



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



HOMENAJE PÓSTUMO
Ing. Fabiola Miranda Argüello

Máster en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica
Investigadora, Unidad de Materiales y Pavimentos, Pitra, LanammeUCR
1991-2020
En recuerdo de nuestra compañera y editora

Infraestructura Vial



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Publicación semestral / ISSN electrónico: 2215-3705

Volumen 22 / Número 40 / Diciembre, 2020 / San José, Costa Rica

COSTA RICA

Análisis estadístico de choques viales a nivel distrital para la gran área metropolitana

COSTA RICA

Factores camión para diseño de pavimentos flexibles en Costa Rica: Análisis histórico en el período 2007-2017

NICARAGUA

Microscopía de fuerza atómica como herramienta en la investigación de asfaltos

DEFINICIÓN DE LA REVISTA

La revista *Infraestructura Vial* pertenece al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR). Fue creada en el año 1999, su primer número se publicó en diciembre de ese mismo año.

Esta revista cuenta con 30 publicaciones y un tiraje semestral de 2000 ejemplares, que son distribuidos a nivel nacional y en más de 35 países en todo el mundo.

La revista publica artículos de carácter técnico e investigaciones realizadas en el área de la infraestructura vial. También incluye otros contenidos relacionados con nuevas tecnologías que se aplican en la ingeniería de carreteras y para el mejoramiento del aprendizaje continuo. Además, divulga artículos de opinión que permiten compartir las experiencias de los ingenieros de carreteras en el mundo.

REQUERIMIENTOS PARA PUBLICACIÓN DE ARTÍCULOS

1. Los artículos deben corresponder a investigaciones o estudios originales, casos de aplicación de nuevas tecnologías y artículos de opinión, en el campo de la infraestructura vial, ingeniería de transportes y temas afines.
2. El artículo debe presentarse en un documento de Microsoft Word y PDF, siguiendo los lineamientos definidos en el siguiente enlace: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/normas-para-presentacion-de-articulos.pdf>
3. El título del artículo debe presentarse tanto en español como en inglés (máximo 85 caracteres, cada uno).
4. Se debe presentar un resumen del artículo en español y en inglés (máximo 300 palabras, cada uno).
5. Es necesario presentar al menos 4 palabras clave en español y 4 en inglés, que identifiquen el artículo para una posible búsqueda en un sistema de archivo.
6. Los artículos que corresponden a investigaciones deben poseer: introducción, objetivos, metodología, desarrollo, análisis de resultados y conclusiones. En caso de que no aplique este formato, el autor debe especificar en una introducción a qué tipo de artículo corresponde.
7. La extensión máxima del artículo es de 12 páginas, incluyendo tablas y figuras.

REVISIÓN DE ARTÍCULOS

El procedimiento que se utiliza para seleccionar los artículos que se publican es el siguiente:

1. Entrega de los artículos a la dirección ejecutiva, para revisar si cumplen con los requisitos mínimos de publicación.
2. Cumplido el punto anterior se someten a una preselección por parte del comité director de la revista.
3. Los artículos preseleccionados son revisados por al menos dos de los miembros del consejo editorial.
4. Por último se envían a evaluadores externos, especialistas en el tema.
5. Aprobadas estas etapas se incluye en la lista de artículos que se van a publicar.

En cada etapa se van eliminando los artículos que no cumplan con los requerimientos necesarios para su publicación. En caso de que requieran alguna modificación, se le informará al autor para que tenga la oportunidad de corregirla y continuar el proceso. Si el artículo es rechazado o aprobado para su publicación se le informa de inmediato al autor respectivo.



SUSCRIPCIÓN

Ingrese sus datos personales en el sitio oficial de la revista:
<http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial>



La revista *Infraestructura Vial* del LanammeUCR se distribuye bajo la licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional

EN ESTA EDICIÓN

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE CHOQUES VIALES A NIVEL DISTRITAL PARA LA GRAN ÁREA METROPOLITANA

Statistical analysis of road crashes at the district level for the greater metropolitan area

Darío Vargas Aguilar Jonathan Agüero Valverde, Ph.D.

01

FACTORES CAMIÓN PARA DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES EN COSTA RICA: ANÁLISIS HISTÓRICO EN EL PERÍODO 2007-2017

Truck factors for flexible pavement design in Costa Rica: Historical analysis for the 2007-2017 period

Jaime Allen, Ph.D. Eliécer Arias Barrantes, M.Sc. Catalina Vargas Sobrado, M.Eng. Allan Ureña Bermúdez

11

MICROSCOPÍA DE FUERZA ATÓMICA COMO HERRAMIENTA EN LA INVESTIGACIÓN DE ASFALTOS

Atomic force microscopy as a tool in asphalt research

Adriana García Karina Kikut Cruz

20

HOMENAJE A LA INGENIERA E INVESTIGADORA FABIOLA MIRANDA ARGÜELLO

28

ESTA REVISTA ES PRODUCIDA POR:



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

PITRA

Programa de
Infraestructura del
Transporte

ESTA REVISTA ESTÁ INDEXADA EN:



Esta es una publicación del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR), ubicado en la Ciudad de la Investigación, San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica.

Tel.: (506) 2511-2500, Fax: (506) 2511-4440, Código Postal: 11501-2060 San José, correo: revistaiv.lanamme@ucr.ac.cr

Los comentarios de los artículos firmados son responsabilidad de sus autores. La revista Infraestructura Vial y el LanammeUCR no necesariamente comparten los criterios expresados en ellos.

El equipo editorial presenta el segundo número del año 2020, el cual contempla dos artículos científicos, una revisión bibliográfica y una sección especial. Las investigaciones incluidas en este número son de gran importancia para la administración, tratando temas como el análisis de choques viales y factores camión para diseño de estructuras de pavimentos, adicionalmente se muestra avances tecnológicos para la investigación en el asfalto.

En el primer artículo titulado **Análisis estadístico de choques viales a nivel distrital para la gran área metropolitana**, se busca introducir las relaciones entre características de la población y variables de uso de suelo con la frecuencia de choques en la gran área metropolitana de Costa Rica. De este análisis se obtienen resultados interesantes y modelos estadísticos que pueden ayudar a entender de mejor manera dicho fenómeno.

El segundo artículo **Factores camión para diseño de pavimentos flexibles en Costa Rica: análisis histórico en el período 2007-2017**, muestra los hallazgos de un análisis de distintas bases de datos, para generar factores camión confiables en el diseño de pavimentos para Costa Rica. Este artículo responde a la necesidad de tener factores camión confiables y actualizados.

El tercer artículo **Microscopía de fuerza atómica como herramienta en la investigación de asfaltos**, es una revisión bibliográfica para la aplicación de los distintos modos de operación de equipo y como se pueden emplear en el estudio del asfalto, para comprender el comportamiento del material desde el nivel microscópico.

Por último, esta revista presenta la **Sección Especial en homenaje a la Ingeniera e Investigadora Fabiola Miranda Argüello**, quien fue editora de esta revista. Una compañera que si algo la caracterizó fue su emprendimiento, ya sea en lo académico, laboral o deportivo, y su conversación inteligente. Esta pequeña reseña de parte de familia, amigos y compañeros de trabajo; muestra una fracción de lo que fue su vida y el impacto que tuvo sobre quienes la conocieron.

En memoria de Fabiola Miranda Argüello (1991-2020). Seguirás con nosotros en nuestro afecto y recuerdo.

Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc.
Directora de la Revista Infraestructura Vial
LanammeUCR

DIRECTORA GENERAL

Ing. Ana Luisa Elizondo Salas, M.Sc.
LanammeUCR
ana.elizondosalas@ucr.ac.cr

EDITORA

Quím. Alejandra Baldi, M.Sc.
LanammeUCR
alejandra.baldi@ucr.ac.cr

EDITOR

Ing. Piero Laurent Matamoros
LanammeUCR
piero.laurent@ucr.ac.cr

MAQUETACIÓN Y DIAGRAMACIÓN

Licda. Daniela Martínez Ortiz, LanammeUCR
daniela.martinezortiz@ucr.ac.cr

CONTROL DE CALIDAD

Oscar Rodríguez Quintana, LanammeUCR
oscar.rodriguezquintana@ucr.ac.cr

CONSEJO EDITORIAL

Dr. Jose Pablo Aguiar Moya
Universidad de Costa Rica, LanammeUCR

Dr. Jonathan Agüero Valverde
Universidad de Costa Rica, ProDus

Dr. Adrián Ricardo Archilla
Universidad de Hawaii, Estados Unidos

Dr. Fabricio Leiva Villacorta
Universidad de Auburn, Estados Unidos

M.Sc. Javier Zamora Rojas
Universidad de Costa Rica, LanammeUCR

Análisis estadístico de choques viales a nivel distrital para la gran área metropolitana

Statistical analysis of road crashes at the district level for the greater metropolitan area

Darío Vargas Aguilar

Programa de investigación en Desarrollo Urbano Sostenible
Universidad de Costa Rica
Costa Rica
dario.vargasaguilar@ucr.ac.cr

Jonathan Agüero Valverde, Ph.D.

Programa de investigación en Desarrollo Urbano Sostenible
Universidad de Costa Rica
Costa Rica
jonathan.aguero@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 01 de julio de 2020 / **Fecha de aprobación:** 23 de noviembre de 2020

RESUMEN

Debido al incremento constante de choques viales que ocurre en el país, se buscó determinar las características socioeconómicas de la población y las variables de uso de suelo relacionadas con la frecuencia con la que estos ocurren a nivel de distrito en la Gran Área Metropolitana (GAM), de manera que fuera posible incluir criterios de seguridad vial en las políticas de planificación urbana.

Se elaboraron modelos estadísticos de estimación de choques, utilizando la distribución binomial negativa a partir del uso de suelo de la GAM. Se incluyeron las variables socioeconómicas de la población y variables asociadas a la red vial. Se determinaron las variables representativas en cada uno de los tipos de choque analizados como, por ejemplo, la población total, y se realizó la estimación de choques esperados para cada uno de los distritos en estudio. Adicionalmente, se determinaron los distritos con mayor exceso de frecuencia, donde sobresale el distrito de Alajuela que resultó ser el más problemático. También resultaron con importantes excesos de choques los distritos de Uruca, Hospital, San Nicolás, Río Segundo, Heredia, entre otros.

Palabras clave: Choques viales; modelos estadísticos; seguridad vial; exceso de choques.

ABSTRACT

Due to the constant increase in the number of road crashes that occur in the country, it was sought to determine the socio-economic characteristics of the population and the variables of land use related to the frequency of road crashes at the district level in the Greater Metropolitan Area (GAM). This will make possible to include road safety criteria in urban planning policies.

Statistical models of crash estimation were developed, using the negative binomial distribution based on the land use of the GAM. The socio-economic variables of the population and variables associated with the road network were included. The representative variables in each of the types of crashes analyzed were determined, such as the total population, and the estimation of expected crashes was performed for each of the districts under study. Additionally, the districts with the highest frequency were determined, where the Alajuela district stands out, which proved to be the most problematic. The districts of Heredia, Uruca, Hospital, San Nicolás, Río Segundo, among others, also resulted in significant excesses of crashes.

Keywords: Road crashes; statistical models; road safety; excesses of crashes.

INTRODUCCIÓN

La seguridad vial es un área de estudio que cada año adquiere más importancia, ya que el crecimiento en el nivel de motorización mundial ha agravado la problemática de los choques viales, que han alcanzado el punto de ser declarado un problema de salud pública por parte de la Organización Mundial de la Salud y formar parte de la agenda para el desarrollo sostenible por parte de las Naciones Unidas. Esto genera anualmente la pérdida de millones de vidas humanas, así como serias lesiones a otros millones de personas (World Health Organization [WHO], 2018). Adicionalmente, a estas pérdidas humanas deben añadirse los costos económicos asociados a las demoras y daños a la propiedad (ProDUS, 2015). Es por esto por lo que surge la necesidad de buscar maneras de reducir la ocurrencia y gravedad de los choques viales.

A nivel internacional existen investigaciones centradas en relacionar las características del uso del suelo con la frecuencia de choques viales, por ejemplo, en 2013 Srinivas Pulugurtha; Venkata Rammana Duddu y Yashaswi Kotagiri realizaron la investigación *“Traffic analysis zone level crash estimation models based on land use”*. Utilizando datos de choques viales y uso de suelo del año 2005, el estudio analizó las denominadas zonas de análisis de tráfico en la ciudad de Charlotte, en el condado de Mercklenburg en Carolina del Norte, relacionándolas con diferentes categorías de uso de suelo como, por ejemplo, residencial, mixto, comercial e industrial. Los investigadores utilizaron un modelo binomial negativo y verificaron los resultados obtenidos mediante una prueba chi-cuadrada (χ^2) con 95% de confianza. Determinaron que los diferentes usos de suelo presentaban una estrecha relación positiva con la ocurrencia de choques viales.

Otro ejemplo es la investigación de 2016 titulada *“Investigating the Effects of Traffic, Socio-Economic and Land Use Characteristics on Pedestrian and Bicycle Crashes: A Case Study of Melbourne, Australia”*, Richard Amoh-Gyimah utilizó variables socioeconómicas, densidad poblacional y de uso de suelo para generar modelos estadísticos que permitieran determinar la relación de estas variables con los atropellos y choques a ciclistas. Para los modelos fue utilizada la distribución binomial negativa y se determinó que la cantidad de kilómetros viajados por vehículo, la cantidad de adultos mayores y el porcentaje de hogares sin automóvil, tienen una correlación positiva con

respecto a la cantidad de atropellos a ciclistas y peatones. A nivel latinoamericano las investigaciones de este tipo son escasas. En el caso de Costa Rica no existen investigaciones en el tema, por lo que es necesario incursionar en este campo.

La presente investigación tiene como objetivo determinar las variables relacionadas con la frecuencia de choques viales en los distritos de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica (GAM). Para ello fue requerido elaborar modelos estadísticos a partir de características socioeconómicas y de uso del suelo que permitieran identificar las variables que inciden en la ocurrencia de choques viales. Se considera que, al identificar estas variables, será posible incluir aspectos relacionados al uso del suelo en las políticas y normativas de seguridad vial. Esto permitiría mejorar la planificación territorial.

METODOLOGÍA

Bases de datos

Se utilizó información de diferentes bases de datos tales como el uso de suelo escala 1:1000 del proyecto de Planificación Regional y Urbana de la GAM (PRUGAM) (Instituto Geográfico Nacional, 2008), proyecciones de población (Instituto Nacional de Estadística y Censos de Costa Rica, 2014), información socioeconómica obtenida del censo poblacional 2011 (Instituto Nacional de Estadística y Censos de Costa Rica, 2011), inventario de carreteras del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (2012) y bases de datos de choques viales del Consejo Nacional de Seguridad Vial (COSEVI) (Consejo de Seguridad Vial, 2016).

Se creó una base de datos unificada, para ello fue necesario como trabajo previo completar el uso de suelo del PRUGAM en el área de estudio, para lo cual se utilizaron fotografías aéreas y sistemas de información geográfica. El uso de sistemas de información geográfica también fue requerido en otras bases de datos, esto con el fin de relacionar las diferentes variables con su respectivo distrito. Una vez unificadas las bases de datos se determinó las posibles variables de interés para incluir en los modelos, estas variables fueron seleccionadas con base en revisión bibliográfica. Se determinó además las estadísticas descriptivas de estas variables, algunas de las cuales se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Estadísticas descriptivas de algunas variables analizadas

Variable	Máximo	Mínimo	Promedio	Desviación estándar	Mediana
Uso de suelo tipo bosque y protección	54,8%	0,0%	16,6%	14,3%	12,2%
Uso de suelo tipo comercial y servicios	33,5%	0,0%	3,9%	6,1%	1,4%
Uso de suelo tipo industrial	29,2%	0,0%	4,0%	5,9%	1,8%
Uso de suelo tipo agropecuario	93,6%	0,6%	41,8%	23,1%	44,2%
Uso de suelo tipo residencial	93,6%	1,4%	33,7%	23,7%	30,4%
Población entre los 0 y los 14 años	29,8%	9,4%	22,6%	3,4%	23,0%
Población entre los 15 y los 24 años	21,2%	14,3%	18,0%	1,4%	17,8%
Población entre los 25 y los 64 años	65,6%	42,4%	52,4%	3,7%	52,4%
Población de 65 años o más	10,8%	4,6%	7,0%	1,3%	6,6%
Población total en miles de habitantes	79,41	0,90	14,45	11,75	10,4
Vehículo Kilómetro año 2012*	0,68	0,00	0,09	0,12	0,05
Vehículo Kilómetro año 2013*	0,68	0,00	0,09	0,12	0,05
Vehículo Kilómetro año 2014*	0,71	0,00	0,10	0,12	0,05

*Vehículos Kilómetro en millones

Elaboración del Modelo Binomial Negativo

Para elaborar modelos estadísticos, se utilizó la distribución binomial negativa. Se consideró que el logaritmo natural del número estimado de choques es una combinación lineal de variables independientes. Asimismo, que la distribución binomial negativa puede tratarse como una distribución de Poisson con promedio λ , donde λ es una variable aleatoria con distribución Gamma (Agüero-Valverde, 2016). Entonces, para una variable discreta aleatoria, Y , y la frecuencia observada i donde $Y_i = 1, \dots, n$ el modelo binomial negativo esta dado por la ecuación 1.

$$\ln \lambda = \beta_i x_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

Para este modelo λ es la cantidad esperada de eventos por distrito, x_i es un vector de variables y ε representa el error de especificación o la heterogeneidad entre secciones. Donde β_i es el cambio proporcional en el número esperado de eventos por período de una unidad de cambio en una variable independiente x_j (Fuentes y Hernández, 2009).

