



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



# Infraestructura Vial



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Publicación semestral / ISSN: 1409-4045 - ISSN electrónico: 2215-3705

Volumen 19 / Número 33 / Julio, 2017 / San José, Costa Rica

## COLOMBIA

Análisis comparativo de mezclas suelo cemento modificadas con materiales no biodegradables. Metodología de la portland cement association

## MÉXICO

Señalización y seguridad vial en buses de tránsito rápido: el transmilenio en Bogotá

## COSTA RICA

Uso de la bicicleta en Costa Rica: repaso histórico y caracterización del tipo de ciclistas y su movilidad en el entorno vial nacional

## ESTADOS UNIDOS

Mejores prácticas para diseñar mezclas asfálticas con pavimento asfáltico recuperado (RAP)

## COSTA RICA

Modelación de demanda de transporte urbano en Costa Rica, de Emme a Transcad

## 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.

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>

Políticas de Uso:



Revista Infraestructura Vial por LanammeUCR se distribuye bajo: Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-SinDerivar 4.0 Internacional

# EN ESTA EDICIÓN

## COLOMBIA

### **ANÁLISIS COMPARATIVO DE MEZCLAS SUELO CEMENTO MODIFICADAS CON MATERIALES NO BIODEGRADABLES. METODOLOGÍA DE LA PORTLAND CEMENT ASSOCIATION**

COMPARATIVE ANALYSIS OF CEMENT MODIFIED SOIL MIXES WITH NON-BIODEGRADABLE MATERIALS.  
PORTLAND CEMENT ASSOCIATION METHODOLOGY

Sandra Elodia Ospina Lozano      Adriana María López Velandia      Camilo Andrés Nieves Castro

05

## MÉXICO

### **SEÑALIZACIÓN Y SEGURIDAD VIAL EN BUSES DE TRÁNSITO RÁPIDO: EL TRANSMILENIO EN BOGOTÁ**

ROAD SIGNAGE AND ROAD SAFETY IN BUS RAPID TRANSIT CORRIDORS: TRANSMILENIO IN BOGOTÁ

Yefer Asprilla Lara      Fernando García De Quevedo      Mario Gpe. González Pérez

15

## COSTA RICA

### **USO DE LA BICICLETA EN COSTA RICA: REPASO HISTÓRICO Y CARACTERIZACIÓN DEL TIPO DE CICLISTAS Y SU MOVILIDAD EN EL ENTORNO VIAL NACIONAL**

USE OF BICYCLE IN COSTA RICA: HISTORICAL REVIEW AND CHARACTERIZATION OF THE TYPE OF CYCLISTS AND THEIR MOBILITY ON THE NATIONAL ROAD SYSTEM

Bohián Pérez Stéfanov

26

## ESTADOS UNIDOS

### **MEJORES PRÁCTICAS PARA DISEÑAR MEZCLAS ASFÁLTICAS CON PAVIMENTO ASFÁLTICO RECUPERADO (RAP)**

RECOMMENDED BEST PRACTICES FOR USING RAP IN ASPHALT PAVEMENTS FOR COSTA RICA

Ing. Fabricio Leiva-Villacorta, Ph.D., MBA

Ing. Adriana Vargas-Nordcbeck, Ph.D., MBA

35

## COSTA RICA

### **MODELACIÓN DE DEMANDA DE TRANSPORTE URBANO EN COSTA RICA, DE EMME A TRANSCAD**

URBAN TRANSPORTATION DEMAND MODELLING IN COSTA RICA, FROM EMME TO TRANSCAD

Ing. Leonardo Castro Rodríguez. M.E., M.B.A.

Ing. Gabriela Picado Aguilar

Ing. Stephan Rodríguez Shum

45

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:

Dialnet e-revist@s latindex

UCRIndex

PERIÓDICA  
Revista de Ciencias e Ingenierías en Costa Rica

SciELO  
Costa Rica

REDIB | Red Iberoamericana  
de Innovación y Conocimiento Científico

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.

En la presente edición, la número 33 de la Revista Infraestructura Vial, se han aceptado 5 artículos de excelente nivel. Como siempre, junto con nuestros revisores, se realizó un exhaustivo análisis de cada artículo y se trató de brindar un contenido variado que pueda aportar tanto a investigadores especializados, trabajadores de la industria y a ciudadanos interesados en los temas de la infraestructura vial, herramientas valiosas de análisis.

El primer artículo, intitulado Análisis Comparativo de Mezclas de Suelo Cemento Modificadas con Materiales No Biodegradables: Metodología de la Portland Cement Association presenta el análisis comparativo de investigaciones realizadas en la Universidad de La Salle – Colombia desde el año 2012, referente a mezclas suelo cemento modificadas diseñadas con la metodología de la Portland Cement Association [PCA] (ACI, 1997), y guiadas por el artículo 350 del Instituto Nacional de Vías [Inviás] del año 2013, que refiere a las características que debe cumplir una mezcla granular mejorada con cemento para control de calidad en obra, de aplicación nacional en Colombia. Así las cosas, el artículo presenta un importante análisis del uso de materiales reciclados en la resistencia y desempeño de mezclas de suelo cemento.

Se incluye como segundo artículo el documento titulado Señalización y Seguridad Vial en Buses de Tránsito Rápido: El Transmilenio en Bogotá, en el cual se indica que el incremento de la accidentalidad vial en la mayoría de los países del mundo ha encendido las alarmas de la práctica de la movilidad urbana e interurbana contemporáneas. Los resultados arrojan que es impostergable para los gobiernos nacionales y municipales implementar políticas de mitigación y medidas orientadas a subsanar los efectos socio-económicos y psicológicos generados por la práctica de la movilidad urbana motorizada.

El tercer artículo trata del Uso de la Bicicleta en Costas Rica: Repaso Histórico y Caracterización del Tipo de Ciclistas y su Movilidad en el Entorno Vial Nacional. Dicho artículo de opinión enfatiza cómo en los últimos años el tema del ciclismo ha ido ganando terreno dentro de los estudios de movilidad, transporte y seguridad vial, como opción para la movilidad y posible solución al congestionamiento vial de las ciudades.

El artículo llamado Mejores Prácticas para Diseñar Mezclas Asfálticas con Pavimento Asfáltico Recuperado (RAP) hace un extenso análisis de las aplicaciones del RAP en mezclas asfálticas. El documento propuesto proporciona una guía para el uso eficaz de los materiales de RAP e incluye recomendaciones sobre la manipulación y el almacenamiento del RAP, ensayos de este material, producción de mezclas que contienen RAP, y las prácticas de control de calidad durante la producción de las mezclas que contienen RAP.

Finalmente, el artículo llamado Modelación de Demanda de Transporte Urbano en Costa Rica, de Emme a Transcad documenta un esfuerzo muy importante entre la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica y el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) para generar la migración de las bases de datos y relaciones analíticas, de Emme2 a TransCAD, del modelo de demanda de transporte urbano de la Gran Área Metropolitana (GAM), calibrado en el Plan Regional Urbano de la Gran Área Metropolitana (PRUGAM) en el 2007. Como conclusión principal del artículo se resalta que, de forma preliminar, el modelo de demanda de transporte urbano del PRUGAM pudo migrarse de Emme2 a TransCAD mediante diversos ajustes de forma, pero sin cambios relevantes en las relaciones analíticas, logrando replicar el modelo de forma satisfactoria.

**Dr. Luis Guillermo Loría Salazar**  
LanammeUCR

## DIRECTOR GENERAL

Dr. Luis Guillermo Loría Salazar,  
LanammeUCR  
luis.loriasalazar@ucr.ac.cr

## DIRECTORA EJECUTIVA

M.Sc. Fabiola Miranda Argüello,  
LanammeUCR  
fabiola.miranda@ucr.ac.cr

## MAQUETACIÓN Y DIAGRAMACIÓN

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

Oscar Rodríguez, 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 comparativo de mezclas suelo cemento modificadas con materiales no biodegradables. Metodología de la portland cement association

*Comparative analysis of cement modified soil mixes with non-biodegradable materials. Portland cement association methodology*

## **Sandra Elodia Ospina Lozano**

Ingeniera civil, Magister en ingeniería  
Facultad de ingeniería civil, Universidad de La Salle  
Bogotá, (Colombia).

[seospina@unisalle.edu.co](mailto:seospina@unisalle.edu.co)

## **Camilo Andrés Nieves Castro**

Estudiante ingeniería civil, Semillero de investigación INDETEC  
Facultad de ingeniería civil, Universidad de La Salle  
Bogotá, (Colombia).

[cnieves35@unisalle.edu.co](mailto:cnieves35@unisalle.edu.co)

## **Adriana María López Velandia**

Estudiante ingeniería civil, Semillero de investigación INDETEC  
Facultad de ingeniería civil, Universidad de La Salle  
Bogotá, (Colombia).

[ladriana87@unisalle.edu.co](mailto:ladriana87@unisalle.edu.co)

**Fecha de recepción:** 24 febrero de 2017 / **Fecha de aprobación:** 19 de junio de 2017

## **RESUMEN**

Este artículo presenta el análisis comparativo de investigaciones realizadas en la Universidad de La Salle – Colombia desde el año 2012, referente a mezclas suelo cemento modificadas diseñadas con la metodología de la Portland Cement Association [PCA] (ACI, 1997), y guiadas por el artículo 350 del Instituto Nacional de Vías [Inviás] del año 2013, que refiere a las características que debe cumplir una mezcla granular mejorada con cemento para control de calidad en obra, de aplicación nacional en Colombia. Inicialmente se recopila y organiza la información de manera que se identifiquen criterios comparativos de los resultados obtenidos de mezclas suelo cemento modificadas con materiales no biodegradables, como vidrio templado, poliestireno expandido [EPS], tereftalato de polietileno [PET], polietileno de alta densidad [PEHD] y grano de caucho. Enseguida se evaluaron los resultados obtenidos de dicho análisis comparativo, cuyas variaciones en los contenidos óptimos de cemento discrepan de los rangos sugeridos de la PCA, lo que lleva a plantear una discusión sobre la aplicación de esta metodología para mezclas suelo cemento modificadas, proponiendo nuevos rangos de parámetros de control para futuras investigaciones, los cuales servirán como punto de partida para proponer una nueva metodología de diseño en mezclas suelo cemento empleando dichos materiales. Sin embargo, el análisis aquí mostrado evidencia la necesidad de enriquecer con un mayor número de datos las recomendaciones que se presentan, para dar validez soportada en un procesamiento estadístico suficiente.

**PALABRAS CLAVES:** Mezclas suelo cemento modificadas, metodología PCA, materiales no biodegradables, Porcentaje óptimo de cemento.

## **ABSTRACT**

*This article presents the comparative analysis of research carried out at the La Salle University - Colombia since the year 2012, regarding modified cement mixtures designed with the Portland Cement Association (PCA) methodology (ACI, 1997) and guided by the Article 350 of the National Institute of Roads [Inviás] of the year 2013, which refers to the characteristics that must be met by an improved granular mixture with cement for quality control on site, of national application in Colombia. Initially, information is collected and organized to identify comparative criteria for the results obtained from cement-based mixtures modified with non-biodegradable materials such as tempered glass, expanded polystyrene [EPS], polyethylene terephthalate [PET], high density polyethylene [PEHD] and rubber grain. The results obtained from this comparative analysis were then evaluated, whose variations in the optimal cement contents differ from the suggested ranges of the PCA, which leads to a discussion on the application of this methodology for modified cement mixtures, proposing new ranges Of control parameters for future research, which will serve as a starting point for proposing a new design methodology in cement soil mixtures using such materials. However, the analysis presented here evidences the need to enrich the recommendations that are presented with a greater number of data, to give validity supported in sufficient statistical processing.*

**KEY WORDS:** Modified ground cement mixtures, methodology PCA, non-biodegradable materials, optimal percentage of cement.

## INTRODUCCIÓN

El presente artículo corresponde a una publicación de revisión; su objetivo es el de plantear una discusión referente a los rangos recomendados en la metodología PCA para la adición de cemento, a las mezclas suelo cemento en las cuales se incorporaron materiales no biodegradables como vidrio templado, PEHD, PET, EPS y grano de caucho.

