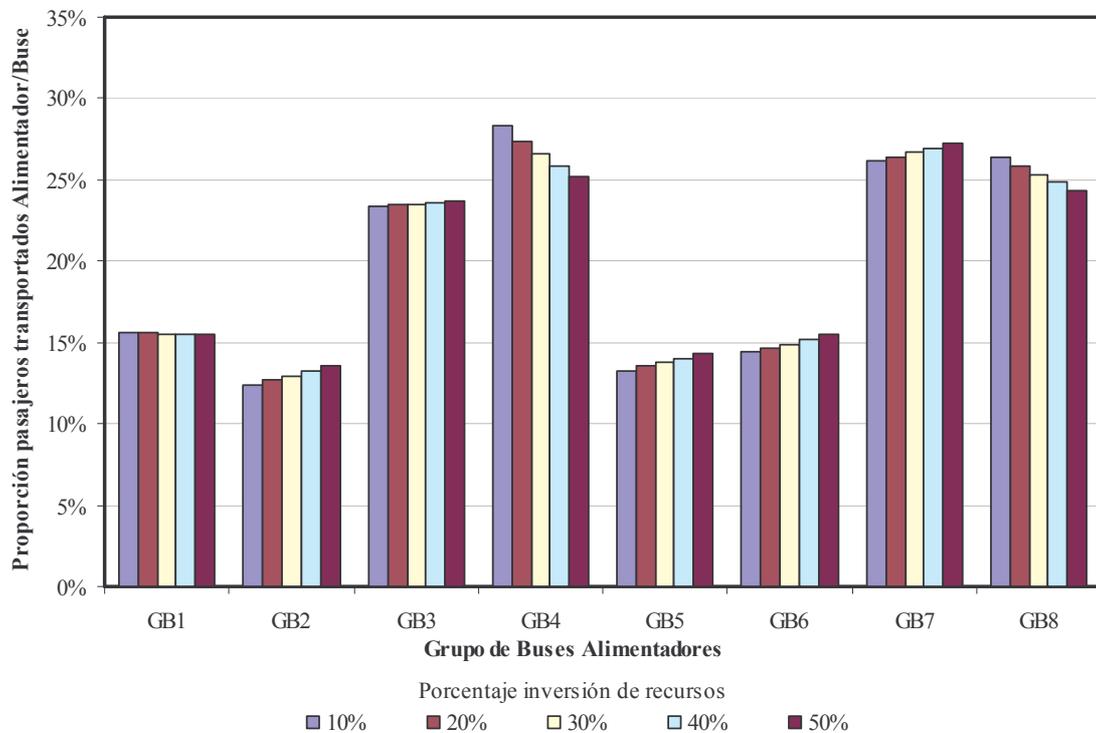


Figura 79. Inversión de recursos de Mantenimiento para la estructura E10 en función de la relación de pasajeros transportados por los buses alimentadores respecto a los transportados por la buseta



ALCALDIA MAYOR  
DE BOGOTÁ D.C.  
Instituto  
Desarrollo Urbano



Universidad de los Andes

---

**Anexo H. DIAGRAMAS FLUJO DE INVERSIÓN EN REHABILITACIÓN DE LAS  
DIFERENTES ESTRUCTURAS DE LOS BUSES ALIMENTADORES RESPECTO  
A LA BUSETA (GRUPO GB9)**



### DIAGRAMAS DE FLUJO ESTRUCTURA E1

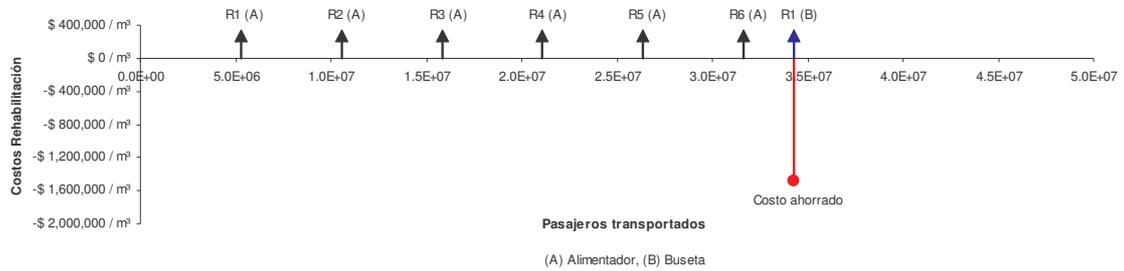


Figura 80. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E1 para el grupo de buses alimentadores GB1 y la buseta