Para la elaboración de los modelos se utilizó el software estadístico R, se consideró un modelo base que relacionó de manera proporcional la cantidad total de choques ocurridos por distrito y el logaritmo natural de los vehículo-kilómetro en el mismo distrito. El modelo base fue modificado, agregando o eliminado variables, hasta obtener un modelo capaz de realizar una mejor aproximación de los datos que el modelo previo. Para determinar si un modelo realiza una mejor aproximación

que el modelo base, es necesario verificar la bondad de ajuste. Para ello, se utilizaron indicadores estadísticos como la pseudo- R^2 de McFadden o la prueba de relación del logaritmo de verosimilitud.

En el caso de la pseudo- R^2 de McFadden, se tiene que el modelo presenta un mejor ajuste respecto a los datos observados cuando el valor de R^2 se acerca a uno y disminuye cuando se aleja de este valor, siempre en el intervalo $[0,1]$. La prueba de relación del logaritmo de verosimilitud establece el aporte de una determinada variable al ajuste de los datos respecto al modelo base existente, de manera que es posible determinar la independencia de una variable respecto a las presentes en el modelo. Para efectos de esta prueba se utilizó un grado de confianza de 0,05; por lo tanto, se consideró que un modelo presenta mejor ajuste si $P_x^2(D,A) < 0,05$, donde D representa el doble del logaritmo de la diferencia de verosimilitud entre el modelo base y el modelo anidado; y A representa la diferencia entre los grados de libertad del modelo base y el modelo anidado.

También se utilizó el criterio de *Akaike Information Criterion* (AIC, por sus siglas en inglés) para realizar comparaciones entre modelos no anidados, según Caballero (2011), el AIC permite identificar el mejor modelo entre varias opciones, ya que se puede interpretar como una aproximación de la bondad de ajuste del modelo. Este criterio cuenta con dos partes, una que premia la bondad de ajuste del modelo, mientras la segunda parte penaliza la inclusión de parámetros adicionales según el principio de parsimonia, de manera que el modelo con menor valor de AIC es el mejor de los considerados.

Determinación del exceso de frecuencia de choques

Una vez determinadas las variables de cada modelo y sus respectivos coeficientes, se estimó la cantidad de choques para cada distrito mediante la función de desempeño asociada al respectivo modelo. Posteriormente, con el fin de determinar los excesos de frecuencia, se calculó un valor de ajuste por peso. Dicho ajuste contempla el parámetro de sobre dispersión, por lo que permite determinar la confiabilidad de la función de desempeño, de manera que, al disminuir la dispersión, la función de desempeño es más confiable (Agüero-Valverde, 2016). Este factor de peso se calcula según la ecuación 2.

$$w = \frac{1}{1 - \emptyset(N_{estimado})} \quad (2)$$

Donde \emptyset es el parámetro de sobre dispersión y w se conoce como peso de Bayes empírico. Una vez determinado el peso de Bayes empírico es posible determinar la cantidad de choques esperados en un distrito mediante el uso de la ecuación 3.

$$N_{esperado} = wN_{estimado} + (1 - w)N_{observado} \quad (3)$$

Conociendo el valor de choques esperados se determina el exceso de frecuencia de choques por distrito según la ecuación 4.

$$\Delta = N_{esperado} - N_{estimado} \quad (4)$$

Cuadro 2. Modelo de estimación de cantidad de choques totales anuales por distrito para la GAM

Variable	Promedio de coeficiente	Error estándar de coeficiente	t-Student	P(> t)
Intercepción	1,630	0,255	6,4	1,70e-10
Log (Población total)	0,944	0,040	23,4	< 2e-16
Log (Vehículo-kilómetro)	0,254	0,021	12,1	< 2e-16
Porcentaje de territorio dedicado a uso de suelo comercial y de servicios	8,765	0,605	14,5	< 2e-16
Porcentaje de personas de 65 años o más	19,266	2,879	6,7	2,22e-11

Nota: Desviación nula: 2373,15. Desviación residual: 509,43. Theta: 2,438. Error estándar: 0,155. 2xLog(Verosimilitud): -5421,976. Pseudo R²: 0,785. AIC: 5433,8. Desviación nula solo con constante: 590,24. $P_{\chi^2}(z): 1,11e-16$

RESULTADOS

Modelos estadísticos

Para la elaboración de los modelos estadísticos se partió de una hipótesis nula, donde la cantidad de choques esperados en cada distrito era igual a la media de la distribución de datos. Posteriormente, se determinó una variable inicial con el fin de generar un modelo diferente del modelo nulo. Dicha variable fue el logaritmo natural del vehículo-kilómetro.

Se realizó una prueba de bondad de ajuste con el fin de determinar si la inclusión de esta variable al modelo genera una mejora en la predicción de los datos observados. Como criterio para determinar la bondad de ajuste se utilizó la prueba de relación del logaritmo de verosimilitud a un nivel de confianza de 0,05. Una vez obtenido el nuevo modelo nulo, este se utilizó como base para la generación de modelos más complejos. En los casos en los que existieron dos o más modelos cuya relación del logaritmo de verosimilitud fuera de 0,05 o menor, se utilizó el criterio de AIC y el pseudo R² para determinar el modelo con mejor ajuste. Se continuó realizando el procedimiento de forma iterativa hasta que ningún nuevo modelo tuviera un valor de 0,05 o menor en la prueba de bondad de ajuste.

Mediante el procedimiento anterior, para el modelo de estimación de choques totales, se obtuvieron los parámetros mostrados en el Cuadro 2. A su vez, para el modelo de estimación de atropellos a personas, se obtuvieron los parámetros mostrados en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Modelo de estimación de atropellos a personas por distrito para la GAM

Variable	Promedio de coeficiente	Error estándar de coeficiente	t-Student	P(> t)
Intercepción	2,140	0,345	6,2	5,57e-10
Log (Población total)	1,054	0,058	18,2	< 2e-16
Log (Vehículos kilómetro)	0,085	0,028	3,0	0,00247
Porcentaje de territorio dedicado a uso de suelo residencial	0,057	0,217	2,3	0,01936
Porcentaje de personas entre los 0 y los 14 años	-13,398	1,543	-8,7	< 2e-16

Nota: Desviación nula: 1495,00. Desviación residual: 493,47. Theta: 2,645. Error estándar: 0,246. 2xLog(Verosimilitud): -2560097. Pseudo R²: 0,67. AIC: 2572,1. Desviación nula solo con constante: 545,69. $P_{\chi^2}(z)$: 1,24e-10

También es posible expresar estos modelos en forma algebraica como se muestra en la ecuación 5 y la ecuación 6.

- Estimación de choques totales anuales por distrito

$$C_T = X^{0,944} Y^{0,254} e^{1,63+8,76Z+19,264W} \quad (5)$$

- Estimación de choques de tipo atropello a persona por año y por distrito

$$C_P = X^{1,05} Y^{0,085} e^{2,14+0,057T-13,40U} \quad (6)$$

Donde C_T es la cantidad de choques totales esperados durante un año en un distrito, C_P es la cantidad de choques de tipo atropello a persona esperados durante un año en un distrito, X es la población total en miles de habitantes, Y es la cantidad de vehículo-kilómetro de las rutas nacionales en millones de vehículos, T es la fracción del distrito destinada a uso de suelo residencial, U es la fracción de la población entre 0 y 14 años, W es la fracción de la población con 65 años o más y Z es la fracción del distrito destinada a uso de suelo comercial y de servicios.

De los modelos anteriores, se puede apreciar en el caso del modelo de estimación de choques totales mostrado en el Cuadro 1, que la variable de mayor peso es el porcentaje de personas adultos mayores en el distrito. Según el modelo obtenido un incremento del 1% en la población adulta mayor del distrito representa un incremento del 21% en la cantidad de choques estimados. En el caso del porcentaje del territorio destinado al uso de suelo comercial y de servicios el modelo refleja que un incremento del 1% en la variable genera un aumento del 9% en la cantidad de choques estimados.

Para la población total del distrito, se obtuvo que al aumentar la cantidad de habitantes del distrito se aumenta la cantidad de choques estimados mediante el modelo. Dichos incrementos en la cantidad de choques son menores con cada mil habitantes

adicionales, ya que se presenta una tasa decreciente de aumento. Este mismo efecto sucede con la variable vehículo-kilómetro, la cual también presenta una tasa decreciente de aumento. Por otro lado, al comparar los valores de los exponentes de estas dos variables, se determinó que se generan mayores incrementos en los choques estimados al aumentar la población que al aumentar el valor de vehículo-kilómetro.

Para el modelo de estimación de choques de tipo atropello a persona, se obtuvo que la variable población total del distrito presenta un aporte positivo al modelo. Esta variable presenta una tasa de aporte creciente, lo que implica que al crecer la población del distrito aumentará la cantidad de atropellos estimados y a su vez, cada unidad (mil habitantes) adicional generará un mayor incremento en la cantidad de atropellos que la unidad previa. En este modelo cobra relevancia el uso de suelo residencial, para esta variable se espera que un incremento de 1% genera un aumento del 0,01% en la cantidad de atropellos a personas estimado. Otra variable importante es el porcentaje de la población que se encuentra entre los 0 a los 14 años, esta variable genera un aporte negativo por lo que por cada incremento de 1% representa una disminución del 14,3% de los atropellos estimados.

Las variables que fueron identificadas como relevantes en ambos modelos son consistentes con las investigaciones mencionadas en la sección de introducción, así como otras relacionadas al tema, por ejemplo: "Predicting Local Road Crashes Using Socio-economic and Land Cover Data" elaborada por Kai Wang, John Ivan, Amy Burnicki y Sha Mamun (2017).

Mediante los modelos anteriores se realizó una estimación de los valores esperados para cada uno de los años de los que se tiene registro. Para esto, se utilizaron las ecuaciones 5 y 6 en conjunto con los datos de uso de suelo, tránsito y socioeconómicos respectivos de cada distrito. Debido a que el área de estudio

comprende un total de 160 distritos, únicamente se presenta la información para los 16 distritos con mayor cantidad de choques estimados. En la Figura 1 y la Figura 2 se muestra la cantidad estimada de choques totales y la cantidad de choques de tipo atropello a persona, respectivamente.

En la Figura 1 es posible apreciar que, con excepción de Alajuela, los distritos con mayor cantidad de choques totales estimados se encuentran ubicados en la provincia de San José, mayoritariamente en el cantón del mismo nombre. El distrito

de Pavas es el que presenta más choques estimados superando los 4300 choques para cada uno de los años en estudio, mientras que el distrito de Alajuela se ubica en la posición 16 y la cantidad de choques estimada oscila entre 900 y 1000 choques anuales. Sin embargo, según los datos suministrados por el COSEVI el distrito de Alajuela es el que presenta mayor cantidad de choques cada año, esta diferencia entre los choques ocurridos y los estimados implica que existe un exceso de frecuencia de choques para ciertos distritos como es el caso de Alajuela.

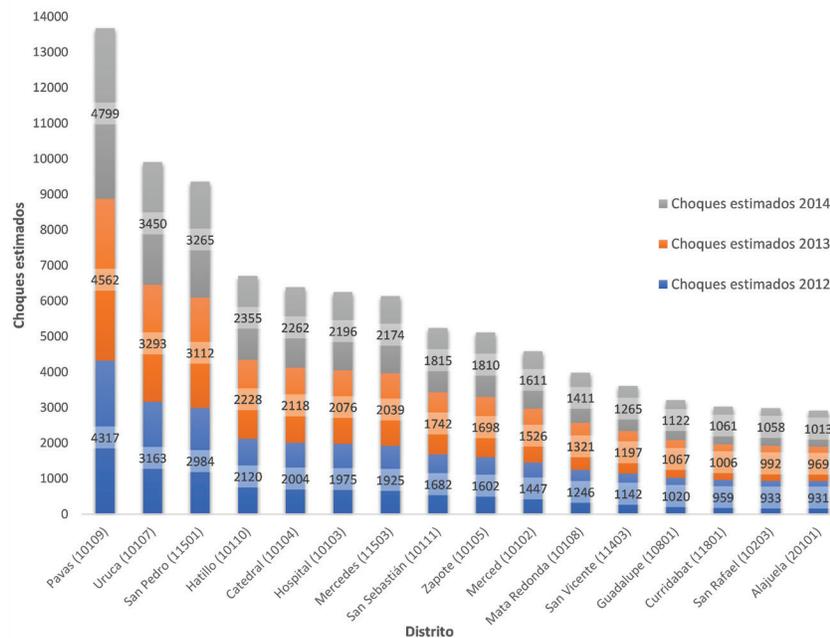


Figura 1. Cantidad total de choques viales estimados según distrito

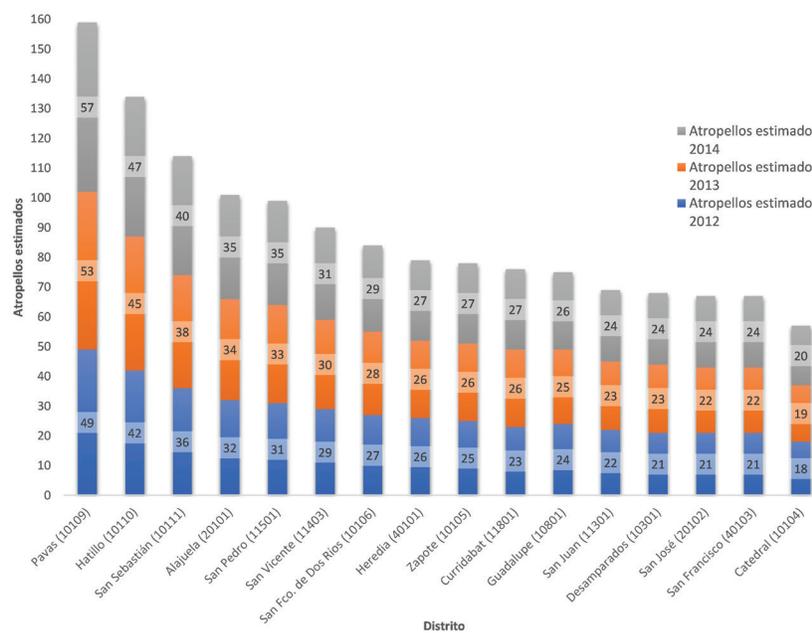


Figura 2. Cantidad estimada de atropellos a personas según distrito

Una situación similar ocurre con los choques de tipo atropello a persona, en la Figura 2 se muestra que los distritos con mayor cantidad de atropellos se encuentran en las cercanías de importantes ciudades como San José, Heredia y Alajuela, siendo distritos con vocación urbana. Para este caso nuevamente el distrito de Pavas presenta la mayor cantidad estimada de choques, no obstante, esto difiere de la realidad según los datos suministrados por el COSEVI.

