

AVANCE DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN: DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE CARGA PARA DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTOS EN COSTA RICA

Henry Hernández-Vega, Catalina Vargas-Sobrado, José Aguiar-Moya, Diana Jiménez-Romero, Luis Loria-Salazar

Laboratorio de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), Universidad de Costa Rica

Introducción

En el año 2004, la Unidad de Investigación del Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA) del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), inició una revisión y análisis de la Guía de Diseño Mecanicista - Empírico 2002 de los Estados Unidos de América. Actualmente, se está en proceso de desarrollar una guía calibrada para las condiciones nacionales.

Para esto, la Guía de Diseño Empírico - Mecanicista requiere insumos relacionados con el suelo, materiales, clima, tráfico y estructura de pavimento. En el PITRA-LanammeUCR se han estado implementando proyectos relacionados con las variables más importantes de dicha guía, incluyendo los siguientes temas: zonificación climática, uso de materiales no tradicionales, uso de granulometrías discontinuas, desempeño en deformación permanente, fatiga, resistencia al daño por humedad, módulo resiliente y curva maestra en mezclas asfálticas, variación estacional de módulos, módulos resilientes y deformación permanente sobre materiales cohesivos, granulares y estabilizados y la caracterización de pesos por tipo de vehículo mediante la encuesta de carga.

En los últimos años las demandas a que están sometidos los pavimentos han acrecentado su severidad en cuanto a la aplicación de cargas, velocidades y condiciones climáticas, pues tal y como se muestra en la Figura 1, constituyen los principales factores que afectan su desempeño estructural.

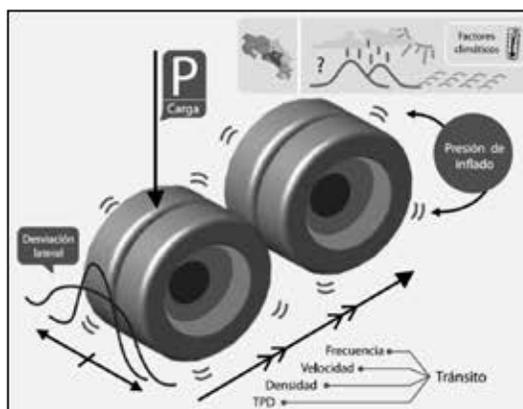


Figura 1. – Parámetros de carga que influyen en el desempeño de las estructuras de pavimento.

Fuente: LanammeUCR, 2012.

Para modelar las cargas correctamente es necesario determinar la frecuencia, velocidad, volumen y clasificación vehicular de la flota en cada proyecto; es preciso identificar la cantidad de vehículos de cada tipo que están transitando diariamente, ya que en general sólo los vehículos más pesados son de interés para el diseño de pavimentos (el daño generado por los

vehículos livianos es marginal). La velocidad del tráfico y la presión de inflado de las llantas de los mismos también es importante conocerla, pues los materiales que componen los paquetes estructurales pueden tener un comportamiento visco-elasto-plástico y por tanto sus propiedades dependen de la velocidad y frecuencia de las cargas a las que están sujetos, razón por la cual es necesario determinar perfiles de velocidad para los vehículos de diseño.

Este documento forma parte de la línea de investigación que pretende generar la información necesaria relativa a parámetros de carga y a su modelación para calibrar los modelos asociados a la Guía de diseño estructural de pavimentos para Costa Rica. Disponer de una Guía de Diseño Estructural de Pavimentos que se adapta a las condiciones de nuestro país permitirá optimizar recursos en el diseño de proyectos de pavimentos.

Lo anterior es de suma importancia ya que actualmente se diseña con guías importadas de otros países que no han sido calibradas para el medio costarricense, lo cual ocasiona que se subestimen o sobreestimen los diseños estructurales, y en consecuencia se desarrolle una inadecuada inversión de recursos y un desempeño de las obras que podría no ser el óptimo.

El proyecto está conformado por cuatro fases en las que participarán diferentes especialistas para la recopilación de la información y la caracterización de los parámetros de carga:

- Fase 1: Recopilación de Datos en Campo y su Análisis.
- Fase 2: Desarrollo del Sistema de Modelación Estructural.
- Fase 3: Modelación de Estadísticos de Carga.
- Fase 4: Calibración de Modelos de Falla.

En la Figura 2 se muestra de manera gráfica el procedimiento a seguir para el desarrollo completo de la investigación, en la cual se observa que inicialmente podrían desarrollarse las fases uno y dos de trabajo que se complementan hasta la Fase 3 del proyecto.

La primera fase constituye la información base de este documento, y se fundamenta en la definición de los parámetros de carga a considerar en la línea de investigación; es decir, las principales áreas temáticas por medio de las cuales se estudiarán los parámetros propios de Costa Rica que sustentarán la Guía de Diseño de Pavimentos, entre ellos:

- Carga aplicada al pavimento
- Presión de inflado
- Desviación lateral de la llanta
- Tránsito vehicular

Como parte de la Fase 2 de la investigación, la Unidad de Materiales y Pavimentos del PITRA-LanammeUCR se encuentra desarrollando un algoritmo por medio del cual se pueda modelar los pavimentos flexibles utilizando la técnica de elemento finito, esto con el propósito de desarrollar y validar un modelo de análisis estructural a través de un software que permita modelar los parámetros de carga

investigados en la Fase 1, y así predecir correctamente la respuesta del pavimento.

La Fase 3 pretende modelar todos los estadísticos de carga con sus variaciones a través del sistema de modelación planteado en la fase anterior. Finalmente en la Fase 4 se propone estudiar de manera práctica los parámetros de carga con el equipo simulador de vehículos pesados (HVS, por sus siglas en inglés Heavy Vehicle Simulator) del PITRA-LanammeUCR, de manera que se comparen con los resultados de la Fase 3 y se realicen las calibraciones necesarias a los modelos de falla.