Los materiales que se trabajaron en las investigaciones previas de mezclas suelo cemento modificadas, corresponden a aquellos que han tenido mayor impacto en el medio ambiente, debido a la contaminación que generan, tiempo de descomposición y el volumen que ocupan sus desechos (Cuadro 1). “En Colombia de las 11.6 millones de toneladas de residuos que se generan al año, solo se aprovecha un 17%, caso contrario a países como Holanda y Alemania donde se aprovechan el 99% y 98% de los residuos respectivamente” (Rojas, 2016).

*Cuadro 1. Características de los materiales no biodegradables empleados para modificar mezclas suelo cemento.*

| Material                     | Definición   | Volumen generado por año (Ton)                   | Tiempo de descomposición años | Dato de interés   |
|------------------------------|--|--|-------------------------------|---|
| Grano de caucho              | Se obtiene a través de un proceso que se utiliza por trituración mecánica y separación de los materiales que conforman las llantas. Es un producto no tóxico, de forma granular y suave olor que caracteriza al caucho. (Ramírez. N, 2006)   | 61000<br>(Ministerio de Ambiente-Colombia, 2010) | 600                           | Para el 2008 en Colombia se consumían 4'493.092 llantas, solamente 5% de ellas es reciclado o renovado, el 2% es utilizado para generar energía y otro 2% son utilizadas en artesanías, lo que deja un 91% de llantas que se quedan como basura. (Revista Dinero, 2009).  |
| Tereftalato de polietileno   | Es un tipo de plástico muy usado en envases de bebidas y textiles. El PET en general se caracteriza por su elevada pureza, alta resistencia y tenacidad. De acuerdo con su orientación presenta propiedades de transparencia y resistencia química. (Tecnología de los plásticos, 2011). | 60000  | 100 a 1.000                   | Las aplicaciones más conocidas del tereftalato de polietileno están en cajas para bebidas, donde su vida útil es de 5 a 7 años aproximadamente, bolsas plásticas con vida útil menor a un año y películas de invernadero con vida útil de 2 a 3 años. (Ministerio de Ambiente-Colombia, 2004).  |
| Poliestireno expandido       | Es un material plástico espumado, derivado del poliestireno y utilizado en el sector del envase y la construcción. (ANAPE, 2017)   | 6000   | 500 a 1.000                   | Los residuos de poliestireno en los rellenos sanitarios ocupan un espacio bastante significativo ya que el volumen equivalente a una tonelada de poliestireno es el mismo para 100 toneladas de otro tipo de materiales. (Junca. I, 2014).  |
| Polietileno de alta densidad | El polietileno de alta densidad es un polímero resultado de la polimerización del etileno. Es posiblemente el plástico más popular del mundo. (M&M Plásticos, 2012).   | 75000  | 500                           | El peso promedio de una botella de dos litros ha pasado de 120 gramos en la década del 70 a 67 gramos en la década del 90. De los desechos que llegan al relleno sanitario Doña Juana (Bogotá) 5,8% corresponden a residuos de PEHD. (Álzate S. & Tafur F. 2006). En 2015 en Colombia se recuperaron entre 3.000 y 3.500 toneladas de envases PEHD, lo que representa tan solo 26% del total. (Zarta D. 2016) |
| Vidrio templado              | Es un tipo de vidrio de seguridad procesado por tratamientos térmicos o químicos, para aumentar su resistencia en comparación con el vidrio normal. (Twenergy, 2012).  | 52000  | 400                           | La industria vidriera en Colombia recicla hasta el 51% del total que se utiliza. Al año reciclan 120.000 toneladas de vidrio de más de 100 referencias distintas, equivalentes a 500 millones de envases. (Twenergy, 2012).   |

Se efectuó el estudio comparativo de los resultados para las diferentes mezclas a través de la revisión de las fuentes bibliográficas y trabajos de investigación. Bajo esta perspectiva, se realizó un análisis de las propiedades y características de estas mezclas, las cuales cumplen con los requerimientos establecidos en la Tabla 350-2 del artículo 350 del Inviás, y en la metodología

PCA (ACI, 1997). Sin embargo, aunque se lograron alcanzar las resistencias y durabilidades deseadas, en algunos casos estos valores estuvieron fuera de los rangos sugeridos de adición de cemento según la metodología PCA, esto plantea una necesidad de realizar una adaptación de la metodología para permitir la innovación e incorporación de nuevos materiales.

El método de diseño para mezclas suelo cemento PCA, evalúa el comportamiento de esta mezcla, cuyo principal requisito es resistir las variaciones de las condiciones climáticas. De este modo, el elemento básico de una mezcla suelo – cemento, es la cantidad de cemento requerida para producir una mezcla que resista los esfuerzos producidos en los ensayos de durabilidad por humedecimiento y secado.

## METODOLOGÍA

Se realizó una recopilación bibliográfica de las investigaciones en mezclas suelo cemento modificadas con materiales no biodegradables (Acero y Mogollón, 2015), (Buitrago y González, 2015), (Cruz y Díaz, 2015), (Infante, 2015), (Meneses y Fuentes, 2015), (Ochoa y Valderrama, 2012), (Sarmiento y Bustos, 2016), (Velandia y Parra, 2016), que fue organizada de acuerdo al tipo de suelo y al método de modificación (adición o sustitución) según se presenta en el cuadro 2.

Cuadro 2. Características de composición de las mezclas suelo cemento modificadas

| Clasificación |      | Material no biodegradable | Nombre asignado a la mezcla | Método de modificación |         | % material no biodegradable (sustituye o adiciona) | Franja granulométrica       |               |
|---------------|------|---------------------------|-----------------------------|------------------------|---------|--|-----------------------------|---------------|
| AASTHO        | USCS |                           |                             | Sustitución            | Adición |  | Pasa tamiz                  | Retiene tamiz |
| A-1-a         | GW   | PET                       | PT2                         | ü                      | X       | 0 - 25 - 50 - 75 - 100                             | N° 4                        | N° 16         |
| A-2-4         | SM   | Grano de caucho           | C1                          | ü                      | X       | 0 - 25 - 50 - 75 - 100                             | N° 30                       | N° 80         |
| A-2-4         | SM   | Grano de caucho           | C2                          | ü                      | X       | 0 - 25 - 50 - 75 - 100                             | N° 8                        | N° 16         |
| A-2-4         | SM   | PET                       | PT1                         | X                      | ü       | 0 - 5 - 10 - 15                                    | No aplica, adición en peso. |               |
| A-2-4         | SM   | Vidrio templado           | V                           | X                      | ü       | 0 - 5 - 10 - 15                                    | No aplica, adición en peso. |               |
| A-2-6         | SM   | EPS                       | P                           | ü                      | X       | 0 - 12.5 - 25 - 37.5 - 50                          | N° 10                       | N° 20         |
| A-2-6         | SM   | PEHD                      | PD                          | ü                      | X       | 0 - 25 - 50 - 75 - 100                             | N° 4                        | N° 10         |
| A-4           | CL   | Grano de caucho           | C3                          | X                      | ü       | 0 - 5 - 25 - 50                                    | No aplica, adición en peso. |               |

Nota: ✓ Se realizó, ✗ No se realizó.

Los procesos de adición y sustitución en las mezclas fueron hechos siempre por peso exceptuando el del EPS, el cual fue realizado por volumen.

Los materiales granulares patrón (primera columna del cuadro 2), y las mezclas fueron evaluadas bajo los requerimientos del artículo 350-13 del Invías, conformando un grupo de ensayos

presentados en el cuadro 3; los ensayos enlistados no fueron efectuados a todas las mezclas, pues el objeto de cada trabajo de investigación era variable.

Cuadro 3. Ensayos realizados a los materiales granulares patrón y las mezclas

| Código de la norma | Nombre del ensayo   | Valor requerido   |
|--------------------|---|-------------------|
| INV E 121 – 13     | Determinación del contenido orgánico de un suelo mediante el ensayo de pérdida por ignición                               | 1% máx.           |
| INV E 122 – 13     | Determinación en laboratorio del contenido de agua(humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo- agregado       | -                 |
| INV E 123 – 13     | Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos  | -                 |
| INV E 125 – 13     | Determinación del límite líquido de los suelos  | -                 |
| INV E 126 – 13     | Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos   | -                 |
| INV E 133 – 13     | Equivalente de arena de suelos y agregados finos  | 30% Mín.          |
| INV E 142 – 13     | Relaciones de humedad - peso unitario seco en los suelos (ensayo modificado de compactación)                              | N/A               |
| INV E 148 – 13     | CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada  | 60% Mín.          |
| INV E 211 – 13     | Determinación terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados  | 2% Máx.           |
| INV E 218 – 13     | Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1 ½") por medio de la máquina de los ángeles | 500 Rev.: 40%Máx. |
|                    |   | 100 Rev.: 8%Máx.  |
| INV E 220 – 13     | Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o magnesio                                  | 18% Máx.          |
| INV E 227 – 13     | Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso  | 50% Mín.          |
| INV E 230 – 13     | Índices de alargamiento y aplanamiento de los agregados para carreteras   | -                 |
| INV E 235 – 13     | Valor de azul de metileno en agregados finos  | 10 Máx.           |
| INV E 238 – 13     | Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato micro-deval       | 30% Máx.          |

Las mezclas suelo cemento con material no biodegradable, fueron diseñadas según las dosificaciones de cemento estipuladas por la PCA (Cuadro 4).

De acuerdo con la organización de los datos se iniciaron las comparaciones mostrando las variaciones de las propiedades

de resistencia a la compresión, porcentaje de cemento óptimo, durabilidad, humedad óptima y masa unitaria seca, estas comparaciones se muestran a través de figuras, donde se evidencia que algunas mezclas pueden ser más factibles de implementar como materiales de construcción.

Cuadro 4. Metodología de diseño PCA para mezclas suelo cemento. (ACI, 1997).

| Clasificación de suelo AASHTO | Clasificación de suelo ASTM | Rango de cemento típico requerido % por peso | Contenido de cemento típico para el ensayo de humedad densidad (ASTM 558) % por peso | Contenido de cemento típico para el ensayo de durabilidad (ASTM D559 Y D506) % por peso |
|-------------------------------|-----------------------------|--|--|---|
| A-1-a                         | GW, GP, GM, SW, SP, SM      | 3-5  | 5  | 3-5-7   |
| A-1-b                         | GM, GP, SM, SP              | 5-8  | 6  | 4-6-8   |
| A-2                           | GM, GC, SM, SC              | 5-9  | 7  | 5-7-9   |
| A-3                           | SP                          | 7-11   | 9  | 7-9-11  |
| A-4                           | CL, ML                      | 7-12   | 10   | 8-10-12   |
| A-5                           | ML, MH, CH                  | 8-13   | 10   | 8-10-12   |
| A-6                           | CL, CH                      | 9-15   | 12   | 10-12-14  |
| A-7                           | MH, CH                      | 10-16  | 12   | 11-13-15  |

A continuación, se grafican los resultados obtenidos de las probetas con mayor porcentaje de cemento (valor máximo sugerido por la PCA y por ende mayor resistencia a la compresión), comparándolos con el requerimiento del artículo

350 del Invías (Figura 1), mostrando que para el porcentaje de cemento sugerido hay mezclas que no alcanzan la resistencia solicitada en el artículo.