Exceso de frecuencia

Con el fin de determinar cuáles de los distritos analizados presenta mayor problema de choques se calculó el exceso de frecuencia para cada caso, esto se realizó siguiendo el procedimiento descrito en la sección referente a metodología. Se determinó que, para el caso de choques totales, 53 de los 160 distritos en estudio presentan exceso de frecuencia, siendo el distrito de Alajuela el que más exceso presenta con valores

anuales superiores a mil choques adicionales. En la Figura 3 se muestran los distritos con más exceso de frecuencia, además de Alajuela, se detectó que Desamparados, Heredia, Ulloa, Curridabat y San Rafael de Escazú no solo presentan un elevado exceso de frecuencia, sino que forman parte de los distritos con más choques anuales reportados por el COSEVI.

Por otro lado, al analizar la distribución espacial de los distritos mostrados en la Figura 3, se puede detectar que existen regiones donde se concentra el exceso de frecuencia, para los choques totales se detectaron tres grupos importantes, el primero formado por Alajuela, Río Segundo y San Joaquín, el segundo por Pozos, Santa Ana, Escazú y San Rafael de Escazú y el tercer grupo formado por Oriental, Occidental y San Nicolás de Cartago, como se observa en la Figura 4. Debe señalarse que estos tres grupos de distritos son atravesados por importantes rutas primarias como es el caso de las rutas nacionales 2, 3 y 27.

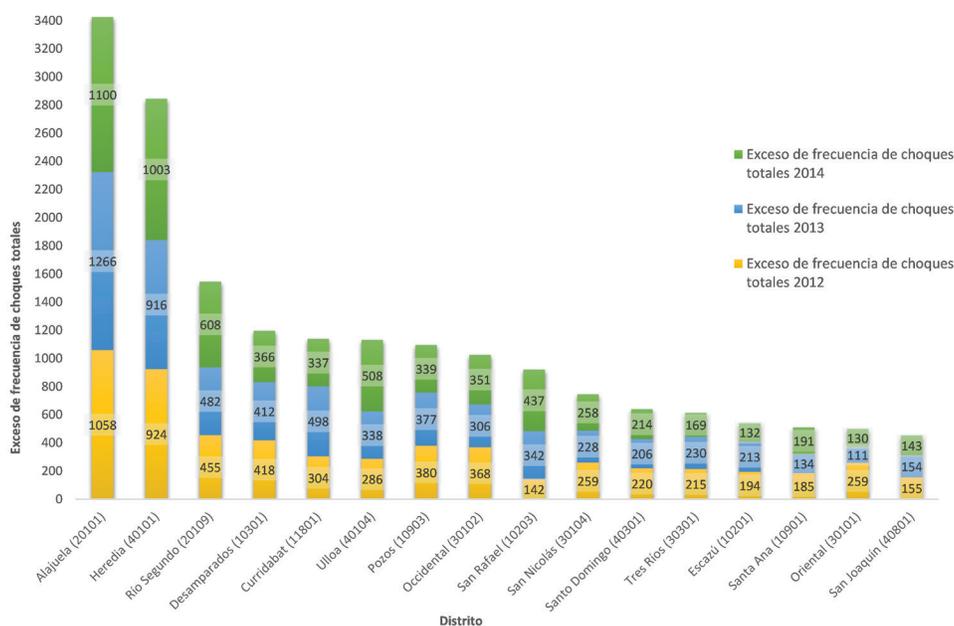


Figura 3. Exceso de choques totales para los distritos con mayor exceso de frecuencia

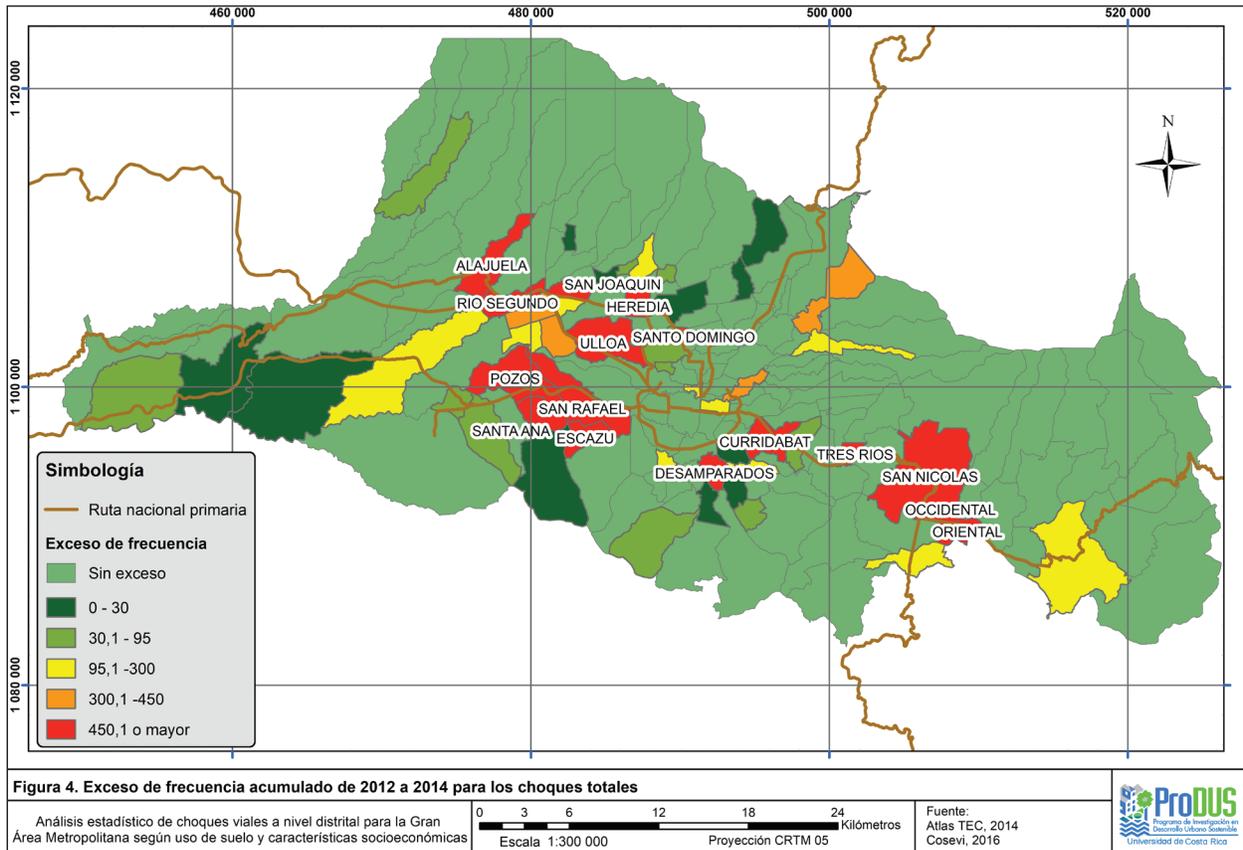


Figura 4. Distribución espacial de los distritos con exceso de choques totales

En el caso de los choques de tipo atropello a persona, la Figura 5 se muestra los distritos con más exceso de frecuencia. Se aprecia que el año 2013 fue especialmente complicado para este tipo de choques ya que se da un incremento importante respecto a la cantidad del año 2012, esto ocurre en distritos como Alajuela, Hospital, Merced, Desamparados, Carmen

y Guadalupe. Asimismo, se da un fenómeno similar de incremento durante el año 2014 para distritos como Heredia, Ulloa y San Rafael de Escazú. También se puede observar que existen al menos siete distritos donde el exceso de frecuencia es de 15 o más atropellos anuales. En estos distritos el exceso de frecuencia oscila entre el 40% y el 80% de la cantidad de

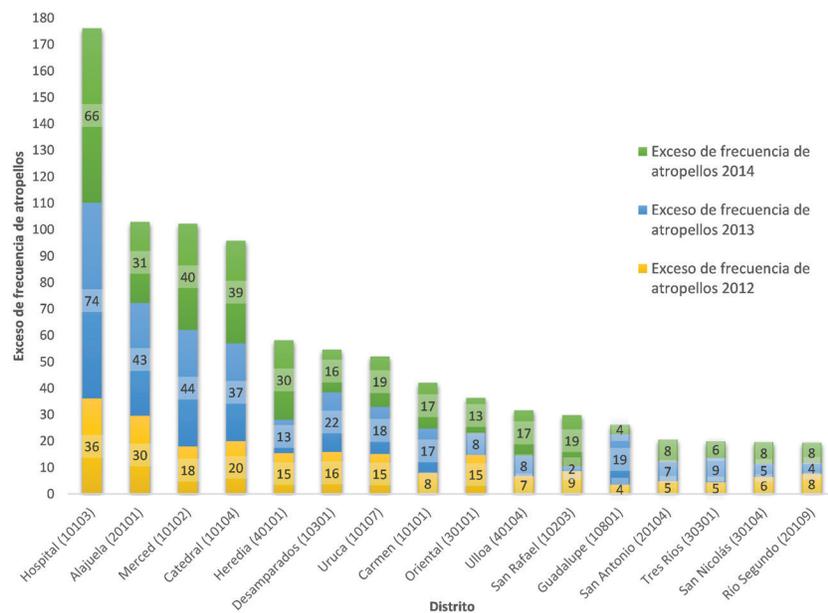


Figura 5. Exceso de atropellos para los distritos con mayor exceso de frecuencia

choques esperados para su correspondiente distrito. Estos valores especialmente alarmantes al considerar que los peatones son los usuarios más vulnerables de la red vial.

En el caso de los atropellos, también es posible detectar bloques en los que se concentra el exceso de frecuencia, existe un área importante formada por los distritos de Ulloa, Uruca, Guadalupe, Catedral, Carmen, Hospital y Merced, siendo los tres últimos los que reportan más exceso de atropellos superando los 96 anuales en cada distrito. Adicionalmente, existe una pequeña región formada por los distritos de Alajuela y San Antonio, como se muestra en el Figura 6. Se debe señalar que los distritos con más exceso de frecuencia de atropellos abarcan los distritos que forman las principales ciudades del país, algunas de estas ciudades, como es el caso de San José y Cartago, están formadas por más de un distrito.

CONCLUSIONES

Se determinó que la población total del distrito es una variable representativa en todos los modelos evaluados. Esta variable tiene un impacto directo y positivo en la incidencia de choques

viales, de manera que incrementos en la población de un distrito repercuten en una mayor frecuencia de choques. Misma situación ocurre con la variable vehículo-kilómetro.

El porcentaje de uso de suelo comercial y de servicios es una variable representativa para el modelo de choques totales, la variable presenta un aporte positivo al modelo.

El porcentaje de uso de suelo residencial es una variable representativa en la estimación de atropellos a personas, se determinó que, a mayor porcentaje de uso de suelo residencial, mayor la cantidad de atropellos en el distrito.

Se determinó que el porcentaje de la población con edad igual o mayor a 65 años es una variable representativa, que aporta de manera positiva a la cantidad de choques totales estimados por año en un determinado distrito. Esta variable puede tener un efecto en el modelo por cuanto las personas en este rango edad presentan menos velocidad de reacción, más problemas de visión y movilidad que podrían afectar sus habilidades como conductores y, por consiguiente, verse involucrados en choques.

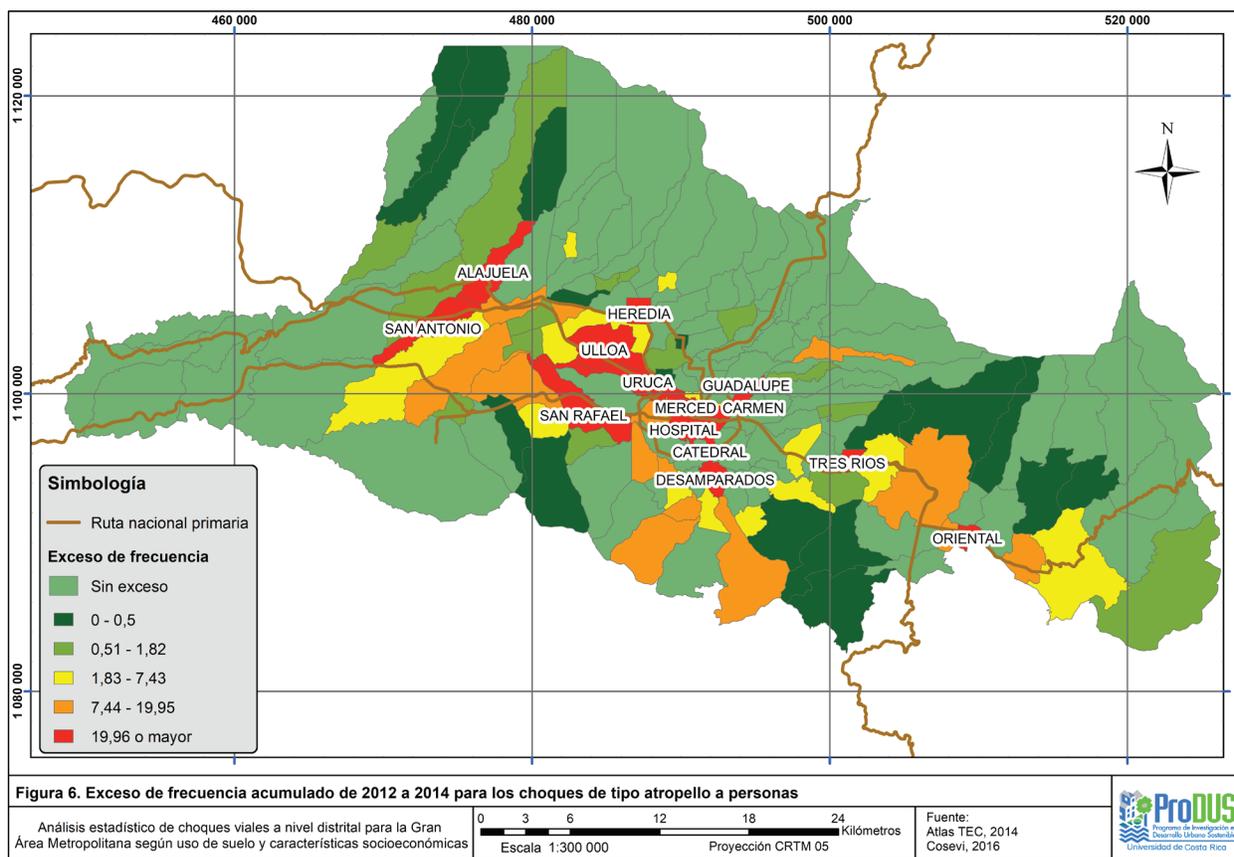


Figura 6. Distribución espacial de los distritos con exceso de atropellos

Se determinó que el porcentaje de habitantes entre las edades de 0 a 14 años es una variable representativa y que influye de manera negativa en la incidencia de atropellos en un distrito, por ende, entre mayor la población entre los 0 a los 14 años, se estima una menor cantidad de atropellos a personas. Esta variable puede tener efecto en el modelo, por cuanto en las zonas con más niños y adolescentes usualmente los conductores tienden a estar más alerta ante posibles situaciones imprevistas. Por otro lado, existen más zonas de velocidad restringida como escuelas y colegios lo que genera que los conductores viajen a menor velocidad, mejorando su posibilidad de reacción.

Se determinó la existencia de bloques de distritos con exceso de choques para todas las categorías de choques analizadas, mostrando la posibilidad de realizar análisis espaciales de concentración de choques con una unidad geoespacial diferente del distrito, con el fin de determinar los motivos de estos excesos de frecuencia a nivel regional.

El distrito de Alajuela es el distrito más problemático en términos de choques viales, por lo que requiere de especial atención por parte de las autoridades competentes.

