

ENCUESTA DE CARGA

INFORME FINAL

Preparado por
PROGRAMA DE INVESTIGACIÓN EN INFRAESTRUCTURA VIAL

Nombre de los investigadores

Ing. Álvaro Ulloa

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica
Tel: (506) 2074994
Fax: (506) 2074440
E-mail: aulloa@lanamme.ucr.ac.cr

Ing. Gustavo Badilla

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica
Tel: (506) 2074994
E-mail: gbadilla@lanamme.ucr.ac.cr

Ing. Jaime Allen, MSc.

Universidad de California, Berkeley
Instituto de Estudios de Transporte
2041 Francisco Street #12, Berkeley, CA, USA 94709
Tel: (510) 6847648
E-mail: allenjaime@berkeley.edu

Denia Sibaja Obando

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,
San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica
Tel: (506) 2074994
E-mail: dsibaja@lanamme.ucr.ac.cr

San José, Costa Rica

Julio 2007

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación e importancia.....	4
1.3 Objetivo general.....	5
1.4 Objetivos específicos	5
CAPÍTULO 2 ETAPAS Y ACTIVIDADES DEL PROYECTO.....	6
2.1 Primera etapa del proyecto.....	6
2.1.1 Clasificación vehicular.....	6
2.1.2 Clasificación oficial.....	6
2.1.3 Reglamento.....	7
2.1.4 Clasificación preliminar.....	8
2.2 Segunda etapa del proyecto.....	10
2.2.1 Variables consideradas en el pesaje de camiones.....	10
2.2.2 Procedimiento de pesaje.....	13
2.3 Tercera etapa del proyecto.....	15
2.3.1 Muestreo.....	15
2.3.2 Clasificación de vehículos encuestados.....	21
2.3.3 Frecuencias.....	22
CAPÍTULO 3 INTERPRETACIÓN, EVALUACIÓN Y APLICACIÓN	27
3.1 Análisis de resultados.....	27
3.1.1 Factor camión.....	27
3.1.2 Ejes equivalentes de diseño.....	30
3.1.3 Análisis del TPD y distribución vehicular con el factor camión.....	33
3.1.4 Espectro de carga.....	38
CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES E INVESTIGACIÓN SUGERIDA.....	44
4.1 Conclusiones.....	44
4.2 Investigación sugerida.....	46
REFERENCIAS.....	48
ANEXO A: BIBLIOGRAFÍA.....	48
ANEXO B: EJEMPLO TEÓRICO DE LA INFLUENCIA DEL FACTOR CAMIÓN EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS.....	499

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama esquemático de la caracterización del tráfico (Ref. 2).....	4
Figura 2: Diagrama esquemático del proyecto de investigación	6
Figura 3: Pick-up modificado (liviano)	9
Figura 4: Camión con eje simple trasero (C2+).....	9
Figura 5: Camión con eje dual trasero (C2).....	9
Figura 6: Camión con eje tandem trasero (C3)	10
Figura 7: Tractocamión con semirremolque (T3-S2)	10
Figura 8: Bus con eje dual trasero (Bus-C2)	10
Figura 9: Error por suspensión	13
Figura 10: Medición	14
Figura 11: Pesaje efectuado por el Lanamme-UCR.....	14
Figura 12: Puntos de muestreo. Mapa elaborado por Lanamme-UCR	21
Figura A-1 Esquema diseño escenario A	52
Figura A-2 Esquema diseño escenario B	52
Figura A-3 Esquema diseño escenario C	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Peso máximo en ejes de tránsito	7
Tabla 2: Diagramas y descripción de los distintos tipos de ejes	8
Tabla 3: Errores por condiciones de pendiente	12
Tabla 4: Ponderación de demanda vehicular (Ref. 9)	16
Tabla 5: Ponderación del Índice Turístico (Ref. 9)	16
Tabla 6: Ponderación del Índice Productivo (Ref. 9)	17
Tabla 7: Ponderación del Índice social de conectividad (Ref. 9)	17
Tabla 8: Tabla resumen de características de rutas evaluadas (Ref. 9)	18
Tabla 9: Frecuencia de vehículos encuestados	22
Tabla 10: Frecuencia de vehículos encuestados en la Ruta 1 – General Cañas (peaje)	23
Tabla 11: Frecuencia de vehículos encuestados en la Ruta 1 – Bernardo Soto Naranjo (peaje).....	23
Tabla 12: Frecuencia de vehículos encuestados en la Ruta 1 – Bernardo Soto Esparza	24
Tabla 13: Frecuencia de vehículos encuestados en la Ruta 2 – Florencio del Castillo	24
Tabla 14: Frecuencia de vehículos encuestados en la Ruta 2 – Pérez Zeledón	25
Tabla 15: Frecuencia de vehículos encuestados en la Ruta 27 – Próspero Fernández	25
Tabla 16: Frecuencia de vehículos encuestados en la Ruta 32 – Braulio Carrillo	26
Tabla 17: Frecuencia de vehículos encuestados en la Ruta 140 – San Carlos	26
Tabla 18: Factores camión por ruta bajo estudio	28
Tabla 19. Comparación de factores camión típicos y los obtenidos en la encuesta de carga	29
Tabla 20. Factor camión para las rutas bajo estudio con cargas controladas	30
Tabla 21. TPD y distribución vehicular para las zonas de estudio	34
Tabla 22. Factores camión por ruta bajo estudio	45
Tabla B-1. Comparación de ESALs reales, CONAVI y con cargas controladas	49
Tabla B-2. ESALs para el presente año para cada escenario	50
Tabla B-3. Características estructurales de las capas	51
Tabla B-4. ESALs de diseño para cada escenario	51
Tabla B-5. Resumen de consideraciones de diseño	51
Tabla B-6. Diseño escenario A	52
Tabla B-7. Diseño escenario B	52
Tabla B-8. Diseño escenario C	53

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Factor camión por zona de estudio para carga liviana	28
Gráfico 2. Factor camión por zona de estudio para carga pesada	29
Gráfico 3. Comparación de ejes equivalentes por ruta de estudio y factor camión	31
Gráfico 4. Comparación de ejes equivalentes de diseño vs vida útil del pavimento	32
Gráfico 5. Tránsito promedio diario por zona de estudio	34
Gráfico 6. TPD y distribución vehicular por zona de estudio	35
Gráfico 7. Relación del factor camión y el TPD por zona de estudio	36
Gráfico 8. Espectro de carga para la Ruta 1 – General Cañas (peaje)	39
Gráfico 9. Espectro de carga para la Ruta 1 – Bernardo Soto Naranjo (peaje)	39
Gráfico 10. Espectro de carga para la Ruta 1 – Bernardo Soto Esparza	40
Gráfico 11. Espectro de carga para la Ruta 2 – Florencio del Castillo (peaje)	40
Gráfico 12. Espectro de carga para la Ruta 2 – Pérez Zeledón	41
Gráfico 13. Espectro de carga para la Ruta 27 – Próspero Fernández (peaje)	41
Gráfico 14. Espectro de carga para la Ruta 32 – Próspero Fernández (peaje)	42
Gráfico 15. Espectro de carga para la Ruta 140 – San Carlos	42

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La infraestructura vial de un país constituye un pilar fundamental en el desarrollo real del mismo, es por esto que se debe dar especial énfasis en implementar y mejorar día a día la calidad de las obras y sobre todo asegurar el cumplimiento de la vida útil de las mismas.

Es con esta ideología, que diversos entes a nivel mundial, han desarrollado diversos mecanismos para controlar tanto la calidad de los materiales a utilizar como los diseños de la infraestructura tanto para construcciones nuevas como para rehabilitaciones. Por ende desde la aparición de la Guía de Diseño de la AASHTO en 1993 (ver Ref. 1) se fijó la necesidad de tomar en cuenta las cargas reales que se solicitaban al pavimento.

De aquí en adelante, se hace necesario contar con una encuesta de carga propia de cada país para poder determinar el efecto tangible de las cargas aplicadas a las estructuras. Para cuantificar este fenómeno, se requieren una serie de datos que se subdividen a su vez en niveles de precisión (ver Ref. 2) para que el ingeniero pueda estimar las características del tráfico bajo las cuales la carretera va a soportar:

Nivel 1: Existe un muy buen conocimiento de las características del tráfico tanto en el pasado como en el futuro. Requiere un registro y análisis histórico del volumen y carga específica de cada zona en particular.

Nivel 2: Existe un conocimiento medio de las características del tráfico tanto en el pasado como en el futuro. Se debe conocer cualquier variación en el volumen y cargas de tráfico a nivel estacional (temporal).

Nivel 3: Existe un conocimiento pobre de las características del tráfico tanto en el pasado como en el futuro. Se tiene muy poca información del volumen y las cargas.

Esta distinción se hace producto de que los volúmenes y pesos del tráfico pueden variar considerablemente de carretera a carretera e inclusive de tramo en tramo a lo largo de la misma.

Es importante aclarar, que se utiliza información tipo 1 y 2 para diseñar carreteras que eventualmente tendrán alto volumen o bien que sea una ruta muy importante de trasiego de mercancía o turismo.

Supuestos en la caracterización del módulo de tráfico en la Guía de Diseño:

1. La distribución de carga por eje normalizada según el tipo de eje para cada clase de vehículo permanece constante año a año a menos que existan cambios políticos o económicos que afecten la cantidad y tipo de cargas. El volumen evidentemente puede variar año a año.
2. La distribución de carga por eje normalizada según el tipo de eje y clase de vehículo, y la distribución del volumen del tráfico no cambia a nivel diario u horario entre fin de semana y entre semana o entre noche y día para la misma estación (temporada).

Estimación del volumen de tránsito TPDA

Se requiere hacer el análisis en ambos sentidos del proyecto según los siguientes niveles:

- **Nivel 1:** Obtención del TPDA mediante sistemas WIM (peso en movimiento), AVC (clasificación vehicular automática), estimación calibrada in situ o con un modelo de generación de viajes. Además el año base de TPDA es el promedio de toda la información precisa de los últimos 3 años; tomando en cuenta la tasa de crecimiento con respecto al año base.
- **Nivel 2:** Se estima con base en datos regionales (con características similares de uso del suelo y flujo vehicular) de conteos vehiculares, estimación regional calibrada in situ o bien modelos de generación de viajes de regiones cercanas y similares. El año base se toma como el promedio de toda la información de los últimos 3 años.
- **Nivel 3:** Se estima a partir de conteos vehiculares y una estimación del porcentaje de vehículos esperado. Se permite estimar con base en la experiencia local. El año base es el promedio de los últimos 3 años con datos.

Ajustes de volumen de tránsito

Se requieren los siguientes factores de ajuste para caracterizar el tránsito con base en la información del tráfico para el año base:

- a) Factores de ajuste mensuales: volumen mensual de una clase de vehículo con respecto al volumen anual de esa clase.
- b) Factores de distribución del tráfico por tipo de vehículo: se debe elegir la distribución con respecto al año base que mejor represente el flujo de tránsito de diseño.
- c) Factores de distribución horaria de vehículos: medido en forma continua por 24 horas en distintos días del año.
- d) Factores de crecimiento vehicular: obtenidos de datos continuos de años anteriores.

Pasos a seguir para tomar en cuenta el tráfico en la Guía de Diseño AASHTO 2002:

- 1) Determinar los incrementos en el flujo vehicular (horarios o mensuales).
- 2) Determinar el tránsito promedio diario anual para el año base.
- 3) Determinar la distribución normalizada del tipo de vehículo para el año base.
- 4) Determinar el número de ejes por tipo de eje para cada clase de vehículo.
- 5) Determinar el espectro de carga normalizado por eje para cada tipo de eje y clase de vehículo.
- 6) Revisar según el tipo y nivel de estimación del tránsito los incrementos para cada año sucesivo en el periodo de diseño o análisis (tasa de crecimiento).
- 7) Multiplicar el espectro de carga normalizado por eje y el espectro normalizado según la clase de vehículo por el incremento del tránsito para determinar el número total de aplicaciones de ejes dentro de cada grupo de ejes para cada tipo de eje por hora de cada mes, de cada año en el periodo de diseño o análisis.
- 8) Especificar los detalles de las cargas de los ejes y llantas.

A continuación se presenta un diagrama que muestra en forma esquemática los ocho pasos a tomar en cuenta a la hora de caracterizar el tráfico, ya sea en el periodo de diseño o de análisis específico.

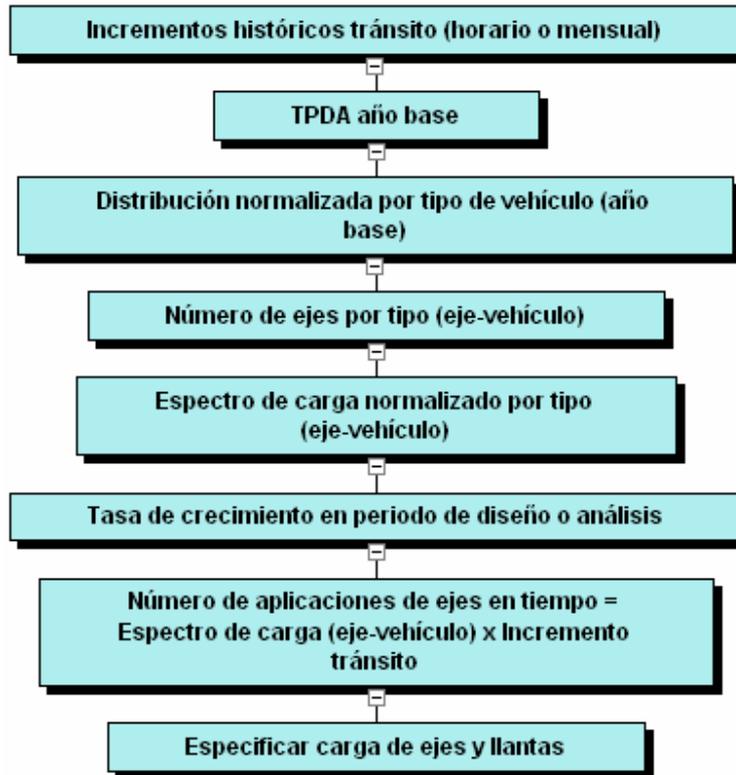


Figura 1: Diagrama esquemático de la caracterización del tráfico (Ref. 2).

1.2 Justificación e importancia

En Costa Rica se han presentado en los pavimentos fallas prematuras durante la vida útil de diseño, debido en gran parte a cargas de tránsito mayores a las que se prevén en el diseño final de la obra de infraestructura vial. Esta problemática tiene como una de sus principales causas que la normativa que regula este tema (Reglamento de pesos y dimensiones de Costa Rica) no está acorde con las cargas reales a las que están sometidos los pavimentos en Costa Rica, ya sea por falta de control o por especificaciones poco realistas.

Además, en la actualidad el país no utiliza los puestos de pesaje ubicados en ciertas rutas del país, por lo que la falta de información imposibilita el seguimiento adecuado para contar con una base de datos representativa de los modelos de cargas reales que transitan por las carreteras nacionales. La información con que se cuenta, no es la idónea

pues en los últimos años se presentan aumentos significativos en las cargas transportadas por los vehículos de carga. También se ha presentado un incremento en la flota de buses para el transporte público, que tienen mayores dimensiones y pesos que los anteriores, por ende se evidencia la necesidad de solventar esta carencia de información con datos actuales y fidedignos.

El presente proyecto de investigación formula una herramienta de análisis y de recolección de datos actualizados para hacer una clasificación de la flota vehicular, por tipos de vehículos que cumplan características similares, tanto en el uso autorizado como en las configuraciones de ejes y rango de cargas de los mismos. Por lo tanto, se pone en manifiesto la gran importancia de contar con información real y representativa que permita al ingeniero diseñar un pavimento tomando en cuenta los factores camión o bien el espectro de carga, ambos de la mano con una guía de diseño, ya sea nacional o internacional.

1.3 Objetivo general

Generar una encuesta de carga que sirva como insumo para formular la Guía de Diseño de Pavimentos de Costa Rica, de la mano con el Manual de Especificaciones Técnicas de Materiales para Costa Rica.

1.4 Objetivos específicos

- ❖ Generar un espectro de carga preliminar para los distintos puntos estudiados.
- ❖ Generar los factores camión por tipo de vehículo según la zona bajo estudio y posteriormente asociarlos con el tránsito promedio diario.
- ❖ Determinar la clasificación vehicular de los puntos analizados en ambos sentidos de viaje.
- ❖ Determinar frecuencias de carga para diferentes ejes según la zona de estudio y el sentido de viaje.