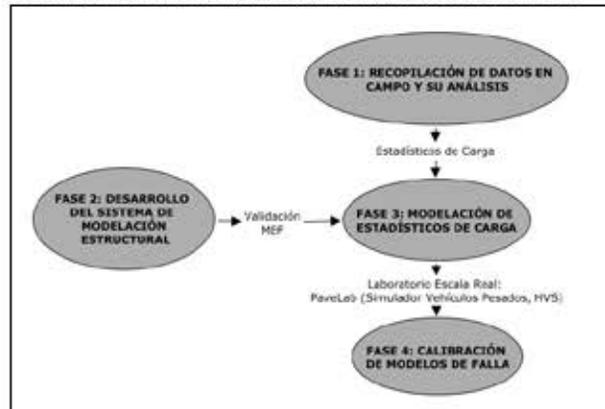


Figura 2. – Estructura de la línea de investigación.
Fuente: LanammeUCR, 2012.

El LanammeUCR ha venido realizando diversas investigaciones por medio de la Unidad de Materiales y Pavimentos y la Unidad de Seguridad Vial y Transporte del PITRA-LanammeUCR, así como la colaboración de trabajos finales de graduación por parte de estudiantes de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica.

Objetivo

El objetivo general consiste en determinar las propiedades de los principales parámetros de carga requeridos en el diseño estructural de pavimentos que actualmente imperan sobre el comportamiento de las rutas nacionales primarias en Costa Rica, los cuales servirán como insumo para la modelación de su efecto en el desempeño de las estructuras de pavimentos y así mejorar las labores de diseño, construcción, reconstrucción y mantenimiento de carreteras.

La línea de investigación permitirá además:

- Cuantificar en campo los parámetros de carga en carretera más representativos para Costa Rica.
- Modelar los parámetros de carga en términos de diseño estructural de pavimentos.
- Desarrollar una base de datos de parámetros de carga medidos en campo.
- Cuantificar estadísticamente mediante mediciones in situ los valores típicos para Costa Rica de los principales parámetros de carga por aplicar en el diseño estructural de pavimentos.
- Desarrollar un sistema de modelación estructural mediante la teoría del elemento finito para los parámetros de carga típicos en el diseño de pavimentos en Costa Rica.
- Verificar teóricamente, mediante análisis de sensibilidad, el modelo de respuesta de estructuras de pavimentos típicos de Costa Rica, basado en cada una de las distribuciones estadísticas de los principales parámetros de carga definidos.

Evaluación de Resultados

Actualmente se está trabajando en la primera fase de la investigación referente a la recopilación de datos en campo de los parámetros de carga y su respectivo análisis, por lo que a continuación se detallan los principales resultados obtenidos hasta en el momento para cada uno de ellos:

1. Encuesta de Carga

En los últimos años el PITRA-LanammeUCR ha realizado diferentes trabajos con el propósito de ampliar el conocimiento sobre el impacto que genera el tránsito de los vehículos pesados en las estructuras de pavimento, pues debido a las altas cargas que transportan son conocidos como las unidades que más influyen en el deterioro de las calzadas.

Desde el año 2007 la institución había realizado encuestas de carga en ocho rutas con altos tránsitos promedio diarios (TPD) ante la inquietud de observar fallas prematuras en los pavimentos asfálticos ocasionadas principalmente porque las solicitaciones de carga vehicular que debían soportar durante su vida útil eran mayores a las que se preveían para el diseño final de la estructura. Dicha problemática se sustentaba principalmente en la falta de control y la escasa coincidencia entre la normativa de pesos legales (pesos permitidos) y los pesos con que se transitaba diariamente (pesos reales).

Este primer estudio fue fundamental para conocer la realidad nacional en el tema, pues además de demostrar una de las principales causas de falla de las estructuras de pavimento, se determinaron datos importantes como Factor Camión (FC) y distribuciones vehiculares de la flota tradicional de hace una década.

Asimismo, este estudio influyó para que las autoridades ejecutaran mayores controles de pesaje, ya que en aquel momento la Administración no ejercía un control adecuado de las cargas vehiculares, ni disponía de FC calibrados para el país. De tal manera, en octubre del año 2009 se volvió a estudiar las cargas vehiculares mediante el Informe *Incidencia de las Estaciones de Pesaje Móvil en los Factores Camión en Pavimentos de Costa Rica* (Badilla y Molina, 2009), y se demostró una variación del FC antes y después de implementar diferentes sistemas de control de pesaje (Allen y Vargas, 2014).

De igual manera, en el año 2014 se realizó un nuevo Informe denominado *Determinación de los factores camión promedio en las estaciones de pesaje en Costa Rica, en el periodo 2008-2011* (Allen y Vargas, 2014), en el cual se analizaron datos procedentes de seis estaciones de pesaje ubicadas en rutas con un tránsito elevado de vehículos destinados al transporte de mercancías (rutas nacionales 1, 2 y 32) y se calcularon los FC; en dicha investigación se confirmó nuevamente la tendencia decreciente en el número de vehículos con sobrecarga luego de mejorar el control de los vehículos pesados.

Adicionalmente, en consecuencia de que en las estaciones de pesaje permanente ni móvil no se controlan los pesos de los autobuses, en el año 2013 se desarrolló el Trabajo Final de Graduación *Determinación de factores camión y espectros de carga representativos de autobuses urbanos e interurbanos para diseño de pavimentos flexibles en carreteras de Costa Rica* (Espinoza, 2013).

En dicha investigación se realizaron conteos con el propósito

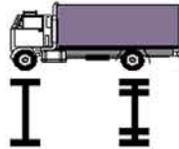
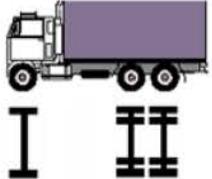
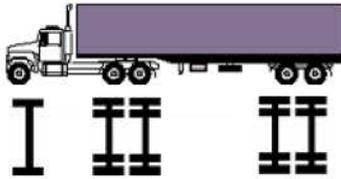
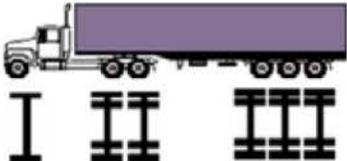
de corroborar que las rutas seleccionadas correspondían a tramos en los cuales el flujo de autobuses urbanos e interurbanos fuese elevado, de tal manera que posteriormente se realizaron pesajes móviles para obtener datos de factores camión promedio y espectros de carga para cada una de las rutas, así como clasificar los diferentes tipos de autobuses y determinar el porcentaje de ejes que excedían el límite de peso permitido según la normativa legal vigente.