REFERENCIAS

- Agüero-Valverde, J. (2016). Determinación de rutas con potencial de mejora utilizando funciones de desempeño de seguridad vial: caso de Costa Rica. *Infraestructura Vial*, 18(32), 39-52. DOI: 10.15517/iv.v18i32.29783
- Amoh-Gyimah, R., Sarvi, M. y Saberi, M. (2016). *Investigating the effects of traffic, socioeconomic, and land use characteristics on pedestrian and bicycle crashes: a case study of Melbourne, Australia* (No. 16-1931). En *Transportation Research Board 95th Annual Meeting*, Washington DC, United States.
- Caballero, F. (2011). *Selección de modelos mediante criterios de información en análisis factorial. Aspectos teóricos y computacionales*. (Tesis doctoral, Universidad de Granada). Recuperado de: <https://hera.ugr.es/tesisugr/19964808.pdf>
- Consejo de Seguridad Vial (2016). *Datos de accidentes de Tránsito en la Gran Área Metropolitana periodo 2012-2014* [Fichero de datos sin publicar]. San José, Costa Rica.
- Fuentes, C. M. y Hernández, V. (2009). La estructura espacial urbana y la incidencia de accidentes de tránsito en Tijuana, Baja California (2003-2004). *Frontera norte*, 21(42), 109-138.
- Instituto Geográfico Nacional (2008). *Hojas cartográficas de Uso de la Tierra en la Gran Área Metropolitana del Proyecto PRUGAM* (1:10,000), San José Costa Rica. Recuperado de: https://www.mivah.go.cr/PRUGAM_Cartografia_Alphabetica.shtml
- Instituto Nacional de Estadística y Censos de Costa Rica (2011). *Censo 2011 Distribución porcentual de los hogares por número de carencias críticas, según distrito* [Fichero de datos]. Obtenido de <http://www.inec.go.cr/pobreza-y-desigualdad/otros-metodos-de-pobreza>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos de Costa Rica (2014). *Estadísticas demográficas. 2011-2025. Proyecciones nacionales: Población total proyectada al 30 de junio por grupos de edades, según provincia, cantón, distrito y sexo* [Fichero de datos]. Recuperado de <http://www.inec.go.cr/poblacion/estimaciones-y-proyecciones-de-poblacion>
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes (2013). *Anuario De Información De Tránsito 2012*. Recuperado de: <http://repositorio.mopt.go.cr:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/399/388-4.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pulugurthaa, S. S., Duddub, V. R. y Kotagiri, Y. (2013). Traffic analysis zone level crash estimation models based on land use. *Accident Analysis and Prevention*, 50, 678-687. DOI: 10.1016/j.aap.2012.06.016
- Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible (ProDUS) (2015). *Costos de los choques viales en Costa Rica* (Informe Final Proyecto 321-B0602). Recuperado de: <https://www.ucr.ac.cr/medios/documentos/2015/informe-final.pdf>
- Wang, K., Ivan, J. N., Burnicki, A. C. y Mamun, S. A. (2017). Predicting local road crashes using socioeconomic and land cover data. *Journal of Transportation Safety & Security*, 9(3), 301-318.
- World Health Organization (2018). *Global status report on road safety 2018*. Geneva: World Health Organization.

Factores camión para diseño de pavimentos flexibles en Costa Rica: Análisis histórico en el período 2007-2017

Truck factors for flexible pavement design in Costa Rica: Historical analysis for the 2007-2017 period

Jaime Allen, Ph.D.

Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica
Costa Rica
jaime.allenmonge@ucr.ac.cr

Eliécer Arias Barrantes, M.Sc.

Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica
Costa Rica
eliecer.arias@ucr.ac.cr

Catalina Vargas Sobrado, M.Eng.

Unidad de Gestión Municipal
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica
Costa Rica
anacatalina.vargas@ucr.ac.cr

Allan Ureña Bermúdez

Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica
Costa Rica
allan.urena@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 10 julio 2020 / **Fecha de aprobación:** 23 noviembre 2020

RESUMEN

El factor camión es uno de los componentes principales en la estimación de la demanda de cargas que tendrá el pavimento de una carretera. Por este motivo, disponer de factores camión confiables es de suma importancia durante la etapa de diseño. En el presente estudio se recopiló y analizó bases de datos sobre factores camión calculados entre los años 2007 y 2017, por el LanammeUCR. Se contabilizaron más de 15 millones de vehículos pesados, distribuidos en diferentes rutas del país. Dada la necesidad de disponer de factores camión actualizados que consideren la realidad nacional, tanto en la época sin control de pesaje como durante esta, se generan factores camión que están asociados a un nivel de confiabilidad específico y que consideran la proporción de vehículos que contribuyen en su estimación.

Palabras clave: Confiabilidad; diseño de pavimentos; factor camión; pesaje.

ABSTRACT

The truck factor is one of the main components in the estimation of the load demand that pavements will have. For this reason, having reliable truck factors is of utmost importance during the design stage. In the present study, the databases on truck factors calculated between 2007 and 2017 were compiled and analysed by LanammeUCR. More than 15 million heavy vehicles were analysed, distributed on different routes in the country. Given the need to have updated truck factors that take into account the national reality, both during the period without weight control and during the period with, truck factors are generated that are associated with a specific level of reliability and that consider the proportion of vehicles that contribute to their estimate.

Keywords: Reliability; pavement design; truck factor; weighing.

INTRODUCCIÓN

Los factores camión que se utilizan actualmente en Costa Rica para el diseño de sobrecapas asfálticas y rehabilitaciones siguen las recomendaciones del oficio DVOP-5170-07, elaborado en el año 2007 por el Ing. Pedro Castro Fernández, entonces viceministro del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). El mismo se basó en la información recopilada a través de la encuesta de carga del año 2007, realizada por LanammeUCR (Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales [LanammeUCR], 2007; Ulloa Salazar, Badilla Vargas, Allen Monge y Sibaja Obando, 2008). Estos valores han sido ampliamente utilizados y corresponden al último pronunciamiento de la Administración respecto al tema de factores camión.

El Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR) realiza investigaciones en el tema de cargas vehiculares desde el año 2006, con el propósito de generar insumos de diseño actualizados, y que representen las condiciones reales y actuales de carga a las cuales se ven sometidas las estructuras de pavimento. En consecuencia, el informe LM-PI-AT-121-2017 (LanammeUCR, 2018) evidenció que los factores camión recomendados en el oficio DVOP-5170-07, se encuentran desactualizados, e insta a la Administración a que adopte valores actualizados por el LanammeUCR.

Con esta motivación, entre los esfuerzos del LanammeUCR, se incluye determinar factores camión actualizados y establecer una actualización continua de los mismos que permita poner a disposición de la ciudadanía y la Administración factores camión adecuados a la flotilla vehicular del país y, por lo tanto, variables de diseño de mayor confiabilidad.

Justificación

La vida útil de una estructura de pavimento puede verse comprometida por diversos factores, entre ellos: (i) las condiciones del medio ambiente en que se encuentra, (ii) características de los materiales que la componen, (iii) cantidad de vehículos que la transitan y (iv) falencias durante su proceso constructivo. Sin embargo, uno de los factores más significativos corresponde al tránsito de vehículos pesados que superan su carga máxima admisible, pues si bien los vehículos pesados son aquellos que generan mayor daño a una estructura de pavimento, también se ha demostrado que cuando se genera un incremento de carga más allá de lo permitido, el daño crece de manera exponencial (Allen y Badilla, 2011).

Asimismo, una estimación poco precisa de las cargas de tránsito induce a sobrediseños, que si bien son resistentes, tienen un costo elevado; o por el contrario, a subdiseños, incapaces de soportar la demanda a la que serán sometidos, ocasionando así un deterioro prematuro. Por tanto, conocer y controlar las cargas vehiculares a través de la estimación de factores camión es sumamente importante para asegurar un uso eficiente de los recursos públicos empleados en el diseño de pavimentos, y por ende en la búsqueda de una maximización en su vida útil.

Objetivo

El objetivo principal de la presente investigación es determinar factores camión actualizados y acordes con la realidad de carga nacional, por medio del análisis del registro histórico de los factores camión generados por el LanammeUCR, en sus diferentes proyectos. Además, se propone incorporar la incidencia que tiene la cantidad de vehículos pesados en las diferentes estimaciones de factores camión, en los distintos estudios que se han realizado, considerando un nivel de confianza específico.

Alcances

Para la estimación de factores camión globales se utilizaron todas las bases de datos que ha recopilado el LanammeUCR, mediante encuestas de carga, un proyecto de graduación dirigido por personal del LanammeUCR, y datos brindados por el MOPT, asociados a las estaciones de pesaje que operan en las diferentes rutas de la red vial nacional y que han sido procesados en LanammeUCR. Así, se incluye en el análisis del estudio, las bases de datos asociadas a los años 2005-2007 de las encuestas de carga y las asociadas al período que comprende los años 2008-2017 de las estaciones de pesaje, además de otra fuente recopilada mediante trabajo final de graduación, específicamente para los vehículos tipo Bus-C2, del año 2013. Todos los pesajes se realizaron en rutas nacionales.

Este estudio pretende brindar una serie de factores camión actualizados y generales para el país, utilizando las bases de datos disponibles, buscando que estos estén asociados a un nivel de confianza específico de diseño, que permita contabilizar los factores camión actualizados acordes con la realidad nacional, sin dejar de lado el comportamiento histórico de los mismos.

Limitaciones

Los factores camión estimados en este estudio son aplicables a diseños de pavimentos flexibles pues utilizan como referencia los factores equivalentes de carga (*LEF*, por sus siglas en inglés) asociados a este tipo de pavimentos, estos representan la mayoría de los pavimentos de la red vial nacional, cerca de un 98 % (LanammeUCR, 2019).

Los estudios considerados obedecen a distintas realidades nacionales asociadas a épocas donde existió un mayor y menor control de las cargas que transitan por las carreteras costarricenses. Sin embargo, ambas realidades aportan información valiosa al presente estudio, pues actualmente, son pocas las rutas que están sometidas a un régimen de control de cargas. Se recalca que es posible que algunos vehículos que circulan actualmente no sean contabilizados ya que utilizan vías alternas a los puestos de control de pesaje vigentes.

La cantidad de rutas consideradas es limitada, aproximadamente doce rutas. Sin embargo, los estudios se han enfocado en capturar el comportamiento de carga en diferentes rutas del país, todas ellas incluidas dentro de los corredores que compone el primer nivel jerárquico de la Red Vial Estratégica según el Plan Nacional de Transportes de Costa Rica (MOPT, 2011). Además, la cantidad total de vehículos considerados asciende a 15.386.304 de vehículos pesados. Los factores camión obtenidos en el presente estudio son representativos de las rutas más importantes del país y de aquellas rutas que cuentan con estaciones de pesaje y control para vehículos pesados.

METODOLOGÍA

Para obtener los valores recomendados de factores camión se siguieron las siguientes etapas metodológicas (ver Figura 1). Primero, se recopilaron las bases de datos disponibles y pertinentes para el estudio en cuestión, utilizando dos fuentes principales: información recopilada por el LanammeUCR, y registros históricos generados y procesados por el MOPT-LanammeUCR.

La encuesta de carga del LanammeUCR fue realizada durante los años 2005-2007, y publicada en el año 2007 con datos de pesajes manuales realizados en la Ruta 1, Ruta 2, Ruta 27, Ruta 32 y la Ruta 140 (LanammeUCR, 2008). Para estas rutas se consideraron los siguientes tipos de vehículos: liviano, C2, Bus-C2, C2+, C3 y T3-S2. Por otra parte, se tienen los datos recopilados a través de las estaciones de pesaje, para la Ruta 32 (2008-2017), Ruta 1 y Ruta 2 (entre los años 2009-2017), donde se analizaron los vehículos tipo C2, C3, C4, T3-S2 y T3-S3. Para la Ruta 32, Ruta 1 y Ruta 2 (entre los años 2008-2011) se analizaron los tipos de vehículos T2-S1 y T3-S1. Cada estudio y proyecto independiente contó con su propio alcance, por lo tanto, no se incluyen todos los vehículos posibles en todos los estudios, por este motivo se planteó utilizar todas las fuentes disponibles. Para el vehículo Bus-C2, se utilizó una base de datos de buses del proyecto de graduación de Espinoza (2013), pues los buses no se pesan en las estaciones de pesaje del MOPT. No se contabilizaron buses de tres ejes dado que representaban un porcentaje pequeño de los vehículos encuestados.

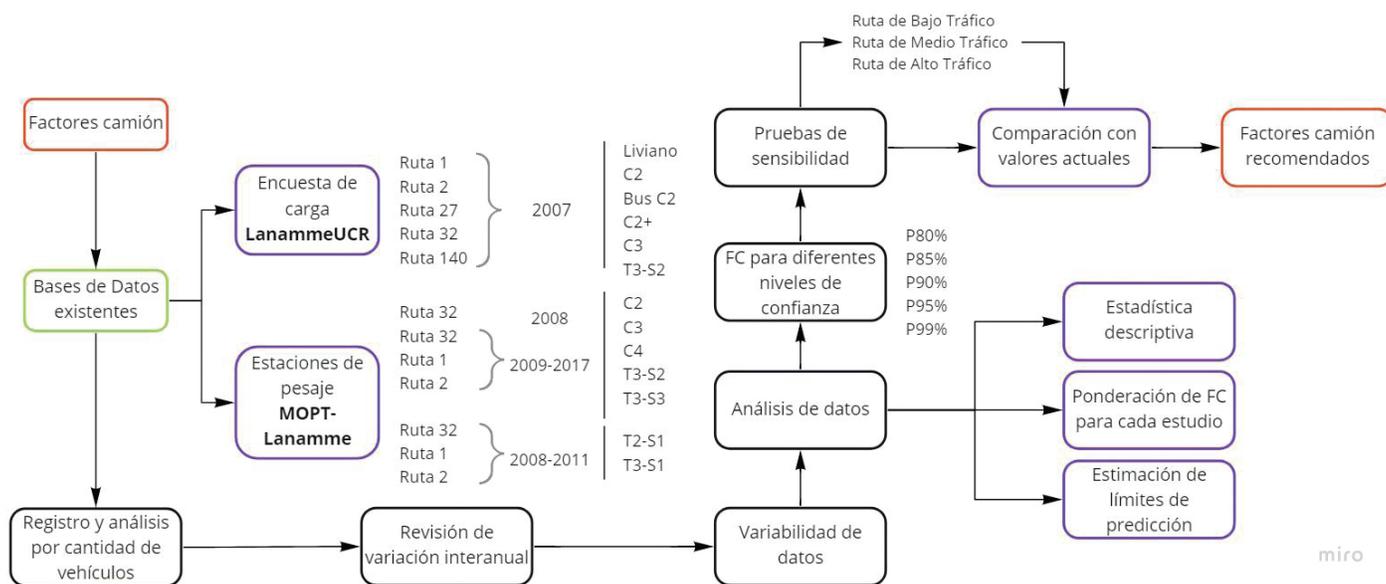


Figura 1. Esquema metodológico del estudio

Como segundo paso, para las bases de datos mencionadas, después de hacer la recopilación, síntesis y análisis por cantidad de vehículos, se revisó la variación interanual de los factores camión, así como la variabilidad de los datos en general. Posteriormente se procedió a: (i) realizar una estadística descriptiva, (ii) generar una ponderación de los factores camión para cada uno de los estudios que conforman la información base del presente informe y (iii) generar una estimación de los límites de predicción de los factores camión.

Para las rutas de bajo tráfico (<5 000 veh/día), medio tráfico (5 000 - 15 000 veh/día) y alto tráfico (15 000 - 40 000 veh/día), según la clasificación de tránsito elaborada por LanammeUCR (2008), se hicieron pruebas de sensibilidad de los datos y se compararon los valores obtenidos con los valores de los factores camión que se manejan actualmente por la Administración. Finalmente, se presentan los factores camión recomendados para el entorno nacional.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se analizó un total de 15.386.304 vehículos que se clasifican en las siguientes ocho categorías: *pick-up*, C2, Bus-C2, C2+, C3, C4, T3-S2 y T3-S3 (ver Figura 2), para cuatro rutas nacionales, las cuales se componen de una ruta nacional de tránsito bajo (Paso Canoas, Ruta 2), dos rutas de tráfico medio

(Ruta 32 sentido Limón-San José y San José-Limón, y Ruta 2 sentido Ochomogo-San José y San José-Ochomogo), y una ruta de tránsito alto (Cañas, Ruta 1). Los vehículos T2-S1 y T3-S1 no se incluyeron dado que no se cuenta con suficiente información para considerar su variabilidad, su población es mínima en proporción al resto de los vehículos.

Dado que el objetivo del presente informe es brindar un factor camión asociado a un valor de confianza específico, se da una mayor ponderación a los factores que han sido calculados mediante estaciones de pesaje pues disponen de una mayor cantidad de datos (registro de vehículos). En contraparte, la encuesta de carga del 2007 registró una gran cantidad de rutas, pero una cantidad de vehículos limitada debido a que el pesaje se realizó de forma manual, vehículo por vehículo. Esto ofreció una ventana de observación interesante de factor camión, dado que en esta época no existía el control de pesaje por parte de la Administración.