CAPÍTULO 2 ETAPAS Y ACTIVIDADES DEL PROYECTO

Con la finalidad de cumplir con los objetivos establecidos en el presente proyecto de investigación se planteó el siguiente esquema o diagrama de investigación:

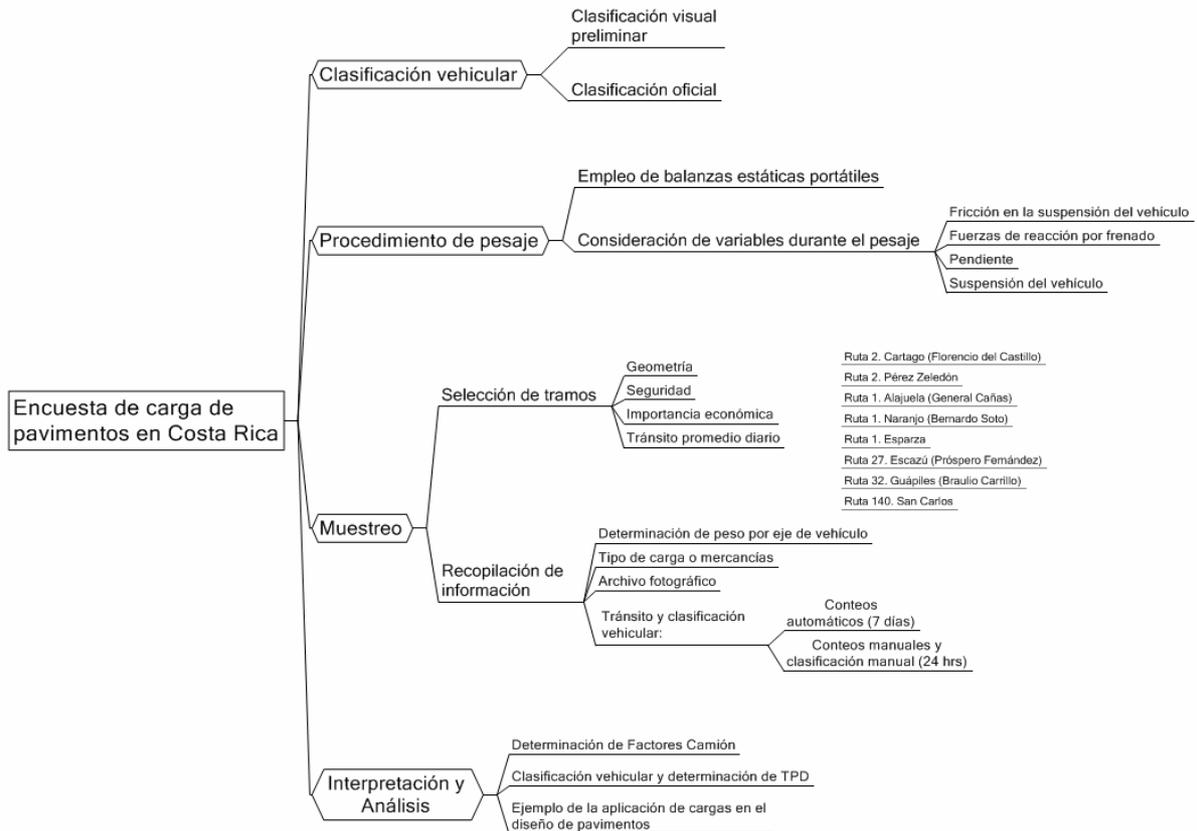


Figura 2: Diagrama esquemático del proyecto de investigación

2.1 Primera etapa del proyecto

2.1.1 Clasificación vehicular

En esta etapa se recopiló información de distintas fuentes en lo que respecta a las diferentes clasificaciones vehiculares y sobre pesos de los vehículos.

2.1.2 Clasificación oficial

La clasificación oficial, que maneja la Dirección de Planificación Sectorial del MOPT consiste en lo siguiente:

Liviano: automóviles para personas, jeeps, vans.

Buses: todos los buses que tienen doble llanta en la parte de atrás (hay buses sin doble llanta, se tienen que tomar en cuenta por separado).

Carga liviana: pick-ups, carros acondicionados para cargas pequeñas. Se refiere a la clasificación usada, no necesariamente a vehículos que tienen la placa carga liviana.

2 ejes: incluye todos los camiones con dos ejes, doble llanta en la parte de atrás.

3 ejes: incluye todos los camiones con tres ejes, dos ejes de doble llanta en la parte de atrás.

5 ejes: incluye tractocamiones (furgones), dos parejas de dos ejes con doble llanta.

2.1.3 Reglamento

En el diario oficial de Costa Rica La Gaceta No.15 del miércoles 19 de enero del 2005, se modifica el Reglamento de Circulación por Carretera con base en el peso y las dimensiones de los vehículos de carga, en este documento se presentan tablas con las normativas para el peso máximo para cada eje de tránsito. A continuación se presenta un resumen de la información más importante.

Descripción de eje	Peso máximo en toneladas	Tolerancia báscula en toneladas
Eje simple delantero	6,0	0,5
Eje simple trasero	6,0	0,5
Eje simple dual	10,0	0,5
Eje doble, llanta simple	13,0	0,5
Eje doble, llantas mixtas	15,0	0,5
Eje doble, tándem	16,5	0,5
Eje triple, llantas simples	16,5	0,5
Eje triple, 2D-1S	20,0	0,5
Eje triple, trídem	23,0	0,5

Tabla 1: Peso máximo en ejes de tránsito

CONFIGURACIÓN TIPO DE EJES / LLANTAS	DESCRIPCIÓN
	Eje simple delantero Llanta simple
	Eje simple (no delantero) Llanta simple
	Eje simple Llantas dobles o duales
	Eje doble (tandem) Llanta simple
	Eje doble (tandem) Llantas mixtas
	Eje doble (tandem) Llantas dobles o duales
	Eje triple (tridem) Llanta simple
	Eje triple (tridem) Llantas mixtas
	Eje triple (tridem) Llantas dobles o duales
	Ejes mixtos Llantas mixtas
	Ejes mixtos Llantas dobles o duales

Tabla 2: Diagramas y descripción de los distintos tipos de ejes

2.1.4 Clasificación preliminar

Se realizó un muestreo fotográfico en la Ruta Nacional No. 2, en el sector de San Pedro de Montes de Oca. Por medio de este muestreo se obtuvieron las principales clasificaciones consideradas como las más representativas en el país. A continuación se presentan algunas fotografías que ilustran las principales clasificaciones. Con esto se pretende hacer un catálogo con las diferentes categorías, para facilitar al encuestador la clasificación de los vehículos muestreados.



Figura 3: Pick-up modificado (liviano)



Figura 4: Camión con eje simple trasero (C2+)



Figura 5: Camión con eje dual trasero (C2)

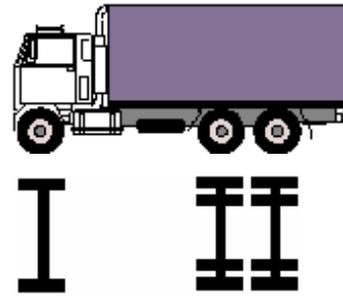


Figura 6: Camión con eje tandem trasero (C3)

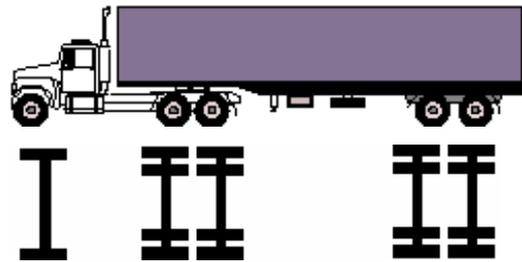


Figura 7: Tractocamión con semirremolque (T3-S2)

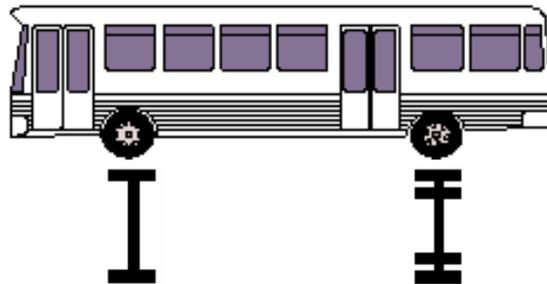


Figura 8: Bus con eje dual trasero (Bus-C2)

2.2 Segunda etapa del proyecto

2.2.1 Variables consideradas en el pesaje de camiones

i. Por la fricción en la suspensión del vehículo:

No existe influencia de la fricción en la suspensión en vehículos de dos ejes.

ii. Por las fuerzas de reacción por el frenado:

Dependiendo de la forma en que las fuerzas sean transmitidas al chasis del vehículo, los ejes del mismo pueden sufrir esfuerzos de tensión adicionales si los frenos no son liberados.

Con el fin de prevenir cualquier efecto desfavorable es necesario que el conductor libere el freno antes de que la lectura de las balanzas sea registrada.

Si la condición del nivel del terreno es tal que no se puedan liberar completamente los frenos del vehículo, se debe colocar el mismo en posición de pesaje, accionar la primera marcha y detener el motor completamente, con el fin de evitar cualquier desplazamiento longitudinal.

iii. Por pendiente:

La pendiente tiene dos posibles efectos:

- El declive del vehículo causa un desplazamiento en el centro de gravedad y por lo tanto un desplazamiento de la carga hacia las ruedas más bajas.
- El declive de la balanza conlleva a una medición menor ya que las balanzas únicamente registrarán el componente de fuerza perpendicular a la plataforma de la balanza. Sin embargo, este efecto es muy pequeño, ya que en una pendiente de un 5% el error asociado es de -0.12% del peso medido.

En todo caso, realizar mediciones sobre superficies con pendiente muestra diferentes resultados que las mediciones realizadas sobre superficies planas. La siguiente tabla muestra la influencia de dicha condición de pendiente:

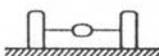
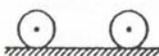
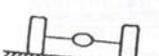
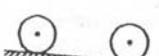
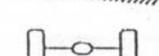
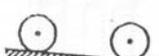
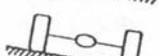
Medición		Peso total	Carga de eje	Carga de rueda
declive				
	longitudinal 0%	correcto	correcto	correcto
	transversal 0%			
	longitudinal 0%	correcto	correcto	error 1)
	transversal 5%			
	longitudinal 5%	correcto	error 1)	error 1)
	transversal 0%			
	Total 5%	correcto	error 1)	error 1)
				
	Total >5%	error 2)	error 2)	error 2)
				

Tabla 3: Errores por condiciones de pendiente

1) La carga del eje o de las ruedas con una ubicación más baja es mayor a aquella que tendrán en posición horizontal. Contrariamente, la carga correspondiente a las de la ubicación más elevada es consecuentemente menor. Por esta razón y dependiendo del tipo de vehículo, se pueden producir errores, desde pequeños hasta muy importantes, a pesar de que la báscula funciona perfectamente. Tratándose de vehículos con carga líquida se producen errores adicionales debido al desplazamiento de la carga hacia los ejes de ubicación más baja.

2) En pendientes superiores al 5% (lo mismo sucede para pendientes iguales al 5%, pero las diferencias serán menos significativas), el peso total medido es marcadamente menor (más de -0,12%) debido a que la báscula registra sólo aquel componente de la fuerza de carga que actúa perpendicularmente sobre la plataforma. Una pendiente considerablemente mayor al límite de 5% puede conducir también a perturbaciones en la báscula. Una pendiente menor al 5% no genera errores significativos.

iv. Por la suspensión del vehículo:

La carga que una llanta o que un eje soporte se encuentra directamente relacionado con la compresión aplicada sobre el resorte de la suspensión. Esta situación es realmente significativa para una medición precisa en vehículos con tres ejes o más.

Se detectarán errores en los casos donde la elevación de un eje resulta en la compresión de los resortes de la suspensión ya que en el caso de camiones con tres ejes o más se encontrarán los dos ejes adicionales tratando de mantener al vehículo nivelado, generando el error mencionado. En el caso de los camiones con dos ejes no son susceptibles a este tipo de error ya que cuando el eje delantero o trasero es levantado todo el vehículo es inclinado uniformemente. El resultado es que la suspensión no recibe un esfuerzo de compresión adicional (sin olvidar el efecto del leve desplazamiento del centro de gravedad mencionado).

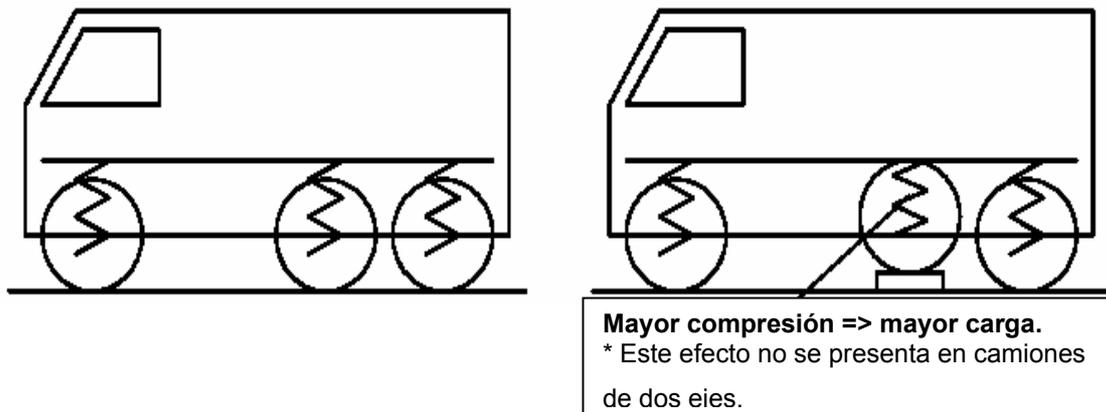


Figura 9: Error por suspensión

2.2.2 Procedimiento de pesaje

El pesaje de los camiones de dos ejes bajo condiciones controladas en el campo se realizó de acuerdo al siguiente esquema:

2.2.2.1 Medición general

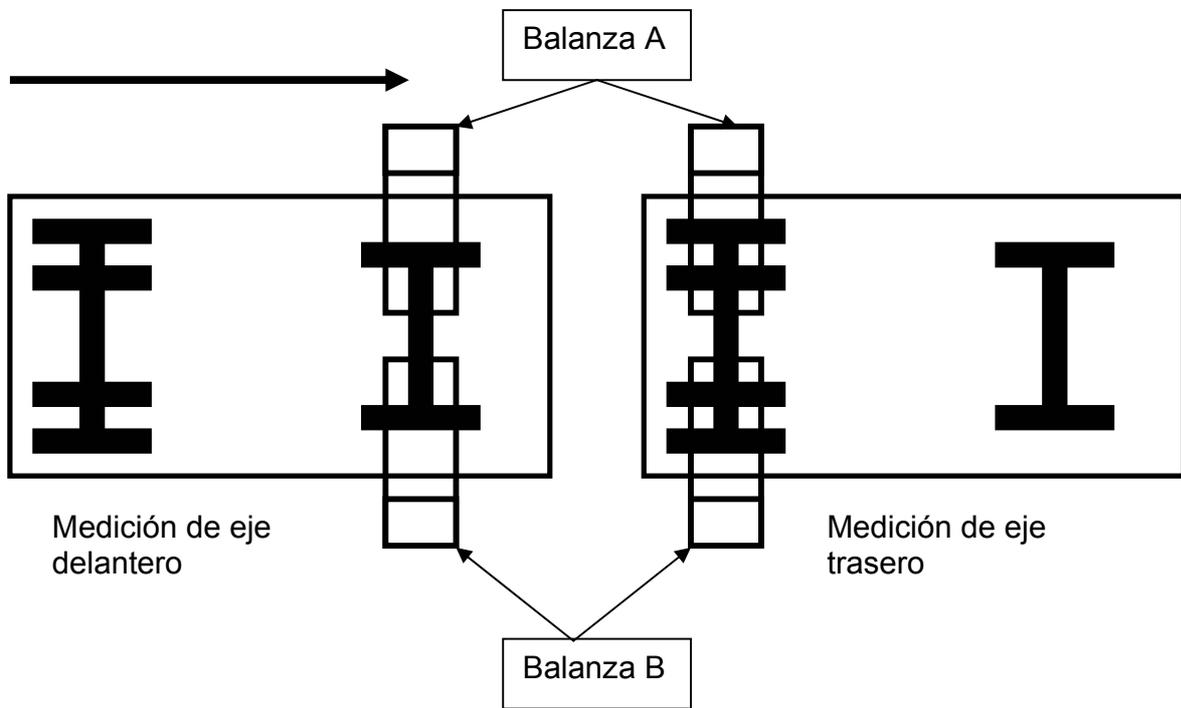


Figura 10: Medición

A continuación se ilustra el proceso de medición en campo según el procedimiento anteriormente mencionado:



Figura 11: Pesaje efectuado por el Lanamme-UCR

2.3 Tercera etapa del proyecto

2.3.1 Muestreo

El pesaje de los camiones de dos ejes bajo condiciones controladas de laboratorio se realizó de acuerdo al siguiente esquema:

2.3.1.1 Metodología de muestreo

- Se utilizan balanzas camioneras portátiles, precisión de ± 50 kg.
- Se pesan dos llantas por eje al mismo tiempo.
- Se especifica tanto si va cargado y tipo de carga como el tipo de placa.
- Se cuenta con la ayuda de oficiales de tránsito, para poder detener a los vehículos sin problemas.
- Archivo fotográfico de cada vehículo.
- No se pesan vehículos livianos, solo pick-ups con vagón modificado.
- Se empezó la encuesta en peajes de 4 principales rutas.
- Cuatro puntos más, fuera de la Gran Área Metropolitana (GAM).
- Se realiza el pesaje una vez por mes en cada punto.
- Se cambia dirección cada mes para cada punto.