Por lo tanto, con base en estos primeros hallazgos se decidió que una forma de estudiar el efecto de los vehículos pesados sobre las estructuras de pavimento sería mediante la determinación del Factor Camión. De tal manera hace algunos años se ha pretendido estar en constante actualización de los valores del FC para Costa Rica, y conocer realmente para cuáles solicitudes de carga deben estar preparadas las estructuras de pavimento que se diseñan en el país.

Se consideraron únicamente los vehículos tipo C2, C3, T3-S2 y T3-S3, ya que son las que categorías que representan más del 95% de todos vehículos de carga inspeccionados en las estaciones de pesaje, según Allen y Sibaja (2001).

La Tabla 1 muestra los vehículos tipo C2, C3, T3-S2 y T3-S3 con su respectiva configuración.

Tabla 1.-Tipos de vehículos y configuración

Tipo de Vehículo	Configuración del vehículo
C2	
C3	
T3-S2	
T3-S3	

Adaptado de: Allen & Badilla (2011)

Hasta la fecha, la última investigación culminada en esta materia por parte del PITRA-LanammeUCR corresponde al "Análisis exploratorio de la variación del factor camión mediante el control de sobrepeso en el transporte de carga para el diseño de pavimentos en Costa Rica" (Allen, 2015), el cual se formuló ante la necesidad de estudiar el comportamiento del FC de forma más detallada, analizando

las relaciones existentes entre los FC y el porcentaje de vehículos que excede la normativa legal.

Para ello, fue necesario determinar el valor del FC con las cargas reales y a partir de ellos, generar regresiones de ajuste entre este FC y el porcentaje de vehículos que se encontraban excediendo el peso debidamente reglamentado. De acuerdo con esta ecuación, se procedieron a determinar dos tipos de FC:

- *FC de incumplimiento constante* que corresponde al factor calculado con el porcentaje de vehículos pesados en el cual se estabilizó la tendencia decreciente de irrespeto a la normativa nacional.
- *FC con incumplimiento nulo* que se determinó con el propósito de identificar cuál sería el FC si en la flota vehicular ningún vehículo transitara en condiciones de sobrepeso, es decir, considerando en la ecuación un porcentaje del 0 %.

En las figuras de la 3 a la 6 es posible observar el descenso del porcentaje de vehículos que transitan con exceso de carga sobre rutas nacionales, pues para este estudio se utilizó de manera agregada la información recolectada en las diferentes estaciones de pesaje.

Los gráficos muestran en su eje horizontal a cada uno de los meses comprendidos entre noviembre del año 2008 hasta octubre del año 2011.

En el caso del vehículo tipo C2 (Figura 3) se evidencia una marcada disminución en el eje dual con el paso de tiempo, principalmente, pues en el eje simple la estabilización se dio en los primeros meses ya que el máximo porcentaje de incumplimiento rondaba solamente el 0,5 %.

En los siguientes gráficos se muestra que el eje simple, a excepción del vehículo C3, no solía estar asociado a un elevado porcentaje de vehículos excediendo el peso máximo permitido por la normativa vigente de la época.

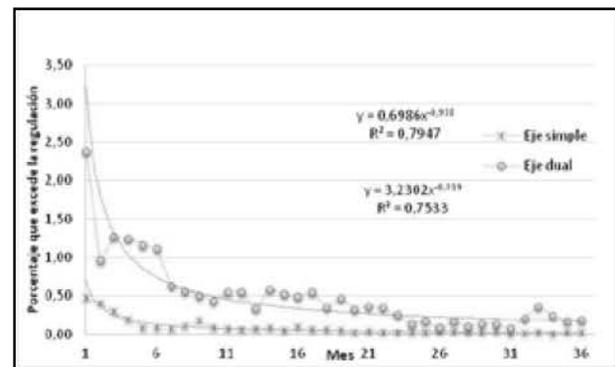


Figura 3. – Porcentaje mensual de vehículos tipo C2 que exceden la normativa nacional de pesos.
 Fuente: Allen, 2015.

En el caso del vehículo C3, tal y como se presenta en la Figura 4, durante los primeros años el porcentaje de vehículos con exceso de peso en el eje simple oscilaba entre los 2 % y 6 %, únicamente el primer año se registró el máximo valor de hasta un 10 %. Sin embargo, de igual manera se evidenció cierta estabilización alrededor del 1 % ya en los últimos meses comprendidos en el estudio.

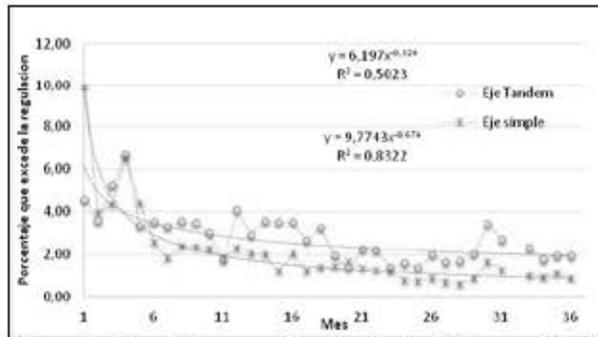


Figura 4. – Porcentaje mensual de vehículos tipo C3 que exceden la normativa nacional de pesos.
Fuente: Allen, 2015.

Para el caso del vehículo T3-S2 (Figura 5) el eje tándem mostró una mínima tendencia a la baja y estabilización al final del período de estudio; mientras que en el caso del vehículo T3-S3 (Figura 6) en el eje tándem no hubo evidencia alguna de estabilizarse, en los primeros años se reduce un poco, mas con el paso de los años se registró un leve aumento en el número de vehículos con exceso.