A partir del análisis de la información disponible, se identifica que la estimación de factores camión para el tipo de vehículo C2 son mayoritariamente aportados por pesajes realizados en las rutas San José-Cartago y Cartago-San José; en tanto la mayor cantidad de registros de los vehículos T3-S2 y T3-S3 (correspondiente a vehículos articulados de 5 y 6 ejes), fueron recopilados principalmente en la Ruta 32 (Limón-San José, y San José-Limón).

Tipo de vehículo	Representación gráfica
Pickup	
C2: Camión con eje dual trasero	
Bus-C2: Bus con eje dual trasero	
C2+: camión con eje simple trasero	
C3: camión con eje tándem trasero	
C4: camión con eje trídem trasero	
T3-S2: camión con eje tándem trasero	
T3-S3: camión con eje trídem trasero	

Figura 2. Categorías vehiculares utilizadas

Fuente: Ulloa et al., 2008

La recopilación de datos desde el año 2008, permite analizar el comportamiento de los factores camión en el tiempo, tal y como se detalla en las Figura 3 y Figura 4, para las rutas nacionales Limón–San José y San José–Cartago, respectivamente. Las figuras muestran que, pese al establecimiento de estaciones de control de pesaje en el año 2008, aún no se define una tendencia a la estabilización clara o evidente para los factores camión en los distintos tipos de vehículos, a pesar de que otras rutas muestran menos variación interanual.

Asimismo, es importante considerar que entre los años 2008 y 2011 los pesajes no se llevaban a cabo durante las 24 horas del día, por lo que podría haber algún flujo de vehículos pesados no considerado en las estimaciones. Lo anterior dificulta las proyecciones de los factores camión, e induce a la consideración de un valor de confianza estadístico del resultado final asociado a la desviación estándar de la totalidad de las observaciones.

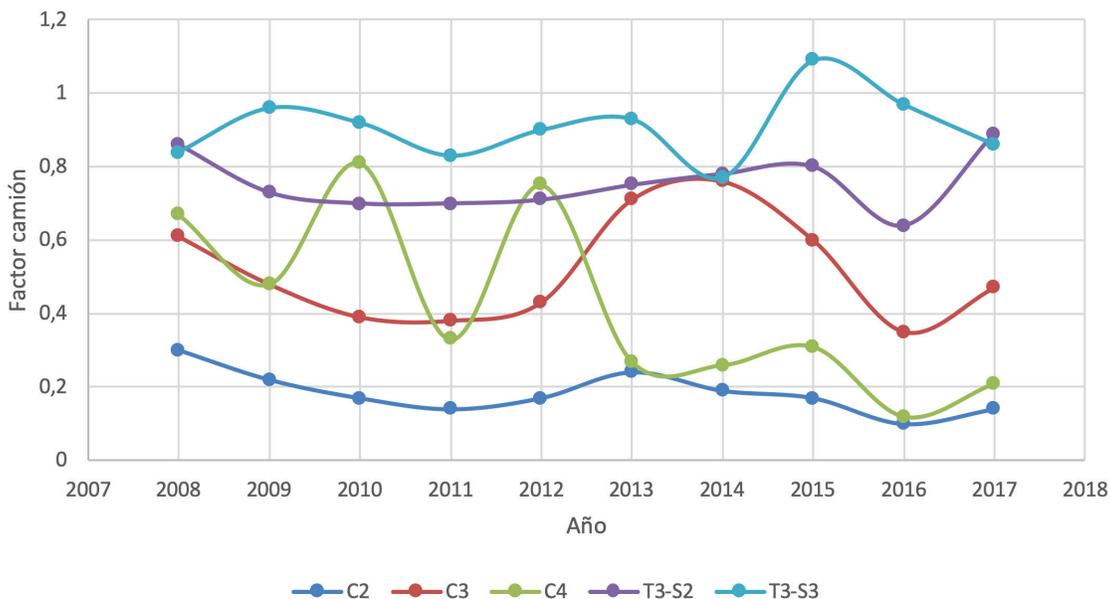


Figura 3. Factores camión promedio históricos en Ruta Nacional N° 32 sentido Limón-San José

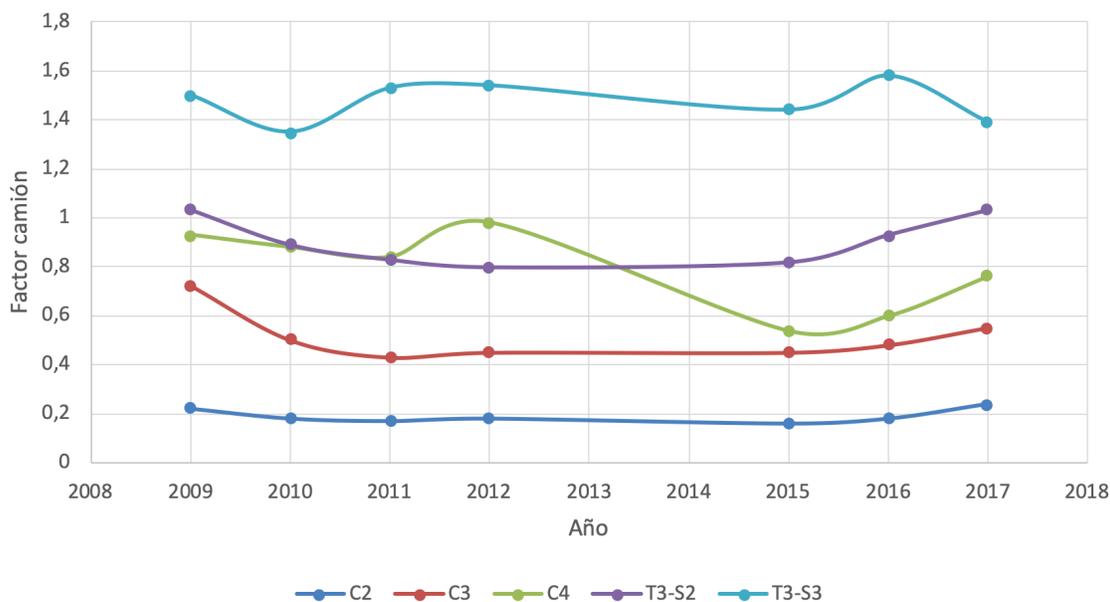


Figura 4. Factores camión promedio históricos en Ruta Nacional N° 2 sentido San José-Cartago (Ochomogo)

Esta variación anual de los factores camión requirió un análisis detallado del espectro de datos disponibles, la Cuadro 1 representa una estadística descriptiva de los datos. Los valores de los diferentes tipos de vehículos tienen rangos bastante amplios, es decir, tienen una gran separación entre su valor máximo y su valor mínimo, esto asociado también a una alta distancia promedio entre los valores y el valor medio (desviación estándar).

Esta variación se aprecia también mediante el coeficiente de variación que expresa la desviación estándar como porcentaje de la media aritmética, ya que expone el grado de variabilidad independientemente de la escala de la variable, a diferencia de la desviación estándar. Por ejemplo, según la Cuadro 1, para los vehículos tipo C2 se identifica un coeficiente de variación de 77,8 %, pese a que la media es 0,27; de igual manera sucede con los vehículos tipo C3, que presentan una media de 0,9 aunque reflejan un coeficiente de variación de 89,8 %. Para este análisis de datos la media aritmética no es representativa, ya que los factores camión obtenidos de los registros históricos presentan una alta variabilidad.

Por tanto, si en un futuro los factores camión estimados comenzaran a seguir una tendencia clara y definida, se podría considerar la selección de registros anuales y así minimizar la variabilidad presente en todos los registros históricos disponibles. Sin embargo, para la estimación de factores camión bajo el panorama actual, con alta variabilidad, se aplica el componente probabilístico con intervalos y límites de predicción (Ryan, 2007) a la matriz general de datos, asociada a niveles de confianza específicos.

Como se mencionó, el propósito del estudio es obtener una serie de factores camión ponderados por tipo de vehículo a partir de la cantidad de vehículos encuestados. Así, se utiliza la desviación estándar de los valores globales por tipo de vehículo para calcular factores camión que cumplan un nivel de confianza específico, según el siguiente modelo:

$$FC_{VjPi} = FC_{Vj} + \sigma_j Z_i \quad (1)$$

donde

FC_{VjPi} = Factor camión para el vehículo j, dado un nivel de confianza i.

FC_{Vj} = Factor camión ponderado para el vehículo j.

σ_j = Desviación normal estándar para el vehículo j.

Z_i = valor de z asociado a un nivel de confianza i, para la distribución normal estándar.

Los factores camión obtenidos a partir de la Ecuación (1) para diferentes niveles de confianza se resumen en la Cuadro 2, cuya comparación con los últimos valores máximos y mínimos definidos por la Administración se presentan gráficamente en la Figura 5 y 6. Esto demuestra que incluso la estimación de un factor camión con nivel de confianza de 85% para el caso de los vehículos tipo C2+, Bus-C2 y C3, supera el rango oficial establecido actualmente. Así, se ratifica la necesidad de implementar factores camión actualizados, que se ajusten a la realidad de la flota vehicular del país.

Cuadro 1. Descripción estadística de los factores camión estimados (2007-2017)

Tipo de Vehículo	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar	Varianza	Coefficiente de variación	Rango	Mínimo	Máximo
C2	0,27	0,20	0,20	0,21	0,04	77,8 %	1,06	0,10	1,16
C2+	0,05	0,02	0,02	0,08	0,01	20,0 %	0,22	0,01	0,23
C3	0,88	0,54	0,43	0,89	0,79	89,8 %	3,44	0,33	3,77
C4	0,75	0,76	0,88	0,36	0,13	17,3 %	1,49	0,12	1,61
Bus C2	2,36	2,06	-	0,90	0,81	34,3 %	2,67	1,02	3,69
Pickup	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,0 %	0,01	0,01	0,02
T2-S1	0,89	0,71	-	0,51	0,26	29,2 %	1,43	0,44	1,87
T3-S1	1,13	1,12	-	0,28	0,08	7,1 %	0,82	0,75	1,57
T3-S2	1,47	1,07	1,03	0,91	0,83	56,5 %	3,58	0,64	4,22
T3-S3	1,50	1,54	0,86	0,45	0,21	30,0 %	1,54	0,77	2,31

Cuadro 2. Resumen de factores camión estimados (2007-2017) y valores utilizados por el MOPT actualmente

Factor Camión Propuesto para diferentes niveles de confianza						Factor Camión MOPT		
Vehículo	80%	85%	90%	95%	99%	Mínimo MOPT	Máximo MOPT	Promedio
Pickup	0,013	0,013	0,014	0,014	0,015	0,010	0,020	0,010
C2	0,360	0,400	0,451	0,527	0,670	0,260	0,630	0,470
Bus C2	2,559	2,734	2,954	3,281	3,893	1,250	2,290	1,710
C2+	0,093	0,107	0,126	0,154	0,205	0,010	0,070	0,026
C3	1,250	1,414	1,621	1,928	2,504	0,990	1,280	1,100
C4	1,123	1,193	1,282	1,413	1,659			
T3-S2	1,920	2,098	2,321	2,652	3,273	1,510	2,380	1,710
T3-S3	2,142	2,230	2,341	2,506	2,815			

Por tanto, de acuerdo con la revisión y análisis de los factores camión estimados para diferentes rutas del país y niveles tránsito vehicular, se recomienda como mínimo los valores de

factores camión calculados con un 85% de confiabilidad. Este nivel de confianza es comúnmente utilizado en el ámbito de la estadística ingenieril.

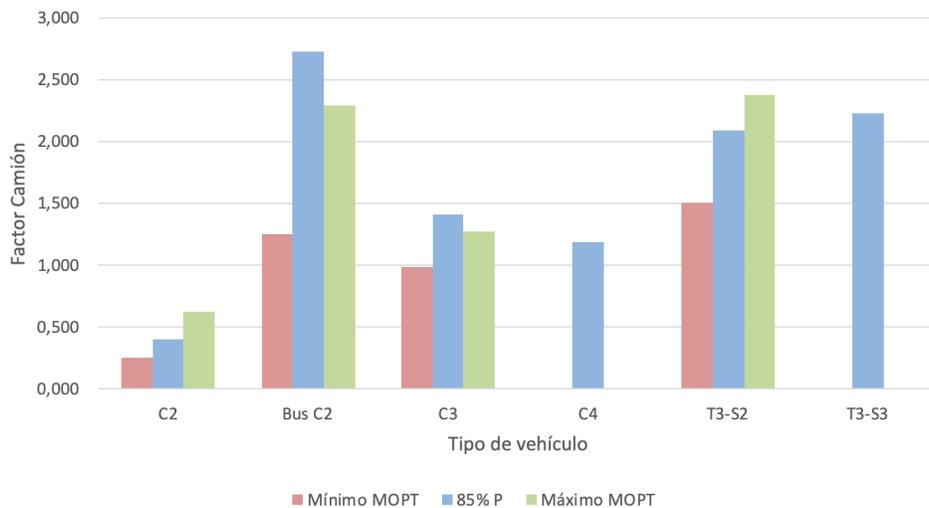


Figura 5. Factor camión para el 85% de nivel de confianza y rangos del MOPT para los vehículos C2, Bus C2, C3, C4, T3-S2 y T3-S3

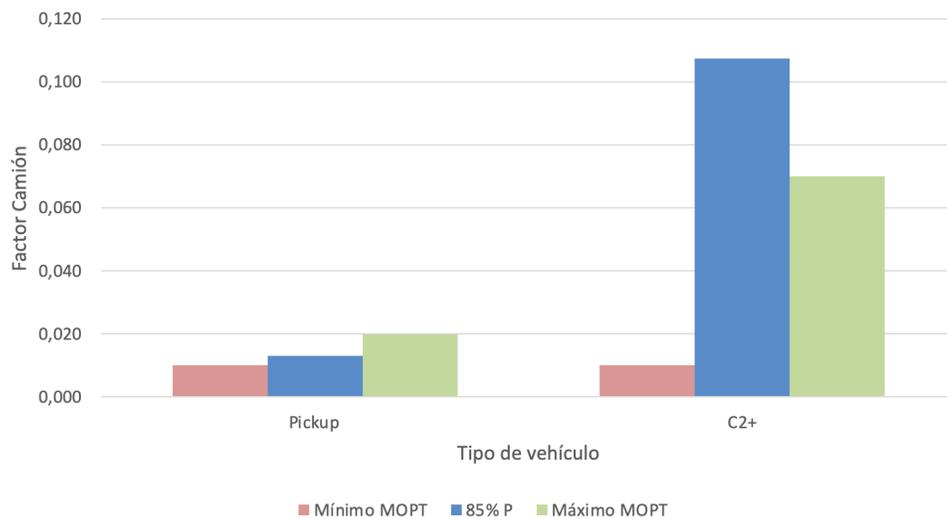


Figura 6. Factor camión para el 85% de nivel de confianza y rangos del MOPT para los vehículos tipo C2+ y pickup

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como valor agregado del análisis se obtiene la ponderación del factor camión por cantidad y tipo de vehículo, para analizar de forma integral los valores existentes y asociarlos a diferentes niveles de confianza. En los análisis realizados no se identifica una evidente estabilización del factor camión en Costa Rica, razón por la cual surge la necesidad de considerar la incidencia que posee la cantidad de vehículos de cada fuente de información, en su estimación.

Los valores acá expuestos, se calcularon a partir de una base de datos de más de 15 millones de vehículos, lo que brinda una cantidad de datos considerable para hacer estimaciones de variabilidad y nivel de confianza. Los valores de factor camión presentados se brindan como una alternativa a los valores que actualmente utiliza la Administración, dado que se obtuvieron con una mayor cantidad de datos, presentan mayor confiabilidad según los valores medidos hasta el año 2017 y capturan la variabilidad intrínseca del factor camión. Dentro de las ventajas que tiene la actualización de los factores camión y los valores finalmente recomendados se tienen las siguientes conclusiones:

- Los valores calculados representan las rutas con mayor cantidad de registros y tráfico del país en la actualidad.
- Los factores camión recomendados capturan información en escenarios que hoy se mantienen, sin control y con el mismo; por lo tanto, se puede inferir que son valores que van acorde con la realidad nacional.