2.3.1.2 Puntos de muestreo

Tomando en consideración la ley 5060 Ley General de Caminos Públicos, del 22 de agosto de 1972 se tiene la siguiente clasificación de la Red Vial Nacional:

- **Carreteras primarias:** Red de rutas troncales, para servir de corredores, caracterizados por volúmenes de tránsito relativamente altos y con una alta proporción de viajes internacionales, interprovinciales o de larga distancia.
- **Carreteras secundarias:** Rutas que conecten cabeceras cantonales importantes - no servidas por carreteras primarias- así como otros centros de población, producción o turismo, que generen una cantidad considerable de viajes interregionales o intercantonales.

- **Carreteras terciarias:** Rutas que sirven de colectoras del tránsito para las carreteras primarias y secundarias, y que constituyen las vías principales para los viajes dentro de una región, o entre distritos importantes.

Demanda Vehicular:

Está representada por el Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA) y la distribución vehicular asociada (automóviles, carga liviana, buses, dos ejes, tres ejes, cuatro ejes y cinco ejes), que a su vez define los Ejes Equivalentes Promedio Diario Anual (EEPDA) que posee la ruta en análisis. Está directamente relacionada con la importancia de la ruta, pues a mayor cantidad de ejes equivalentes, mayor su importancia. Los Ejes Equivalentes Promedio Diario Anual y su valor asociado se definen a continuación:

Nivel	Ejes Equivalentes Promedio Diario Anual	I_{EEPDA}
Muy bajo	< 260	2
Bajo	260-450	6
Medio	450-2000	8
Alto	>2000	10

Tabla 4: Ponderación de demanda vehicular (Ref. 9)

Índice Turístico:

Este parámetro está relacionado con la importancia de la ruta, considerando su ubicación con respecto a las actividades turísticas. Esta relacionado con la definición de rutas estratégicas definidas por el Instituto Costarricense de Turismo y se define utilizando un Índice Turístico (I_T), su evaluación es muy sencilla acorde a las políticas gubernamentales en materia turística.

I_T	Ponderación
Ruta turística según ICT	10
Ruta no turística según ICT	2

Tabla 5: Ponderación del Índice Turístico (Ref. 9)

Índice Productivo:

Este parámetro está relacionado con la importancia de la ruta, considerando su ubicación con respecto a las actividades productivas inmersas en la zona. El índice productivo (I_P) considera la actividad productiva asociada a la ruta. Por ejemplo rutas de salida de producción, como el café, melón, etc. Deben ser más importantes que otras que no sirven para transportar productos de un lugar a otro.

I_P	Ponderación
No existe transporte de productos	2
Salida de al menos un producto	4
Salida de dos o más productos	6
Transporte masivo de productos	10

Tabla 6: Ponderación del Índice Productivo (Ref. 9)

Índice social de conectividad:

Este parámetro está asociado a la conectividad de la ruta con comunidades, instituciones educativas, hospitales, templos, etc. De esta manera el índice de conectividad social (I_{SOC}) considera la unión de estos elementos:

I_{SOC}	Ponderación
Conecta al menos 2 elementos	2
Conecta entre 3-5 elementos	4
Conecta entre 6-9 elementos	6
Conecta 10 o más elementos	10

Elementos: otras rutas nacionales, centros educativos, hospitales o centros hospitalarios y templos.

Tabla 7: Ponderación del Índice social de conectividad (Ref. 9)

Considerando estas variables se tiene que para los tramos empleados en la presente investigación se tienen las siguientes características:

Punto	Clasificación	I _{EEPDA}	I _T	I _P	I _{SOC}
Ruta 32. Braulio Carrillo (peaje)	Primaria	10	10	10	10
Ruta 140. San Carlos (Ciudad Quesada - Florencia)	Secundaria	8.63	2	10	10
Ruta 27. Próspero Fernández (peaje)	Primaria	10	2	6	10
Ruta 1. General Cañas (peaje)	Primaria	9.91	10	10	10
Ruta 1. Bernardo Soto, Naranjo (peaje)	Primaria	9.91	10	10	10
Ruta 1. Bernardo Soto, Esparza (peaje)	Primaria	9.91	10	10	10
Ruta 2. Florencio del Castillo (peaje)	Primaria	8.6	10	10	10
Ruta 2. Pérez Zeledón (Tránsito)	Primaria	8.6	10	10	10

Tabla 8: Tabla resumen de características de rutas evaluadas (Ref. 9)

En resumen se pueden definir las siguientes características para cada una de las rutas estudiadas:

Ruta 32. Braulio Carrillo (peaje): carretera primaria, con un alto nivel de ejes equivalentes promedio diarios anuales (>2000). De importancia turística según el Instituto Costarricense de Turismo, que funciona como conexión con otras rutas nacionales, centros educativos, hospitales, etc. Además, es una ruta empleada para el transporte masivo de productos, al tratarse de una de las rutas con conexión al puerto marítimo del Atlántico, en la provincia de Limón.

Ruta 140. San Carlos (Ciudad Quesada - Florencia): carretera secundaria, con un alto nivel de ejes equivalentes promedio diarios anuales (>2000). Sin importancia turística según el Instituto Costarricense de Turismo; pero que funciona como conexión con otras rutas nacionales, centros educativos, hospitales, etc. Además, es una ruta empleada para el transporte masivo de productos.

Ruta 27. Próspero Fernández (peaje): carretera primaria, con un alto nivel de ejes equivalentes promedio diarios anuales (>2000). Sin importancia turística según el Instituto Costarricense de Turismo, que funciona como conexión con otras rutas nacionales, centros educativos, hospitales, etc. Finalmente, se trata de una ruta que permite la salida de dos o más productos, sin ser esta de manera masiva.

Ruta 1. General Cañas (peaje): carretera primaria, con un alto nivel de ejes equivalentes promedio diarios anuales (>2000). De importancia turística según el Instituto Costarricense de Turismo, que funciona como conexión con otras rutas nacionales, centros educativos, hospitales, etc. Además, es una ruta empleada para el transporte masivo de productos.

Ruta 1. Bernardo Soto, Naranjo (peaje): carretera primaria, con un alto nivel de ejes equivalentes promedio diarios anuales (>2000). De importancia turística según el Instituto Costarricense de Turismo, que funciona como conexión con otras rutas nacionales, centros educativos, hospitales, etc. Además, es una ruta empleada para el transporte masivo de productos.

Ruta 1. Bernardo Soto, Esparza (peaje): carretera primaria, con un alto nivel de ejes equivalentes promedio diarios anuales (>2000). De importancia turística según el Instituto Costarricense de Turismo, que funciona como conexión con otras rutas nacionales, centros educativos, hospitales, etc. Además, es una ruta empleada para el transporte masivo de productos, al tratarse de una de las rutas con conexión al puerto marítimo del Pacífico, en la provincia de Puntarenas.

Ruta 2. Florencio del Castillo (peaje): carretera primaria, con un alto nivel de ejes equivalentes promedio diarios anuales (>2000). De importancia turística según el Instituto

Costarricense de Turismo, que funciona como conexión con otras rutas nacionales, centros educativos, hospitales, etc. Además, es una ruta empleada para el transporte masivo de productos.

Ruta 2. Pérez Zeledón (tránsito): carretera primaria, con un alto nivel de ejes equivalentes promedio diarios anuales (>2000). De importancia turística según el Instituto Costarricense de Turismo, que funciona como conexión con otras rutas nacionales, centros educativos, hospitales, etc. Además, es una ruta empleada para el transporte masivo de productos.

A continuación se muestran los diferentes puntos donde se muestreó hasta el año 2006, se incluyen los diferentes sentidos de muestreo:

- Florencio del Castillo: San José-Cartago, Cartago-San José.
- Próspero Fernández: San José-Escazú, Escazú-San José.
- General Cañas: San José-Alajuela y Alajuela-San José.
- Braulio Carrillo: San José-Limón, Limón-San José.
- Naranjo: Naranjo-San José.
- Esparza: Puntarenas- San José.
- Ciudad Quesada (Florencia): Ciudad Quesada-Florencia, Florencia-Ciudad Quesada.
- Pérez Zeledón: San José- Pérez Zeledón, Pérez Zeledón- San José.

En la **Figura 12** se indican los puntos de muestreo ubicados en la red vial nacional. Como se observa, las rutas analizadas son las más importantes en cuanto a flujo vehicular, uso del suelo y sobre todo por servir de enlace entre las zonas productoras del país y la Gran Área Metropolitana (GAM).

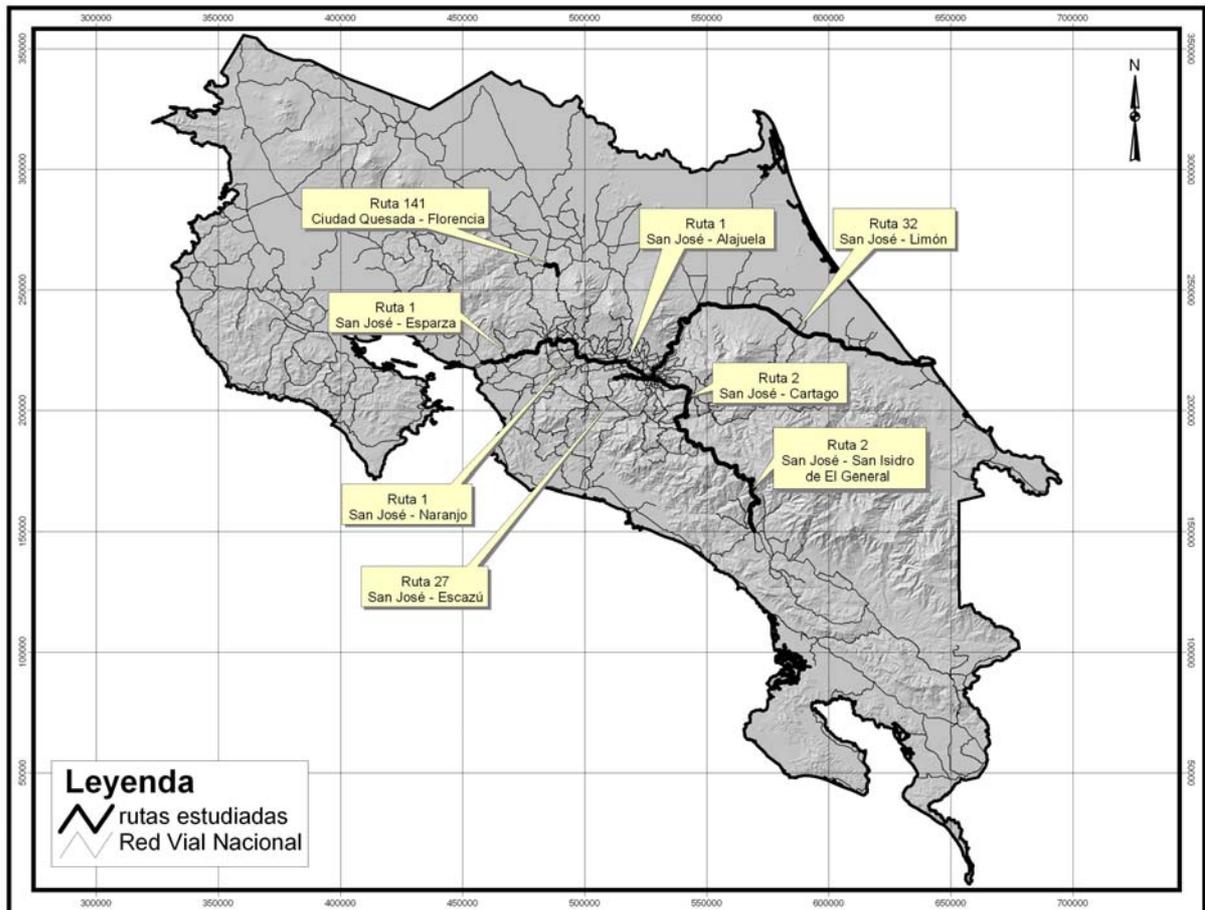


Figura 12: Puntos de muestreo. Mapa elaborado por Lanamme-UCR

2.3.2 Clasificación de vehículos encuestados

En esta sección se muestran la clasificación y frecuencia de vehículos encuestados hasta el año 2006. Cabe destacar que las principales clasificaciones son: pick-up modificado, C2+, C2, C3, Bus C2 y T3-S2. Las demás clasificaciones representan menos de 1,5 % de los vehículos pesados encuestados por lo que se descartan para el análisis del cálculo del factor camión y el espectro de carga.

En la **Tabla 9** se muestra la frecuencia de medición de cada tipo de vehículo encuestado y la totalidad de los mismos para efectuar la encuesta de carga.

Tipo de vehículo	Frecuencia
Pick up	215
C2+	417
C2	1998
C3	642
C4	6
Bus C2	446
Bus C2+	2
Bus ejes dobles	2
T3-S2	1283
T3-S2-S2	7
T3-S3	33
T3-S1	5
T2-S2	3
C2-S2	2
C2-R1	1
T3-S1-S1	1
TOTAL	5063
No. Ejes	11464

Tabla 9: Frecuencia de vehículos encuestados

2.3.3 Frecuencias

A continuación se presentan las frecuencias obtenidas para conformar la encuesta de carga y con base en ésta determinar los factores camión y el espectro de carga, de acuerdo a la región de estudio.

2.3.3.1 Frecuencias desagregadas regionales

a) Ruta 1 – Autopista General Cañas:

Los muestreos se realizaron principalmente en el sentido San José – Alajuela y en menor medida en el sentido Alajuela –San José, ambas en las cercanías de la estación de peaje. A continuación se presenta la frecuencia desagregada total para dicho punto de estudio:

Carga	Pick-up	C2+	C2		C3		Bus C2		T3-S2	
	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (dual)	Eje simple (1 llanta)	Eje Tandem	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (dual)	Eje simple (1 llanta)	Eje Tandem
0-2000	48	94	97	65	0	0	6	6	0	0
2000-4000		8	133	109	5	4	14	5	9	4
4000-6000			26	50	32	6	32	4	75	60
6000-8000			5	15	14	15	8	18		28
8000-10000				9	3	3		23		5
10000-12000				6		0		4		9
12000-14000				4		1				10
14000-16000				3		4				20
16000-18000						7				20
18000-20000						5				7
20000-22000						4				3
22000-24000						3				0
24000-26000						2				2
26000-28000										
28000-30000										
30000-32000										
Total	1165									

Tabla 10: Frecuencia de vehículos encuestados en la Ruta 1 – General Cañas (peaje)

b) Ruta 1 – Bernardo Soto Naranjo:

Los muestreos se realizaron en un solo sentido (Naranjo – San José) en las cercanías de la estación de peaje. A continuación se presenta la frecuencia desagregada total para dicho punto de estudio:

Carga	Pick-up	C2+	C2		C3		Bus C2		T3-S2	
	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (dual)	Eje simple (1 llanta)	Eje Tandem	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (dual)	Eje simple (1 llanta)	Eje Tandem
0-2000	10	42	44	27	0	0	1	1	0	0
2000-4000		2	138	113	2	2	3	2	15	5
4000-6000			39	40	36	2	10	2	190	77
6000-8000			6	17	7	25	14	1		29
8000-10000				19		1		14		13
10000-12000				5		1		7		29
12000-14000				4		2		1		10
14000-16000				2		3				51
16000-18000						2				104
18000-20000						1				62
20000-22000						2				18
22000-24000						2				8
24000-26000						1				4
26000-28000						1				
28000-30000										
30000-32000										
Total	1293									

Tabla 11: Frecuencia de vehículos encuestados en la Ruta 1 – Bernardo Soto Naranjo (peaje)

c) Ruta 1 – Bernardo Soto Esparza:

Los muestreos se realizaron en ambos sentidos (Esparza – San José y San José – Esparza). A continuación se presenta la frecuencia desagregada total para dicho punto de estudio:

Carga	Pick-up	C2+	C2		C3		Bus C2		T3-S2	
	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (dual)	Eje simple (1 llanta)	Eje Tándem	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (dual)	Eje simple (1 llanta)	Eje Tándem
0-2000	10	36	36	30	0	0	7	5	0	0
2000-4000		2	67	46	2	1	2	3	15	13
4000-6000		0	21	28	19	1	17	1	255	66
6000-8000		0	2	7	6	9	15	9		42
8000-10000		2		12	1	2		13		18
10000-12000				0		0		10		21
12000-14000				3		0				20
14000-16000						5				48
16000-18000						3				154
18000-20000						2				109
20000-22000						3				40
22000-24000						1				5
24000-26000						0				3
26000-28000						0				1
28000-30000						1				
30000-32000										
Total	1295									

Tabla 12: Frecuencia de vehículos encuestados en la Ruta 1 – Bernardo Soto Esparza

d) Ruta 2 – Autopista Florencio del Castillo:

Los muestreos se realizaron en ambos sentidos (San José – Cartago y Cartago – San José). A continuación se presenta la frecuencia desagregada total para dicho punto de estudio:

Carga	Pick-up	C2+	C2		C3		Bus C2		T3-S2	
	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (dual)	Eje simple (1 llanta)	Eje Tándem	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (dual)	Eje simple (1 llanta)	Eje Tándem
0-2000	23	121	125	83	1	0	2	1	0	0
2000-4000	1	8	170	118	10	13	10	7	29	9
4000-6000		0	42	73	81	6	48	35	159	115
6000-8000		1	4	24	23	28	2	4		45
8000-10000				25		3		11		14
10000-12000				10		1		4		17
12000-14000				6		2				15
14000-16000				1		7				38
16000-18000				1		16				61
18000-20000						7				35
20000-22000						8				10
22000-24000						13				10
24000-26000						8				4
26000-28000						3				3
28000-30000										
30000-32000										
Total	1781									

Tabla 13: Frecuencia de vehículos encuestados en la Ruta 2 – Florencio del Castillo

e) Ruta 2 – Pérez Zeledón:

Los muestreos se realizaron en ambos sentidos (San José – Pérez Zeledón y Pérez Zeledón - San José). A continuación se presenta la frecuencia desagregada total para dicho punto de estudio:

Carga	Pick-up	C2+	C2		C3		Bus C2		T3-S2	
	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (dual)	Eje simple (1 llanta)	Eje Tándem	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (dual)	Eje simple (1 llanta)	Eje Tándem
0-2000	151	105	106	73	0	0	15	10	0	0
2000-4000	1	3	86	86	8	9	10	13	5	0
4000-6000		0	19	34	49	5	44	21	43	22
6000-8000		0	2	12	18	27	13	16		21
8000-10000				4	2	6		11		10
10000-12000				2		2		9		3
12000-14000				0		2		2		7
14000-16000				2		3				11
16000-18000						0				18
18000-20000						2				3
20000-22000						4				1
22000-24000						2				
24000-26000						9				
26000-28000						5				
28000-30000						1				
30000-32000										
Total	1154									

Tabla 14: Frecuencia de vehículos encuestados en la Ruta 2 – Pérez Zeledón

f) Ruta 27 – Autopista Próspero Fernández:

Los muestreos se realizaron en ambos sentidos (San José – Escazú y Escazú – San José) en las cercanías de la estación de peaje. A continuación se presenta la frecuencia desagregada total para dicho punto de estudio:

Carga	Pick-up	C2+	C2		C3		Bus C2		T3-S2	
	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (dual)	Eje simple (1 llanta)	Eje Tándem	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (dual)	Eje simple (1 llanta)	Eje Tándem
0-2000	10	129	120	93	0	0	4	3	0	0
2000-4000		7	165	122	9	9	9	2	9	1
4000-6000		0	54	59	117	11	28	8	53	35
6000-8000		0	3	21	39	54	9	21		23
8000-10000				5	4	4		13		7
10000-12000				17		3		3		12
12000-14000				22		3				7
14000-16000				3		7				8
16000-18000						9				14
18000-20000						21				7
20000-22000						19				4
22000-24000						23				2
24000-26000						4				4
26000-28000						2				
28000-30000										
30000-32000										
Total	1463									

Tabla 15: Frecuencia de vehículos encuestados en la Ruta 27 – Próspero Fernández

g) Ruta 32 – Autopista Braulio Carrillo:

Los muestreos se realizaron en ambos sentidos (San José –Limón y Limón – San José) en las cercanías de la estación de peaje. A continuación se presenta la frecuencia desagregada total para dicho punto de estudio:

Carga	Pick-up	C2+	C2		C3		Bus C2		T3-S2	
	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (dual)	Eje simple (1 llanta)	Eje Tándem	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (dual)	Eje simple (1 llanta)	Eje Tándem
0-2000	38	57	83	67	0	0	5	4	0	0
2000-4000		7	119	86	5	3	2	2	29	10
4000-6000		0	23	47	53	7	13	1	345	165
6000-8000		0	1	13	13	35	15	1	2	115
8000-10000				3	1	2		12		31
10000-12000				4		3		15		37
12000-14000				4		2				48
14000-16000				0		2				65
16000-18000				2		1				92
18000-20000						5				83
20000-22000						5				43
22000-24000						3				18
24000-26000						3				21
26000-28000						0				7
28000-30000						1				12
30000-32000										5
Total	1950									

Tabla 16: Frecuencia de vehículos encuestados en la Ruta 32 – Braulio Carrillo

h) Ruta 140 – San Carlos:

Los muestreos se realizaron en San Carlos, tomando en cuenta los sentidos (Ciudad Quesada – Florencia y Florencia – Ciudad Quesada). A continuación se presenta la frecuencia desagregada total para dicho punto de estudio:

Carga	Pick-up	C2+	C2		C3		Bus C2		T3-S2	
	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (dual)	Eje simple (1 llanta)	Eje Tándem	Eje simple (1 llanta)	Eje simple (dual)	Eje simple (1 llanta)	Eje Tándem
0-2000	136	203	126	96	0	0	10	8	0	0
2000-4000	2	7	112	102	10	4	12	4	6	1
4000-6000			23	36	54	8	48	26	44	31
6000-8000			1	14	13	14	18	18		20
8000-10000				5	3	7		21		2
10000-12000				4		1		10		2
12000-14000				3		3		1		4
14000-16000				2		9				2
16000-18000						10				10
18000-20000						4				10
20000-22000						4				7
22000-24000						3				7
24000-26000						3				3
26000-28000						6				1
28000-30000						3				
30000-32000						1				
Total	1363									

Tabla 17: Frecuencia de vehículos encuestados en la Ruta 140 – San Carlos

CAPÍTULO 3 INTERPRETACIÓN, EVALUACIÓN Y APLICACIÓN

3.1 Análisis de resultados

A partir de los datos obtenidos de la encuesta de carga en los 8 puntos de estudio, se procede a dividir el análisis en la obtención de los factores camión para cada zona y finalmente generar los espectros de carga preliminares.

Ambas herramientas son muy útiles para el ingeniero diseñador de pavimentos y son parte fundamental en la formulación de la Guía de Diseño de Pavimentos de Costa Rica de la mano con el Manual de Especificaciones Técnicas de Materiales.

3.1.1 Factor camión

Para la obtención del factor camión de las distintas zonas de estudio, se utiliza como base la Guía de diseño AASHTO 1993 (Ref. 1). En donde se utiliza este parámetro de la mano con el tránsito promedio diario (TPD) de la ruta o localidad del proyecto, para diseñar el pavimento de interés.

A manera de ejemplo, se obtienen como parte del daño que se le infringe al pavimento (relación esfuerzo-deformación) los factores de equivalencia de carga (LEF por sus siglas en inglés), los cuales se muestran en la siguiente relación:

$$\text{Factor de equivalencia de carga} = \left(\frac{\text{Peso del eje medido}}{\text{Peso del eje patrón}} \right)^4 \quad (3.1)$$

A partir de estos valores y tomando en cuenta que los pavimentos bajo estudio son todos de mezcla asfáltica, se genera uno a uno los valores a ponderar según el peso final de cada eje con incrementos de 2000 kg y de acuerdo al tipo de vehículo de estudio. Es así como finalmente se obtiene el factor camión de la siguiente manera:

$$\text{Factor camión promedio} = \frac{\left[\sum (\text{número de ejes} * \text{factor de equivalencia de carga}) \right]}{\text{número de vehículos encuestados}} \quad (3.2)$$

Es importante aclarar que la utilización del factor camión en la Guía de Diseño de la AASHTO 1993 (Ref. 1) es de enorme trascendencia para calcular los ejes equivalentes a carga de ejes simples (ESALs), ya que si se utilizan valores por debajo de los reales, no

se consideran las cargas que va a sufrir el pavimento y por ende la estructura fallaría prematuramente. De esta forma los ESALs para cada tipo de vehículo se calculan así:

$$ESALs_{(\text{tipo de vehículo})} = TPD_A \times \% \text{ Distribución tipo de vehículo} \times \text{Factor camión}_{(\text{tipo de vehículo})} \quad (3.3)$$

De esta forma se presenta a continuación la tabla resumen que muestra los factores camión según la zona de estudio para los vehículos encuestados:

Ruta	Tipo de vehículo	Factor Camión (TF)					
		Pick up	C2+	C2	Bus C2	C3	T3-S2
Ruta 1 - General Cañas (Peaje)		0,011	0,019	0,734	2,022	2,721	2,102
Ruta 1 - Bernardo Soto Naranjo (peaje)		0,011	0,016	0,902	3,680	1,971	3,701
Ruta 1 - Bernardo Soto Esparza (peaje)		0,011	0,233	0,723	2,911	2,834	4,153
Ruta 2 - Florencio del Castillo (Peaje)		0,015	0,031	0,827	1,437	3,202	3,021
Ruta 2 -Pérez Zeledón (tránsito)		0,012	0,014	0,446	1,858	3,330	2,080
Ruta 27 - Próspero Fernández (Peaje)		0,011	0,016	1,163	1,957	3,155	2,695
Ruta 32 - Braulio Carrillo (Peaje)		0,011	0,022	0,695	3,692	2,271	4,229
Ruta 140 - San Carlos (Ciudad Quesada-		0,012	0,014	0,521	2,107	3,773	3,861
Promedio		0,012	0,046	0,751	2,458	2,907	3,230
Desviación estándar		0,001	0,076	0,223	0,861	0,585	0,878

Tabla 18: Factores camión por ruta bajo estudio

En forma gráfica y para visualizar la variación de la magnitud del factor camión en función de la zona de estudio, se procede a separar los resultados en carga liviana y en vehículos pesados de la siguiente manera:

a) Carga liviana

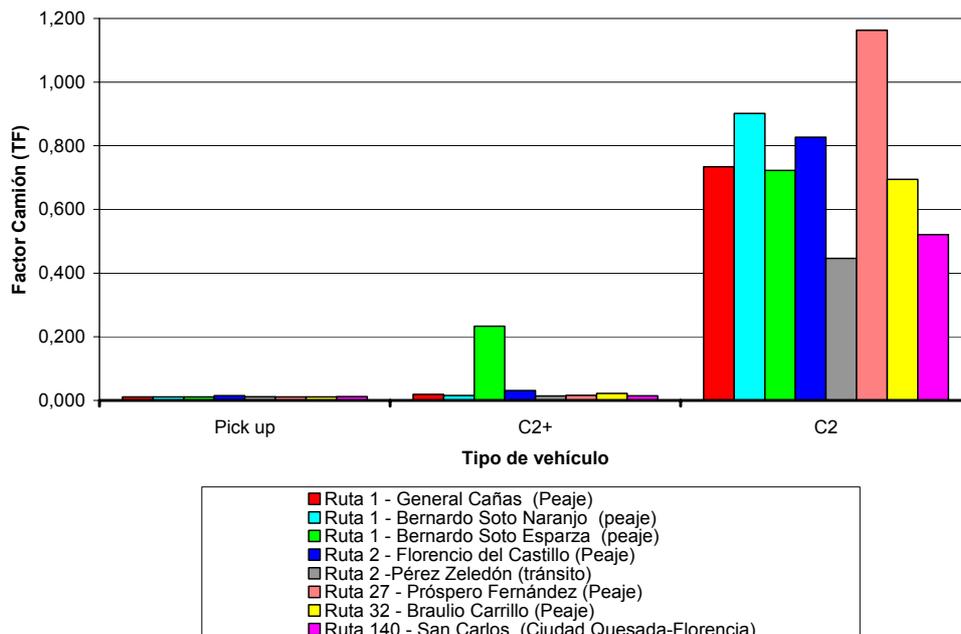


Gráfico 1. Factor camión por zona de estudio para carga liviana

b) Carga pesada

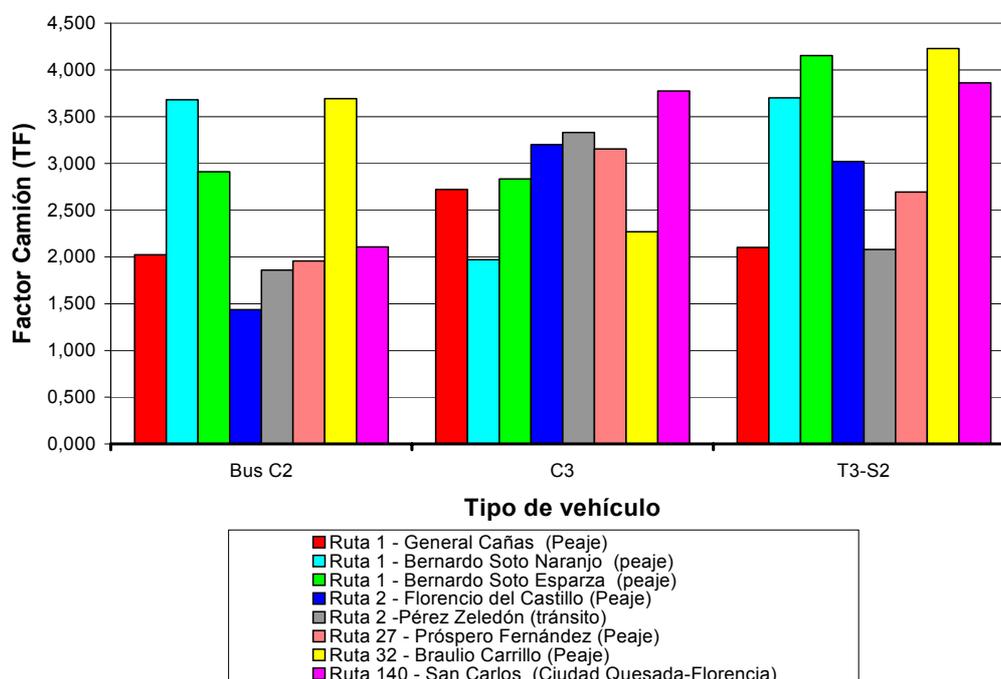


Gráfico 2. Factor camión por zona de estudio para carga pesada

Es importante comparar los valores obtenidos en la encuesta de carga con los factores camión típicos utilizados en otros países y además los utilizados por el MOPT-CONAVI.

Tipo de vehículo	Ontario Canadá		EEUU inter estatal			Costa Rica	Encuesta de carga
	Típico FC	Rango FC	Rural	Urbano	Rango FC	MOPT-CONAVI	Rango FC
Carga liviana (C2+)	-	-	0,003	0,002	0,003 - 0,017	0,39	0,014 - 0,233
2 Ejes (C2)	0,4	0,05 - 0,9	0,21	0,17	0,19 - 0,41	1,0	0,446 - 1,163
3 Ejes (C3)	0,4	0,05 - 0,9	0,61	0,61	0,45 - 1,26	1,45	1,971 - 3,773
4 Ejes	2,0	0,2 - 4,0	0,62	0,62	0,37 - 0,91	-	-
5 Ejes (T3-S2)	1,2	0,3 - 3,5	1,09	1,05	1,05 - 1,67	2,7	2,102 - 4,229
> 6 Ejes	5,1	2,0 - 6,5	1,23	1,05	1,04 - 2,21	-	-

Tabla 19. Comparación de factores camión típicos y los obtenidos en la encuesta de carga

De la tabla anterior, se concluye que los factores camión para países desarrollados son muy bajos en comparación con los de Costa Rica, esto se explica básicamente en el estricto control de cargas y el apego a la reglamentación. Además, se observa que, en términos generales, los valores utilizados por el MOPT-CONAVI están muy por debajo de los valores máximos encontrados en las rutas hacia los muelles principalmente. Esto evidencia que al no contemplar las cargas reales que pasaran por el pavimento, se diseñarán y construirán pavimentos cuya capacidad estará subdiseñada a las

solicitaciones reales a la cual estará expuesto; provocando deterioros en el corto plazo con la consecuente pérdida del patrimonio vial.