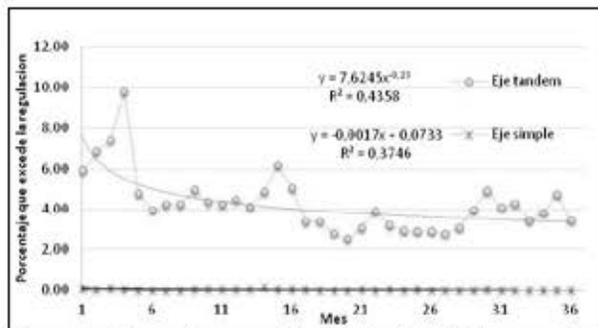


Figura 5. – Porcentaje mensual de vehículos tipo T3-S2 que exceden la normativa nacional de pesos.
Fuente: Allen, 2015.

Finalmente, en el eje tridem del T3-S3 se presenta una disminución en la cantidad de vehículos con excedencia, y al final de los años en estudio se aprecia una estabilización en los datos.

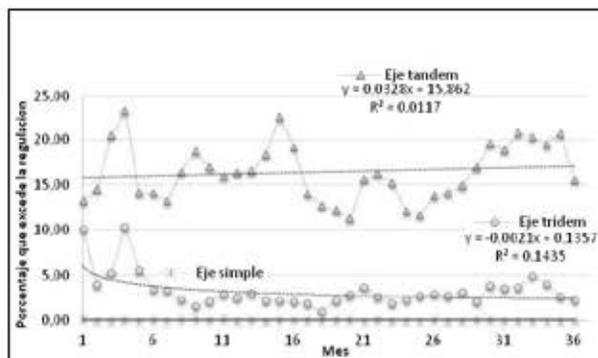


Figura 6. – Porcentaje mensual de vehículos tipo T3-S3 que exceden la normativa nacional de pesos.
Fuente: Allen, 2015.

Por lo tanto, una vez realizados diferentes análisis estadísticos a los datos de los ejes de cada tipo de vehículo, se obtuvo el valor en el cual se estabiliza el porcentaje de la cantidad de vehículos con incumplimiento; los resultados se muestran en la Tabla 2.

Sin embargo, de acuerdo con las regresiones lineales anuales y las gráficas de control realizadas, se obtuvo que durante el período 2008-2011 el eje tándem del vehículo T3-S3 no llega a estabilizarse, lo cual reafirmó el análisis realizado inicialmente y mostrado en la Figura 6.

Tabla 2.-Estabilización del porcentaje de incumplimiento.

Vehículo	Eje	Estabiliza	% Incumplimiento Estabilizado
C2	Simple	Si	0,029
	Dual	Si	0,173
C3	Simple	Si	0,974
	Tándem	Si	2,099
T3-S2	Simple	Si	0,019
	Tándem	Si	3,716
T3-S3	Simple	Si	0,069
	Tándem	No	-
	Tridem	Si	3,270

Fuente: Allen, 2015.

En el mismo informe se determinó, mediante análisis de regresión con los datos del período comprendido, los valores del factor camión proyectados para el último mes, en donde se mostró que en todos los casos este parámetro sí llegaba a estabilizarse. En la Tabla 3 se resume la ecuación empleada y el valor estimado para cada clasificación vehicular analizada.

Tabla 3.-Estabilización del factor camión del período en estudio.

Tipo de vehículo	Ecuación	FC (proyectado mes 36)
C2	$FC = 0,43263 * x^{-0,228682}$	0,1906
C3	$FC = 1,11331 * x^{-0,154178}$	0,6407
T3-S2	$FC = 1,60268 * x^{-0,098874}$	1,1245
T3-S3	$FC = 1,98712 * x^{-0,085254}$	1,4640

Fuente: Allen, 2015.

Se generaron ecuaciones mediante regresiones lineales en las cuales se consideró como variable dependiente el factor camión y como variable explicativa el porcentaje excedente en cada eje por tipo de vehículo.

Con base en estas ecuaciones formuladas por tipo de eje, se seleccionó para cada tipo de vehículo aquella ecuación generada a partir del eje que mayor relación presentó con el factor camión; por lo tanto, con estas ecuaciones y los porcentajes estabilizados de exceso de vehículos con incumplimiento (presentados en la Tabla 2), fue posible determinar el factor camión considerando las cargas que son aplicadas realmente a las estructuras de pavimento (ver Tabla 4).

La ecuación anterior se utilizó, tal como se muestra en la Tabla 4, de igual manera para determinar el factor camión que se obtendría si ningún camión viajara con exceso de carga (columna FC sin incumplimiento), con el porcentaje de incumplimiento estabilizado obtenido en el estudio (columna incumplimiento estabilizado) y con porcentajes de vehículos con exceso de cargas de un 5 %, 10 % y un 15 %, los resultados se sintetizan en la Tabla 4.

Tabla 4.- Factores camión estimados para diferentes porcentajes de incumplimiento.

Vehículo	Eje de inferencia	Factor Camión (FC) en función del Porcentaje de Exceso	R ²	Porcentaje de Exceso Estabilizado de estudio	FC sin incumplimiento	FC porcentaje incumplimiento estabilizado (constante)	FC 5 % exceso	FC 10 % exceso	FC 15 % exceso
C2	Dual	FC = 0,116 * %Excedencia + 0,180	0,929	0,17	0,18	0,2	0,76	1,35	1,93
C3	Simple	FC = 0,086 * %Excedencia + 0,578	0,849	0,97	0,58	0,66	1,01	1,44	1,86
T3-S2	Tándem	FC = 0,073 * %Excedencia + 0,92	0,714	3,72	0,92	1,19	1,29	1,65	2,02
T3-S3	Simple	FC = 0,998 * %Excedencia _eje_simple + 0,015 *	0,615	0,07	1,1	1,54	1,46	1,75	2,04
	Tándem			17,29					
	Tridem			3,26					
T3-S3 (Eje Tándem T3-S2)	Simple	%Excedencia _eje_tándem + 0,043 *	0,615	0,07	1,1	1,37	1,46	1,75	2,04
	Tándem			3,72					
	Tridem			3,27					

Fuente: Allen, 2015.