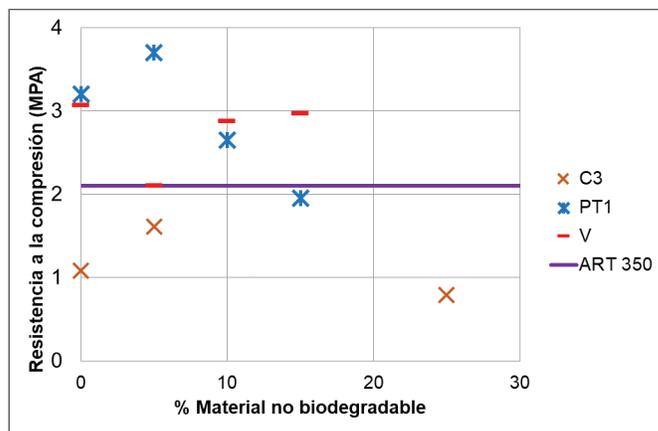
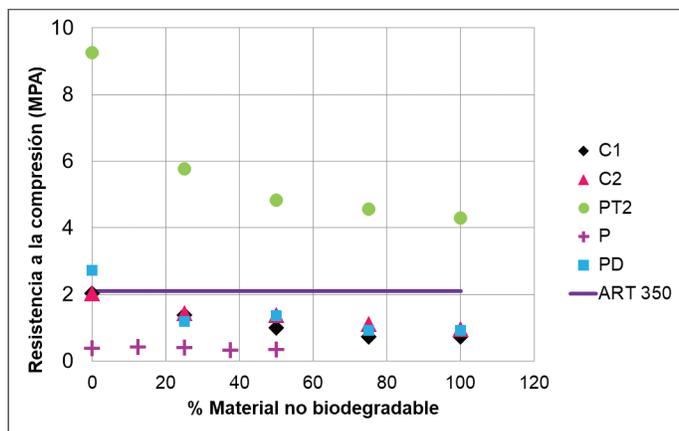


Figura 1. Comparación resistencia a la compresión suelos. a) por sustitución. b) por adición.

Según los parámetros establecidos por la PCA y los valores requeridos por el artículo 350 del Invías 2013, las muestras trabajadas con materiales como C1, C2, C3 y P no cumplen con la resistencia mínima de 2.1 MPa, caso contrario a lo que ocurre en las muestras trabajadas con PT1, PT2 y V, que cumplen con los

valores mínimos establecidos para la resistencia a la compresión en todas las mezclas trabajadas, probablemente en la mezcla PT2 el cumplimiento del requerimiento obedezca a las características del material granular, que corresponde con una grava bien gradada.

Una vez analizada la resistencia a la compresión, se define el porcentaje óptimo de cemento que alcance la resistencia mínima, según lo requerido en el artículo 350; cuando no se alcanzaba esta resistencia dentro del rango analizado de los porcentajes de cemento adicionados a las mezclas según las indicaciones de la PCA, fue necesaria la extrapolación de datos para obtener el contenido óptimo de cemento de cada mezcla. A continuación, se presenta la comparación de los diferentes tipos de suelos utilizados (Figuras 2 a 4) versus el rango de cemento utilizado para cada caso presentado en el cuadro 4.

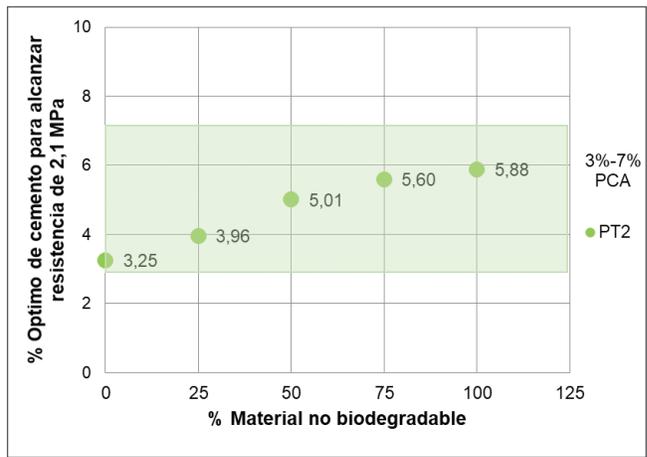


Figura 2. Porcentaje óptimo de cemento, suelo A-1-a por sustitución.

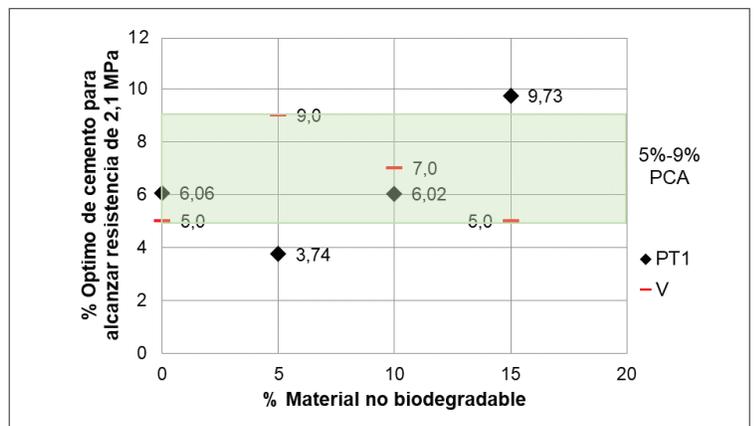
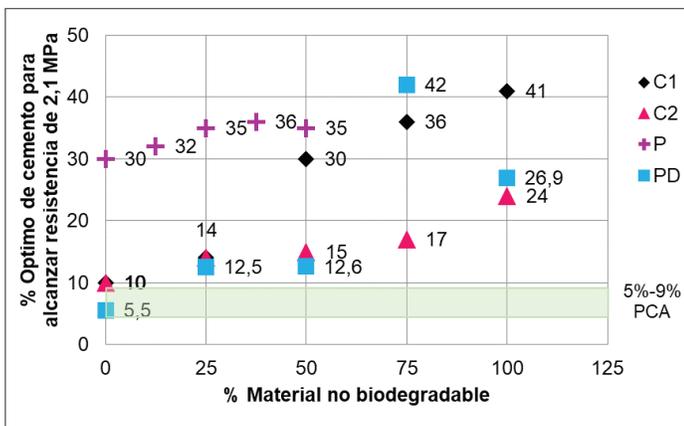


Figura 3. Porcentaje cemento óptimo, suelo A-2. a) por sustitución. b) por adición

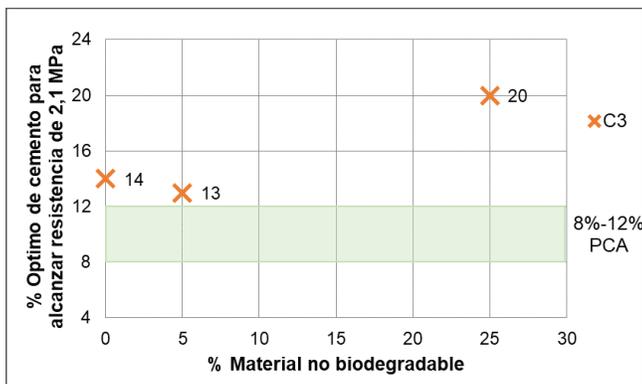


Figura 4. Porcentaje cemento óptimo, suelo A-4 por adición.

Se puede notar que el suelo A-1-a por sustitución, y A-2 por adición (para V, y parcialmente para PT1) alcanzan la resistencia mínima requerida dentro del rango del contenido de cemento sugerido por la PCA. Analizando el comportamiento de las adiciones para el suelo A-2, respecto al diseño de referencia (0% de material no biodegradable) se observa un comportamiento lineal considerando los porcentajes de adición utilizados de los modificadores V y PT1 (5%, 10% y 15%), lo que permite observar que para valores que para el primer modificador V para porcentajes entre el 5% y el 15% de adición coincidiría con el rango de la PCA, mientras que para el modificador PT1 esto se cumpliría para el rango entre el 7% y el 14%.

Para el suelo A-2 por sustitución y A-4 por adición, es necesaria la extrapolación para obtener el contenido óptimo de cemento para lograr la misma resistencia.

Otra de las propiedades evaluadas, fue la de durabilidad o máxima pérdida de masa de la mezcla compactada en la prueba de humedecimiento y secado (Figura 5), según lo permitido en el artículo 350 para cada tipo de suelo.

Según la Figura 5, los suelos de mejor calidad (Figura 5b) al ser modificados cumplen con el máximo de pérdida permitido según el artículo 350 (línea púrpura), pero en el caso de suelos arenolimosos o limoarcillosos, la pérdida presentada con la modificación es mayor que la máxima permitida, en este caso se debe observar que el material natural sin modificación estabilizado con cemento (0% material no biodegradable) presenta una pérdida muy cercana al límite máximo (Figura 5a).

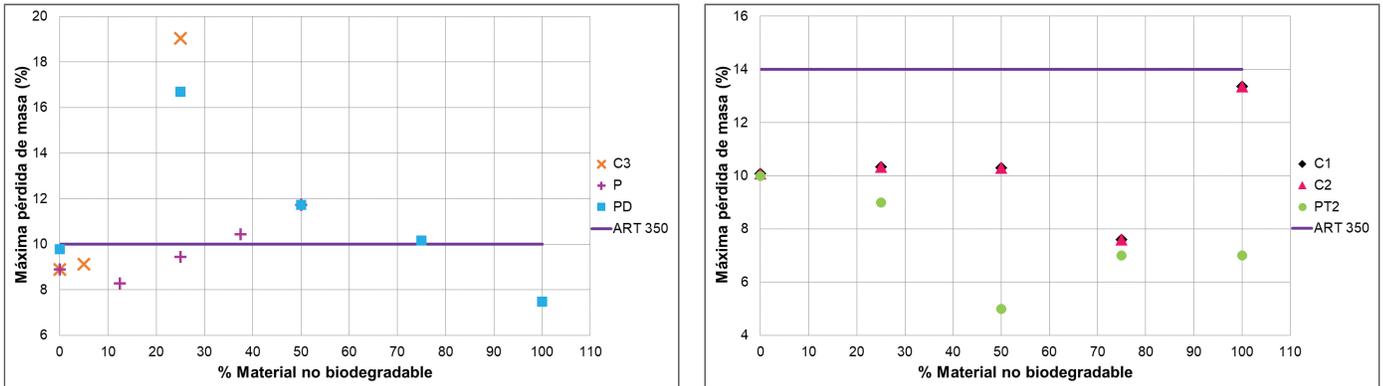


Figura 5. Máxima pérdida de masa de la mezcla compactada en prueba de humedecimiento y secado. a) Suelos A-2-6 y A-4. b) Suelos A-1-a y A-2-4

El ensayo de compactación es uno de los más importantes procedimientos de estudio y control de calidad de un terreno, en los trabajos analizados en este documento emplearon el ensayo de compactación Proctor Standard. A través de él es posible determinar la densidad seca máxima de un terreno en relación con su grado de humedad, a una energía de compactación

determinada (Chamba, 2014), la comparación del porcentaje de humedad óptima para las mezclas evaluadas se encuentra en la Figura 6, a su vez los resultados y comparación de la masa unitaria se encuentran en la Figura 7.

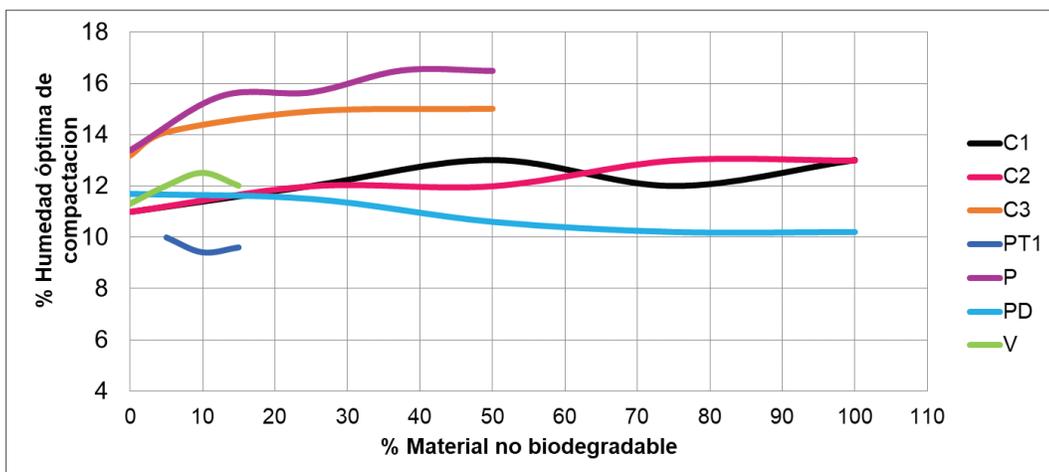


Figura 6. Porcentaje de humedad óptima evaluada en mezclas suelo cemento con material no biodegradable

En general la variación de la humedad óptima de compactación del suelo natural y de las mezclas modificadas es de aproximadamente 2%, lo cual indica que el material modificador no afecta en gran medida este parámetro, sin embargo, la curva de PT2 no se muestra

en la gráfica ya que presenta un comportamiento diferente a las demás, en este caso se sigue y hace parte de las recomendaciones realizar más pruebas para validar los resultados obtenidos.