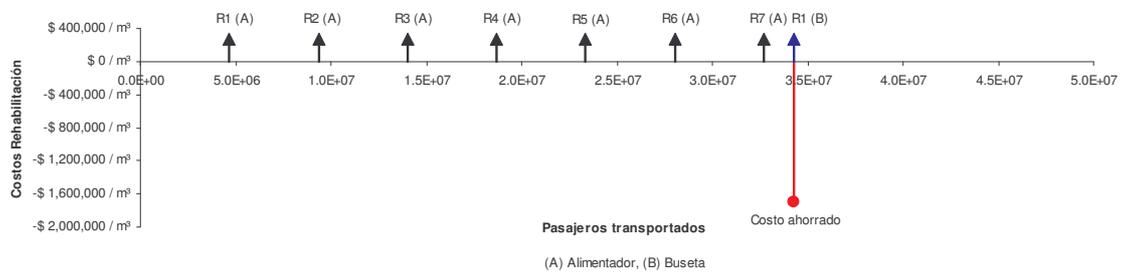


Figura 81. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E1 para el grupo de buses alimentadores GB2 y la buseta

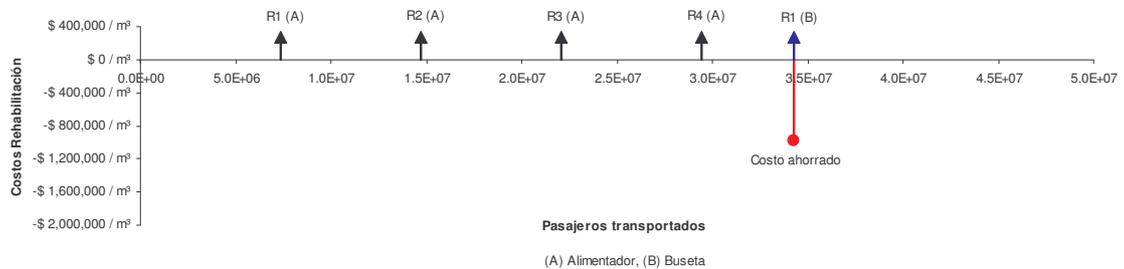


Figura 82. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E1 para el grupo de buses alimentadores GB3 y la buseta

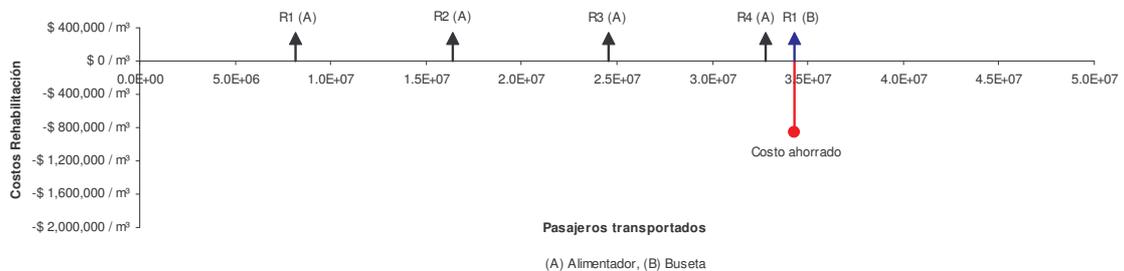


Figura 83. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E1 para el grupo de buses alimentadores GB4 y la buseta

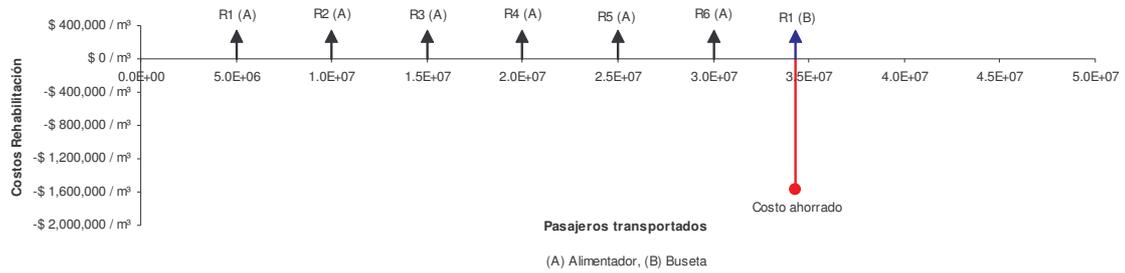


Figura 84. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E1 para el grupo de buses alimentadores GB5 y la buseta

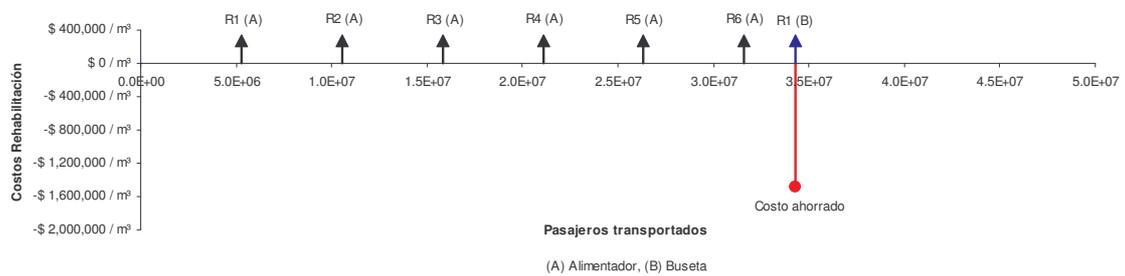


Figura 85. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E1 para el grupo de buses alimentadores GB6 y la buseta