En el caso del vehículo T3-S3, tal y como se mostró en la Tabla 2, no fue posible determinar la estabilización del porcentaje de exceso de vehículos con incumplimiento, razón por la cual se decidió aplicar el porcentaje de incumplimiento del eje tándem asociado al vehículo tipo T3-S2 (pues inicialmente se utilizó el valor de 17,29 % correspondiente a promedio anual mínimo para el eje tándem del vehículo T3-S3, el cual era bastante elevado).

De tal manera, entre los resultados obtenidos se evidenciaron diferencias de hasta un 25 % entre los factores camión calculados para la condición de “incumplimiento constante” e “incumplimiento cero”. Sin embargo, de manera general en el informe se evidenció que para las bases de datos recolectadas durante el período 2008-2011, hubo una tendencia a la estabilización en el porcentaje de vehículos que circulan con exceso de carga, excepto en el eje tándem del vehículo tipo T3-S3.

Actualmente se están estudiando los pesos, a través de pesajes móviles (ver Figura 7), en rutas no reguladas por estaciones de pesaje en diferentes puntos del país.



Figura 7. – Pesaje de vehículo en Ruta Nacional N° 1.
Fotografía: Hernández, 2016.

2. Presión de Inflado

En el año 2014 se culminó una investigación en relación a la presión de inflado de vehículos pesados que transitan por la red vial de Costa Rica.

Dicho trabajo fue impulsado en conjunto con un estudiante de la carrera de Ingeniería Civil mediante el Trabajo Final de Graduación (Sibaja, 2014).

Debido a las variaciones estacionales y temporales del tránsito, fue necesario definir un método de muestreo efectivo que redujera el sesgo estadístico de los datos recolectados en campo, los cuales estuvieron enfocados principalmente en los tipos de vehículos C2 y T3-S2, ya que según una encuesta de carga previa, estos corresponden a los vehículos de carga típicos del país.

Asimismo, debido a la gran extensión de la red vial y al alcance del proyecto, se seleccionaron cuatro fuentes de información:

- Estación de pesaje de Esparza
- Estación de pesaje de Bufalo
- Estación de pesaje de Ochozogo
- Una empresa privada con una flotilla significativa del tipo de vehículos en estudio.

La totalidad del muestreo se llevó a cabo en un solo sentido de la vía durante los meses de setiembre, octubre y noviembre del año 2013, con el propósito de variar un poco las fechas de recolección de datos y así considerar el efecto de la variación temporal. Las estaciones pesaje se visitaron una vez al mes, y la empresa se visitó en cuatro ocasiones.

Entre los principales datos tomados de cada uno de los vehículos se encuentra la carga por eje y la presión de inflado (bajo el supuesto de que la presión de inflado corresponde a la presión de contacto, lo cual se cumple para presiones de inflado altas), temperatura, marca y tipo de neumáticos por eje (en el caso de los ejes duales la información se recolectó para las llantas externas).

Posteriormente, se realizaron análisis para obtener espectros de presión mensuales y totales por tipo de vehículo y ruta, así como correlaciones entre la presión de inflado y temperatura, y presión de inflado y carga por eje.

En consecuencia de que la carga con que transita una unidad incide directamente sobre la presión de inflado y demás parámetros identificados en la investigación, se resalta que cuando se realizaron las mediciones no todos los vehículos se encontraban cargados, sino que por el contrario en el tipo de vehículo C2 solo 61 % estaba cargado, mientras que en los vehículos T3-S2 este porcentaje correspondió al 78 %.

Asimismo, se identificaron las presiones adecuadas para cada eje según los pesos máximos de circulación permitidos, y fueron determinados en 100 libras por pulgada cuadrada (psi, por sus siglas en inglés) para los ejes direccionales de ambos vehículos, y 90 psi para el eje trasero dual del vehículo C2 y ambos ejes tándem del vehículo T3-S2.

Las presiones de inflado elevadas aumentan especialmente el agrietamiento que se da por fatiga, además de la forma y profundidad de los ahuellamientos. En el caso del vehículo T3-S2 se obtuvo una presión de inflado promedio para los ejes direccionales de 100 psi, lo cual se considera bastante similar a los 120 psi planteados en estudios realizados en otros países como Sudáfrica, Estados Unidos y Egipto; el vehículo tipo C2 no fue posible comparar con estudios internacionales debido a la variabilidad y falta de separación entre los vehículos de carga liviana y pesada que existe en Costa Rica.

En relación a los tipos de neumáticos empleados por los vehículos, se confirmó que existe una gran variabilidad, pues para el vehículo C2 se identificaron 59 marcas y 23 modelos distintos, mientras que para el vehículo T3-S2 el número de marcas diferentes se incrementó a 77, y los modelos disminuyeron a 14. Estos atributos pueden ser variables hasta en un mismo vehículo.

Uno de los mayores hallazgos que se obtuvo con la investigación constituye el hecho de que los valores de correlación no fueron significativos entre los parámetros de temperatura y presión.

3. Desviación Lateral de Llanta

Actualmente, el diseño de carreteras en el país considera que los vehículos se distribuyen a lo largo de todos los carriles, transitando en línea recta. Sin embargo, los vehículos presentan un movimiento lateral en un mismo carril, razón por la cual una carretera donde se dé un desplazamiento lateral mayor presenta una huella menos profunda y más ancha en consecuencia de que la aplicación de cargas se distribuye; si por el contrario las cargas se aplican constantemente en el mismo punto, se genera una concentración de esfuerzos que acelera el deterioro de la estructura.

Por medio del Trabajo Final de Graduación *"Determinación del desplazamiento lateral de vehículos en carreteras urbanas de Costa Rica"* (Morris, 2016), se obtuvo un valor de desplazamiento lateral representativo para las condiciones propias del país, lo cual es de gran relevancia en la línea de investigación porque los valores determinados en otros países podrían no ser representativos para la realidad nacional, en consecuencia de que este parámetro se encuentra asociado a factores del tráfico, clima y los conductores de la localidad (Stemphihar, Williams, & Drummer, 2005).