3.1.2 Ejes equivalentes de diseño

En el cálculo de los ejes equivalentes (ESALs) se parte de tres escenarios distintos con los tipos de vehículos encuestados para el año 2006 (periodo en que se tienen los datos de TPD y distribución vehicular de todas las rutas, generados a partir de la presente investigación):

- Escenario 1: empleando los los factores camión obtenidos con la encuesta de carga
- Escenario 2: empleando los factores típicos del MOPT-CONAVI
- Escenario 3: se supondrá que el país cuenta con mecanismos adecuados para seguir un estricto control de pesos (por ejemplo, estaciones de pesaje en óptimas condiciones). De esta manera, todos los ejes que se encuentren con sobrepesos por encima de los límites establecidos en la normativa vigente (ver tabla 1), se suman a la cantidad de ejes que se encuentran en el límite de la carga máxima permitida para cada tipo de vehículo y eje correspondiente, con lo que se supone que los vehículos respetan totalmente la reglamentación vigente y no se presentarán vehículos con sobrepesos, de esta manera los factores camión varían de la siguiente forma:

RUTA	Pick up	C2+	C2	Bus C2	C3	T3-S2
Ruta 1 - General Cañas (Peaje)	0,011	0,019	0,448	1,705	1,182	1,509
Ruta 1 - Bernardo Soto Naranjo (peaje)	0,011	0,016	0,625	2,288	0,995	2,214
Ruta 1 - Bernardo Soto Esparza (peaje)	0,011	0,074	0,568	1,905	1,275	2,379
Ruta 2 - Florencio del Castillo (Peaje)	0,015	0,031	0,562	1,253	1,271	1,748
Ruta 2 -Pérez Zeledón (tránsito)	0,012	0,014	0,283	1,276	1,041	1,629
Ruta 27 - Próspero Fernández (Peaje)	0,011	0,016	0,584	1,595	1,254	1,542
Ruta 32 - Braulio Carrillo (Peaje)	0,011	0,022	0,387	2,199	0,989	1,907
Ruta 140 - San Carlos (Ciudad Quesada-Florencia)	0,012	0,014	0,260	1,430	0,773	0,707
PROMEDIO	0,0117	0,0258	0,465	1,706	1,098	1,705
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	0,001	0,020	0,142	0,396	0,179	0,510

Tabla 20. Factor camión para las rutas bajo estudio con cargas controladas

De esta manera, se genera el **Gráfico 3** en donde se comparan los ESALs para los tres escenarios y todas las rutas bajo estudio, utilizando la sumatoria acumulada de la ecuación 3.3 según el factor camión correspondiente. Del gráfico se infiere la enorme diferencia entre los ejes equivalentes (ESALs) que realmente pasarán por la infraestructura vial de las rutas de mayor trasiego de mercancía (ESALs carga real), como

por ejemplo la Ruta 1 y la Ruta 32, en comparación con los estimados por el MOPT-CONAVI en donde la diferencia máxima es de 1 350 000 ESALs, con las repercusiones en la vida útil y la pérdida de recursos económicos que posteriormente se entrará en detalle.

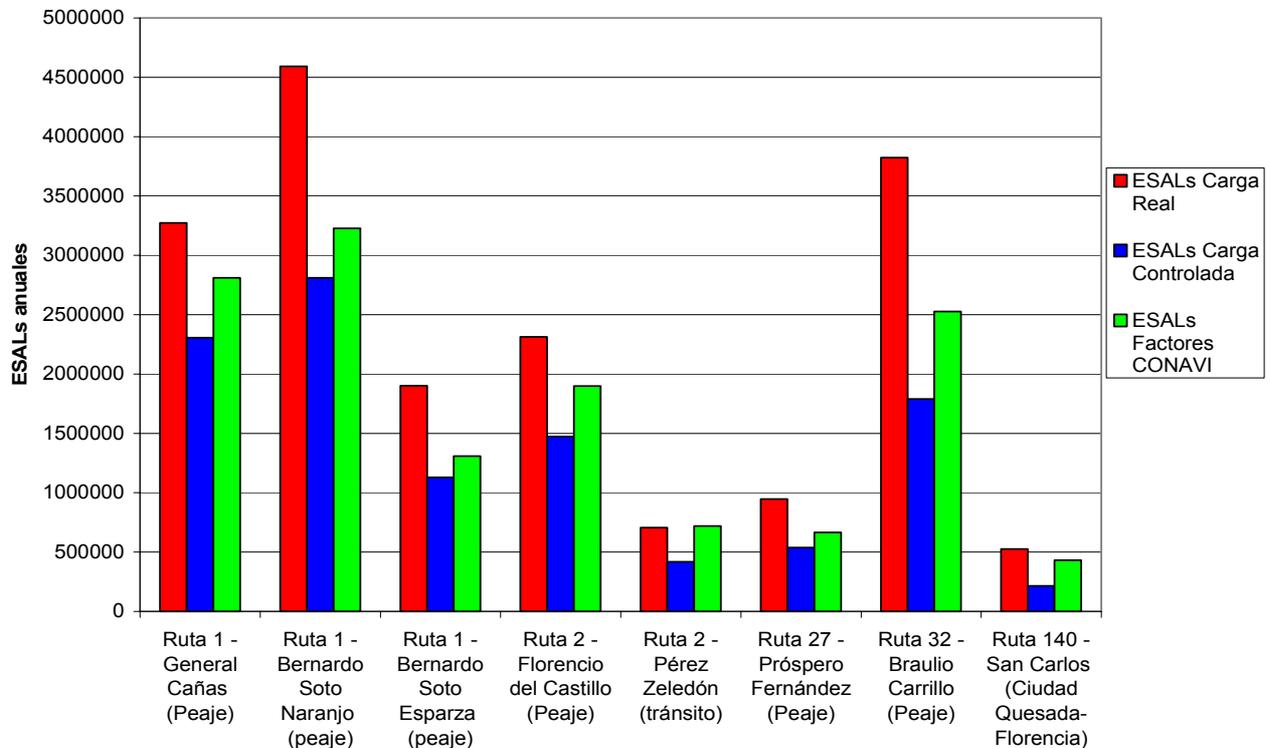


Gráfico 3. Comparación de ejes equivalentes por ruta de estudio y factor camión

Del gráfico anterior se observa que si se controlaran las cargas que transitan por las carreteras de mejor forma, se generarían ESALs muy inferiores a los que actualmente están pasando, con diferencias de hasta 2 050 000 ejes equivalentes para la Ruta 32, lo que demuestra la enorme importancia de controlar las cargas, en apego con la reglamentación nacional vigente; ya sea con estaciones de pesaje estacionarias o bien con sistemas de control dinámicos como carga en movimiento (WIM por sus siglas en inglés).

Además, de las tablas y gráficos anteriormente mostrados, se estudia el cumplimiento de la vida útil para un pavimento construido según las consideraciones de carga en el diseño; es decir con los factores camión reales, con los típicos utilizados por el MOPT-CONAVI o bien si se controlaran las cargas. De esta manera se muestra el **Gráfico 4**, en donde se calculan los ESALs para un periodo de diseño de hasta 20 años tomando como ejemplo la

por la limitante de cargas no es mayor a los viajes originales), concebidos en el diseño se alcanzarían hasta el año 19. Esto permite concluir que al no controlar las cargas de la mano con la subestimación de las cargas reales del tránsito, se pierden en total 8 años de vida útil, y peor aún los costos por tener que reconstruir un pavimento antes del año 11 en un periodo de 15 años (que podrían funcionar hasta 19 años), demuestran que la pérdida económica es gigantesca y equivale a una disminución de cerca del 50 % de años de servicio.

Como producto adicional de la presente investigación se realizaron tres ejemplos de diseños teóricos para la Ruta 32 – Braulio Carrillo, tomando en cuenta los escenarios anteriormente explicados (cargas reales, cargas supuestas por MOPT-CONAVI y cargas controladas), los cuales se muestran en detalle en el **Apéndice B**. De éstos se infiere la diferencia en espesores que se requiere para poder soportar la solicitación de cargas de cada escenario y sobre todo la inversión que se necesita hacer para construir un paquete estructural que subestima las cargas (MOPT-CONAVI) y que al cabo de la mitad de su posible vida útil se debe reconstruir o bien darle mucho mayor mantenimiento e inclusive rehabilitarlo para cumplir la vida útil que el país en vías de desarrollo requiere.

3.1.3 Análisis del TPD y distribución vehicular con el factor camión

Como parte de la investigación, se recolectaron datos históricos del tránsito promedio diario (TPD) de las distintas zonas de estudio, gracias a la Dirección de Ingeniería de Tránsito del MOPT y a su vez se realizaron conteos manuales de 24 horas (de mayo a julio del año 2006) de la mano con conteos automáticos de una semana, para determinar el TPD con su respectiva distribución vehicular. Posteriormente estos valores fueron comparados y ajustados con el valor histórico de la zona de estudio.

El factor de ajuste consiste en tomar datos de TPD de las estaciones de peaje de dos años y encontrar la proporción entre los valores mensuales con respecto al valor promedio total de TPD. Este factor se multiplica luego por el valor de TPD promedio del conteo semanal automático según el mes en que se haya efectuado y la distribución vehicular

generada mediante los conteos manuales de 24 horas (ver **Tabla 21**). De esta forma se obtiene finalmente el TPD representativo de la semana típica de todo el año para la zona de estudio. En consecuencia se genera el siguiente gráfico en donde se muestran los resultados obtenidos:

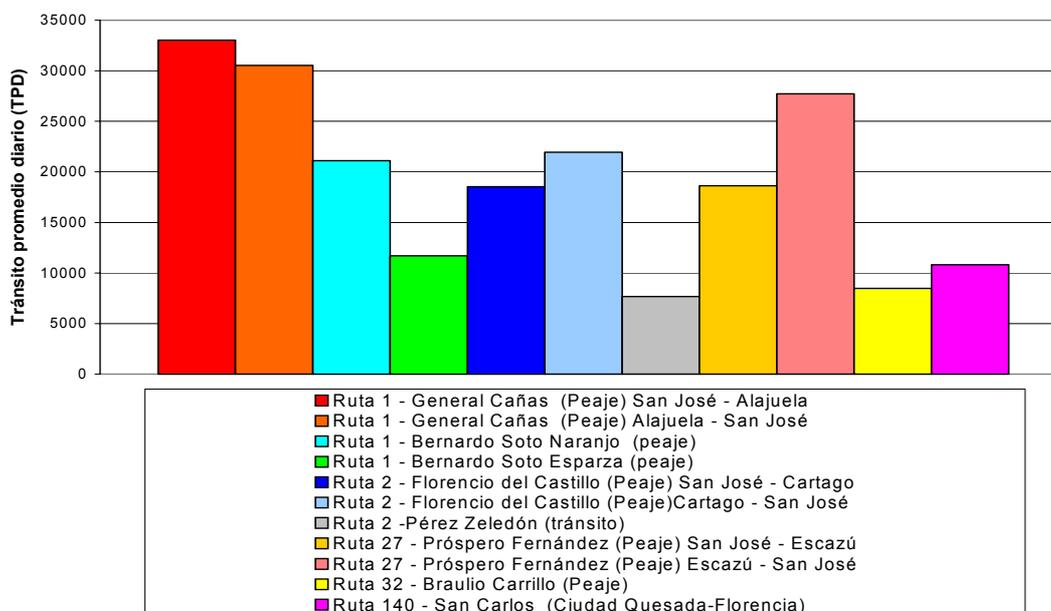


Gráfico 5. Tránsito promedio diario por zona de estudio

El gráfico anterior se complementa ampliamente con la distribución vehicular que presente el tránsito promedio diario, es por esto que a continuación se muestra la tabla resumen con los valores porcentuales para las distintas zonas de estudio:

Ruta - Sentido	Tipo de vehículo	Distribución vehicular						
		TPD	Pick up	C2+	C2	Bus C2	C3	T3-S2
Ruta 1 - General Cañas (Peaje)	San José - Alajuela	33028	8,43%	1,24%	7,52%	5,37%	1,51%	3,13%
	Alajuela - San José	30535	8,32%	1,20%	7,50%	5,38%	1,49%	3,11%
Ruta 1 - Bernardo Soto Naranjo (peaje)	Naranjo	21105	13,90%	2,02%	11,21%	3,20%	2,71%	8,70%
Ruta 1 - Bernardo Soto Esparza (peaje)	Esparza	11696	9,38%	5,30%	6,06%	2,24%	0,78%	7,25%
Ruta 2 - Florencio del Castillo (Peaje)	San José - Cartago	18536	6,04%	1,87%	5,92%	4,77%	1,63%	3,47%
	Cartago - San José	21959	6,24%	2,02%	6,56%	5,19%	1,76%	3,79%
Ruta 2 -Pérez Zeledón (tránsito)	Pérez Zeledón	7669	24,68%	3,27%	8,82%	2,90%	2,40%	3,64%
Ruta 27 - Próspero Fernández (Peaje)	San José - Escazú	18623	4,76%	1,59%	3,16%	1,83%	1,05%	0,78%
	Escazú - San José	27730	6,93%	1,55%	2,89%	1,32%	1,06%	0,55%
Ruta 32 - Braulio Carrillo (Peaje)	Peaje	8472	11,07%	3,23%	10,45%	2,56%	2,96%	23,65%
Ruta 140 - San Carlos (Ciudad Quesada-Florencia)	Ciudad Quesada - Florencia	10828	17,25%	2,27%	5,65%	1,71%	1,25%	0,46%

Tabla 21. TPD y distribución vehicular para las zonas de estudio

A continuación se presenta gráficamente la variación del TPD con la distribución vehicular, con lo cual finalmente se puede determinar la importancia relativa de los distintos factores que determinan el daño al pavimento y ponderan el diseño del mismo.

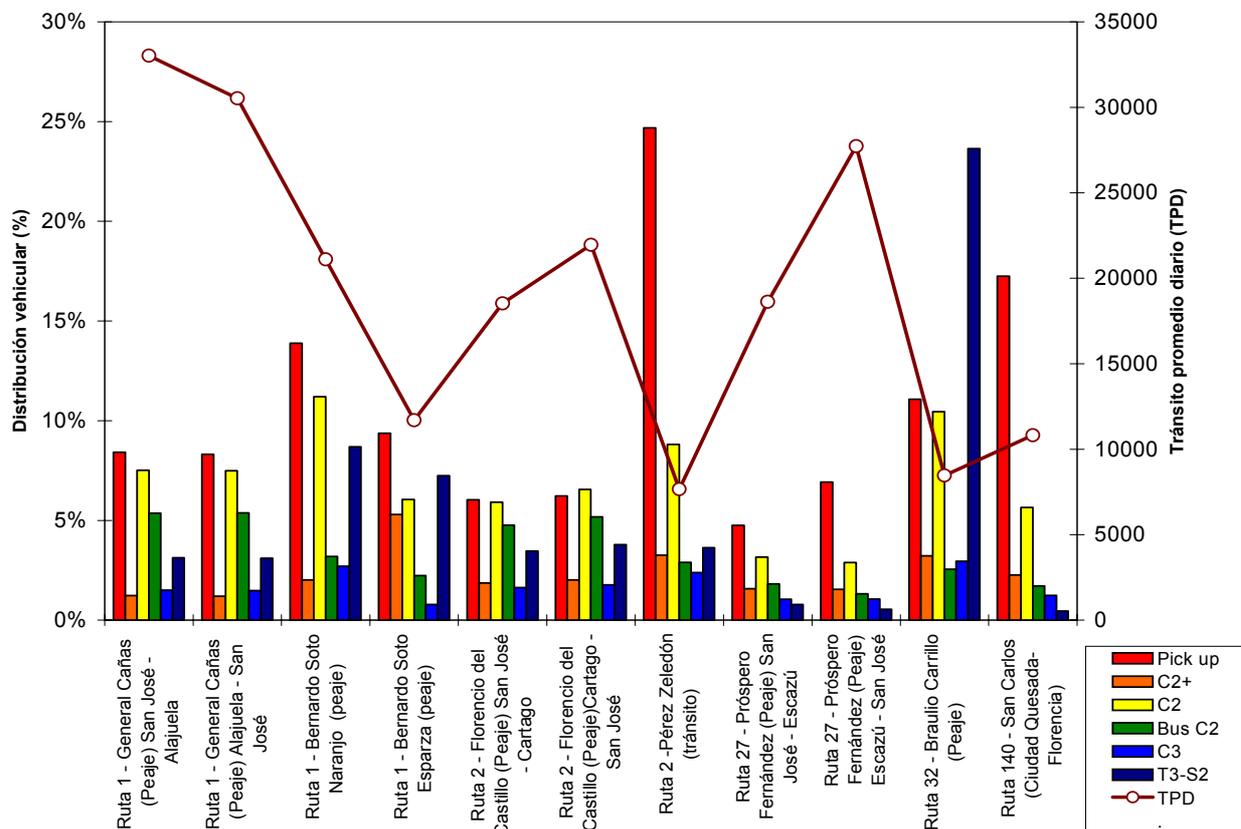


Gráfico 6. TPD y distribución vehicular por zona de estudio

En el gráfico anterior, se observa que en las rutas:

- Ruta 32. Braulio Carrillo (peaje): carretera primaria, empleada para el transporte masivo de productos, al puerto marítimo del Atlántico, en la provincia de Limón;
- Ruta 1. Bernardo Soto, Esparza (peaje): carretera primaria, empleada para el transporte masivo de productos, al puerto marítimo del Pacífico, en la provincia de Puntarenas.