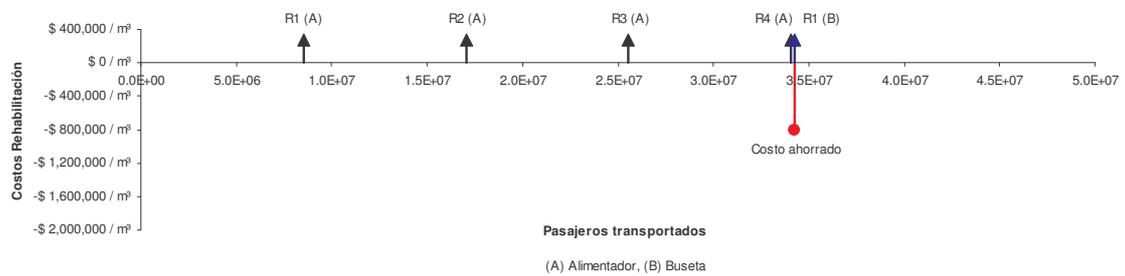


Figura 86. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E1 para el grupo de buses alimentadores GB7 y la buseta

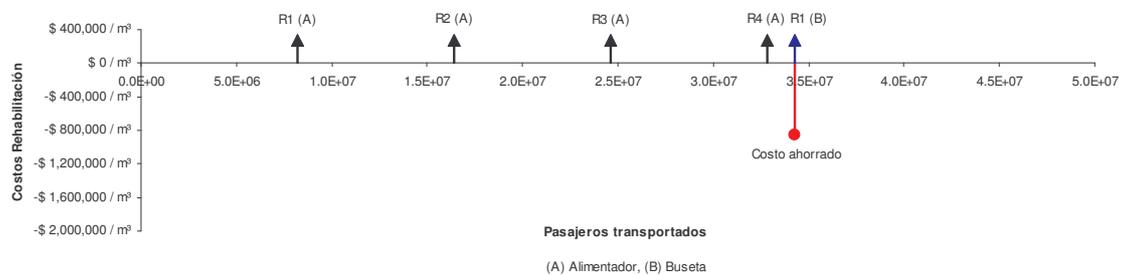


Figura 87. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E1 para el grupo de buses alimentadores GB8 y la buseta



## DIAGRAMAS DE FLUJO ESTRUCTURA E2

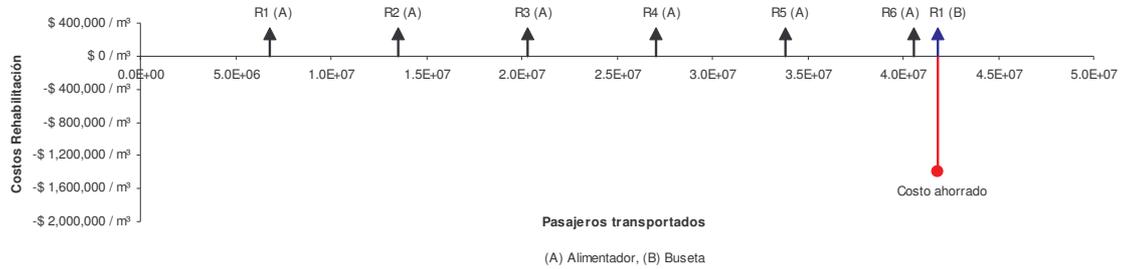


Figura 88. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E2 para el grupo de buses alimentadores GB1 y la buseta

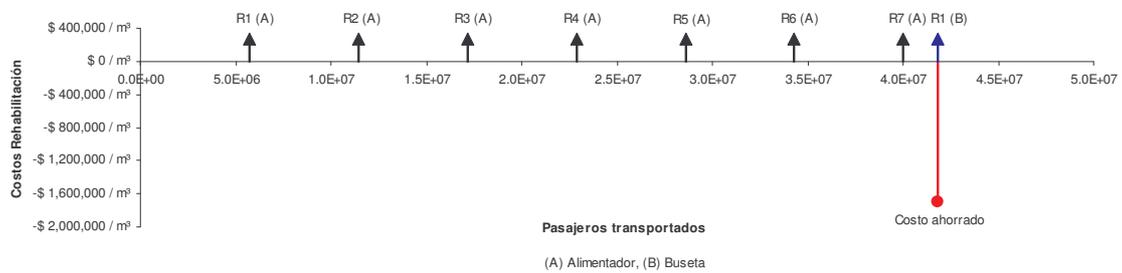


Figura 89. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E2 para el grupo de buses alimentadores GB2 y la buseta