La identificación de un parámetro propio de la zona de estudio permite la generación de diseños y simulaciones más

representativos de la realidad, lo cual induce a una optimización e inversión más eficiente de los recursos. De acuerdo con Morris (2016), lo anterior se reafirma ya que el efecto producido por la desviación lateral de la llanta con el pasar del tiempo influye directamente sobre la vida útil del pavimento, en especial por medio de la aparición de deterioros como agrietamiento por fatiga, deformación permanente y afectación de la regularidad de la vía (medido mediante el International Roughness Index).

Ese trabajo se realizó mediante la selección previa de seis puntos de control determinados en rutas nacionales de características similares en el Gran Área Metropolitana, con anchos de carril entre 3,45 y 3,65 m, máximo dos carriles por sentido, y caracterizados por tener un alto porcentaje de vehículos pesados como parte de su flota vehicular (rutas nacionales 2, 3, 32, 39, 108 y 202 con un Tránsito Promedio Diario de camiones superior a 1000), en las cuales mediante el uso de una cámara de video y el trazado de líneas en el pavimento (0,2 m de longitud, 0,025 m de ancho y espaciadas cada 0,1 m; ver Figura 8), se procedió a determinar el desplazamiento lateral desarrollado en cada una de ellas.



Figura 8. – Líneas demarcadas para medir la desviación lateral de la llanta, Ruta Nacional N°39.

Fuente: Morris, 2016.

La muestra seleccionada para el desarrollo de la investigación consideró tanto vehículos livianos como pesados, a partir de la cual se identificó un desplazamiento lateral promedio de 28,11 cm y 29,05 cm, respectivamente. La obtención de dichos valores coincide con lo planteado por Stemphihar, Williams y Drummer (2005) en cuanto a que el tipo de vehículo no influye significativamente en este parámetro y por tanto ambos promedios deben ser similares entre sí.

Finalmente, se concluyó también que la ubicación promedio del centro de neumático respecto al margen del carril es de un metro cuando se trata de carriles de 3,6 m de ancho (tanto para el caso de vehículos livianos como pesados), lo cual es la posición del neumático cuando el vehículo transita por el centro del carril; además, se demostró que el desplazamiento lateral de la llanta en Costa Rica supera los 10 cm determinados como parámetro de entrada para los ensayos a escala real desarrollados en el HVS (Heavy Vehicle Simulator, por sus siglas en inglés) del LanammeUCR (Leiva, Aguiar y Lora, 2015).

4. Tránsito Vehicular

Esta línea de trabajo se ha enfocado en determinar factores temporales de tránsito que puedan ser empleados en la determinación de estadísticas de tránsito más precisas, y por tanto sean utilizadas en la toma de decisiones de estudios de ingeniería de tránsito, procesos de planificación y gestión, diseño de pavimentos, entre otros.

De tal manera, los trabajos realizados en este campo se han centrado en el análisis de los datos de diferentes fuentes de información, tales como:

- *Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT)*: La Unidad de Estudios de Tráfico e Investigación de la Dirección de Planificación Sectorial contaba al momento de realizar los estudios 12 estaciones permanentes distribuidas en rutas primarias y secundarias estratégicas pavimentadas, en las cuales a partir de dispositivos neumáticos de conteo (contadores de manguera) determinan la cantidad y el tipo de vehículos que transitan diariamente. Sin embargo, existen períodos en los que la toma de datos se suspende en consecuencia de daños en los equipos o por situaciones de vandalismo.
- *Concesionario de la Ruta Nacional N° 27*: A lo largo de los 76,8 km que comprende la vía se encuentran distribuidas 12 estaciones permanentes de conteo mediante la utilización de detectores que funcionan mediante espiras metálicas.
- *LanammeUCR*: Desde el año 2013, la Unidad de Seguridad Vial y Transportes (USVT) ha realizado aforos vehiculares de entre dos y diez días de duración mediante equipo neumático en diferentes zonas del país (32 puntos en total), los cuales a pesar que de no corresponden a conteos de larga duración, resultan de gran utilidad para caracterizar los patrones de variación del tránsito.

Asimismo, en Costa Rica se realizan por lo general “conteos cortos” a partir de los cuales se pretende deducir o encontrar la cantidad de vehículos correspondiente que se obtendría mediante conteos de larga duración, mas en la actualidad existe un conocimiento limitado sobre variaciones temporales del tránsito y factores de expansión.

Por lo tanto, a partir de los aforos realizados en campo se desea obtener estos factores temporales del tránsito mediante la explicación de diferentes patrones de comportamiento típicos identificados por medio de análisis de conglomerados.

En la investigación se determinó para cada punto de muestreo las variaciones temporales, las cuales se subdividen en variaciones por hora del día, día de la semana, variaciones estacionales que se dan según la época del año, la ubicación de la ruta y las variaciones espaciales, pues todas éstas son variables relevantes que describen los cambios en los volúmenes vehiculares según la ubicación geográfica.

Para el estudio se dividieron los vehículos estudiados en subgrupos (por ejemplo, ver detalle para camiones unitarios en la Figura 9) y se estudió el comportamiento de cada región.

Finalmente, dentro de las conclusiones más relevantes obtenidas hasta el momento en este campo se tiene que el análisis de conglomerados es una herramienta adecuada para identificar los patrones del tráfico costarricense, las variaciones temporales en rutas urbanas y rurales son significativas, los días feriados y/o festivos alteran en gran medida el comportamiento regular del tránsito, e indudablemente se requiere mayor cantidad de recursos y estaciones de conteo permanentes.

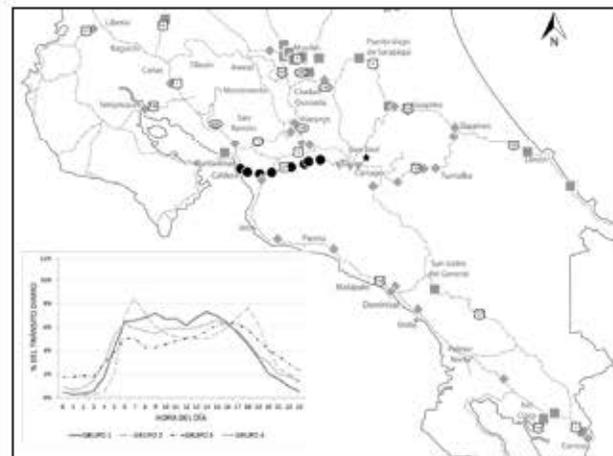


Figura 9. – Grupos de patrones de factores de tránsito por hora del día y distribución geográfica, para camiones unitarios.
Fuente: Magaña, 2014 (p. 95).