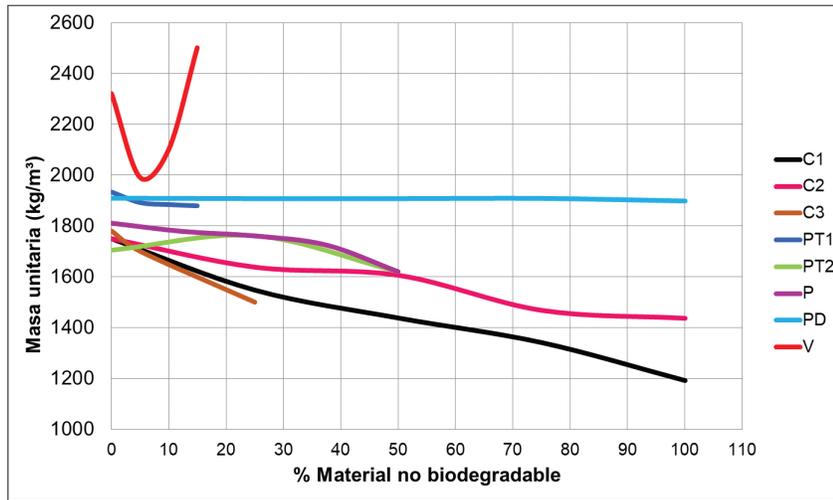
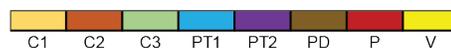


Figura 7. Masa unitaria evaluada en mezclas suelo cemento con material no biodegradable

Adicionalmente la relación entre el material modificador de la mezcla y la masa unitaria es inversamente proporcional, esto es debido a que los materiales modificadores son livianos por lo cual a mayor porcentaje de material modificador en la mezcla menor es su masa unitaria, caso contrario ocurre con el V ya que su densidad es de 2500 kg/m<sup>3</sup> ocasiona que la masa unitaria de la mezcla presente un incremento.

## RESULTADOS

De la revisión bibliográfica inicial, se plantea el estado de las diferentes condiciones que aún no han sido estudiadas y donde se requiere seguir realizando investigación para validar los resultados respecto a nuevos rangos que se proponen en este artículo. Los cuadros 5, 6 y 7, presentan respectivamente una relación conforme a los materiales y suelos que se han estudiado a la fecha en cuanto a las mezclas suelo cemento modificadas, y por tanto las posibles variaciones e investigaciones que surgen para realizar un estudio más detallado. Los materiales se representan con colores, para su fácil identificación, así:



Cuadro 5. Relación de materiales, metodología de modificación y propiedades evaluadas.

| Grano de caucho, PET, EPS, Vidrio templado, PEHD |                              | Suelo |       |   |       |   |     |   |
|--|------------------------------|-------|-------|---|-------|---|-----|---|
|  |                              | A-1   | A-2   |   |       |   | A-4 |   |
|  |                              | A-1-a | A-2-4 |   | A-2-6 |   |     |   |
| Método de modificación                           | Sustitución                  | ■     | ■     | ■ | ■     | ■ | ■   | ■ |
|  | Adición                      | ■     | ■     | ■ | ■     | ■ | ■   | ■ |
| Propiedades evaluadas                            | Durabilidad                  | ■     | ■     | ■ | ■     | ■ | ■   | ■ |
|  | Perdidas en peso de material | ■     | ■     | ■ | ■     | ■ | ■   | ■ |
|  | Resistencia a la compresión  | ■     | ■     | ■ | ■     | ■ | ■   | ■ |
|  | Resistencia a la flexión     | ■     | ■     | ■ | ■     | ■ | ■   | ■ |
| Resistencia a la compresión (cubo modificado)    |                              | ■     | ■     | ■ | ■     | ■ | ■   | ■ |

Cuadro 6. Relación de dosificaciones y suelos en las mezclas evaluadas.

| % Dosificación | Suelo |       |       |  |     |
|----------------|-------|-------|-------|--|-----|
|                | A-1   | A-2   |       |  | A-4 |
|                | A-1-a | A-2-4 | A-2-6 |  |     |
| 5              |       |       |       |  |     |
| 10             |       |       |       |  |     |
| 12.5           |       |       |       |  |     |
| 15             |       |       |       |  |     |
| 25             |       |       |       |  |     |
| 37.5           |       |       |       |  |     |
| 50             |       |       |       |  |     |
| 75             |       |       |       |  |     |
| 100            |       |       |       |  |     |

Cuadro 7. Relación de franjas granulométricas y suelos trabajados en las mezclas evaluadas.

| Tamiz      | Suelo |       |       |     |
|------------|-------|-------|-------|-----|
|            | A-1   | A-2   |       | A-4 |
|            | A-1-a | A-2-4 | A-2-6 |     |
| 3/4        |       |       |       |     |
| 3/8        |       |       |       |     |
| N 4        |       |       |       |     |
| N 8        |       |       |       |     |
| N 10       |       |       |       |     |
| N 16       |       |       |       |     |
| N 20       |       |       |       |     |
| N 30       |       |       |       |     |
| N 50       |       |       |       |     |
| N 80       |       |       |       |     |
| N 100      |       |       |       |     |
| N 200      |       |       |       |     |
| ADICION EN |       |       |       |     |

En los cuadros anteriores todas las casillas en blanco son posibles investigaciones que se pueden realizar a futuro, con el fin de tener una base de datos más amplia. En la Tabla 5, se presenta la relación del método de modificación y las propiedades evaluadas en las mezclas, donde la PT2 es la mezcla a la que se le realizaron más ensayos; así mismo se presentan en las Tablas 6 y 7, la relación entre los rangos de valores de las dosificaciones y la franja granulométrica con los diferentes suelos, donde estos pueden tener diferentes variaciones y combinaciones.

Partiendo de la comparación realizada, se definen fronteras de cambio con el fin de tener en cuenta la inclusión de estos materiales alternativos en futuras investigaciones, dichas fronteras se proponen en una tabla con rangos de dosificación similares a los establecidos por la PCA (Tabla 8), donde se indica el porcentaje de cemento a adicionar sugerido; la recomendación se hace en función del material modificador y el método de inclusión en la mezcla con el fin de alcanzar la resistencia de 2.1 MPa y con la cual se diseñaron las probetas que se trabajaron en las investigaciones analizadas.

Cuadro 8. Dosificaciones de diseño sugeridas para la inclusión de materiales no biodegradables.

| Clasificación AASHTO | Clasificación ASTM     | Rango del cemento para el ensayo de durabilidad (ASTM D 559 y D506) % por peso según PCA | Material no biodegradable | Metodología de inclusión para material no biodegradable | Propuesta del rango para encontrar el contenido de cemento óptimo con material no biodegradable (%) |
|----------------------|------------------------|--|---------------------------|---|---|
| A-1-a                | GW, GP, GM, SW, SP, SM | 3-5-7  | PT2                       | Sustitución   | *   |
| A-2-4                | GM, GP, SM, SC         | 5-7-9  | C1, C2                    | Sustitución   | 14-27-41  |
|                      |                        |  | PT1                       | Adición   | 3-6-10  |
|                      |                        |  | V                         | Adición   | *   |
| A-2-6                | GM, GP, SM, SC         | 5-7-9  | PD                        | Sustitución   | 13-28-43  |
|                      |                        |  | P                         | Sustitución   | 30-33-36  |
| A-4                  | CL, ML                 | 8-10-12  | C3                        | Adición   | 13-17-21  |

Nota: \* No se propone nada porque la resistencia mínima a la compresión se logra dentro del rango de la PCA.

## CONCLUSIONES

En la Tabla 8, de los 5 tipos de materiales no biodegradables que modificaron las mezclas, fue posible lograr la resistencia mínima requerida por el artículo 350 del Invías, dentro del rango de cemento sugerido por la PCA para el PET y el vidrio. En el caso del PET, la validación de la PCA, se da para los dos métodos de modificación (adición o sustitución).

Para el grano de caucho por método de modificación de sustitución, el nuevo rango sugerido en los porcentajes de cemento para la fabricación de las probetas, es muy diferente al planteado por la PCA. En el caso del mismo modificador por el método de adición, el nuevo rango también es diferente al de la PCA, pero no tan distante; esto puede implicar que para una mezcla modificada por un material liviano como el PEHD la metodología no se ajusta.

Referente a lo anterior, para los modificadores EPS y PEHD, se puede concluir lo mismo, por tratarse de materiales de muy baja densidad, la resistencia a la compresión de 2.1 MPa no se logra para los porcentajes de cemento recomendados, al igual que la máxima pérdida permitida por efecto de la evaluación de durabilidad por la prueba de humedecimiento y secado, por lo que se proponen unos nuevos rangos de cemento óptimo. De acuerdo con esto se concluye que las bajas densidades de materiales alternativos, ocasionan que la metodología PCA para diseño de mezclas suelo cemento modificadas no se ajuste.

Dada la cantidad de datos utilizados en este documento de acuerdo con las tablas presentadas del estado del conocimiento actual para las mezclas suelo cemento modificadas, es necesario seguir ampliando la investigación de manera que a futuro se pueda proponer una metodología similar a la PCA con nuevos valores y que estos estén validados con suficiencia estadística.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acero, A. Y Mogollón, F. (2015). Análisis de una muestra suelo- cemento sustituyendo la fracción granulométrica (pasa no 8 – retiene no 16) por grano de caucho. Bogotá: Universidad de La Salle.
- Asociación nacional de poliestireno expandido (2017). Madrid. Recuperado de <https://goo.gl/mzkVQy>
- Buitrago, H. y González, E. (2015). Comportamiento de una base estabilizada con cemento sustituyendo partículas de poliestireno expandido en la fracción fina del agregado (tamiz # 10 y # 20). Bogotá: Universidad de La Salle.
- Capas de material granular estabilizado con cemento sección 420-11, Instituto de desarrollo urbano IDU, Bogotá D.C. 2011. Recuperado de <https://goo.gl/ElnUiH>
- Características del PET, M&M Plásticos. 2012. Recuperado de <https://goo.gl/xjc733>
- Colombia apuesta por el reciclaje de vidrio. 2012 Recuperado de <https://goo.gl/MegPIE>.
- Colombia entierra millones de pesos por no reciclar, Rojas F. Publicado el 10 de enero de 2016, Periódico El Colombiano. <https://goo.gl/nXQ5nW>.
- Cruz, J. y Díaz, I. (2015). Utilización de caucho pulverizado proveniente de llantas en bases estabilizadas con suelo – cemento sustituyendo la franja granulométrica entre el tamiz n°30 y n°80. Bogotá: Universidad de La Salle.
- Degradación del plástico. Recuperado de <https://goo.gl/m10uOw>