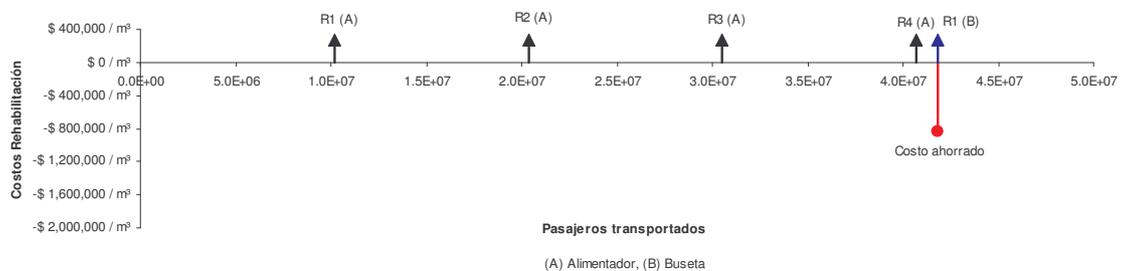


Figura 90. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E2 para el grupo de buses alimentadores GB3 y la buseta

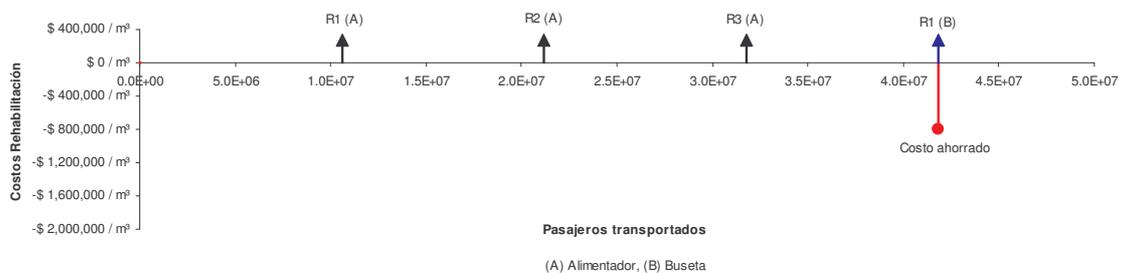


Figura 91. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E2 para el grupo de buses alimentadores GB4 y la buseta

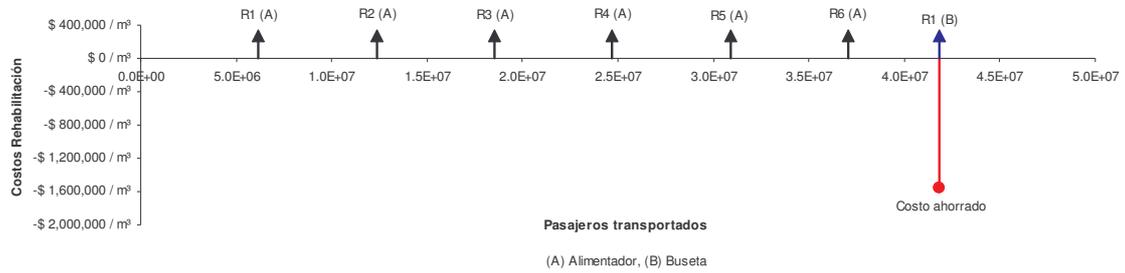


Figura 92. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E2 para el grupo de buses alimentadores GB5 y la buseta

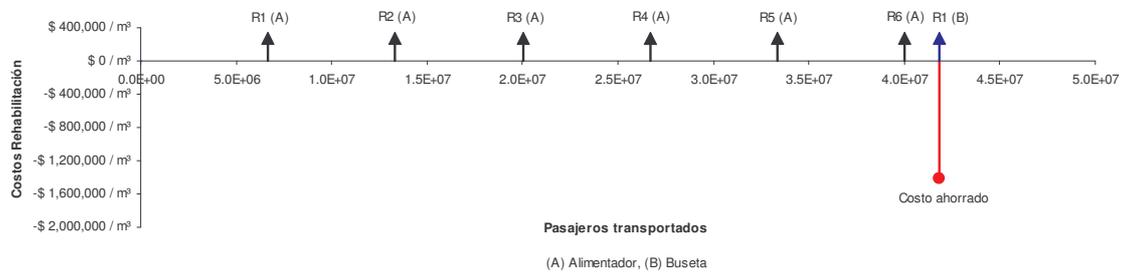


Figura 93. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E2 para el grupo de buses alimentadores GB6 y la buseta