5. Informe de Patrones de Velocidad

Recientemente, el PITRA-LanammeUCR realizó un informe denominado *Patrones de velocidad a partir de datos de estaciones permanentes de monitoreo del tránsito de Costa Rica* (Hernández, Morales, Jiménez, Leiva y Loria, 2016), el cual tuvo como objetivo identificar, mediante un análisis descriptivo, los principales patrones de velocidad de los corredores viales del país. Se propone que estos datos sean utilizados para conseguir mejoras en la seguridad del vial y el diseño de pavimentos, pues su conformación presenta propiedades viscoelásticas que generan dependencia entre el tiempo de servicio y la frecuencia y velocidad de las cargas que soportará a lo largo de su vida útil.

Se realizó un análisis de los datos recopilados por las estaciones permanentes de la Secretaría de Planificación Sectorial del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) mediante dispositivos neumáticos de conteo, de tal manera que durante el análisis se enfocó en desarrollar un análisis basado en elementos temporales y de clasificación vehicular, principalmente.

Se analizó la distribución de las 13 estaciones de control en tres aspectos: la distribución de velocidad y porcentaje de vehículos para toda la estación, el factor vehicular y el factor temporal.

El factor vehicular se determinó con base en la cantidad de ejes de los vehículos que atravesaron la estación durante el período de medición; la clasificación empleada presenta una escala de cinco rangos distintos según la cantidad de ejes (dos, tres, cuatro, cinco o más ejes). La categoría de únicamente dos ejes, además de que es aquella con mayor porcentaje de vehículos asociados en todas las estaciones, se subdividió en otros cinco niveles de acuerdo con la longitud que los separa (metodología también utilizada por la FHWA de los Estados Unidos), pues las unidades de esta categoría incluyen configuraciones bastante distintas como: motocicleta, automóvil, pick up, camión y autobús. En la Tabla 5 se presenta los resultados obtenidos en cada una de las estaciones en estudio.

Tabla 5.- Velocidades mayor y menor según estación.

Estación	Mayor velocidad promedio		Menor velocidad promedio	
	Tipo vehículo	Velocidad Promedio (km/h)	Tipo vehículo	Velocidad Promedio (km/h)
Búfalo	2 ejes	73,2	5 o más ejes	67,7
Cambronero	2 ejes	63,5	4 ejes	54,8
Cañas	3 ejes	81,4	4 ejes	73,1
Desmonte	2 ejes	53,1	3 ejes	50,2
Guápil	2 ejes	85,4	4 ejes	76,2
Juan Víñas	2 ejes	51,6	5 o más ejes	42,1
Liberia	2 ejes	73,3	5 o más ejes	67,0
Matapalo	2 ejes	73,8	5 o más ejes	61,0
Muelle	2 ejes	72,8	3 ejes	66,4
Paso Canoas	2 ejes	54,6	5 o más ejes	30,9
Río Chiquito	2 ejes	72,1	4 ejes	54,0
San Juanillo	2 ejes	59,6	4 ejes	51,1
Tempisque	2 ejes	84,6	5 o más ejes	73,1

Fuente: Hernández, Morales, Jiménez, Leiva y Loria, 2016.

Por medio del análisis del factor temporal se determinó aquellos días y meses de mayor y menor tránsito vehicular tal y como se muestra en la Tabla 6 y Tabla 7. En el estudio se determinó que los días del fin de semana son aquellos que se presentan mayores velocidades.

Tabla 6.- Día de mayor y menor velocidad según estación.

Estación	Día de mayor velocidad		Día de menor velocidad	
	Día	Velocidad Promedio (km/h)	Día	Velocidad Promedio (km/h)
Búfalo	Domingo	73,9	Martes	68,3
Cambronero	Domingo	62,5	Viernes	61,3
Cañas	Domingo	78,8	Viernes	76,1
Desmonte	Viernes	53,8	Domingo	52,8
Guápil	Lunes	85,8	Domingo	83,2
Juan Víñas	Sábado	52,1	Lunes	48,5
Liberia	Domingo	75,5	Viernes	71,9
Matapalo	Jueves	74,5	Viernes	65,5
Muelle	Domingo	74,9	Jueves	70,3
Paso Canoas	Viernes	61,3	Miércoles	43,7
Río Chiquito	Sábado	72,4	Viernes	70,4
San Juanillo	Sábado	52,6	Domingo y miércoles	50,8
Tempisque	Domingo	86,2	Miércoles	81,5

Fuente: Hernández et al, 2016.

Tabla 7.- Hora de mayor y menor velocidad según estación.

Estación	Hora de mayor velocidad		Hora de menor velocidad	
	Hora	Vel. Prom. (km/h)	Hora	Vel. Prom. (km/h)
Búfalo	1:00 - 2:00	79,2	19:00 - 20:00	62,7
Cambronero	5:00 - 6:00	66,6	17:00 - 18:00	57,9
Cañas	4:00 - 5:00	84,3	18:00 - 19:00	72,7
Desmonte	1:00 - 2:00	56,2	2:00 - 3:00	50,5
Guápil	7:00 - 8:00	89,1	18:00 - 19:00	78,2
Juan Víñas	22:00 - 23:00	52,5	18:00 - 19:00	47,0
Liberia	2:00 - 3:00	83,9	17:00 - 18:00	67,2
Matapalo	8:00 - 9:00	78,4	16:00 - 17:00	65,9
Muelle	0:00 - 1:00 y 6:00 - 7:00	75,0	18:00 - 19:00	66,4
Paso Canoas	0:00 - 1:00	66,1	18:00 - 19:00	47,1
Río Chiquito	17:00 - 18:00	73,3	2:00 - 3:00	67,4
San Juanillo	2:00 - 3:00	57,5	0:00 - 1:00	48,3
Tempisque	4:00 - 5:00	88,8	10:00 - 11:00	79,3

Fuente: Hernández, Morales, Jiménez, Leiva y Loria, 2016.