10. Factibilidad económica, ambiental y social del proceso de fabricación de adoquines cpm de flexiform como alternativa para la formación de recuperadores de Bogotá D.C. Álzate S. y Tafur F. Universidad de La Salle, Bogotá. 2006.
11. Ikoportex- poliestireno expandido. Recuperado de <https://goo.gl/1FddVp>
12. Infante S. (2015). Evaluación de características físicas y mecánicas de una base estabilizada con cemento modificada con vidrio templado. Bogotá: Universidad de La Salle.
13. Inforeciclaje – Reciclaje del vidrio. Recuperado de <https://goo.gl/Jp96x>
14. Invías (2013), Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Normas de Ensayo para Materiales de Carreteras, Instituto Nacional de vías, Colombia.
15. Junca. I (2014). El icopor, una amenaza ambiental creciente para Bogotá. Periódico El Espectador. Bogotá. Recuperado de <https://goo.gl/OTPgHP>
16. La oportunidad está en la basura. Revista Dinero, 2009. Recuperado de <https://goo.gl/BMMPVE>
17. Meneses L. y Fuentes L. (2015). Base estabilizada con cemento, modificada con PET reciclado. Bogotá: Universidad de La Salle.
18. Montejo, A. (2006). Ingeniería de pavimentos (Vol. 2). Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
19. Ochoa, P. y Valderrama, C. (2012). Base estabilizada con cemento modificada con grano de caucho de llanta. Bogotá: Universidad de La Salle.
20. Propiedades generales del vidrio. Recuperado de: <https://goo.gl/BzpljC>
21. Ramírez. N (2006). Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco. Universidad de Chile. Santiago de Chile.
22. Resolución 1457 de 2010, Ministerio de Ambiente – Colombia. Recuperado de <https://goo.gl/DEDATU>
23. Rico, A. y Del Castillo, E. (2009). La ingeniería de los suelos en las vías terrestres (Vol. 2). Limusa editores.
24. Sarmiento J. y Bustos D. (2016). Análisis del comportamiento de base granular estabilizada con cemento sustituyendo con material no biodegradable tereftalato de polietileno (PET) en la fracción del agregado que pasa el tamiz #4 y se retiene en el #16. Bogotá: Universidad de La Salle.
25. Sector plástico, guías ambientales. 2004. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Republica de Colombia. Bogotá.
26. State of the Art Report in Soil Cement, ACI 230.1R – 90, 1997. Recuperado de <https://goo.gl/hBV9AT>
27. Suelo – cemento 1ra parte. Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto A.C. Ingeniería, marzo 2008. Recuperado de <https://goo.gl/X2ZKdc>
28. Suelo – cemento 2da parte. Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto A.C. Ingeniería, abril 2008. Recuperado de <https://goo.gl/7RDkdP>
29. Velandia, C y Parra, L. (2016). Suelo A-2,6 estabilizado con cemento sustituyendo la fracción pasa el tamiz n° 4 y retiene n° 10 del agregado por polímero de alta densidad (PE-HD), Bogotá: Universidad de La Salle.

# Señalización y seguridad vial en buses de tránsito rápido: el transmilenio en Bogotá

*Road signage and road safety in bus rapid transit corridors: transmilenio in Bogotá*

**Yefer Asprilla Lara**

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, estudiante Doctorado en Movilidad Urbana, Transporte y Territorio, Centro Universitario de Tonalá-Universidad de Guadalajara  
[yeasla@hotmail.com](mailto:yeasla@hotmail.com)

**Fernando García De Quevedo**

Instituto Tecnológico de Monterrey Campus Guadalajara, México  
[fdoquevedo@itesm.mx](mailto:fdoquevedo@itesm.mx)

**Mario Gpe. González Pérez**

Universidad de Guadalajara, México  
[inge\\_united@hotmail.com](mailto:inge_united@hotmail.com)

**Fecha de recepción:** 20 de noviembre de 2016 / **Fecha de aprobación:** 20 de julio de 2017

## RESUMEN

El incremento de la accidentalidad vial en la mayoría de los países del mundo ha encendido las alarmas de la práctica de la movilidad urbana e interurbana contemporáneas. Los percances, ocurren tanto en sistemas de transporte público, como en vehículos privados o sistemas masivos de transporte. En el presente escrito, se estudia la influencia de la señalización en la seguridad vial de los usuarios del sistema Transmilenio en el eje troncal de la avenida Caracas en Bogotá, Colombia, a través del análisis descriptivo y la inspección in situ. Los resultados arrojan que es impostergable para los gobiernos nacionales y municipales implementar políticas de mitigación y medidas orientadas a subsanar los efectos socio-económicos y psicológicos generados por la práctica de la movilidad urbana motorizada.

**PALABRAS CLAVE:** Señalización, seguridad vial, accidentalidad, buses de tránsito rápido.

## ABSTRACT

*The increase in traffic accidents in most countries of the world has triggered the alarms in urban and interurban mobility safety. Accidents occur both in public transport systems, such as private vehicles or mass transit systems. In this paper, the influence of road signage on users' road safety of the Transmilenio system in the main arterial of the Caracas Avenue in Bogotá, Colombia is studied through descriptive analysis and on-site inspection. The results show that it is urgent that national and municipal governments implement mitigation policies and measures aiming at decreasing socio-economic and psychological effects generated by motorized traffic.*

**KEYWORDS:** Road signage, road safety, traffic accidents, Bus Rapid Transit.

## INTRODUCCIÓN

Las diferentes investigaciones realizadas en seguridad vial convergen en que el factor humano, con todas sus implicaciones sociales, el vehículo y la infraestructura son los ejes en donde podría tener origen la accidentalidad vial. Efectivamente, los accidentes de tránsito no son solo un problema de señalización o educación vial, sino que se han convertido en un tema de salud pública, que afecta a todos los países del mundo, pero especialmente aquellos con ingresos medios y bajos (Chan, 2011). Inclusive, la Organización Mundial de la Salud (2015) argumenta que cerca de 1,25 millones de personas perecen anualmente y alrededor de 50 millones más, quedan lesionadas en las vías urbanas e interurbanas de los núcleos poblacionales. Por lo cual, la seguridad vial ha sido estudiada y analizada desde hace años por diferentes organizaciones e instituciones a nivel global como la Organización Mundial de la salud (OMS), la Organización Panamericana de la Salud y el Banco Mundial; y en el caso de los sistemas de autobuses de tránsito rápido, organismos como el Instituto de Políticas para el Transporte y Desarrollo, el Centro de Transporte Sostenible del Instituto de Recursos Mundiales, la Asociación Latinoamericana de Sistemas Integrados y BRT, y el Fondo de Prevención Vial. Incluso se estima que de no tomar en cuenta las medidas pertinentes en materia de seguridad vial, para 2030 los decesos por accidentes de tránsito pasarían

a ser la quinta causa de muerte a nivel global, después de las enfermedades pulmonares obstructivas crónicas e infecciones por vías respiratorias (OMS, 2015).

Ciertamente, el tema de la seguridad vial en los sistemas masivos de transporte público es un caso particular; sobre todo en aquellos sistemas de autobuses de tránsito rápido (BRT), los cuales existen en un poco más de 200 ciudades (Global BRT Data, 2016), y se han convertido en una de las soluciones mayormente implementadas en países latinoamericanos y asiáticos, por sus beneficios socioeconómicos y ambientales en la práctica de la movilidad. El BRT (Bus Rapid Transit) es un sistema de transporte público que se caracteriza por no mezclarse con el tráfico mixto. Es decir, el tránsito ocurre por un carril exclusivo. En 1974, la ciudad de Curitiba en Brasil, fue la primera en implementar este sistema, luego en diciembre del 2000 lo adoptó Bogotá, con el denominado sistema Transmilenio (Lindau et al. 2010). Este sistema se ha caracterizado por una serie de dificultades como: baja frecuencia de rutas, bloqueos, ventas ambulantes, accidentalidad, “colados” (acceso al sistema sin pago del pasaje), entre otras, que han afectado notoriamente la calidad del servicio. Además, según datos de la Dirección de Seguridad Vial de la Secretaría Distrital de Movilidad (2016), se tiene evidencia que en los últimos cinco años el problema de la accidentalidad ha sido continuo (Véase Figura 1).



Figuras 1. Accidente de BRT Transmilenio en la Av. Caracas  
Fuente: @kmiilowm en El Universal, 2013

Efectivamente, el año 2014 registró un total en el sistema Transmilenio de 470 accidentes, con 24 decesos y 540 lesionados, y en el 2015 se redujo 22,1% el número de accidentes, con 26,4% menos lesionados; pero no así, el número de fallecimientos, que pasaron de 24 a 27 personas (Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá, 2016). Esta situación podría estar relacionada con el incremento de la demanda de pasajeros y, en consecuencia, por mayores operaciones y crecimiento de la flota de autobuses. A su vez, se adhiere la entrada en operación de la fase III y la extensión del servicio al municipio de Soacha; sobre todo porque después de 12 años de operación de la fase I: troncal avenida Caracas, calle 80, autopista y la Fase II: troncales Norte-Quito sur, Suba y Américas. Sin embargo, en 2012 entra la Fase III del sistema Transmilenio, la cual comprende las troncales de la carretera 10 y calle 26 (Transmilenio, 2014).

En este contexto, un comparativo de los distintos tipos de accidentes que ocurrieron en el sistema Transmilenio entre los años 2013 y 2014, con Informe Policial de Accidente de Tránsito (IPAT), se logra evidenciar que los atropellos a peatones se incrementaron en un 53%, en ciclistas el incremento fue del 48% y en los choques con motociclista el incremento fue del 50%; lo anterior evidencia que la frecuencia de los accidentes se presenta con los usuarios más vulnerables de la movilidad, lo que permite inferir que en la ocurrencia de estos eventos, exista alguna falla de los elementos que conforman la infraestructura del sistema, como señalización y otros. Sin embargo, las hipótesis atribuidas a los accidentes asociadas con los buses del sistema Transmilenio muestran que en el 47,5% de los casos se desconocen sus causas, y al resto se le relaciona con la operación en la prestación del servicio, el tránsito, la señalización, entre otras (Véase Figura 2).

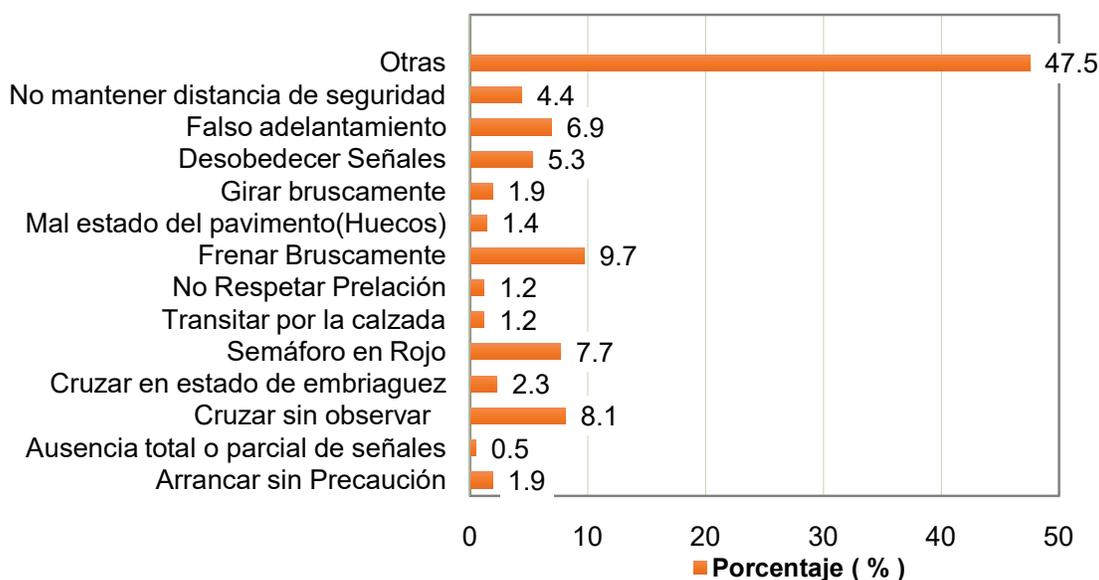


Figura 2. Principales hipótesis de los accidentes del sistema Transmilenio  
Fuente: Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá, 2016

Las principales causas o hipótesis de los accidentes que se muestran en la figura anterior como: frenar bruscamente, cruzar semáforo en rojo, cruzar sin observar, desobedecer las señales de tránsito, adelantar cerrando o entre cruzamientos, no mantener distancia de seguridad entre otras; se evidencian en los tipos de accidentes más frecuentes que se presentaron en el sistema durante el periodo 2013-2014, entre las que se resaltan las caídas dentro del vehículo, seguido por atropellos a peatones y ciclistas,

luego choques con terceros, choques entre buses articulados y motociclistas, lo cual da cuenta que los accidentes presentados en el sistema interactúan los diferentes modos de la movilidad cotidiana, siendo los más afectados los usuarios y actores vulnerables como peatones y ciclistas (Véase Figura 3).