- El análisis del presente estudio utiliza información de estaciones de pesaje, encuestas de carga y una tesis de grado, bases de datos disponibles al año 2017. Esto incorpora información adicional de 10 años en la estimación de factores camión, sobre aquellos correspondientes al último pronunciamiento oficial de la Administración en el año 2007.
- Los factores camión aquí presentados muestran una condición importante a considerar para la Administración, pues tal y como se demostró, incluso para un 85% de confianza, los factores camión actualizados de los vehículos tipo C2+, Bus-C2 y C3 superan los límites superiores establecidos por el Ministerio de Obras Públicas y Transportes, en su última actualización.
- Se recomienda actualizar la normativa en cuanto a los rangos de factores camión para diseño de pavimentos flexibles en Costa Rica, utilizando los obtenidos en el presente estudio.

Adicionalmente, se plantean recomendaciones para futuras investigaciones:

- Analizar estadísticamente el efecto de la implementación de las estaciones de pesaje en el factor camión, además de si existen cambios cuando varían las políticas de medición.
- Determinar si hay un efecto regional específico en los factores camión para los distintos vehículos de diseño, mediante el análisis de los datos en estaciones de pesaje individuales.
- Analizar el efecto temporal, horario y por período del año, en los factores camión para los distintos vehículos de diseño, mediante el análisis de los datos en estaciones de pesaje individuales.

REFERENCIAS

- Allen, J. y Badilla, G. (2011). Determinación de la carga de diseño para pavimentos flexibles en Costa Rica. En *XVI Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto*, Rio de Janeiro, Brasil, 2011. Recuperado de: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/516>
- Espinoza González, J. C. (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* (Tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (2007). *Encuesta de Carga* (PI-01-PIIVI-2007). Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1473>
- Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (2008). *Propuesta de rangos para la clasificación de la Red Vial Nacional*. Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1685>
- Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (2018). *Evaluación de parámetros y metodología utilizada en los Diseños de Pavimentos realizados bajo el marco de la Licitación Pública 2014LN-000018-0CV00* (LM-PI-AT-121-2017). Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1562>

- Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (2019). Informe de evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica años 2018-2019 (LM-PI-UGERVN-004-19). Recuperado de <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/1750>
- Ministerio de Obras Públicas y Transporte (2007). DVOP-5170-07: Lineamientos diseño de pavimentos. San José, Costa Rica: Pedro Castro.
- Ministerio de Obras Públicas y Transporte (2011). *Plan Nacional de Transporte de Costa Rica 2011-2035*. Recuperado de <https://www.mopt.go.cr/wps/wcm/connect/a86ca326-d0c2-403f-9166-259c356f4783/Memoria.pdf?MOD=AJPERES>
- Ryan, T. P. (2007). *Modern Engineering Statistics*. New Jersey, United States: John Wiley & Sons.
- Ulloa Salazar Á, Badilla Vargas G., Allen Monge J. y Sibaja Obando D. (2008). Determinación de factores camión en pavimentos de Costa Rica. *Infraestructura Vial*, 10(19), 28-37. Recuperado de <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial/article/view/2048>

Microscopía de fuerza atómica como herramienta en la investigación de asfaltos

Atomic force microscopy as a tool in asphalt research

Adriana García

Departamento de Construcción
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN)
Nicaragua
ajesusgarcia23@gmail.com

Karina Kikut Cruz

Asistente de Investigación
Unidad de Investigación en Infraestructura y Transporte
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica
Costa Rica
karina.kikut@ucr.ac.cr

Fecha de recepción: 29 de mayo, 2020 / **Fecha de aprobación:** 29 de noviembre, 2020

RESUMEN

El Microscopio de Fuerza Atómica se utiliza ampliamente para la obtención de imágenes superficiales de alta resolución; así como para obtener información de las propiedades mecánicas de un material. Esta herramienta cuenta con diversos modos de operación, algunos de ellos son: estáticos, dinámicos, *tapping* y contacto, entre otros. De igual forma, posee diversas geometrías de la punta del *cantilever*, por lo que escoger la adecuada es un paso crucial en cualquier investigación que desee usar el AFM. El objetivo del presente estudio es brindar un conocimiento general del AFM desde sus modos de operación hasta el uso de este en la investigación de los asfaltos. Se concluye que el Microscopio de Fuerza Atómica se emplea en el estudio de los asfaltos para analizar las propiedades microscópicas del mismo y comprender cómo estas impactan las propiedades macroscópicas del material.

Palabras clave: Microscopio de fuerza atómica; asfalto; propiedades microscópicas; modos de operación; *cantilever*.

ABSTRACT

The Atomic Force Microscope is used to obtain superficial images with high resolution. As well, to acquire information about the mechanical properties of a material. This tool has several operation modes, such as static, dynamic, tapping and contact, among others. It is worth to mention that cantilever has several geometries, then choosing the right one is a crucial step in any investigation that uses AFM. The focus of this article is to give a broad outlook of the AFM, from its operation modes to its applications in asphalt studies. Upon this article, the AFM is highly used in asphalts to analyse the microscopic properties and to understand how these properties impact its macroscopic performance.

Keywords: *Atomic Force Microscope; asphalt; microscopic properties; operation modes; cantilever.*

INTRODUCCIÓN

Objetivo general

Analizar los beneficios de la utilización de la técnica de Microscopía de Fuerza Atómica en la investigación de asfaltos.

Generalidades

La principal aplicación del microscopio de fuerza atómica es la creación de imágenes de superficies en alta resolución (García, 2017), sin embargo, este también permite obtener información de las propiedades mecánicas del material con una resolución atómica. Algunas de estas propiedades son: la adhesión, la rigidez, la fuerza máxima, la disipación de energía, el tiempo de contacto, las fuerzas de largo alcance, la dureza y el módulo de elasticidad (García, 2017).

El funcionamiento básico del AFM, por sus siglas en inglés (Binnig, Quate y Gerber, 1986), consiste en una interacción entre todas sus partes, entre ellas están: un foto-detector (4 cuadrantes), un voladizo o cantiléver con una punta, los posicionadores de materiales piezoeléctricos, el láser y la muestra (Aguilar, Loria y Salazar, 2017). Su funcionamiento corresponde a una pequeña punta de un par de micras de largo sujeta a una viga en voladizo (*cantilever*); esta realiza un barrido sobre la superficie de la muestra a ser evaluada, de forma que va tomando los datos para determinar las características topográficas y de fases del material (Olmos, 2009). Con esa configuración, el voladizo detecta las fuerzas de interacción que se generan entre la punta y la superficie de la muestra; es decir, las fuerzas de van der Waals, electrostáticas y repulsiones electrónicas que surgen en distancias nanométricas (Roa, Oncins, Díaz, Sanz y Segarra, 2011). Además, el AFM usa un sistema de deflexión láser desarrollado por Meyer y Amer en 1988. El láser es reflejado por la parte posterior de la viga en voladizo a un detector de posicionamiento que está

compuesto por un fotodiodo de cuatro cuadrantes. De forma que el desplazamiento de la viga resulta en una diferencia en la señal recolectada entre los fotodiodos superior, inferior, el de la derecha y el de la izquierda; y esta se traduce a una deflexión proporcional de la viga (Carrión, Valbuena y Gomez, 2010). Por tanto, se da una retroalimentación debida a la diferencia de señal relativa entre el fotodiodo por medio del control de un software; esto logra que la punta pueda trabajar manteniendo la altura o fuerza constante (Figura 1).

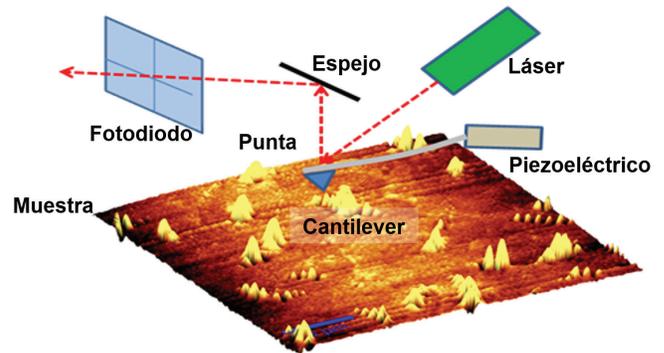


Figura 1. Funcionamiento del AFM (García, 2018).

El sistema del AFM permite desarrollar un perfil en tres dimensiones de la superficie tal como se muestra en la Figura 1, lo que resulta en un ensayo de topografía. Además, este se encuentra soportado en una mesa anti-vibratoria y dentro de una cámara diseñada para minimizar la interacción del entorno (García, 2017). En la Figura 2 se muestra como ejemplo el equipo Witec que se encuentra en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR). Para el almacenamiento de la medición completa y el post-procesamiento de datos se utiliza un software específico llamado *Witec Control*. Este programa cuenta con varios parámetros de aplicación que están en dependencia del tipo de material, modo en que se desea medir y la respuesta mecánica que se desea obtener.

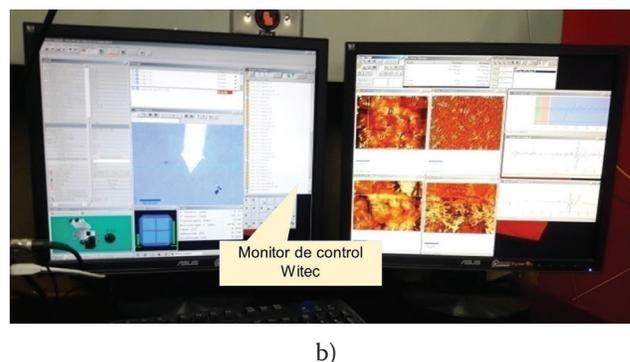
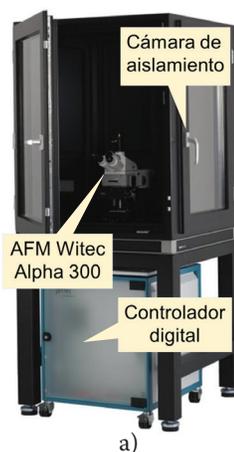


Figura 2. a) Componentes del Microscopio de Fuerza Atómica (LanammeUCR, Witec Alpha 300), b) monitor de control y software de evaluación de datos (García, 2018).

Modos de operación del AFM

Los microscopios de fuerza atómica cuentan con dos modos que son: estáticos (también conocidos como modos de contacto) y dinámicos (modos de oscilación) (Carvajal, 2010). En el primero de ellos, el *cantilever* sufre deflexión de acuerdo con la fuerza aplicada hasta alcanzar el equilibrio estático. En el microscopio se puede mantener un valor constante para la deflexión y este modo se denomina en inglés *equiforce mode*; el cual resulta ser el más común (Kyeyune, 2017). Por su parte, en el modo dinámico, se mantiene la amplitud o la frecuencia constante, y ambos poseen en el mismo contenido físico.

De acuerdo con Reséndiz y Castellón-Urbe (2005), otros modos de operación del microscopio de fuerza atómica son: *Tapping*, Contacto e Imagen de Fase para observar la topografía de la muestra. Asimismo, los autores, detallan que el modo de operación que se utilice dependerá de las cualidades físicas de la muestra, así como de sus propiedades. Por ejemplo, el modo *Tapping*, realiza la medición de la topografía de la superficie de la muestra de manera intermitente. El modo contacto mide la topografía pero, mediante el deslizamiento de la punta del *cantilever* sobre la superficie; y en el caso de imagen de Fase, brinda una imagen de contraste que se produce por las diferencias de adhesión de la superficie estudiada (Haugstad, 2012). Existen otros modos de operación como: No Contacto, Fuerza Magnética, Fuerza Eléctrica, Potencial de Superficie y Modo *Lift*, entre otros (Reséndiz y Castellón-Urbe, 2005).

Para la obtención de las propiedades mecánicas del material, el AFM funciona mediante varios modos de medición: modo de contacto, modo de no contacto y modo de fuerza pulsada o contacto intermitente (PFM, del inglés *pulsed force mode*) (Raghavan, VanLandingham, Gu y Nguyen, 2000). El uso

de cada modo de operación dependerá de los requerimientos de cada investigación y de la muestra de análisis.

El modo de contacto (CM, del inglés *contact mode*), funciona mediante el intercambio de la punta que se encuentra al final del voladizo con una pequeña constante de resorte (k); esta es inferior que la constante de resorte efectiva que sustenta los átomos de la muestra. La deflexión del voladizo (S) se produce por la fuerza de contacto, ya que la punta recorre la superficie de la muestra, adaptándose a su topografía y señalando zonas con diversos comportamientos mecánicos. La fuerza (F) en la punta es repulsiva con un valor medio de 10^{-9} N por ello, la relación fuerza entre la punta y la muestra debe ser constante (Haugstad, 2012). En la Figura 3 se muestra la interacción punta muestra y la obtención de curva fuerza distancia. La importancia de esta última se basa la generación de fuerzas atractivas y repulsivas que se generan al entrar en contacto con la superficie y al alejarse de la misma (carga y descarga), obteniendo de esta la acción de la fuerza que se genera versus el desplazamiento.

En el caso del modo de no contacto (denotado como AC, del inglés *acoustic mode*), se recomienda utilizar cuando se pueda dar la alteración de la muestra debido al contacto con la punta; por ello, la punta se coloca a $50 \text{ \AA} - 150 \text{ \AA}$ sobre la superficie de la muestra. Las fuerzas atractivas de van der Waals entre la punta y la muestra son detectadas, fabricando así imágenes topográficas. Al ser las fuerzas atractivas bastante débiles, más que las empleadas en el CM, se puede utilizar este modo si no se desea estropear la superficie de la muestra, en especial si es una muestra blanda o elástica (Raghavan *et al.*, 2000). Por ello, es necesario producir una leve oscilación en la punta para poder detectar las fuerzas que se generan a partir de la medición de variaciones en la amplitud, la fase o la frecuencia

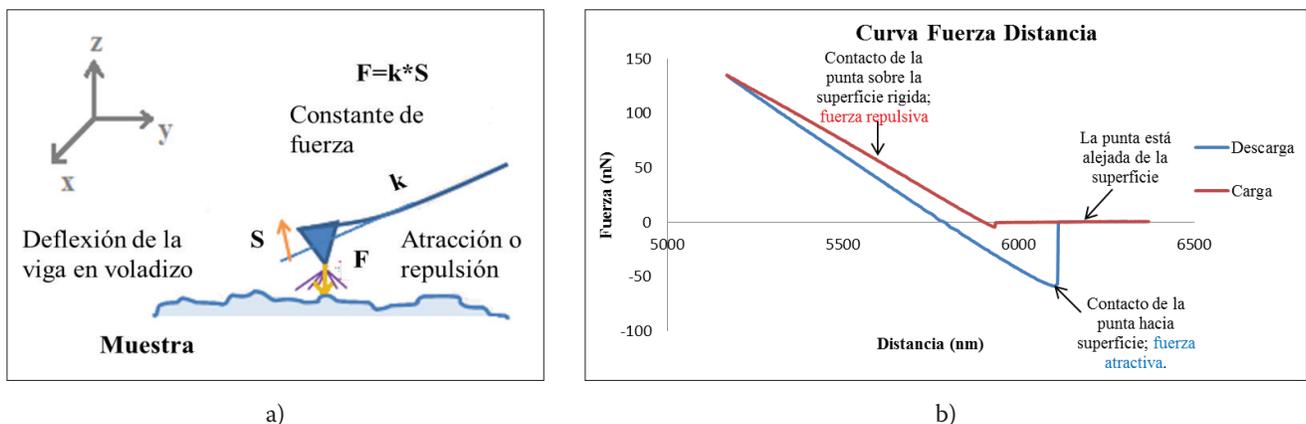


Figura 3. Modo de operación de contacto: a) relación entre la fuerza (F), la deflexión (S) y la constante de fuerza (k), b) curva fuerza-distancia (García, 2018).

en la que oscila el *cantilever* debido a gradientes de fuerza en la muestra (Haugstad, 2012). Cabe mencionar que este modo (AC) se prefiere para muestras asfálticas por la composición y topografía que presentan, ya que minimiza fuerzas laterales y normales (Aguiar *et al.*, 2015).