Esta investigación constituye el primer paso en materia de los estadísticos descriptivos de la variación temporal de velocidades del tránsito en rutas costarricenses, pues en posteriores estudios se recomienda considerar aspectos como:

- Descripción física del tramo en el cual se encuentra el contador de neumático, el cual incluya ancho de calzada, pendiente longitudinal, existencia de espaldones, entre otros.
- Nivel de servicio (LOS) del tramo en estudio, ya que es una variable que influye directamente en la velocidad de operación.
- Incidencia de factores ambientales durante la medición, como por ejemplo lluvia, neblina, encandilamiento por luz solar, oscuridad durante horas de la noche, y algunos otros que permitan comparar el comportamiento de los usuarios ante diferentes condiciones.
- Considerar la dirección en que se desplaza el flujo vehicular con el propósito de comparar las velocidades según el sentido de avance en dependencia con la hora del día.

Recomendaciones y conclusiones

La implementación de controles de pesaje produce un efecto de estabilización en los factores camión y en el porcentaje de incumplimiento. El factor de equivalencia de carga se incrementa de manera exponencial al aumentar el peso por eje, por lo que los vehículos con sobrepeso someten el pavimento a grandes esfuerzos y con ello aceleran el proceso de falla.

Se debe disponer con rangos específicos y actualizados de las presiones de inflado que reflejen el tránsito que se moviliza en la Red Vial Nacional. Es recomendable separar en carga liviana y carga pesada los vehículos tipo C2 no solo en la tarjeta de circulación, sino también de acuerdo al peso máximo permitido.

A partir de un análisis combinado por medio de herramientas estadísticas y la caracterización de cada sitio de aforo fue posible la determinación de los patrones típicos de variación temporal del tránsito en cinco clasificaciones, los cuales aumentan la precisión requerida en el diseño de pavimentos.

Las variaciones de velocidad de los vehículos en las carreteras de Costa Rica presentan variaciones repetitivas para periodos determinados de tiempo, por lo que es posible establecer patrones de comportamiento típicos.

Es indispensable identificar el comportamiento de cada uno de los parámetros planteados anteriormente si se desea que la Guía de Diseño Mecánico - Empírica se encuentre verdaderamente adaptada a las condiciones de Costa Rica, pues si bien algunos valores no varían considerablemente a los obtenidos en estudios internacionales como por ejemplo la presión de inflado, sí hay algunos otros como la desviación lateral de la llanta que es diferente y por tanto no sería correcto adoptar valores ya establecidos por otros países.

Asimismo, se muestra la importancia de mantener con control permanente sobre estos parámetros en consecuencia de que sus características varían ante una gran cantidad de factores ambientales, temporales, tecnología de los vehículos, comportamiento de los conductores, entre otros.

Referencias

Allen, J., y Badilla, G. (2011). *Determinación de la Carga de Diseño para Pavimentos Flexibles en Costa Rica*. XVI CILA Congreso Iberoamericano del Asfalto. IBP2134_11.

Allen, J. (2013). *Propuesta de línea de investigación: determinación de parámetros de carga para diseño estructural de pavimentos de Costa Rica*. Unidad de Materiales y Pavimentos. Programa de Infraestructura del Transporte Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.

Allen, J. (2014). *Recomendaciones técnicas para el diseño estructural de pavimentos flexibles con la incorporación de criterios mecánico-empíricos*. San José, Costa Rica: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.

Allen, J., y Vargas, C. (2014). *Determinación de los factores camión promedio en las estaciones de pesaje en Costa Rica, período 2008-2011*. Unidad de Gestión Municipal. Programa de Infraestructura del Transporte Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.

Allen, J. (2015). *Análisis exploratorio de la variación del factor camión mediante el control de sobrepeso en el transporte de carga para el diseño de pavimentos en Costa Rica*. Unidad de Gestión Municipal. Programa de Infraestructura del Transporte Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.

Badilla, G., & Molina, D. (2009). *Incidencia de las Estaciones de Pesaje Móvil en los Factores Camión en Pavimentos de Costa Rica*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Unidad de Investigación en Infraestructura Vial, San José.

Espinoza, J. (2013). *Determinación de factores camión y espectros de carga representativos de autobuses urbanos e interurbanos para diseño de pavimentos flexibles en carreteras de Costa Rica*. Trabajo Final de Graduación. Universidad de Costa Rica.

Hernandez-Vega, H., Jimenez-Romero, D., Aguiar-Moya, J. y Loria-Salazar, L. (2016). *Determinación de Parámetros de Carga para diseño estructural de Pavimentos en Costa Rica*. Informe de Avance. Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.

Hernández-Vega, H., Morales-Aguilar, M., Jiménez-Romero, D., Leiva-Villacorta, F. y Loria-Salazar, L. (2016). *Análisis descriptivo de patrones de velocidad a partir de datos de estaciones permanentes de monitoreo del tránsito de Costa Rica LM-PI-USVT-002-16*. San José, Costa Rica: Programa Infraestructura del Transporte (PITRA), LanammeUCR.

Leiva, F., Aguiar, J., & Loria, L. G. (2015). *Status of the first experiment at the Pavelab*.

Magaña, J. (2014). *Determinación de patrones típicos de distribución temporal de tránsito en Costa Rica*. San José, Costa Rica: Trabajo Final de Graduación. Universidad de Costa Rica.

Morris, V. (2016). *Determinación del desplazamiento lateral de vehículos en carreteras urbanas de Costa Rica*. San José, Costa Rica: Trabajo Final de Graduación. Universidad de Costa Rica.

Sibaja, L. M. (2014). *Determinación de presión de neumáticos de vehículos de carga típicos de Costa Rica*. Trabajo Final de Graduación. Universidad de Costa Rica. San Pedro.

Stemphihar, J., Williams, R. C., & Drummer, T. (2005). *Quantifying the lateral displacement of trucks for use in pavements design*. Michigan: Michigan Technological University