Se presentan valores de tránsito promedio diario en menor magnitud que la mayoría de las zonas, pero con mayor predominancia de vehículos pesados. Esto se explica claramente por el movimiento importante de mercancías.

También se observa un comportamiento muy marcado de presencia de vehículos pesados según la productividad de la zona y sobre todo el uso del suelo de la misma. Es por esto

que la composición vehicular varía en cada zona y se demuestra la enorme importancia de tomar en cuenta este efecto a la hora de realizar el diseño del pavimento para que pueda soportar la solicitud de cargas reales, con la frecuencia y la composición vehicular propia de cada zona de proyecto.

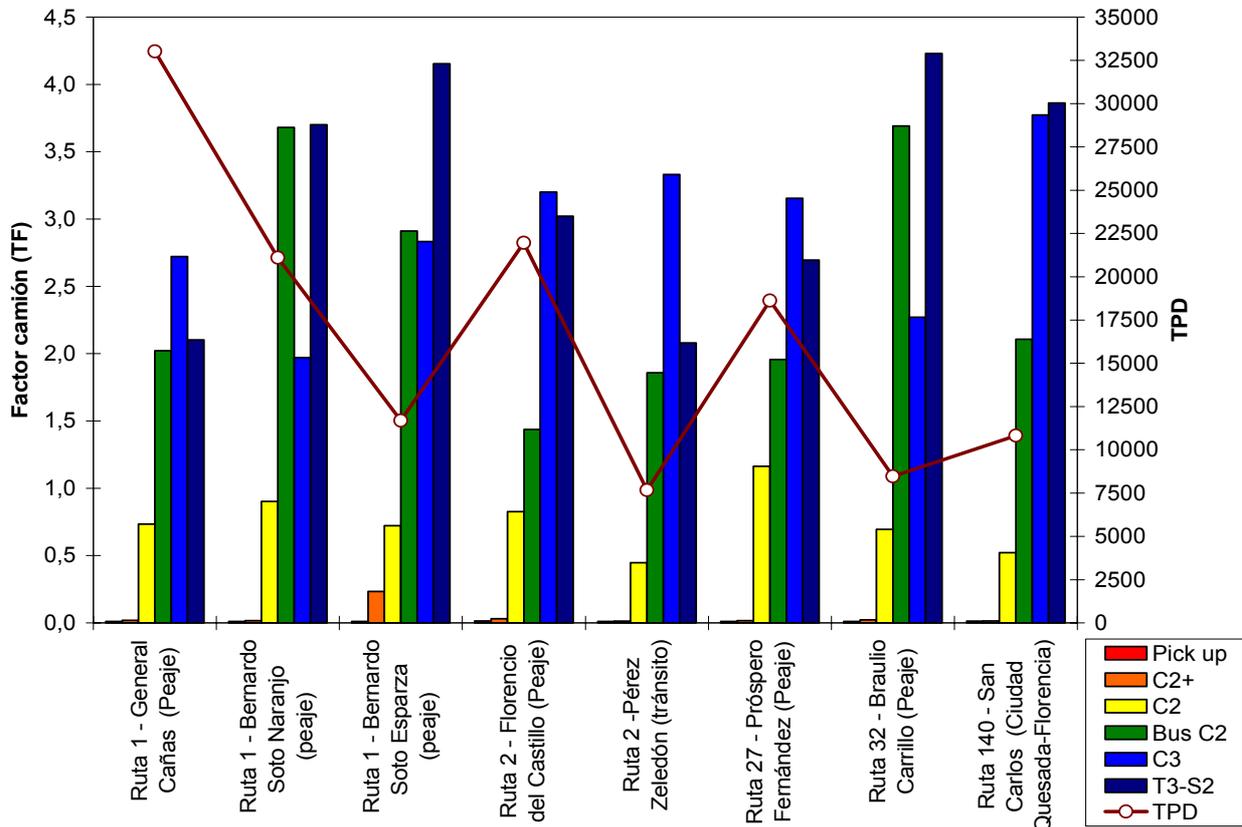


Gráfico 7. Relación del factor camión y el TPD por zona de estudio

En el **Gráfico 7** se presenta la relación del tránsito promedio diario con el factor camión bajo cada zona de estudio. Cabe destacar que se debe analizar el daño relativo que sufre el pavimento en función tanto de las cargas que recibe, expresadas en términos de factor camión, y de las repeticiones de las mismas, expresadas en TPD de la mano con la distribución vehicular.

Como nota aclaratoria del **Gráfico 7**, se tiene que el eje horizontal representa las zonas de estudio, el primer eje ordenado corresponde al factor camión (TF) y el segundo eje ordenado indica el tránsito promedio diario (TPD). Las barras mostradas en el gráfico

corresponden a los factores camión de los principales tipos de vehículos de las diferentes zonas de estudio, mientras que la línea indica el TPD asociado a cada zona de estudio.

En Costa Rica los puertos marítimos para el trasiego de mercancía tienen como principales rutas de acceso la Ruta 32 (Puerto de Moín y Limón) y la Ruta 1 (Puerto de Caldera y es parte de la Interamericana). Del gráfico anterior, se observa que tanto la Ruta 32 como la 1 presentan los mayores factores camión para el vehículo T3-S2, el cual corresponden al vehículo más común para el transporte de mercancías.

Es importante recalcar que zonas como San Carlos presentan valores altos de factor camión para vehículos de carga pesada de la mano con porcentajes pequeños de vehículos pesados, por lo que se evidencia que la disminución de la vida útil del pavimento es menor que en zonas como por ejemplo la Ruta 32, en donde los factores camión son muy altos y además el porcentaje de vehículos pesados es a su vez alto.

A lo largo de la Ruta 1 y la Ruta 32 se observa un valor alto de factor camión en los autobuses, eso se evidencia en las importantes zonas turísticas que tienen como meta estos viajes. Por esto, se observa una predominancia de este tipo de vehículo comparado con el resto de las zonas del país bajo estudio.

Además, se observa que dentro de la GAM (Ruta 1 General Cañas, Ruta 2 Florencio del Castillo y Ruta 27 Próspero Fernández) e inclusive en Pérez Zeledón, predominan los valores altos de factor camión para los vehículos tipo C3, esto se explica por la mayor facilidad de movilización de mercancías o productos por estas rutas a menor escala.

Por otra parte, en la Ruta 140, se observan valores de factor camión altos, lo que corresponde en gran parte a la característica productiva de la zona de San Carlos, el uso del suelo general de la localidad produce una gran cantidad de viajes con productos agropecuarios, sin embargo como se observa en el **Gráfico 6**, la frecuencia de estos viajes no es tan alta.

Cabe recalcar, que los factores camión obtenidos para las principales rutas nacionales no necesariamente aplican para rutas con diferentes características o bien para rutas municipales, por lo que se advierte previsión ante esta limitante.

3.1.4 Espectro de carga

Para la obtención del espectro de carga preliminar de cada zona de estudio, se utiliza como base la Guía de diseño AASHTO 2002 (Ref. 2). En la cual se expresa la importancia de realizar el diseño del pavimento según la variación de las cargas por ejes de acuerdo al tipo de vehículo con una frecuencia establecida.

El nivel de esta investigación es aplicable a los niveles de entrada de datos de tránsito 2 y 3 (ver Ref. 2); es decir, pueden ser usados en todos aquellos proyectos que requieran diseño de estructuras de pavimentos y no se tenga registro histórico de pesajes de camiones. Y constituye el primer acercamiento a la obtención de un método de diseño más aproximado a lo que se plantea en la “Guía de Diseño de pavimentos” de la AASHTO (2002). Esto constituye una primera etapa, la cual pretende servir como base en el desarrollo de nuevas investigaciones que busquen obtener mayores niveles de confiabilidad y precisión mayores, y obtener así espectros de carga definitivos.

Cabe destacar, que el espectro de carga final debe considerar variaciones en el factor tiempo, es decir, en forma mensual hasta inclusive horaria, esto según el grado de importancia del proyecto.

A continuación se presentan los espectros de carga según la zona de estudio para una frecuencia de 1000 ejes clasificados tanto por tipo de eje (simple o tándem) y por la clase de vehículo (siguiendo la clasificación oficial).

a) Ruta 1 – Autopista General Cañas:

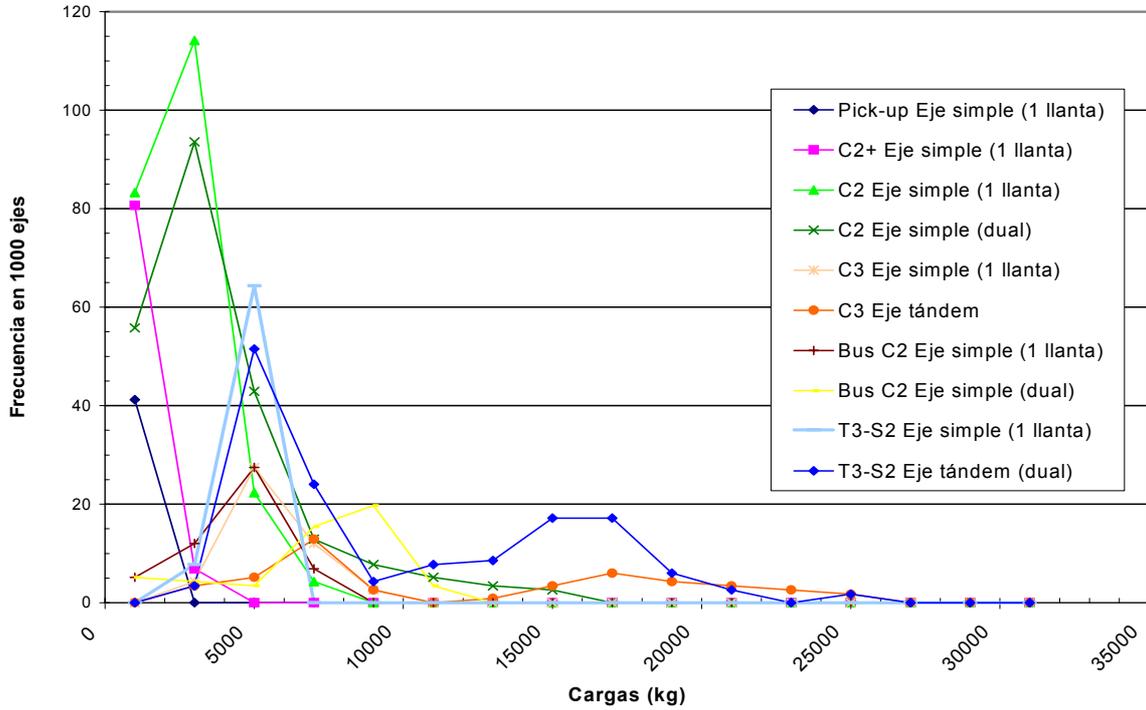


Gráfico 8. Espectro de carga para la Ruta 1 – General Cañas (peaje)

b) Ruta 1 – Bernardo Soto Naranjo:

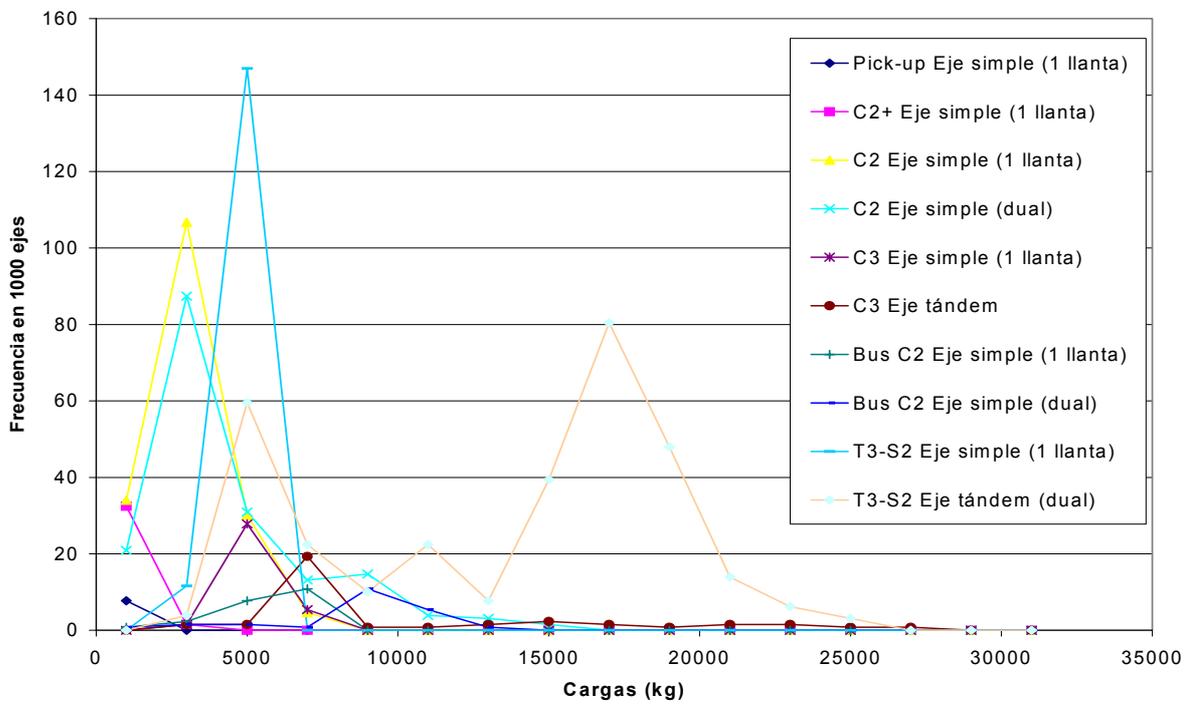


Gráfico 9. Espectro de carga para la Ruta 1 – Bernardo Soto Naranjo (peaje)

c) Ruta 1 – Bernardo Soto Esparza:

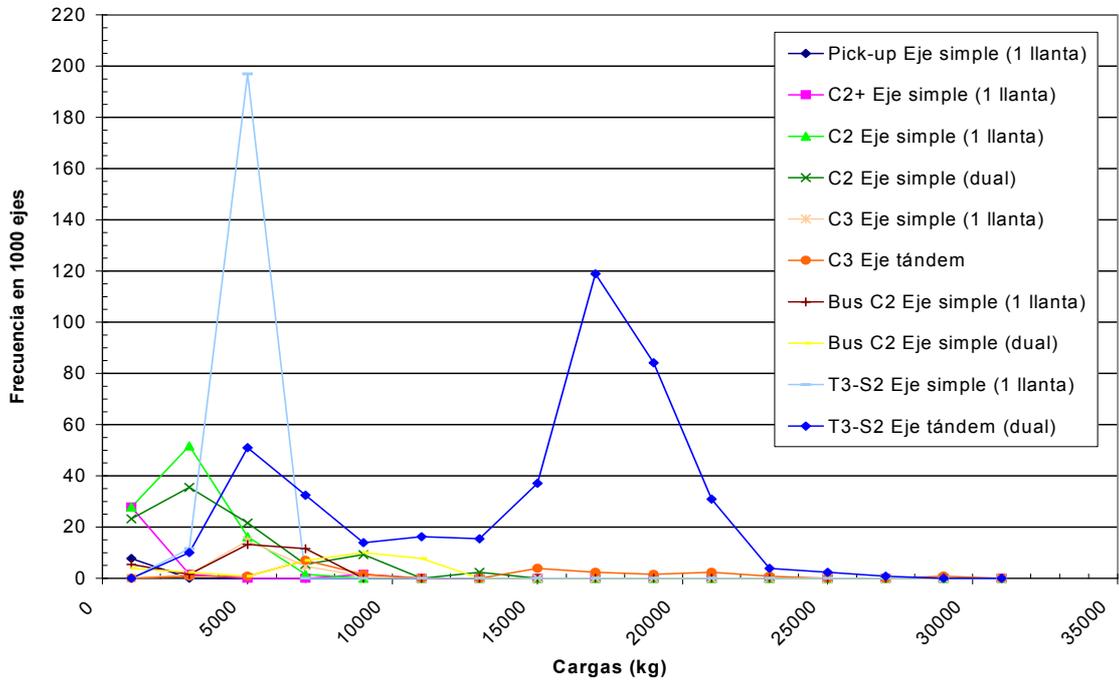


Gráfico 10. Espectro de carga para la Ruta 1 – Bernardo Soto Esparza

d) Ruta 2 – Autopista Florencio del Castillo:

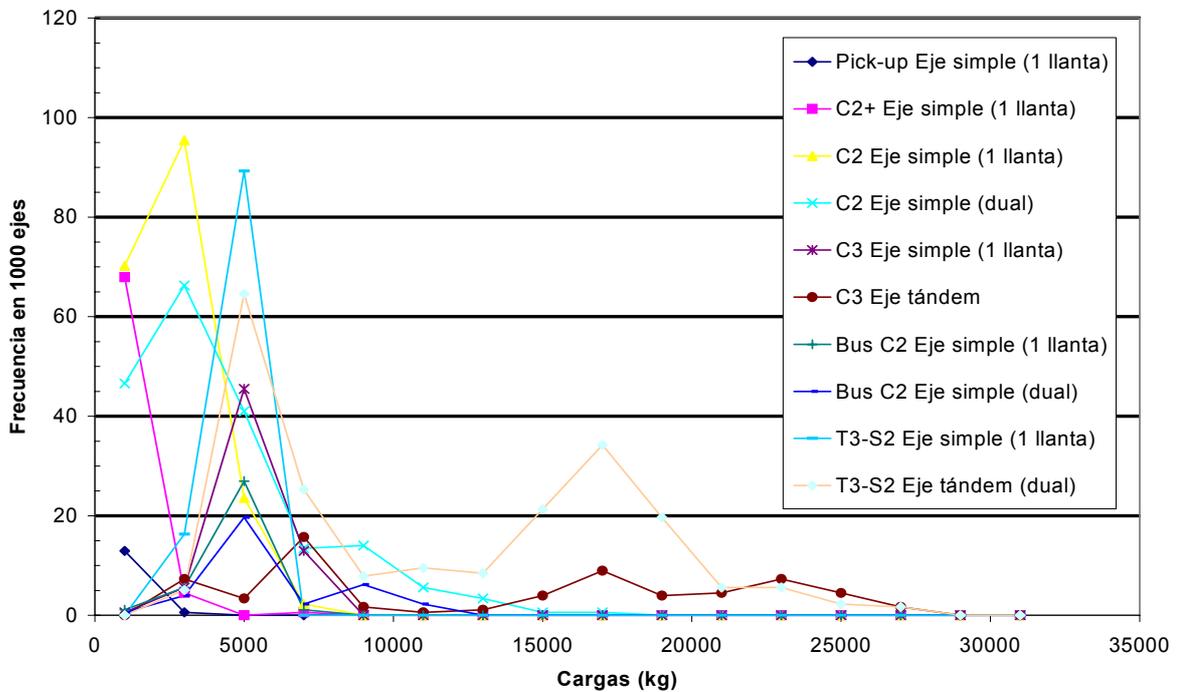


Gráfico 11. Espectro de carga para la Ruta 2 – Florencio del Castillo (peaje)

e) Ruta 2 – Pérez Zeledón:

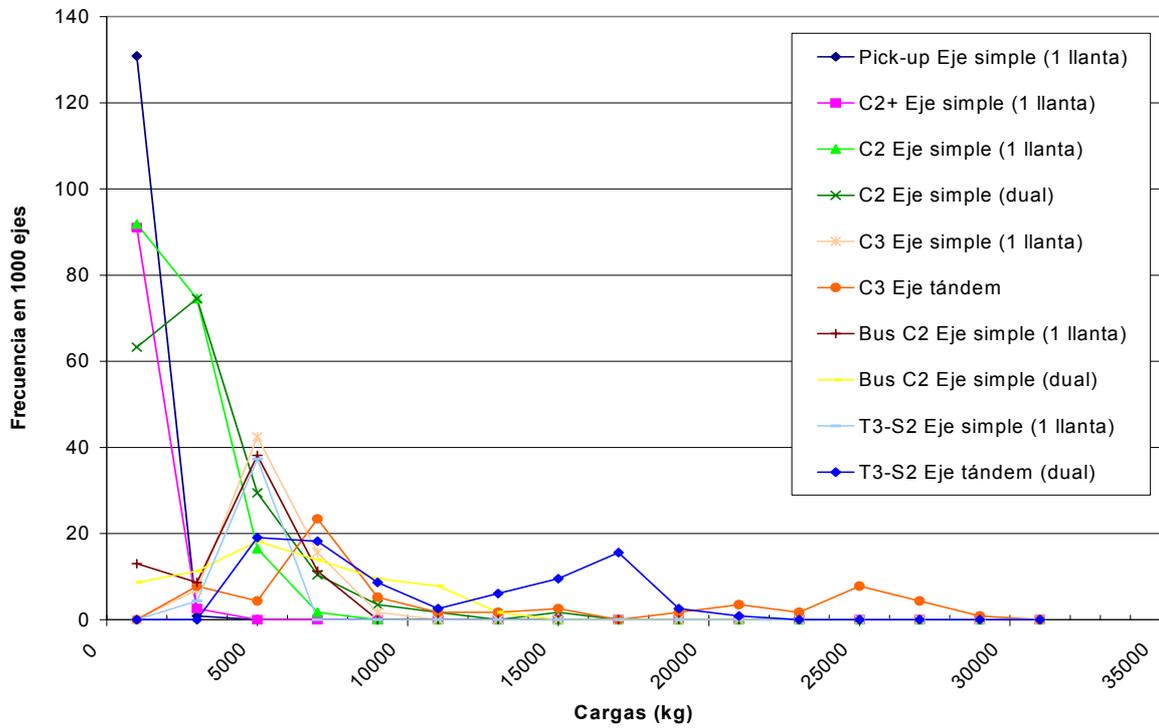


Gráfico 12. Espectro de carga para la Ruta 2 – Pérez Zeledón

f) Ruta 27 – Autopista Próspero Fernández:

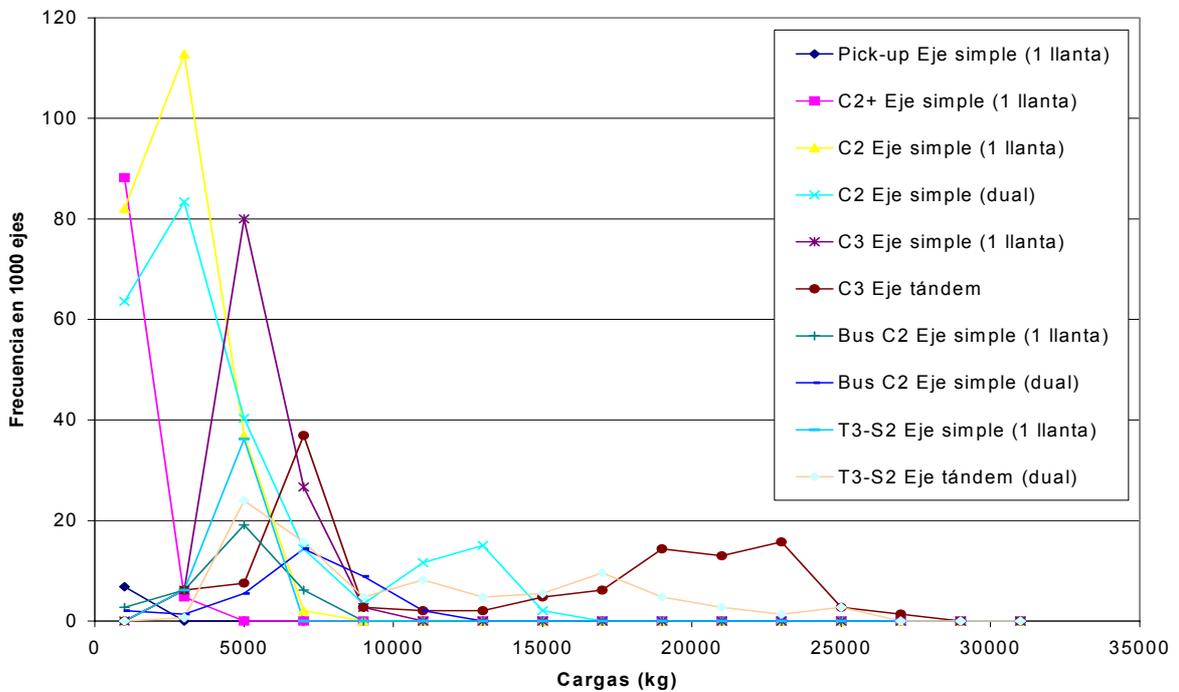


Gráfico 13. Espectro de carga para la Ruta 27 – Próspero Fernández (peaje)

g) Ruta 32 – Autopista Braulio Carrillo:

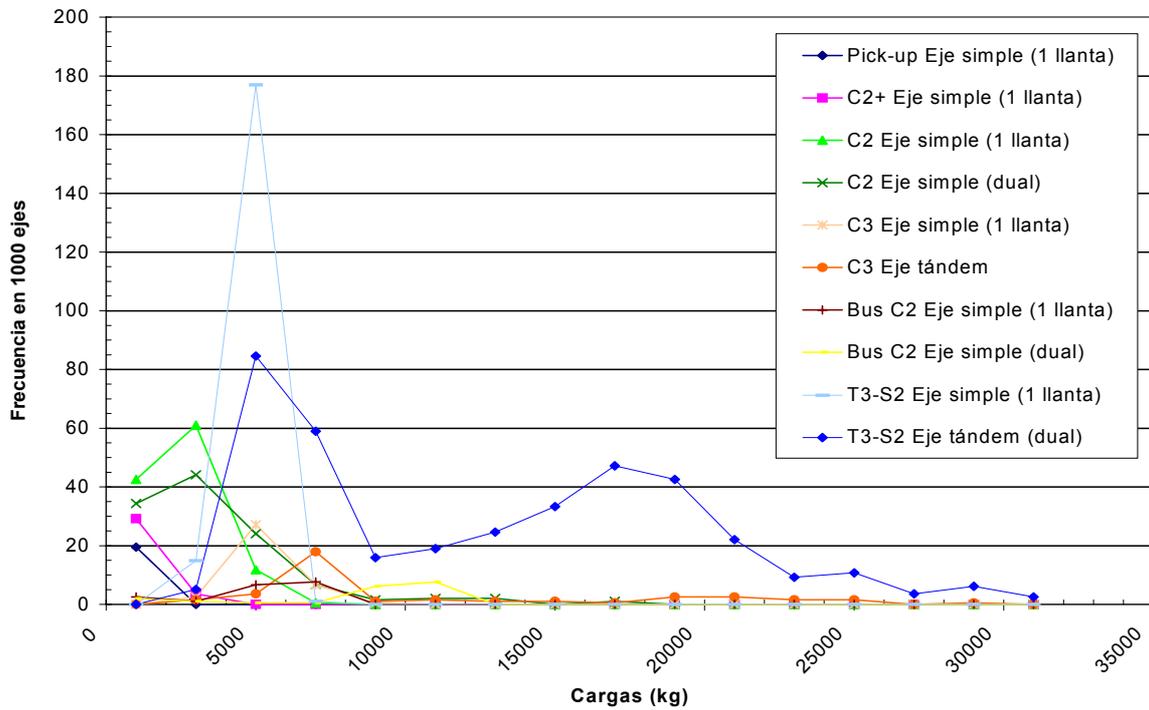


Gráfico 14. Espectro de carga para la Ruta 32 – Próspero Fernández (peaje)

h) Ruta 140 – San Carlos:

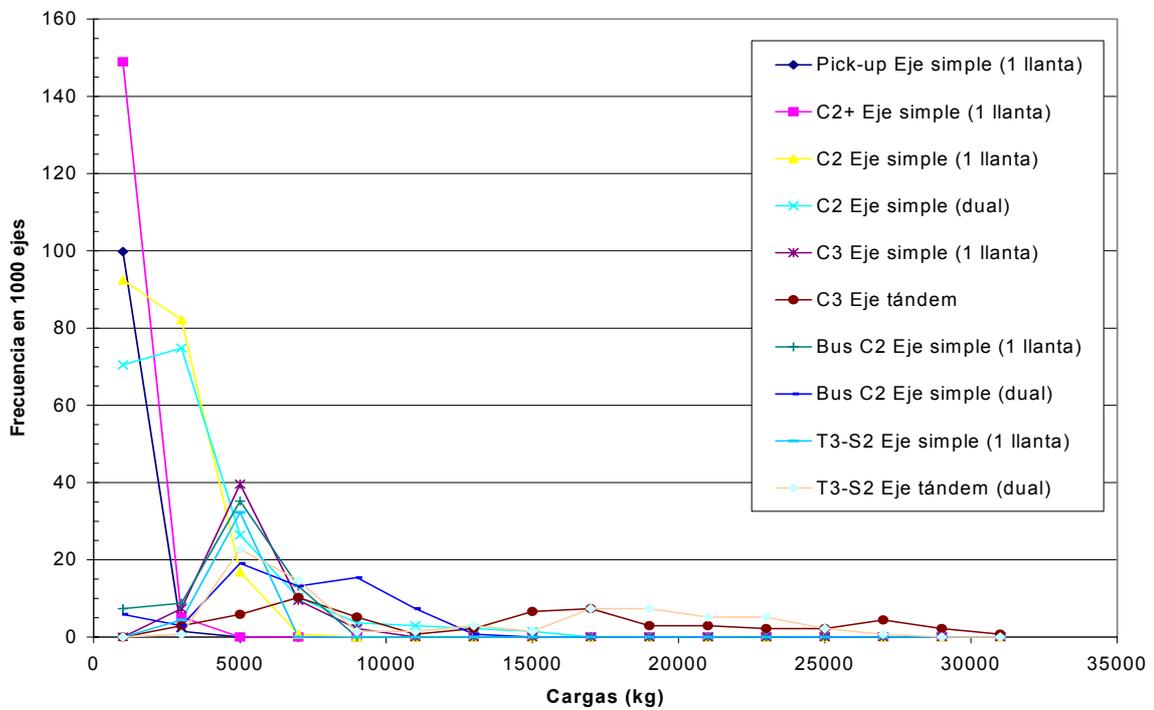


Gráfico 15. Espectro de carga para la Ruta 140 – San Carlos

A partir de los gráficos anteriormente mostrados, se puede inferir en forma preliminar y a un nivel entre 2 y 3 (ver Ref. 2) el comportamiento de las cargas por eje en las distintas zonas de estudio. Es así como se necesita conocer una serie de información con mayor detalle para poder alcanzar en forma efectiva los espectros de carga reales para cada zona de estudio.

Dentro de las principales limitaciones de la investigación, se tiene que únicamente se contó con dos balanzas para realizar los muestreos, por lo que el ritmo de avance no permitió encuestar un mayor número de vehículos.

Además, en ciertos tramos de estudio, no se pudo analizar el comportamiento en ambos sentidos, producto de la configuración geométrica de la carretera y la alta velocidad que se genera en las autopistas. Es por esto, que se debe hacer la salvedad ante esta situación y se debe manejar con mucho cuidado los resultados obtenidos según el sentido faltante en las rutas evaluadas.

Finalmente, una limitación que tiene incidencia directa en la representatividad de los resultados, es que los datos históricos de tránsito promedio diario suministrados por la Dirección de Ingeniería de Tránsito del MOPT son únicamente del 2004-2005, por lo que no se cuenta con un registro histórico en donde se observe la variación año a año durante un periodo significativo de años. Esto afecta a la investigación únicamente en el factor de ajuste del TPD y por ende se hace hincapié en la limitante.

CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES E INVESTIGACIÓN SUGERIDA

4.1 Conclusiones

A partir de la presente investigación, se infiere la gran diferencia que se presenta entre los factores camión de una zona a otra, principalmente entre las rutas de la GAM hacia los puertos marítimos y las rutas de menor trasiego de mercancías. Producto de las cargas estudiadas, se evidencia que los factores camión utilizados hasta el momento subestiman el peso real de los vehículos que atraviesan las calles de Costa Rica, puesto que se obtienen factores camión muy superiores para las rutas de mayor trasiego de productos (rutas a los muelles), en comparación con los factores camión que se consideran como “típicos” para realizar el diseño en cualquier ruta del país. Esto explica en gran medida una de las posibles razones por las que los pavimentos fallan en forma prematura y que en su mayoría no cumplan la vida útil para la cual fueron diseñados.

Es muy importante, complementar los resultados y los gráficos de factor camión con los valores de tránsito promedio diario y a su vez con la composición vehicular de cada zona, esto porque a mayor número de repeticiones de carga de cada tipo específico de vehículo se podría acelerar el daño producido al pavimento.

Además, queda evidenciada la necesidad de contar con valores de factor camión por tipo de zona en específico; esto porque sin duda alguna según las características de cada región (uso del suelo, trasiego de mercancías, volumen y capacidad de la ruta, etc.) así serán la sollicitación de cargas que se le impongan a la infraestructura. Por ende, queda demostrado que al utilizar valores típicos e iguales para todas las rutas del país, se subestiman las cargas e inclusive se genera un diseño que no cumple hasta en un 50 % de la vida útil para la cual se realizó la inversión.

Específicamente, para las rutas estudiadas el factor camión recomendado es el que se muestra en la **Tabla 22**, lo que corresponde a sollicitaciones de carga más realista, cuyos valores exceden en muchos casos los valores típicos usualmente utilizados.