El modo de fuerza pulsada o contacto intermitente (PFM), en este tipo la punta se relaciona con la muestra de forma interrumpida, mientras recorre la superficie se evita el estropeo de la muestra lo que podría suceder en el modo de contacto (Haugstad, 2012). En el PFM se aplica una señal sinusoidal, haciendo oscilar a la punta a una frecuencia de resonancia entre 0,01 kHz y 10 kHz, con amplitud entre 50 nm y 500 nm. Los barridos se realizan manteniendo la amplitud de oscilación constante (amplitud de trabajo). El escáner de barrido se desplaza en forma de Z para conservar esa amplitud constante en toda la corrida (Olmos y Gonzales, 2009).

Debido a la interacción de la punta-muestra, se genera un desfase de la onda sinusoidal aplicada que al registrarlo permite la obtención de la imagen de fase. Dicho cambio en la señal sinusoidal se relaciona con las propiedades mecánicas y las propiedades viscoelásticas del material (Olmos y Gonzales, 2009).

El PFM permite aumentar las capacidades del AFM, sobrepasando la medición topográfica y brindando propiedades como: la rigidez local, la adhesión, la viscosidad, la disipación de energía, el tiempo de contacto y las fuerzas de largo alcance. Lo anterior se puede llevar a cabo a tasas regulares de exploración ya que el software emplea velocidades de miles de píxeles por segundo (Haugstad, 2012). Además, posee un sistema de recolección de datos de alta velocidad, un generador de modulación que se puede programar y un módulo de evaluación de datos en tiempo real. En este modo la señal de amplitud se ajusta cuando la punta entra en contacto con la muestra, ejerciendo un periodo de atracción, repulsión y oscilación (Ver Figura 4).

La Figura 4 muestra la señal de modulación sinusoidal que se obtiene el modo de contacto intermitente, en el cual se obtiene una señal de fuerza vs el tiempo, cuando la muestra entra en contacto con la punta se da el pico de adhesión máximo, luego este registra una regresión de rigidez lineal hasta llegar a una fuerza máxima (F_{max}) esto en un rango de tiempo repulsivo donde se da una separación entre la punta y la muestra, lo que permite un proceso oscilatorio a una razón de frecuencia, terminado este último se vuelve a repetir la modulación sinusoidal bajo la integración punta muestra (García, 2017).

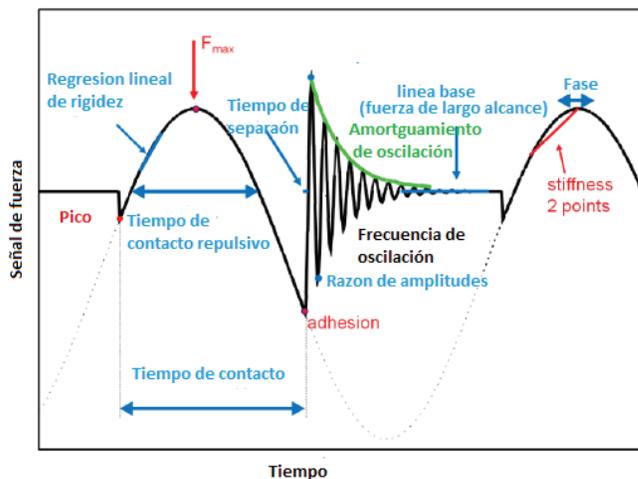


Figura 4. Modo de contacto intermitente modulación sinusoidal (García, 2018).

La curva fuerza distancia (Ver Figura 3b) obtenida en el modo de contacto es posible correlacionarla con el modo intermitente para determinar la fuerza máxima que se ejerce sobre la muestra en un rango de oscilación específico.

Geometría de las puntas usadas en AFM

Las puntas que se emplean en el AFM son elaboradas empleando la microfabricación, donde las puntas se producen con radios de curvatura en el rango de 1 nm a 10 nm. La longitud del *cantilever* puede variar entre 50 micras y varios centenares de micras, y este valor dicta su dureza final o su constante de fuerza del *cantilever* (k). La punta se elige según la aplicación o la superficie que se desee estudiar, ya que la geometría, dimensiones de la punta y la longitud del *cantilever* se pueden combinar de muchas formas. El *cantilever* puede ser de diferentes formas, por ejemplo: triangular y rectangular. En la Figura 5, en la parte a, se muestra un ejemplo de ello.

La determinación de la punta ideal según el tipo de ensayo es uno de los primeros pasos a realizar. En algunos casos, las puntas se fabrican con recubrimientos finos, lo que permite un aumento de la reflectividad. Las puntas suelen ser de nitruro de silicio o silicio monolítico; la primera no se recomienda utilizar en ensayos a altas temperaturas por la diferencia en los coeficientes de expansión térmica entre los materiales de la punta y el *cantilever*, que podrían producir tensiones y a su vez un momento de torsión capaz de romperla. Por lo anterior, las puntas más utilizadas son de silicio, independiente del modo de operación. Para ejemplificar lo anterior en la Figura 5, parte b, se muestran las características simétricas de una punta de silicio monolítico en modo de fuerza pulsada. La importancia de la geometría de la punta radica en la resolución de las imágenes, además de la veracidad de los datos que se obtengan; los cuales dependen estrechamente de la geometría de la punta y de su material (Sánchez, 2018).

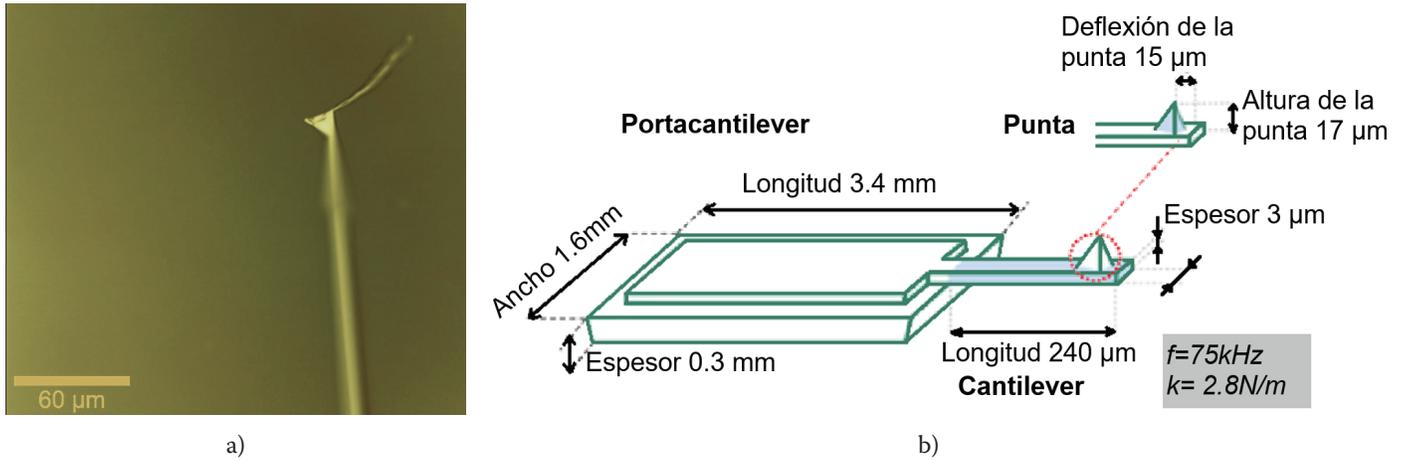


Figura 5. a) Punta empleada en el AFM (García, Aguiar, Salazar, Baldi y Loria, 2019), b) Configuración de la simetría de la punta para el modo de fuerza pulsada (García, 2018).

Existe una gran variedad de puntas disponibles en el mercado con diversas constantes de fuerza, frecuencias de resonancia, recubrimientos superficiales, longitud de la punta, espesor y forma. En la Tabla 1 se detallan las características simétricas de las puntas y del *cantilever* que se utilizan en LanammeUCR para el estudio de materiales, las cuales van en función de su modo de operación. La utilización del tipo de punta y el modo de operación para analizar las muestras asfálticas está en dependencia de las propiedades mecánicas que se desean obtener.

Usos en asfalto

En los siguientes párrafos se comentarán los hallazgos más relevantes sobre los usos recientes de la técnica de Microscopía de Fuerza Atómica en el asfalto.

Existen algunas propiedades a nivel micro que se pueden determinar la respuesta microestructural del asfalto utilizando la técnica de Microscopía de Fuerza Atómica. De acuerdo con García (2018), algunas de ellas son: penetración, fuerza

Tabla 1. Detalles simétricos de las puntas de silicio en función de su modo de operación.

Datos de <i>cantilever</i>	Valor	Rango	Valor	Rango	Valor	Rango
	CM		AC		PFM	
Frecuencia Resonante	14 kHz	10 - 19	285 kHz	240 - 380	75 kHz	58 - 97
Constante de fuerza	0,2 N/m	0,06 - 0,38	42 N/m	27 - 80	2,8 N/m	1,4 - 5,8
Longitud	450 μm	445 - 455	160 μm	155 - 165	240 μm	235 - 245
Anchura media	45 μm	40 - 50	45 μm	40 - 50	35 μm	30 - 40
Espesor	2,0 μm	1,5 - 2,5	4,6 μm	4,1 - 5,1	3,0 μm	2,5 - 3,5
Altura de la punta	17 μm ± 2 μm					
Deflexión de la punta	15 μm ± 5 μm					
Radio de la punta	< 10 nm					
Ángulo del medio cono	20°-25° del eje del <i>cantilever</i>					
	25°-30° de ambos lados					
	10° de la punta					

Fuente: Nanoworld, 2020.

máxima, adhesividad, rigidez y respuesta viscoelástica (Ver Figura 6). Asimismo, esta técnica presenta otra ventaja, la cual es que caracteriza los procesos de envejecimiento del material. Este envejecimiento se ve a su vez compuesto por procesos como: la oxidación, la pérdida de componentes volátiles y la exudación; que resultan ser irreversibles en el asfalto. Además, la Microscopía de Fuerza Atómica, permite caracterizar las cuatro principales fases del asfalto, las cuales son: catana-fase, peri-fase, para-fase y sal-fase; con lo anterior al comprender los cambios microscópicos del asfalto se pueden predecir los cambios a nivel macroscópico de este.

Con base en lo anterior, Yang, Zhu, Yuan y Li (2020) ejemplifican que, al estudiar las propiedades micro, se pueden comprender mecanismos como daño por fatiga y agrietamiento del asfalto. También, con ayuda de microscopios, se descubrió la estructura inestable y dependiente del tiempo llamada estructura de abeja, que ahora se relaciona al asfalto. De igual forma, las técnicas como la Microscopía de Fuerza Atómica permiten caracterizar el envejecimiento del asfalto, que resulta ser un proceso dependiente de la temperatura y se determina dependiendo de la estructura de los cristales.

También, el AFM presenta ventajas sobre otras técnicas, como que logra examinar a detalle la interacción sólido-sólido que resulta beneficioso para el estudio de los asfaltos; ya que la mezcla asfáltica se compone del ligante y los agregados. Asimismo, esta técnica posee el potencial para investigar a fondo las propiedades nano-mecánicas de los agregados del asfalto. Donde dichas propiedades nano dictan las propiedades físicas a gran escala del asfalto, como: elasticidad, plasticidad, dureza, adhesión, y energía superficial, entre otras. De igual forma, la AFM, permite visualizar la interacción de las fases compuestas del asfalto, que interactúan en esta escala.

En el estudio realizado por Rahmad, Yusoff, Rosyidi, Haji y Widyatmoko (2020), utilizan un Microscopio de Fuerza Atómica para observar los cambios de un asfalto PG76 modificado con diferentes porcentajes de mezcla asfáltica tibia (WMA por sus siglas en inglés).

En otros avances se empleó AFM utilizando puntas suaves y duras para escanear la superficie de una muestra de asfalto modificado con *bio-binder*. El *bio-binder* es un material renovable que se obtiene de fuentes naturales. Con el AFM, se descubrió que las muestras poseían estructuras típicas de abeja lo que indica un buen acople entre las mezclas asfálticas con el *bio-binder*. Asimismo, para este estudio, se observó que al agregar el *bio-binder* no hubo mayores cambios en la morfología del asfalto. De igual manera, se midió la fuerza adhesiva del material, y se obtuvo que al añadir el *bio-binder* hay cambios importantes en la fuerza adhesiva del asfalto. Es importante mencionar, que al utilizar diferentes puntas para el análisis de fuerza adhesiva se obtienen resultados diferentes que resultan no ser comparables entre sí. Posteriormente, se realizó una comparación entre el uso de AFM para medir la propiedad adhesiva de la superficie, y el método de la energía libre superficial. Al utilizar dos puntas en el AFM, se obtuvieron resultados un tanto diferentes que se le atribuyen a la sustancia de prueba, la escala de prueba y los componentes medidos (Gong *et al.*, 2017). La importancia de este estudio realizado por Gong *et al.* (2017), es que se observa una aplicación del AFM para determinar los cambios morfológicos del asfalto al ser modificados con otras sustancias.

Abd, Al-Khalid y Akhtar (2017) concuerdan con Rahmad *et al.* (2020), debido a que ambos enfatizan en lo poderosa que es la técnica de Microscopía de Fuerza Atómica para comprender cómo se comporta el asfalto en la escala nano. La importancia

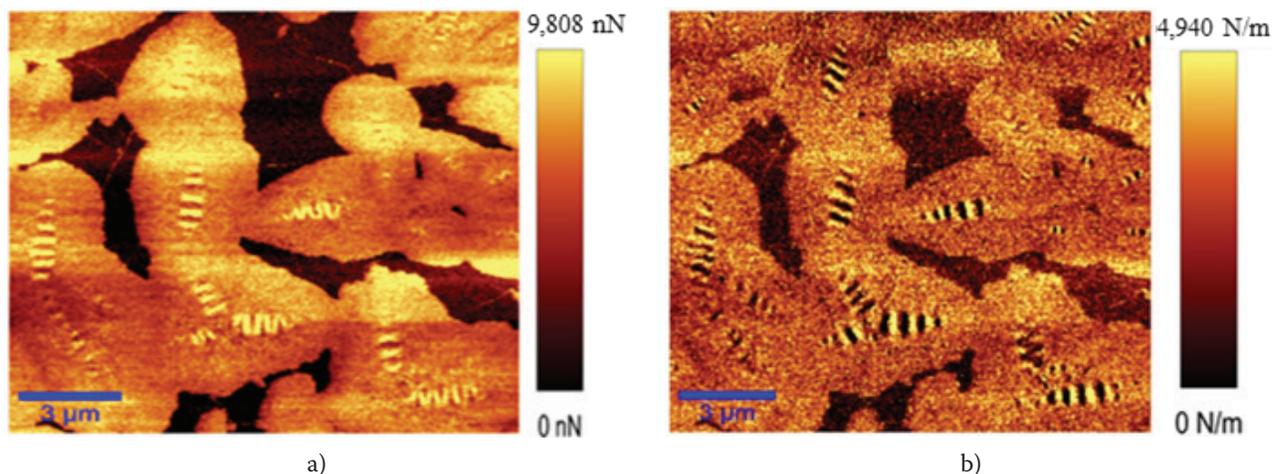


Figura 6. Respuesta microestructural del asfalto a) adhesión y b) rigidez (García *et al.*, 2019).

de conocer cómo se comporta el asfalto en dicha escala radica en que la interacción entre las fases compuestas de la mezcla asfáltica sucede a esta escala. Este estudio tuvo como objetivo la investigación del efecto de aditivos tibios en las propiedades mecánicas, topografía, módulo y la adhesión de microestructuras en el asfalto. Las microestructuras encontradas, con ayuda del AFM, correspondieron a para-fase y peri-fase. Uno de los aditivos utilizados fue Sasobit y los autores concluyeron que este aumenta significativamente el módulo del asfalto en una escala nano (Abd *et al.*, 2017).

Cabe mencionar que los primeros avances que se realizaron con AFM en tema de asfaltos lograron demostrar la asociación entre asfaltenos y partículas coloidales con grupos funcionales polares. Este estudio se basó en la medición de las propiedades microreológicas del asfalto empleando la Microscopía de Fuerza Atómica; se utilizaron tres asfaltos, los cuales se envejecieron y se analizaron por medio de esta técnica. Como conclusión, de acuerdo con Allen, Little y Bhasin (2012), se obtuvo que el envejecimiento del asfalto a largo plazo no solo impacta el comportamiento de las microestructuras del material, sino que también varía su tamaño, forma y distribución. También, se descubrió que al envejecer el asfalto no solo aumenta su dureza por la presencia de componentes nuevos que endurecen el asfalto, sino por el aumento general de dureza de las fases continua y dispersa (Allen *et al.*, 2012).