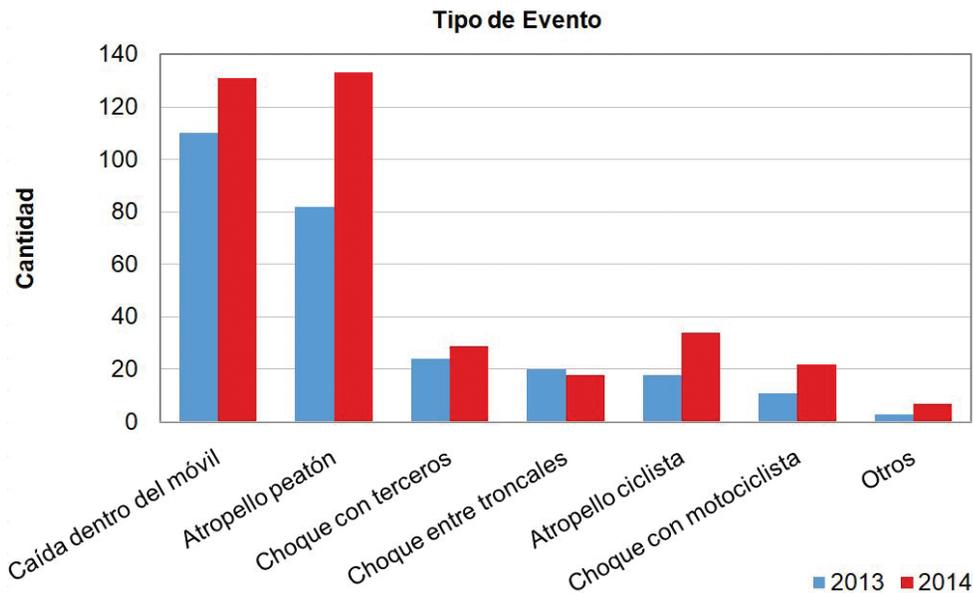


Figura 3. Tipo de eventos (accidentes) frecuentes en el sistema Transmilenio.  
Fuente: Informe de Gestión Sistema Transmilenio, 2014

El presente estudio está circunscrito dentro del “factor infraestructura”; pues suponemos que *en la medida que esta incorpore los mecanismos necesarios para la buena práctica de la movilidad, se estaría en condiciones de contribuir con la reducción de los índices de accidentalidad*. Por lo que se cuestiona: ¿De qué forma incide la señalización en los percances de tránsito?, ¿qué características presenta la señalización de la infraestructura utilizada por el sistema Transmilenio?, ¿qué expectativas se generan en materia de seguridad vial en el sistema Transmilenio? El objetivo central consiste en *analizar la influencia de la señalización en la seguridad vial del sistema BRT Transmilenio, uno de los más reconocidos a nivel mundial (Duarte y Rojas, 2012; Lindau et al. 2010), considerando exclusivamente la señalización vertical y horizontal del eje troncal de la Avenida Caracas*. Para ello, se empleó el método analítico descriptivo aunado con la inspección visual in situ y apoyado con imágenes de Google Earth.

## MARCO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

### Los BRT: un breve bosquejo

Los primeros sistemas BRT fueron propuestos por Jaime Lerner en la década de los setentas en Curitiba, Brasil. Por esos años, se daba un debate en torno a la construcción de un sistema férreo de tren ligero, o LRT (por sus siglas en inglés), como opción para resolver los problemas de movilidad en la ciudad. Sin embargo, por las dificultades económicas y falta de apoyo financiero, el proyecto no se pudo materializar; lo cual condujo a que la

administración municipal buscara alternativas que cumplieran las mismas funciones de los sistemas férreos en términos de eficiencia y rapidez, pero a menores costos por kilómetro y tiempo de construcción (Lindau et al. 2010).

A partir de este evento nacen los sistemas BRT, con particularidades que permitieran cumplir con las expectativas del momento, como la preferencia de circulación por carriles exclusivos y la integración con otros sistemas de transporte. Esto inspiró, más luego que tarde para que otras ciudades de Latinoamérica se apropiaran de este modelo de transporte (Duarte y Rojas, 2012). En el caso de la ciudad de Bogotá, desde finales de la década de los noventas, los problemas de movilidad urbana y la falta de calidad en la prestación del servicio de transporte público como los largos tiempos de los viajes, las bajas velocidades por la congestión vehicular, desorganización de rutas con sobre ofertas en algunos sitios y baja cobertura en otros, accidentalidad, contaminación ambiental, caos en la prestación del servicio y una frágil normatividad, condujeron a la realización de un estudio sobre el sistema de transporte y la movilidad de la ciudad (Asprilla y Rey, 2012).

Con la carta de navegación trazada, se analizaron y evaluaron diferentes alternativas de sistemas masivos o semi-masivos de transporte público de pasajeros de otras ciudades latinoamericanas y países desarrollados. Como consecuencia, la administración distrital de ese entonces, decidió adaptar e implementar a finales del año 2000, con algunos ajustes, el modelo exitoso de transporte de Curitiba, el sistema denominado Transmilenio.

En la actualidad, los sistemas BRT están presentes en cerca de 203 ciudades a nivel global y mueven más de treinta y tres millones de pasajeros por día. *Global brt data* por ejemplo, es una plataforma pública para compartir datos de sistemas prioritarios de autobús, administrado por WRI-Brasil, la cual recoge, procesa y almacena los datos e información fiable y actual de todos los sistemas BRT que existen en el mundo, brindando información actualizada de las 203 ciudades que hoy cuentan con este sistema masivo de transporte público (Global BRT Data, 2016). En Colombia, los resultados positivos mostrados desde un inicio por el sistema Transmilenio, posibilitaron la réplica (con algunas modificaciones), en otras seis ciudades importantes del país (Pereira, Bucaramanga, Cali, Barranquilla, Medellín y Cartagena). No obstante, en materia de accidentalidad, se han estado presentando percances en los ejes viales adecuados para estos sistemas de transporte, lo cual llevó al Fondo de Prevención Vial (Actualmente la Agencia Nacional de Seguridad Vial), a publicar en 2014 la “Guía de lineamientos en seguridad vial y peatonal para diseño y operación de sistemas de transporte masivo en buses”, y ha servido de orientación para los sistemas BRT actualmente en operación, debido a que integra diferentes factores relacionados con la seguridad vial, tales como: *humano, vía-entorno y vehículo*, con una visión holística de interrelación e interdependencia para una mejor seguridad.

### **Señalización y seguridad vial**

Dentro del “factor vía-entorno”, la señalización ha tenido una relevancia global desde mediados del siglo XX, pues es vista como un elemento fundamental que contribuye con la seguridad vial. En este sentido, diversas organizaciones internacionales y nacionales se han dado a la tarea de realizar estudios sobre la generalización y unificación de las señales y simbologías en materia de tránsito (Organización de Naciones Unidas, 1949,1955; Organización de Estados Americanos, 1991; Ministerio de Transporte de Colombia, 2004; 2014 y Secretaria de Comunicaciones y Transporte de México, 2014).

En Colombia, recientemente se expidió el *Manual de señalización vial: Dispositivos uniformes para la regulación del tránsito en calles, carreteras y ciclorutas de Colombia*, y de acuerdo con el “inciso e”, “Artículo 2” de la Ley 105 de 1993 y “artículo 2” de la Ley 336 de 1996, se estableció la clasificación y definición de las señales de tránsito, las cuales tienen como función indicar al usuario de las vías sobre las precauciones que debe tener en cuenta, las restricciones y liberaciones que se rigen en el tramo de circulación. Asimismo, también abarca la información necesaria para carriles exclusivos de sistemas BRT, incluyendo los últimos avances

tecnológicos que se han desarrollado alrededor del mundo en materia de señalización vial (Ministerio de Transporte, 2014). Diferentes investigaciones han demostrado que la señalización influye en la seguridad y reducción de los accidentes viales; las señales de advertencia, por ejemplo, pueden reducir los accidentes hasta un 20% (Tignor, 1999), o bien la utilización de semáforos en intersecciones y cruces peatonales podría reducir el número de accidentes alrededor de un 15% en intersecciones en forma de T y cerca de un 30% en los cruces (Rune et al. 2013).

En el caso de la señalización en los sistemas BRT, esta constituye el pilar fundamental para la comunicación entre la infraestructura, conductores y usuarios. Una deficiencia de esta, puede resultar en confusiones para conductores y peatones y afectaciones a las velocidades de operación, lo que conlleva una mayor vulnerabilidad al sistema (Fondo de Prevención Vial, 2014). En este sentido, las señales deben ser necesarias, visibles y llamar la atención. De igual forma, deben ser legibles y de fácil entendimiento, para dar tiempo suficiente al usuario de la movilidad y este pueda responder adecuadamente. Finalmente, deben infundir respeto y ser creíbles (Ministerio de Transporte, 2004).

En algunos corredores viales de los sistemas BRT, los cuales tienen como característica principal estar segregados de otros actores de la movilidad, la señalización no cumple con los requisitos de *visibilidad, legibilidad, comprensibilidad, credibilidad* e infundir respeto. Esto conlleva, a que algunos usuarios de las vías las incumplan y pongan en riesgo su vida al circular por los carriles exclusivos de los sistemas BRT. Por otro lado, la señalización horizontal o marcas en el pavimento (cruces peatonales, cebras, marcas solo bus, separadores, flechas, etc.), en algunos casos son relegadas por las autoridades municipales gestoras los sistemas BRT.

### **Descripción del corredor troncal**

El corredor de la Avenida Caracas es la principal línea troncal del sistema Transmilenio, y está dividido en dos segmentos: troncal Caracas y trocal Caracas sur. Este último inicia en la parte sur de la localidad de Usme y termina en la parte norte de la localidad de Chapinero (Véase Figura 4).

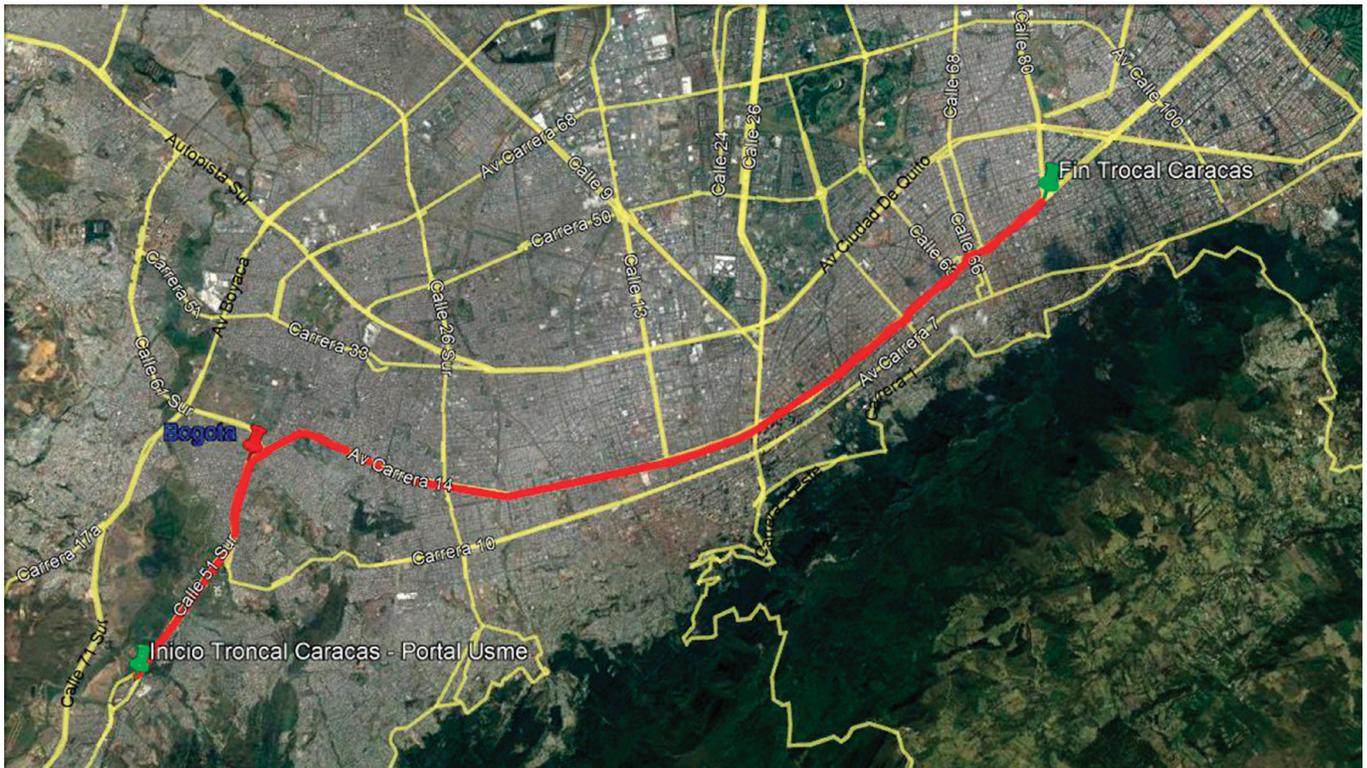


Figura 4. Corredor troncal Avenida Caracas.  
Fuente: Google Earth, 2016

Las características infraestructurales del corredor de estudio (Véase Cuadro 1), hace parte de la malla vial arterial de la ciudad y es uno de los que soporta la movilidad y accesibilidad urbana en largas distancia. Esta troncal tiene una longitud total de 22 kilómetros, un ancho de 60 metros incluyendo la acera para los peatones, dos carriles vehiculares en cada sentido