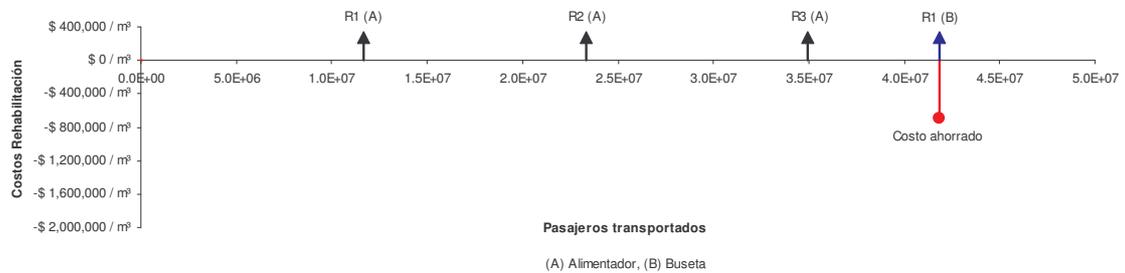


Figura 94. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E2 para el grupo de buses alimentadores GB7 y la buseta

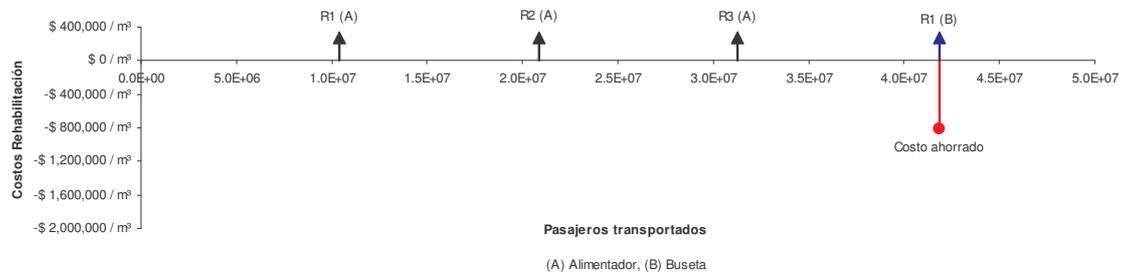


Figura 95. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E2 para el grupo de buses alimentadores GB8 y la buseta



### DIAGRAMAS DE FLUJO ESTRUCTURA E3

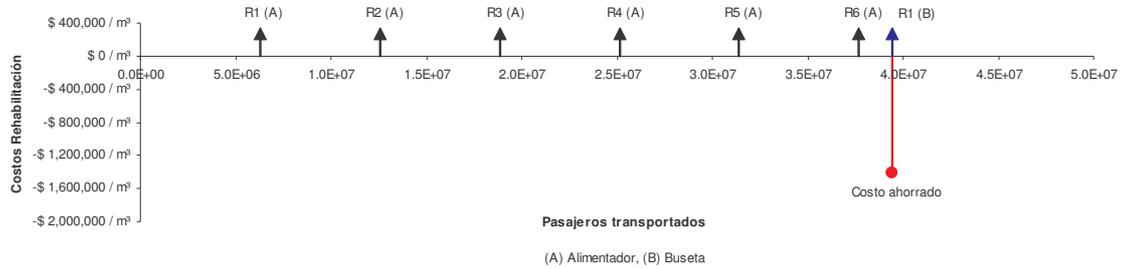


Figura 96. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E3 para el grupo de buses alimentadores GB1 y la buseta

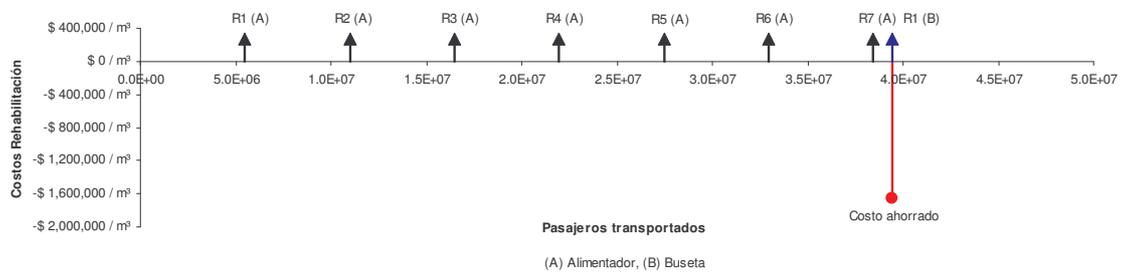


Figura 97. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E3 para el grupo de buses alimentadores GB2 y la buseta