Asimismo, se consultaron documentos, como revisiones bibliográficas del uso del AFM en el estudio de asfaltos; se halló que el AFM es capaz de obtener información micro-mecánica del asfalto. Información como las propiedades del mismo, tales como: dureza relativa, módulo de Young, adhesión, pérdida de energía y deformación, entre otras. De igual manera, el AFM se utiliza para observar las propiedades micro-reológicas del asfalto, mediante nanoindentación, se descubrió que la micro-estructura con forma de abeja presentó entre 40%-50% más dureza que la matriz en la que se encontraba. También, el AFM, se ha utilizado para investigar los cambios de fase como consecuencia de modificaciones y lograr relacionar los cambios en la escala micro y como se reflejan en las propiedades físicas, químicas y reológicas del asfalto modificado (Das *et al.*, 2016).

CONCLUSIONES

La Microscopía de Fuerza Atómica es un instrumento versátil, con diversos modos de operación y selección de geometrías para obtener diversos resultados que se adecuen al estudio que se esté realizando. En cuanto a la investigación en asfaltos, la Microscopía de Fuerza Atómica es una herramienta vanguardista que permite conocer las propiedades microscópicas del asfalto, que generan efectos importantes en las propiedades macroscópicas; lo que amplía el rango de conocimiento y permite la mejora de la vida útil del material.

REFERENCIAS

- Abd, D., Al-Khalid, H. y Akhtar, R. (2017). Nano-scale properties of warm-modified bituminous binders determined with atomic force microscopy, *Road Materials and Pavement Design*, 18(sup2), 189-202. DOI: 10.1080/14680629.2017.1304262
- Aguiar, J., Loria, L. y Salazar, J. (2017). Respuesta micromecánica del asfalto mediante AFM. *ASFALTO*, VII(26), 25-34.
- Aguiar, J., Salazar, J., Bonilla, V., Rodríguez, E., Leiva, F. y Loria, L. (2015). Morphological analysis of bitumen phases using atomic force microscopy. *Road Materials and Pavement Design*, 16(sup1), 138-152. DOI: 10.1080/14680629.2015.1029672
- Allen, G., Little, D. y Bhasin, A. (2012). Structural Characterization of Micromechanical Properties in Asphalt Using Atomic Force Microscopy. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(10), 1317-1327. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000510.
- Binnig, G., Quate, C. F. y Gerber, C. (1986). Atomic Force Microscope. *Physical Review Letters*, 56(9), 930-933. DOI: 10.1103/PhysRevLett.56.930
- Carrión, V., Valbuena, J. y Gomez, H. (2010). *Dispositivo interfase digital para la integración del modo de imagen en espectroscopio de fuerza monomolecular*. ES 2 316 285 B1 España: Oficina española de patentes y marcas.
- Carvajal, D.F. (2010). *Caracterización mecánica de materiales mediante técnicas de microscopía de fuerza atómica y nanoindentación*. (Tesis de grado). Colombia, Universidad de Los Andes.
- Das, P., Baaj, H., Tighe, S. y Kringos, N. (2016). Atomic force microscopy to investigate asphalt binders: a state-of-the-art review. *Road Materials and Pavement Design*, 17(3), 693-718. DOI: 10.1080/14680629.2015.1114012

- García, A. (2017). Análisis del comportamiento micromecánico del asfalto. *Revista Infraestructura Vial*, 18(31), 39-45. DOI: 10.15517/IV.V18I31.27763
- García, A. (2018). *Implementación de metodología para estimación del módulo de elasticidad de asfalto mediante microscopía de fuerza atómica*. (Tesis de Maestría). Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica.
- García, A., Aguiar, J., Salazar, J., Baldi, A. y Loría, L. (2019). Methodology for estimating the modulus of elasticity of bitumen under different aging conditions by AFM. *Road Materials and Pavement Design*, 20(SUP1), S332-S346. DOI: 10.1080/14680629.2019.1588152
- Gong, M., Zhu, H., Pauli, T., Yang, J., Wei, J. y Yao, Z. (2017). Evaluation of bio-binder modified asphalt's adhesion behavior using sessile drop device and atomic force microscopy. *Construction and Building Materials*, 145, 42-51. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.114
- Haugstad, G. (2012). *Atomic Force Microscopy: Understanding Basic Modes and Advanced Applications*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.
- Kyeyune, B. (2017). *Atomic Force Microscopy*. (Tesis de maestría). Tanzania: African Institute for Mathematical Sciences.
- Meyer, E. y Amer, N, M. (1988). Novel optical approach to atomic force microscopy. *Applied Physics Letters*, 53, 1045. DOI: 10.1063/1.100061
- Nanoworld (2020). AFM probes. Recuperado de <https://www.nanoworld.com>
- Olmos, D. y Gonzalez, B. (2009). *Microscopía de fuerza atómica. Práctica 1. Modos básicos de operación*. Universidad Carlos III de Madrid.
- Olmos, D. (2009). *Microscopía de efecto túnel y microscopía de fuerza atómica*. Universidad Carlos III de Madrid.
- Raghavan, D., VanLandingham, M., Gu, X. y Nguyen, T. (2000). Characterization of hetero geneous regions in polymer systems using tapping mode and force mode atomic force microscopy. *Langmuir*, 16(24), 9448–9459. DOI: 10.1021/la991694w
- Rahmad, S., Yusoff, N., Rosyidi, S., Haji, K. y Widyatmoko, I. (2020). Effects of Rediset on the adhesion, stripping, thermal and surface morphologies of PG76 binder. *Construction and Building Materials*, 241, 1-12. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117923
- Reséndiz, M. y Castrellón-Uribe, J. (2005). Microscopio de Fuerza Atómica. *Encuentro de Investigación en Ingeniería Eléctrica*, Zacatecas.
- Roa, J., Oncins, G., Díaz, J., Sanz, F. y Segarra, M. (2011). *Calculation of Young's Modulus Value by Means of AFM. Recent Patents on Nanotechnology*, 5(1), 27-36. DOI: 10.2174/187221011794474985
- Sánchez, J. (2018). *Espectroscopía de Fuerzas Multidimensional para la Caracterización en la Nanoescala de las Interacciones Electroestática y de Dispersión*. (Tesis doctoral). España: Universidad de Murcia.
- Yang, J., Zhu, X., Yuan, Y. y Li, L. (2020). Effects of Aging on Micromechanical Properties of Asphalt Binder Using AFM. *Journal of Materials of Civil Engineering*, 32(5), 04020081. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003030.

Homenaje a la Ingeniera e Investigadora Fabiola Miranda Argüello

Máster en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica
Investigadora de la Unidad de Materiales y Pavimentos del Pitra, LanammeUCR.
Editora de la Revista Infraestructura Vial
1991-2020

Un mensaje de su familia

Por: María José Miranda Argüello

Aquellas personas que conocimos bien a mi hermana, sabemos que hay dos palabras que la definían muy bien: determinación y entrega.

Ella era una mujer que estaba dispuesta a alcanzar todo aquello que se proponía, tanto laboral como personal, y lo hacía de la manera más asertiva posible.

Su autenticidad era lo que más admiraba de ella, Fabiola era la persona más transparente que he conocido en mi vida y su corazón lo más noble que existía, su entrega en todo lo que hacía, me dejaba admirada.

Siempre fue única y bastante diferente, ambas éramos como el agua y el aceite, en nuestra infancia, mientras yo era una niña pasiva, Fabiola era una niña enérgica, llena de vida, persistente y entusiasta, se ganaba rápidamente el cariño de cualquier persona que la conociera. Crecimos entre adversidades, nuestros padres siempre lucharon para que saliéramos adelante y, esta experiencia, fue lo que marcó y determinó el carácter de mi hermana, sabía que, si quería lograr algo, no solo debía alcanzar esa meta, sino que debía de ser la mejor. Su carácter luchador permitió que ella fuera una persona reconocible.

Siempre fue selectiva con las personas que la rodeaban, pero amaba con pasión a aquellas que consideraba sus amigas, su entrega era incondicional y sincera, siempre dispuesta a ayudar, puedo decir que para todos aquellos que fuimos amigos de Fabiola, ¡era todo un privilegio! No siempre se consigue una amiga como ella.

Amaba con el corazón todo lo que la rodeaba: su trabajo, familia, amigos y hasta los deportes.

Siempre dispuesta a aventurarse, nunca daba un no como respuesta, aceptó cada reto que se le colocaba en frente y tomaba cada ocasión como una oportunidad de mejora.

Ambas compartíamos nuestros sueños y ambiciones, sabía que podía contar con ella en cualquier momento, era una gran consejera y su juicio asertivo la convertía en mi mejor amiga.

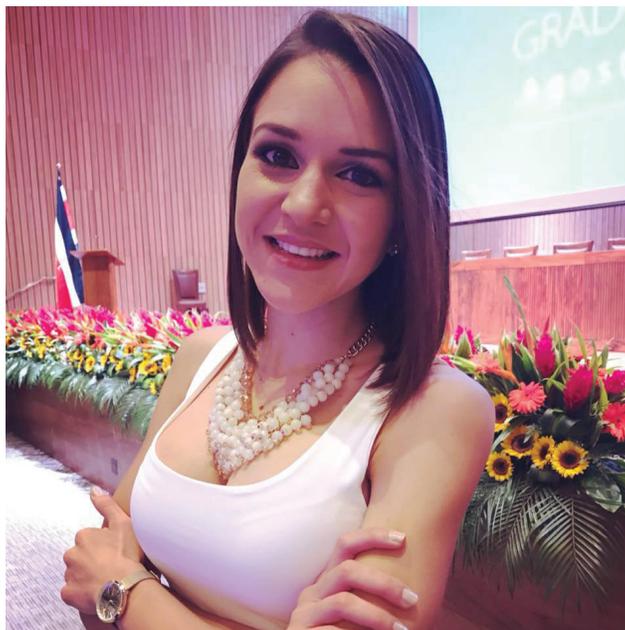
Para aquellas personas que leerán esta nota, solo quiero que sepan que: Fabiola Miranda Argüello era un ser humano admirable, era capaz de anteponer las necesidades de los demás antes que las de ella, amaba con determinación y nobleza, siempre fue objetiva, humilde, nunca emitió un juicio sin razón, le encantaba el deporte, la moda y el queso, tenía una mente brillante, sin lugar a duda, que muy pocos la comprendían, pero si alguien entraba en su vida, quedarían marcados por siempre.

Para ella, su último proyecto laboral, fue la manera de dejar su aporte para la sociedad, entregó cuerpo y alma para lograr cumplir esta meta. En una de nuestras últimas conversaciones, ella me dijo: Sé que yo no reciclo, pero esta carretera que viene será mi manera de borrar mi huella de carbono.

No me queda más que agradecer a todos aquellos que compartieron con mi hermana, sus amigos y compañeros de trabajo, a LanammeUCR, institución que tomó en cuenta la labor de mi hermana y quiso destacarla en este homenaje.

Y gracias a ti, Fabiola, dejaste una marca de orgullo imborrable en mi vida.

De verdad, muchas gracias.



Un mensaje de sus compañeros

Por: Tania Ávila Esquivel y José Pablo Aguiar Moya

Nació en la ciudad de Heredia el 6 de agosto de 1991, en el seno de una familia de seis, donde era la menor. Realizó sus estudios primarios y secundarios en dicha ciudad, obteniendo el Bachillerato en 2008 del Liceo Samuel Sáenz Flores. Se matriculó en la Universidad de Costa Rica (UCR) en el año 2009, obteniendo una nota de más de 700 puntos en el examen de admisión. En este Centro cursó la carrera de Ingeniería Civil, su primera opción, y obtuvo su diploma de Licenciada en Ingeniería Civil en el año 2014. También en este año ganó el 1er Concurso Interuniversitario del Colegio de Ingenieros Civiles por la construcción de un puente a escala, lo que le permitió en ese mismo año viajar a Washington DC en representación de la UCR en la edición mundial del concurso.

Mientras cursaba la carrera, Fabiola comenzó a laborar como asistente en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (LanammeUCR) a partir del año 2012, donde realizó trabajos de apoyo en investigación del comportamiento mecánico de la matriz fina de las mezclas asfálticas, tema que posteriormente continuó desarrollando en su trabajo final de graduación.

Producto de su desempeño como asistente en el LanammeUCR, se le ofrece la posibilidad de trabajar como Ingeniera Civil a partir del año 2015, para desempeñarse dentro del Programa de Infraestructura del Transporte ejerciendo labores de coordinación y apoyo en proyectos de vinculo externo y, posteriormente, en investigación en mezclas asfálticas, ahondando en el tema de daño por humedad.

En paralelo a sus actividades como profesional, se inscribió en la Maestría de Ingeniera en Transporte y Vías de la UCR, obteniendo su título de Máster en el año 2017, donde además obtuvo un reconocimiento de parte de la Institución por ser la mejor estudiante de dicha Maestría en agosto de 2018. Con base en su proyecto de investigación, también ganó el reconocimiento de mejor póster en Congreso del *European Asphalt Technical Association* (EATA) del 2019.

Publicó sus investigaciones en congresos y revistas científicas de mucho prestigio a nivel regional y mundial como lo son el Congreso Iberoamericano del Asfalto, *European Asphalt Technology Meeting*, *Transportation Research Board Annual Meeting* y el *Journal of the Association of Asphalt Pavement Technologists*. Adicionalmente, apoyó como parte del Consejo Científico del Congreso Infraestructura Vial Citrans.

La Ingeniera Miranda siempre se distinguió como profesional por su dedicación, esmero, eficiencia y proactividad en el desarrollo de sus funciones. Como persona se distinguió por su firmeza y postura en cuanto a sus ideas, lo que siempre le ganó el respeto de sus colegas. Pero también se le conoció por su nobleza, lealtad y solidaridad para con sus compañeros y amigos.

En esta breve reseña, queremos resumir la meritoria trayectoria profesional de Fabiola, que tristemente se vio interrumpida antes de lo que todos hubiésemos deseado, así como dejar plasmada nuestra admiración, cariño y respeto por ella. Que la fortaleza, positivismo y perseverancia con la que vivió, sea una luz de guía para los momentos más difíciles. Finalmente, nos corresponde a amigos y compañeros llevarla siempre en la memoria y seguir el ejemplo que su trayectoria nos dejó.

Un mensaje de la Revista Infraestructura Vial

Por: Piero Laurent y Alejandra Baldi

La Ingeniera Miranda tomó la revista en el año 2017, durante su tiempo a cargo se publicaron dos volúmenes que comprendieron 4 números regulares y un número especial, publicando así 15 artículos de diferentes países como México, Chile, Colombia, Estados Unidos y Costa Rica.

Su trabajo fue ejemplar, siempre buscó la manera de ayudar a los autores para que sus obras estuvieran a la altura de una revista científica de la Universidad de Costa Rica. Su entrega y pasión han marcado la vida de quienes le conocimos, por lo que siempre será recordada como una excelente profesional, admirada por muchos.

Para nosotros, los actuales editores de la Revista Infraestructura Vial del LanammeUCR, es un honor continuar con la excelente labor realizada por la Ingeniera Miranda.

Gracias por tanto, Fabi.

Un mensaje del director del LanammeUCR

Por: Alejandro Navas Carro

Fabiola empezó su trayecto en el LanammeUCR como estudiante, fue asistente y tesiera, y sus capacidades y potencial profesional le permitieron convertirse en una muy estimada colaboradora de la institución.

Durante los años laborados formó parte de importantes investigaciones tanto para el LanammeUCR como para el país, como lo fue el desarrollo de los pavimentos verdes y la posibilidad de empezar a incorporar tecnologías amigables con el ambiente en el área de la infraestructura vial.

La recordamos como una persona alegre, amable, carismática, y como una profesional comprometida, colaboradora y esforzada, que siempre dio su mayor esfuerzo y dedicación; que luchó hasta el final dejándonos una gran enseñanza de valentía y amor por la vida.

UCR