para el tráfico mixto, los cruces son regulados mediante sincronización semafórica y en esta línea el sistema cuenta con 2 estaciones intermedias y 24 sencillas ubicadas entre los 500 y 700 metros de distancia.

Cuadro 1. Características de la infraestructura del corredor troncal avenida Caracas sistema Transmilenio desde el portal Usme a la estación de calle 76

| Características   | Cantidad | Ancho (metros) | Longitud total (Kilómetros) |
|---|----------|----------------|-----------------------------|
| Longitud total del corredor   | 1        | 40             | 22                          |
| Calzadas segregadas por sentido   | 2        | 7              | 19.2                        |
| Carriles segregados y exclusivos por sentido  | 2        | 3.5            | 19.2                        |
| Carriles tráfico mixto por sentido  | 2        | 3.9            | 22                          |
| Intersecciones vehiculares y reguladas semafóricamente (distancia promedio entre ellas) | 56       | 7 a 40         | 0.392                       |
| Total Intersecciones reguladas por semáforos  | 62       | 4 a 40         | 0.354                       |

Según datos de Transmilenio (2014), en el día se movilizan cerca de 521.000 pasajeros y en horas pico hasta 48.000 pasajeros/hora/sentido; el sistema opera en corredores segregados del tráfico mixto, por lo tanto, en el tramo de estudio la circulación de los autobuses es en calzadas exclusivas, con una intensidad del tráfico en hora pico de 320 buses/hora aproximadamente, lo que representa una frecuencia promedio de 5.3 buses/ minutos, lo que indica una separación entre buses de tan solo 11.3 segundos.

Esto llevaría a que las características de la señalización vertical como horizontal requieran tener estándares mucho más altos a los que existen actualmente. Por otro lado, el crecimiento del tráfico de los autobuses en el corredor de estudio ha sido progresivo, a la par con el crecimiento de la demanda de pasajeros del sistema, la cual en los últimos años ha crecido en promedio 7% (Véase Cuadro 2).

Cuadro 2. Crecimiento promedio del tráfico de buses/hora punta, troncal de estudio

| Años                                 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Tráfico promedio (buses/hora punta ) | 210  | 225  | 228  | 272  | 295  | 320  |

Este crecimiento del tráfico de buses y de la demanda ha generado que en esta troncal se concentre el mayor número de accidentes viales de todo el sistema, lo cual se ubica en un rango entre 30 a 35%. En el periodo comprendido entre 2010 y 2015, los accidentes del sistema se incrementaron por múltiples causas, una de ellas relacionada con señalización.

del día, encontramos que la mayor concentración se presenta en los periodos de horas picos de la mañana, medio día y noche. Lo anterior permite inferir que por el aumento de las operaciones (buses/hora) debido a la demanda de pasajeros, las distancias de separación entre buses y visibilidad de las señales disminuyen, lo que genera un mayor riesgo de accidentes en estas franjas horarias (Véase Figura 5).

Al hacer un análisis de los accidentes ocurridos durante el periodo 2014-2015 en este corredor troncal, teniendo en cuenta la hora

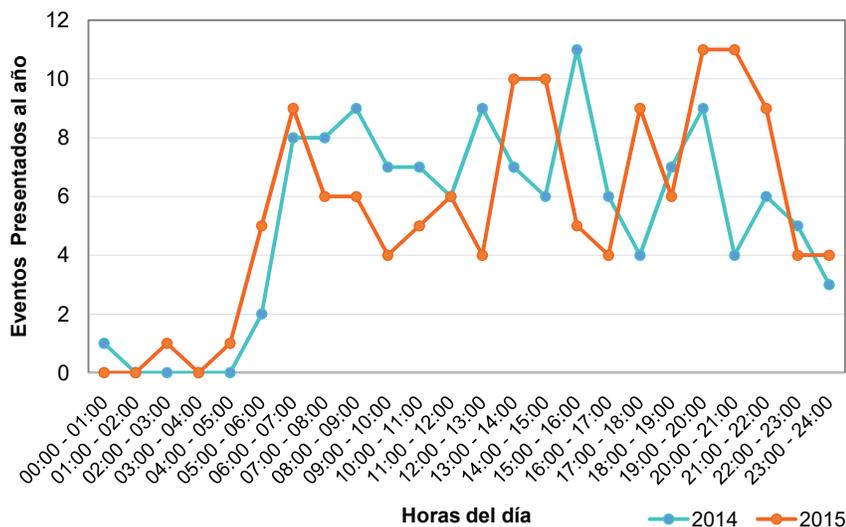


Figura 5. Accidentes por horas del día, corredor troncal avenida Caracas.  
Fuente: Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá, 2016

### Procedimiento metodológico

Para realizar el análisis de la influencia de la señalización en la seguridad de los sistemas BRT, se realizó una inspección visual, haciendo énfasis en el sistema Transmilenio de la ciudad de Bogotá, Colombia. Para ello, se tomó como referencia el corredor troncal más importante y el que más presenta accidentes: la avenida Caracas. La inspección requirió la utilización de

imágenes de Google Earth, y se efectuó un recorrido por todo el eje de estudio, para evaluar las cuatro características que se asume debe cumplir la señalización vial (visibilidad, legibilidad, comprensión, credibilidad). La escala de valoración cualitativa comprendió calificaciones de 1 a 5 puntos y detalladas en orden descendente (Véase Cuadro 3).

Cuadro 3. Escala de valoración por inspección visual del estado de la señalización

| Valoración del estado de la señalización | Calificación (puntos) |
|--|-----------------------|
| Muy Buena                                | 5                     |
| Buena                                    | 4                     |
| Regular                                  | 3                     |
| Deficiente                               | 2                     |
| Mala                                     | 1                     |

La calificación numérica de la señalización, que se muestra en la tabla anterior, tomó como referencia las características utilizadas por International Road Assessment Program - IRAP (Programa Internacional de Evaluación de Carreteras), la cual utiliza criterios cualitativos para evaluar los elementos que influyen en la seguridad vial, como lo es la señalización; este proceso es soportado bajo la revisión o inspección visual realizada in situ. La valoración utilizada por IRAP para evaluar la señalización se basa en tres categorías de calificación: buena, mala o regular; en nuestra investigación adicionamos dos categorías más que consideramos pertinentes, debido a que se hace una evaluación más ajustada a la realidad urbana del corredor de estudio. Una señalización *muy buena* cumple con los cuatro criterios de visibilidad, legibilidad, comprensión, credibilidad en la troncal de la avenida Caracas e influye de manera positiva en la seguridad vial para todos los actores de la movilidad que interactúan con el sistema de Transmilenio. Una señalización *mala* no cumple con ningunos de los criterios que debe tener la señalización vial, lo cual induce a cometer errores y generación de eventos viales entre los diferentes modos de transporte, especialmente los buses articulados y biarticulados del sistema masivo de pasajeros tipo BRT.

## RESULTADOS

Para Jimeno (2013), las señales deben cumplir cuatro aspectos básicos como son: *visibilidad*, *legibilidad*, *comprensibilidad* y *credibilidad*. Estas premisas han sido contempladas en el “Manual de señalización vial: Dispositivos uniformes para la regulación del tránsito en calles, carreteras y ciclorutas de Colombia 2015” y el cual nos ha servido de fundamento para el análisis de la señalización en el sistema BRT Transmilenio. Sobre la premisa “visibilidad”, se tienen dos categorías: una *visibilidad fisiológica*, que tiene que ver con la máxima distancia a la cual se puede leer el mensaje de una señal, y se estima en 800 veces la altura de la letra o símbolo. Pero, por otro lado, está la *visibilidad geométrica* la cual se define como la máxima distancia medida

sobre la vía en la que la visual del conductor hacia la señal esté libre de obstáculos (Jimeno, 2013). Sin embargo, esto no ocurre en la visibilidad de las señales verticales instaladas en la troncal de la avenida Caracas del sistema Transmilenio. La *legibilidad* entonces, busca que la señalización sea legible a cierta distancia, según el Manual de Señalización de Colombia, la distancia de legibilidad mínimo es 400 metros en vías urbanas. Sobre todo, porque distancia y luminancia de una señal son factores fundamentales desde la perspectiva de la lectura, estos tienen directa relación con el manejo de información al volante y los requisitos tipográficos no deben inducir confusión al conductor. Es decir, la legibilidad apunta al reconocimiento de las letras y símbolos de una señal (Gallardo, 2014). No obstante, se evidencian poca o nula legibilidad de las marcas en el pavimento de cebras y líneas separadoras de carriles en el corredor de la troncal de la Avenida Caracas.

Existe coincidencia en torno a que una señalización no debe exigir esfuerzos de comprensión y atención. Es decir, el individuo o usuario de la vía debe asimilar de manera instantánea la información del estímulo visual de un medio exterior; inclusive dentro de un entorno de contaminación visual (Márquez, 2011). En este entendido, la *comprensibilidad*, va a estar en función del diseño y forma de la señal horizontal o vertical, de tal manera que proporcione el tiempo suficiente para comprender lo que quiere decir y responder adecuadamente. Por su parte, la *credibilidad* se soporta en el respeto hacia todos los usuarios viales. Esto implica entregar mensajes verdaderos y confiables, sin caer en contradicciones o ambigüedades que lleven a desinformar y confundir al actor móvil. De ahí que, para acatar y obedecer los señalamientos es importante que el tamaño, forma y mensaje concuerden con la situación que se señala. Sin embargo, esto no siempre ocurre así, la evaluación de cada uno de los criterios analizados en el estudio de la señalización vertical y horizontal obtuvo que la mejor calificación fue para la *comprensibilidad* con 3,7 puntos, seguida por la *visibilidad y legibilidad* con 3,5 puntos. Esto demuestra que la señalización del corredor es comprensible pero tiene poca credibilidad (Véase Cuadro 4).

Cuadro 4. Evaluación de la señalización, troncal Avenida Caracas, Transmilenio.

| Señalización | Características de la señalización |             |                 |              | Total |
|--------------|------------------------------------|-------------|-----------------|--------------|-------|
|              | Visibilidad                        | Legibilidad | Compresibilidad | Credibilidad |       |
| Vertical     | 4,0                                | 3,5         | 3,8             | 3,5          | 3,7   |
| Horizontal   | 3,0                                | 3,5         | 3,5             | 3,2          | 3,2   |
| Total        | 3,5                                | 3,5         | 3,7             | 3,4          | 3,48  |

Se puede observar además que la señalización vertical resulta mejor calificada frente a la señalización horizontal, en todos los criterios considerados. En este sentido, el estado en que se encuentra la señalización del corredor troncal de la avenida Caracas obtiene una calificación de 3,48 puntos de 5 puntos posibles, y es equivalente a una valoración regular, cercana a aceptable (Véase Figura 6).