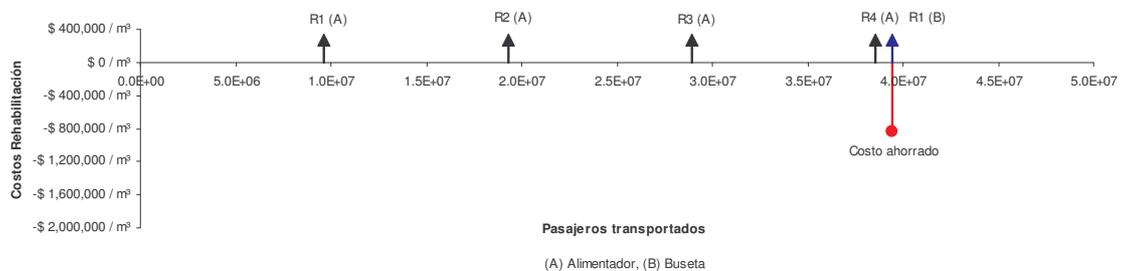


Figura 98. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E3 para el grupo de buses alimentadores GB3 y la buseta

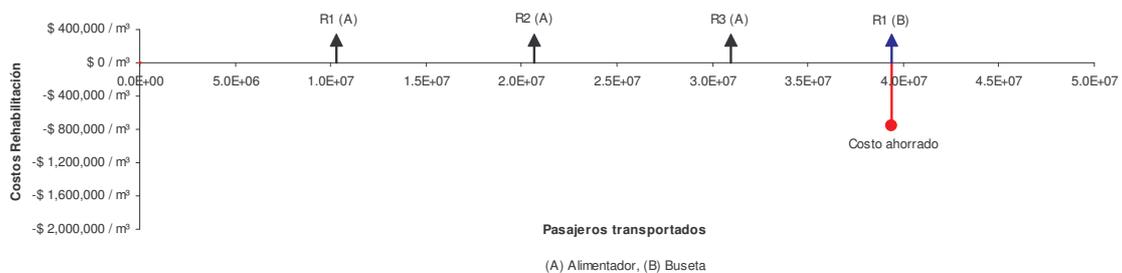


Figura 99. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E3 para el grupo de buses alimentadores GB4 y la buseta

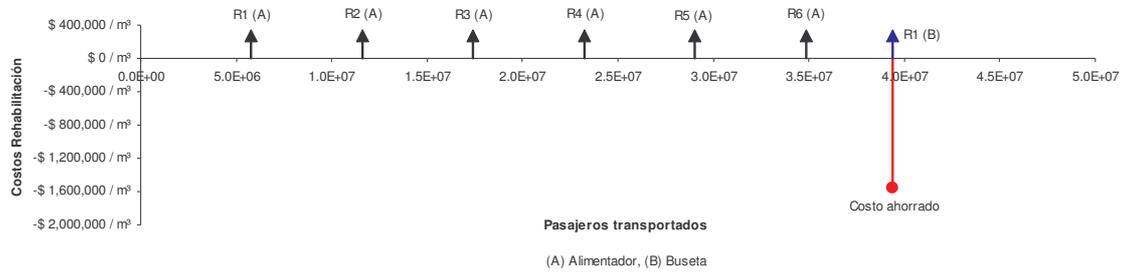


Figura 100. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E3 para el grupo de buses alimentadores GB5 y la buseta

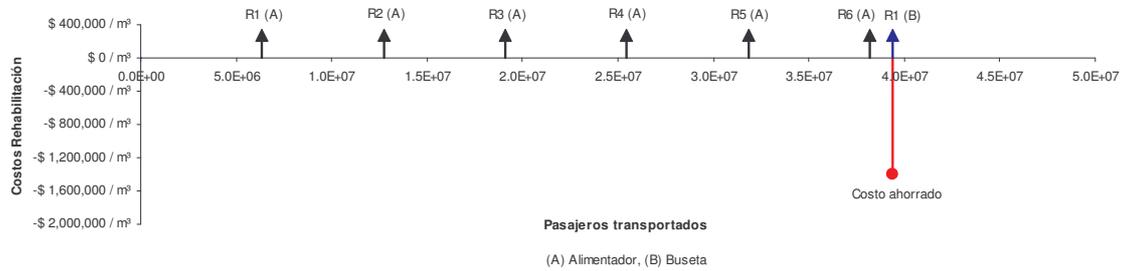


Figura 101. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E3 para el grupo de buses alimentadores GB6 y la buseta

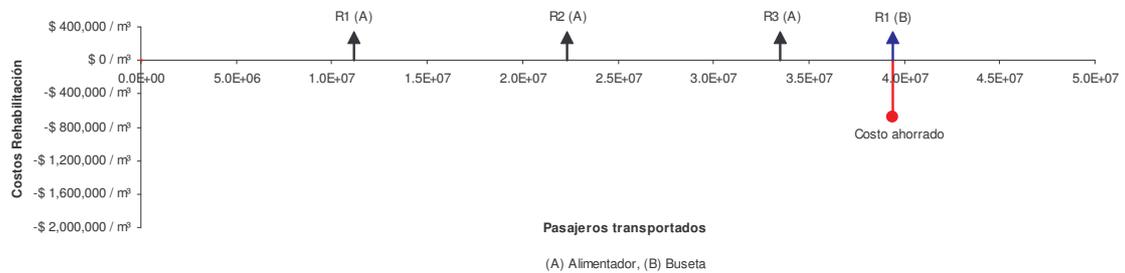


Figura 102. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E3 para el grupo de buses alimentadores GB7 y la buseta