Ruta	Tipo de vehículo	Factor Camión (TF)					
		Pick up	C2+	C2	Bus C2	C3	T3-S2
Ruta 1 - General Cañas (Peaje)		0,011	0,019	0,734	2,022	2,721	2,102
Ruta 1 - Bernardo Soto Naranjo (peaje)		0,011	0,016	0,902	3,680	1,971	3,701
Ruta 1 - Bernardo Soto Esparza (peaje)		0,011	0,233	0,723	2,911	2,834	4,153
Ruta 2 - Florencio del Castillo (Peaje)		0,015	0,031	0,827	1,437	3,202	3,021
Ruta 2 -Pérez Zeledón (tránsito)		0,012	0,014	0,446	1,858	3,330	2,080
Ruta 27 - Próspero Fernández (Peaje)		0,011	0,016	1,163	1,957	3,155	2,695
Ruta 32 - Braulio Carrillo (Peaje)		0,011	0,022	0,695	3,692	2,271	4,229
Ruta 140 - San Carlos (Ciudad Quesada-		0,012	0,014	0,521	2,107	3,773	3,861
Promedio		0,012	0,046	0,751	2,458	2,907	3,230
Desviación estándar		0,001	0,076	0,223	0,861	0,585	0,878

Tabla 22. Factores camión por ruta bajo estudio

Se demuestra, además, la enorme importancia de controlar las cargas de los vehículos, ya que como se mostró en los gráficos para las rutas de mayor movimiento de productos, la vida útil del pavimento se duplicaría en comparación con los diseños que actualmente se hacen; en los cuales se subestiman las cargas reales con factores camión típicos y provoca la consecuente pérdida de inversión. Esto provoca finalmente que en muy poco tiempo se tengan que realizar intervenciones y hasta inclusive reconstrucciones totales en arterias vitales para el desarrollo del comercio de la nación.

En el ámbito financiero se hace insostenible para un país en vías de desarrollo, o bien para inclusive una potencia mundial, construir obras de infraestructura vial que requieren una fuerte inversión de recursos y que al cabo de unos pocos años se tengan que rehabilitar o hasta volver a construir, produciendo un alto costo de operación e inclusive comprometiendo la seguridad de los usuarios y el bienestar del país. Esto se ve reflejado en los espesores de diseño mostrados en el **Apéndice B**, con los cuales la diferencia económica entre controlar las cargas y las que actualmente circulan, con el agravante de que en mucho menos tiempo se deben rehabilitar, es muy cuantiosa y se debe solventar cuanto antes.

A manera de conclusión, es de vital importancia recalcar que se debe analizar cuidadosamente la utilización de los factores camión, ya que estos se calcularon para tan sólo 8 rutas consideradas dentro de los TPD más altos y de las más importantes del país, sin embargo cada zona tiene sus características muy particulares, tanto de tránsito, uso del suelo, urbanidad, cargas por eje, entre otros, que deben tomarse en cuenta a la hora de extrapolar los valores de una zona específica a puntos cercanos.

Es necesario hacer hincapié en que el ingeniero diseñador debe tomar en cuenta la importancia de cada proyecto en particular, esto para determinar si es indispensable realizar un estudio específico para la ruta a rehabilitar o construir. Por ende según el tipo de proyecto y tanto el uso del suelo como las características propias del tráfico (Nivel 1, 2 o 3), es necesario desarrollar una encuesta de carga de la mano con conteos vehiculares para conocer el daño relativo real que se le transmitirá a la infraestructura vial a construir.

A partir de estos resultados, se generan diversas herramientas fundamentales para formular tanto el “Manual de especificaciones técnicas de materiales” como la “Guía de diseño de pavimentos de Costa Rica”, necesarios para reorientar al país con una visión especializada en el incremento significativo de la calidad de las obras de infraestructura vial que sin duda alguna son el engranaje para propiciar el desarrollo de la nación.

4.2 Investigación sugerida

Es de gran utilidad ampliar la presente investigación para alcanzar una clasificación de factor camión y espectro de carga por tipo de zona y según la variación temporal de los mismos, con los cuales se apoye en elementos básicos de estudio como los son el uso del suelo, tiempos de cosechas o producción de bienes, entre otros factores que determinan el comportamiento real del tráfico de cada zona.

La investigación no se centra en determinar si existe sobre peso en los vehículos o no, ni en qué magnitud o proporción de la totalidad de la flota vehicular representa este sobrepeso en cada zona; sin embargo, estos datos son una llamada de atención para otras entidades de las instituciones del estado para entender y atender los resultados de factor camión y el espectro de carga que deben considerarse en el diseño estructural de pavimentos.

Se recomienda efectuar una encuesta de carga y medición del TPD en zonas residenciales tanto existentes como en construcción. Esto para comparar los valores obtenidos en las rutas nacionales y los que se tendrían en zonas residenciales, con el fin

de brindar una herramienta de enorme importancia para las municipalidades y los desarrolladores de proyectos de infraestructura en general.

Es recomendable efectuar un análisis estadístico para determinar si el número de muestra seleccionado es suficiente para hacer inferencia al resto del país, o bien se necesitan aumentar los ejes encuestados por tipo de vehículo. Esto con el fin de validar la investigación y extrapolar los resultados a otras rutas con características similares.

Finalmente, se debe analizar las cargas estudiadas en función de las cargas máximas admisibles para estructuras como puentes, en donde se compromete no solo la inversión de recursos, sino que también se evidencia el riesgo de que se produzca una fatalidad por el derrumbe de estas obras de enorme trascendencia para el país.

REFERENCIAS

ANEXO A: BIBLIOGRAFÍA

1. American Association of State Highway and Transportation Officials, "Guide for Design of Pavement Structures", Apéndice D, Washington, D.C (1993).
2. American Association of State Highway and Transportation Officials, "Guide for Design of Pavement Structures", (2002).
3. Asphalt Institute, "Traffic Analysis and Thickness Design – Highways", 1993.
4. Diario Oficial de Costa Rica La Gaceta No. 13, miércoles 19 de enero del 2005.
5. María Fernanda García, "Variable Tránsito Colombiana para el Diseño de Pavimentos según AASHTO 2002". Pontificia Universidad Javeriana, Epiciclos, Colombia (2002).
6. "Mechanistic-Empirical Design of New and rehabilitated pavement structures". NCHRP Report 1-37A, National Cooperative Highway Research Board, National Research Council, Illinois, (2004).
7. Portland Cement Association, "Traffic Load Analysis", (1993).
8. Consejo Nacional de Vialidad, CONAVI, Dirección de Ingeniería.
9. Figueroa, Tomás y Villalta Carlos, "Metodología simplificada para determinar el índice de priorización de las rutas incluidas en los proyectos de conservación vial de la Red Nacional Pavimentada, Segunda Generación". Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Costa Rica. Abril 2006.

ANEXO B: EJEMPLO TEÓRICO DE LA INFLUENCIA DEL FACTOR CAMIÓN EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS

1. Para realizar este ejemplo de diseño, se elige la Ruta 32 - Braulio Carrillo, debido a tres razones:
 - a. Es una de las rutas que presenta mayor diferencia porcentual entre los ejes equivalentes (ESALs) reales obtenidos con la encuesta de carga y los ESALs producto de las condiciones de carga controlada,
 - b. Es la ruta que presenta el mayor número de ESALs con uno de los TPDA más bajo analizado; lo que refleja la magnitud de las cargas que transitan por dicha vía,
 - c. Es la ruta que presenta una de las mayores diferencias porcentuales entre los ESALs calculados a partir de los factores utilizados por el MOPT-CONAVI y los obtenidos con la encuesta de carga.

Esto se ejemplifica de mejor forma en la siguiente tabla:

RUTA	ESALs AÑO REAL	ESALs AÑO CONTROLADOS	Diferencia	Porcentaje	ESALs AÑO REAL	ESALs AÑO CONAVI	Diferencia	Porcentaje
Ruta 1 - General Cañas (Peaje)	3271580	2306281	965299	41,9 %	3271580	2810509	450071	16 %
Ruta 1 - Bernardo Soto Naranjo (peaje)	4592074	2809515	1782559	63,5 %	4592074	3227297	1353087	41,9 %
Ruta 1 - Bernardo Soto Esparza (peaje)	1902106	1128843	773263	68,5 %	1902106	1308640	589094	45,0 %
Ruta 2 - Florencio del Castillo (Peaje)	2313067	1474691	838376	56,9 %	2313067	1897350	408252	21,5 %
Ruta 2 - Pérez Zeledón (tránsito)	705541	418280	287261	68,7 %	705541	719449	21917	-3,1 %
Ruta 27 - Próspero Fernández (Peaje)	946204	538088	408117	75,9 %	946204	665606	275484	41,4 %
Ruta 32 - Braulio Carrillo (Peaje)	3822840	1790237	2032603	113,6 %	3822840	2528087	1291015	51,1 %
Ruta 140 - San Carlos (Ciudad Quesada-Florencia)	525105	215456	309649	143,7 %	525105	432073	84576	19,6 %

Tabla B-1. Comparación de ESALs reales, CONAVI y con cargas controladas

2. Se plantean tres escenarios para el diseño
 - a. Con base en los resultados de la encuesta de carga, es decir para la condición real, con los factores camión actuales.
 - b. Suponiendo que los vehículos que iban sobrecargados fueron controlados y la carga se mantuvo al límite máximo permitido, es decir que no se elimina ningún camión, sino que por el contrario se suman todos los ejes con sobrecarga al límite según la reglamentación. Esta condición parte del supuesto que funcionan las estaciones de pesaje y que se garantiza el cumplimiento de la reglamentación con un eficiente control de pesos.
 - c. Tomando los valores de factor camión que utiliza en la actualidad el CONAVI y que en primera instancia fueron estimados años atrás por el MOPT.

A continuación se muestra una tabla resumen con los ESALs que se consideran para cada escenario de diseño:

RUTA 32 – Autopista Braulio Carrillo		
ESALs Encuesta Carga	ESALs Carga controlada	ESALs CONAVI
3822840	1790237	2528087

Tabla B-2. ESALs para el presente año para cada escenario

3. Para realizar el diseño se realizan varios supuestos y consideraciones:

- a. Para el cálculo de la serviciabilidad se supone un $P_o = 4.2$ (típico para pavimentos flexibles) y un $P_t = 2.5$ (típico para carreteras de alto tránsito). Además no se toman en cuenta posibles problemas de expansividad de suelos; por consiguiente el Índice de Serviciabilidad se calcula de la siguiente forma:

$$\Delta PSI = 4,2 - 2,5 = 1,7$$

- b. La desviación estándar normal, asociado con la eficacia del diseño, se supone $Z_R = -1,645$ correspondiente a un nivel de confiabilidad $R=95\%$.
- c. La desviación estándar global (S_o) debido al error de proyecciones de tránsito y al desempeño del pavimento (cambio de los valores de entrada del diseño en el transcurso del tiempo) se supone de 0,4
- d. Se realiza un análisis simplificado de capacidad de la carretera con base en conteos de tránsito de la Estación 14 del MOPT y se determina que no se alcanza la misma, por lo tanto la tasa de crecimiento se calcula con un modelo exponencial y no logístico, es decir diferente de 0% para todos los años del período de diseño. Finalmente se obtuvo un porcentaje de crecimiento anual de 4 %.
- e. Para la carpeta se supone un módulo típico de 400 000 psi.
- f. Suponiendo que se va a colocar una base estabilizada (BE35, $40\text{kg/cm}^2 - 568.94\text{psi}$) se le asigna, según la figura 2.8 de la guía de diseño AASHTO 93 un módulo de 668000 psi.
- g. Para la subbase, se supone un valor de módulo típico de 15000 psi, que está por encima del valor correspondiente a un CBR de 30% regulado por el CR – 2002.
- h. Para la subrasante se supone un módulo resiliente efectivo (tomando en cuenta las variaciones estacionales) de 7000 psi.

- i. Para determinar los valores de los coeficientes estructurales se realizan interpolaciones a partir de las figuras de la Guía de diseño AASHTO 93.
- j. El coeficiente de drenaje empleado para la subbase es de 0,8 ya que se supone un drenaje regular (evacuación de agua en una semana) y expuesto a la lluvia más de un 25% del tiempo (común en la zona de estudio).

4. Resumen de consideraciones de diseño:

Datos de las capas			
CAPA	MÓDULO (psi)	a	m
CARPETA ASFÁLTICA	400000	0,42	-
BE-35	668000	0,185	-
SUBBASE	15000	0,11	0,8
SUBRASANTE	7000	-	-

Tabla B-3. Características estructurales de las capas

ESALS	
ESALS Día REALES	10474
ESALS Día CONTROLADOS	4905
ESALS Día CONAVI	6926
ESALS Diseño REALES	22948715
ESALS Diseño CONTROLADOS	10746892
ESALS Diseño CONAVI	15176241

Tabla B-4. ESALS de diseño para cada escenario

Tasa de crecimiento	4,0%
Directional Split	50,0%
Po	4,2
Pt	2,5
R	95%
Z _R	-1,645
so	0,4

Tabla B-5. Resumen de consideraciones de diseño

5. Ahora se resuelve la ecuación de diseño (Guía AASHTO 1993) para cada escenario:

$$\text{Log}_{10}(W_{18}) = Z_R * so + 9,36 * \text{Log}_{10}(\text{SN} + 1) - 0,2 + \text{Log}_{10}(\Delta\text{PSI}/(4,2-1,5))/(0,40+(1094/(\text{SN}+1)^{5,19}))+2,32 * \text{Log}_{10}(M_R)-8,07$$

ESCENARIO A: Valores de la encuesta de carga (datos reales)

Escenario A					
ESALS Diseño REALES 22948715					
CAPA	Carpeta	BE-35	SUBBASE	SUBRASANTE	SN final
Módulo	400000	668000	15000	7000	
a	0,42	0,185	0,11	-	
m	-	-	0,8	-	
SNreq		0,982346	4,54833	5,83601	5,83601
Espesor (pulg)	5,901	11,42	14,17	-	
Espesor (cm)*	15	29	36	-	
SN	2,48	2,11	1,247	-	5,83976

Tabla B-6. Diseño escenario A



Figura A-1 Esquema diseño escenario A

ESCENARIO B: Valores de carga controlados

Escenario B					
ESALS Diseño CONTROLADOS 10746892					
CAPA	Carpeta	BE-35	SUBBASE	SUBRASANTE	SN final
Módulo	400000	668000	15000	7000	
a	0,42	0,185	0,11	-	
m	-	-	0,8	-	
SNreq		0,827039	4,04927	5,26172	5,26172
Espesor (pulg)	4.72	11.42	13.39	-	
Espesor (cm)*	12	29	34	-	
SN	1,984251969	2,1122047	1,177952756	-	5,27441

Tabla B-7. Diseño escenario B

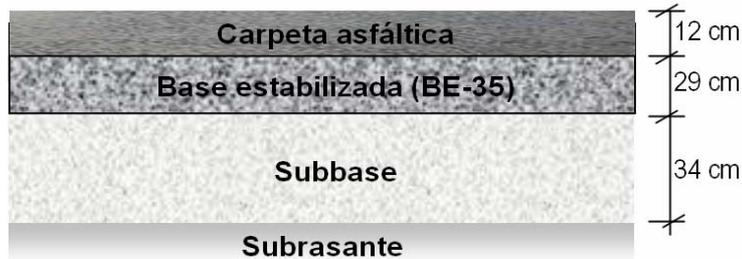


Figura A-2 Esquema diseño escenario B

ESCENARIO C: Valores utilizando datos de CONAVI

Escenario C					
ESALS Diseño CONAVI 15176241					
CAPA	Carpeta	BE-35	SUBBASE	SUBRASANTE	SN final
Módulo	400000	668000	15000	7000	
a	0,42	0,185	0,11	-	
m	-	-	0,8	-	
SNreq		0,896069	4,27219	5,51867	5,51867
espesor cm redondeado	12	32	35	-	
espesor pulgadas	4,72	12,59	13,78	-	
SN	1,984251969	2,3307087	1,212598425	-	5,52756

Tabla B-8. Diseño escenario C

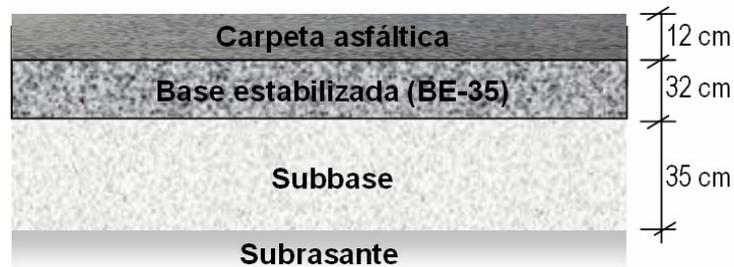


Figura A-3 Esquema diseño escenario C