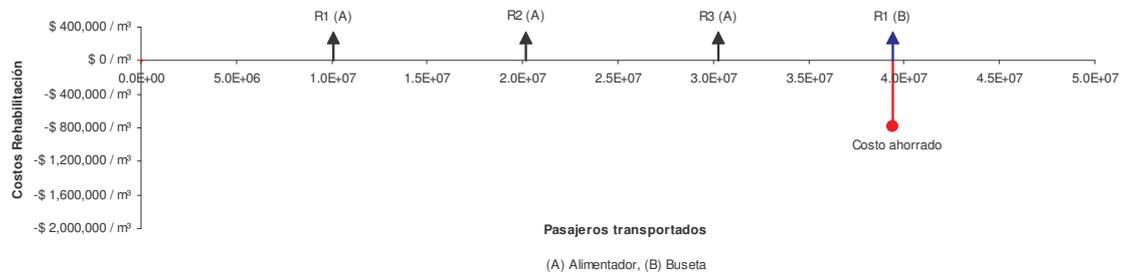


Figura 103. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E3 para el grupo de buses alimentadores GB8 y la buseta



## DIAGRAMAS DE FLUJO ESTRUCTURA E4

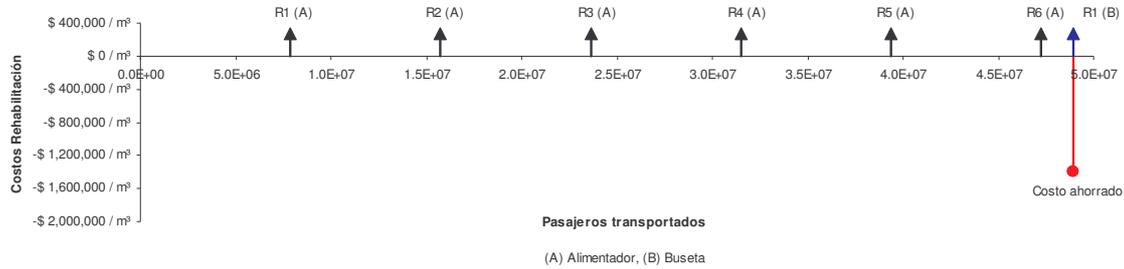


Figura 104. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E4 para el grupo de buses alimentadores GB1 y la buseta

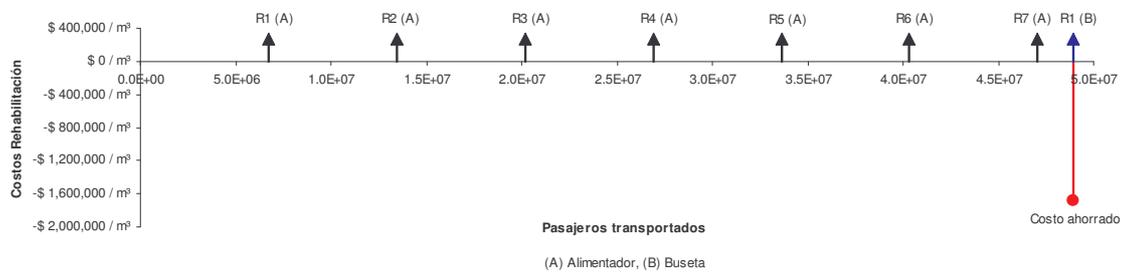


Figura 105. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E4 para el grupo de buses alimentadores GB2 y la buseta

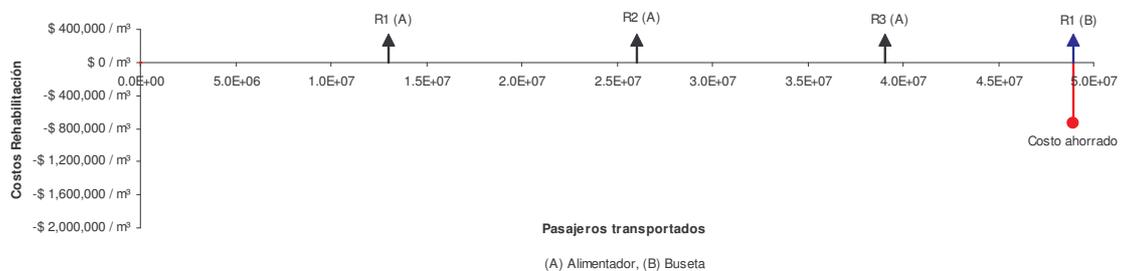


Figura 106. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E4 para el grupo de buses alimentadores GB3 y la buseta

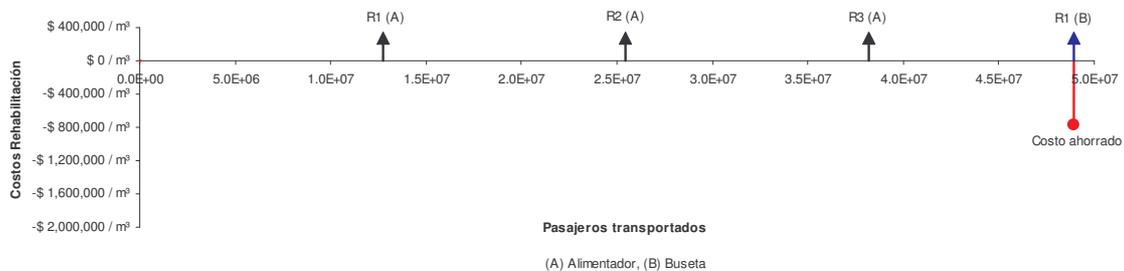
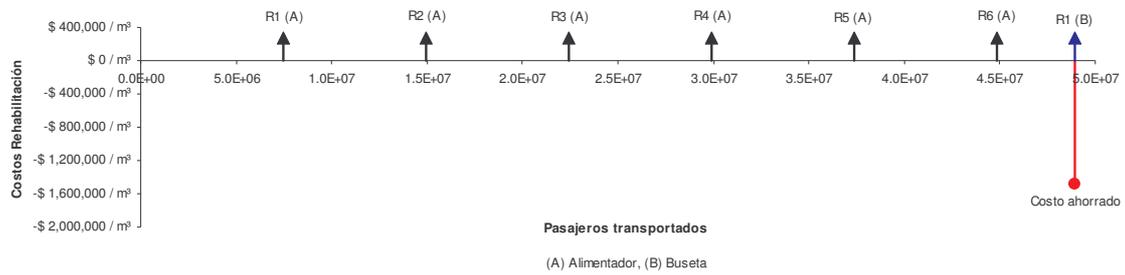
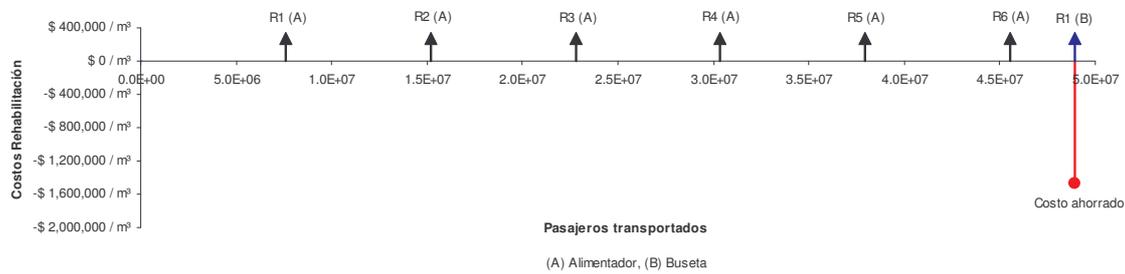


Figura 107. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E4 para el grupo de buses alimentadores GB4 y la buseta



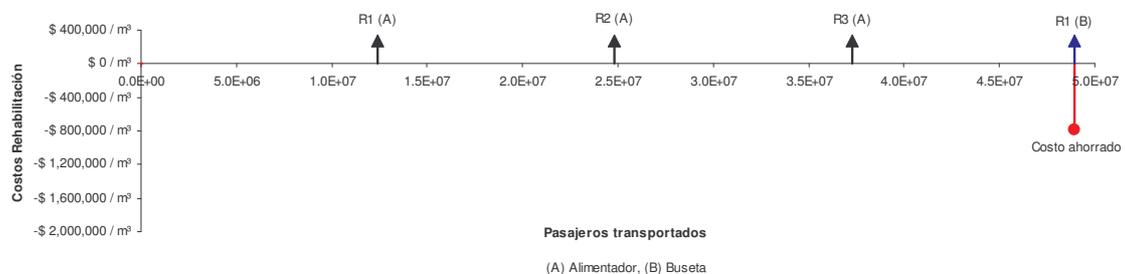
**Figura 108. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E4 para el grupo de buses alimentadores GB5 y la buseta**



**Figura 109. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E4 para el grupo de buses alimentadores GB6 y la buseta**



**Figura 110. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E4 para el grupo de buses alimentadores GB7 y la buseta**



**Figura 111. Diagrama flujo de inversión en rehabilitación de la estructura E4 para el grupo de buses alimentadores GB8 y la buseta**