La calificación obtenida evidencia que la señalización del corredor de estudio no es buena y analizando las causas de los accidentes, combinado con los tipos de eventos que se han presentado en los últimos años; se infiere que la señalización ha influido de alguna manera en la ocurrencia de los lamentables hechos viales, debido a que tiene regular visibilidad, legibilidad, comprensibilidad y credibilidad.

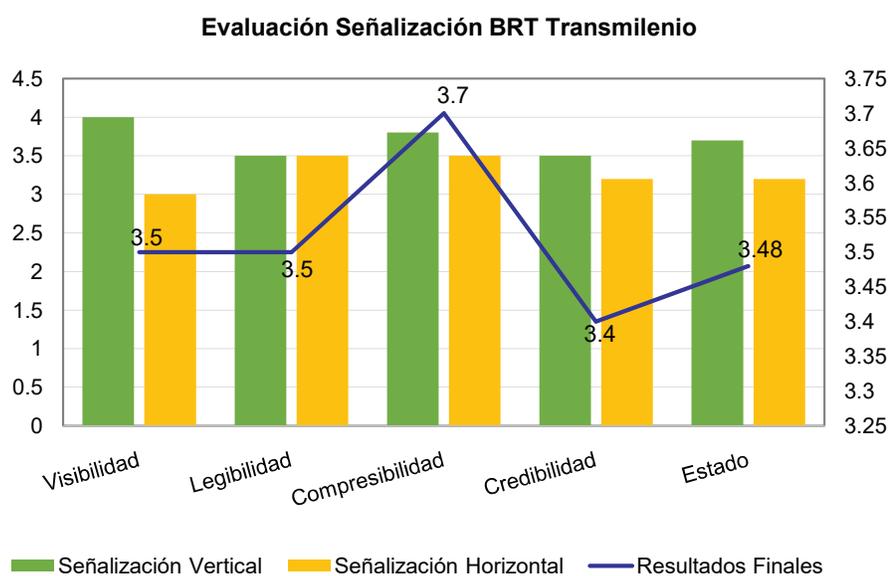


Figura 6. La señalización en la troncal Avenida Caracas

## DISCUSIÓN

La señalización tanto vertical como horizontal es un elemento fundamental que influye en la seguridad vial de los sistemas de transporte público de pasajeros tipo BRT, siempre y cuando estas cumplan con las características básicas de visibilidad, legibilidad, comprensibilidad y credibilidad, y se conserven en buen estado, con calificaciones mínimo de cuatro puntos, de acuerdo a la escala propuesta. En nuestro caso, se obtuvo una calificación promedio de 3,48 puntos, que en términos generales es aceptable. No obstante, esto indica que se debe mejorar el estado de la señalización para que esta llegue a ser buena o muy buena, especialmente la horizontal o las marcas en el pavimento para que

sean más visibles y creíbles, de tal manera que sea respetada por todos los actores de la movilidad que interactúan con el sistema y se minimicen los posibles accidentes que se puedan presentar en el principal corredor troncal de los buses articulados de la ciudad capital.

En las evaluaciones y recorridos in situ, se pudo evidenciar que algunos operadores de los buses del sistema no respetan ciertas señales de tránsito corroborando algunas de las causas o hipótesis de los accidentes que se presentan en el sistema Transmilenio (Véase Figura 7).



Figura 7. Desobediencia de señal semafórica en la troncal de la Ave. Caracas.

## CONCLUSIONES

La señalización influye en los eventos o percances viales en la medida que estas no tengan un adecuado mantenimiento y reposición, para que cumplan con las funciones de guiar y orientar a los conductores de los buses del sistema Transmilenio y el resto de usuarios de la movilidad que circulan por el corredor vial. De ahí la necesidad de asignar los recursos suficientes para que en materia de señalización se responda a los estándares más altos y a su vez, se prolonge su conservación.

En Colombia, la construcción de corredores viales para la movilidad urbana y la señalización vial no ha sido la prioridad en las asignaciones presupuestales por parte de las entidades encargadas del mantenimiento y rehabilitación; pues ha sido evidente el incremento de la accidentalidad, y conlleva a la implementación de políticas públicas que posicionen la señalización, como uno de los elementos de la infraestructura que más incide en la seguridad vial. La señalización vertical y horizontal de la infraestructura del sistema Transmilenio deberá ser renovada y actualizada de acuerdo con los nuevos lineamientos de señalamientos introducidos en el recién expedido *Manual de señalización vial: Dispositivos uniformes para la regulación del tránsito en calles, carreteras y ciclorutas de Colombia*. Esto porque, las características de visibilidad,

legibilidad, comprensibilidad y credibilidad no son las mejores, y en la mayoría de los casos las señales son desobedecidas constantemente por los diferentes actores de la movilidad que interactúan con el sistema de transporte; incluidos los operadores de las rutas troncales que transitan por la avenida Caracas.

Así pues, la seguridad es un elemento fundamental como indicador de la calidad o el nivel de servicio de los sistemas BRT. Por ello, el sistema Transmilenio tiene como propósito reducir los eventos viales que se han presentado en los últimos años, para lo cual se están implementando acciones como la reprogramación y reducción del número de rutas expresas como fáciles (paran en todas las estaciones) y hacer una intervención integral en la infraestructura del corredor troncal con mayor demanda de todo el sistema, donde la señalización, la semaforización, el pavimento y las intersecciones han sido elementos que se han considerado como prioritarios.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Asprilla, Y. & Rey E. (2012). La implementación del Sistema Integrado de Transporte Público (SITP) de Bogotá y sus retos en el futuro. *Tecnogestión* 9 (1), 26-40. Recuperado 20 noviembre 2015 de: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tecges/article/view/5649/7167>
2. Chan, M. (2011). Comunicado de prensa: Unidos para frenar las muertes y los traumatismos causados por el tránsito, Organización Mundial de la Salud, EE.UU. Recuperado 3 enero 2016 de: [http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2011/road\\_safety\\_20110506/es/](http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2011/road_safety_20110506/es/)
3. Congreso de Colombia (1993). Ley 105 sobre la Planeación del Sector Transporte en Colombia. Diario Oficial No. 41.158. Recuperado 12 diciembre 2015 de: [http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_0105\\_1993.html](http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0105_1993.html)
4. Duarte F. & Rojas F. (2012). Intermodal Connectivity to BRT: a Comparative Analysis of Bogotá and Curitiba. *Journal of Public Transportation*, 15 (2), 1-18. Recuperado 4 marzo 2016 de: <http://www.nctr.usf.edu/wp-content/uploads/2012/07/JPT15.2Duarte.pdf>
5. El Universal (2013). Cuatro heridos por accidente de TransMilenio al norte de Bogotá. Recuperado 15 mayo 2015 de: <http://www.eluniversal.com.co/colombia/bogota/cuatro-heridos-por-accidente-de-transmilenio-al-norte-de-bogota-139475>
6. Fondo de Prevención Vial (2014). Guía de lineamientos en seguridad vial y peatonal para diseño y operación de sistemas de transporte masivo en buses. Recuperado 12 mayo 2015 de: <http://clementinagrafica.blogspot.mx/2014/05/guia-de-lineamientos-en-seguridad-vial.html>
7. Gallardo, V. (2014). Lectura en señales de tránsito: Una revisión al impacto de la tipografía en las personas. Recuperado marzo 26 2016 de: [https://www.academia.edu/21451828/Lectura\\_en\\_se%C3%B1ales\\_de\\_tr%C3%A1nsito\\_Una\\_revisi%C3%B3n\\_al\\_impacto\\_de\\_la\\_tipograf%C3%ADa\\_en\\_las\\_personas\\_esp%C3%B1ol](https://www.academia.edu/21451828/Lectura_en_se%C3%B1ales_de_tr%C3%A1nsito_Una_revisi%C3%B3n_al_impacto_de_la_tipograf%C3%ADa_en_las_personas_esp%C3%B1ol)
8. Global BRT Data. (2016). Datos de Sistemas prioritarios de autobús de tránsito rápido, WRI-Brasil, EMBARQ-IEA, SIBRT. Recuperado 2 junio 2015 de: <http://brtdata.org>
9. Google Earth (2016). Imágenes del corredor troncal del sistema Transmilenio, Ave Caracas, Colombia. Recuperado 12 febrero 2016 de: <https://www.google.com.mx/intl/es/Earth>
10. International Road Assessment Programme – IRAP (2009). Metodología calificación por estrellas para vías más seguras. Londres. Disponible en <http://www.irap.org/en/about-irap-3/methodology/category/10-previous-model-methodology-papers>
11. Jimeno, Berceruelo, M. L. (2013). Seguridad vial: Influencia de la señalización vertical. *Revista técnica de la asociación española de Carreteras*, (190), 41-49. Recuperado de 25 marzo 2016 de: <http://www.afasemetra.com/doc/Articulos/CARRETERAS%20190%20AEC.pdf>
12. Lindau, L., Hidalgo D. y Facchini, D. (2010). Curitiba, the cradle of Bus Rapid Transit. *Built Environment*, 36, (3), 274-282. Recuperado 17 noviembre 2015 de: <http://www.sibrtonline.org/downloads/built-environment-curitiba-oct194db0b5ac230da.pdf>
13. Márquez, E. (2011). *Señales: Características de Visibilidad y Legibilidad*. Instituto de Diseño de Valencia. España. Recuperado 25 marzo 2016 de: [http://wiki.ead.pucv.cl/images/5/51/Se%C3%B1ales\\_Caracter%C3%ADsticas\\_de\\_Visibilidad\\_y\\_Legibilidad.pdf](http://wiki.ead.pucv.cl/images/5/51/Se%C3%B1ales_Caracter%C3%ADsticas_de_Visibilidad_y_Legibilidad.pdf)
14. Ministerio de Transporte (2015). *Manual de señalización vial: Dispositivos para la regulación del tránsito en calles, carreteras y ciclorutas de Colombia*. Recuperado 11 mayo 2016 de: [https://www.mintransporte.gov.co/Documentos/documentos\\_del\\_ministerio/Manuales/manuales\\_de\\_senalizacion\\_vial](https://www.mintransporte.gov.co/Documentos/documentos_del_ministerio/Manuales/manuales_de_senalizacion_vial)
15. Ministerio de Transporte (2014)- *Plan Nacional de seguridad Vial 2013-2021*. Recuperado diciembre de 2015 [https://culturavial.files.wordpress.com/2014/01/consulta\\_plan\\_nacional\\_de\\_seguridad\\_vial\\_colombia\\_2013-2021.pdf](https://culturavial.files.wordpress.com/2014/01/consulta_plan_nacional_de_seguridad_vial_colombia_2013-2021.pdf)
16. Organización de Estados Americanos (1991). *Manual Interamericano de dispositivos para el Control del tránsito en calles y carreteras*. Recuperado 2 abril 2016 de: <http://200.35.84.131/portal/bases/marc/texto/013431-Libro.pdf>
17. Organización de Naciones Unidas (1949). *Primera asamblea de países miembros, con el fin de discutir una propuesta para la unificación de las señales de tránsito*. Ginebra, Suiza.
18. Consejo Económico y Social (1955). *Aprobación del sistema mundial de señales*. I. New York. EE.UU
19. Organización Mundial de la Salud-OMS (2015). *Informe mundial sobre la situación de la seguridad vial*. Recuperado 27 noviembre 2015 de: [http://www.who.int/violence\\_injury\\_prevention/road\\_safety\\_status/2015/en/](http://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015/en/)
20. Rune, E. Hoye, A., Vaa, T. & Sorensen, M. (2013). *Manual de Medidas de Seguridad Vial*. España: Fundación Mapfre.
21. Secretaria de Comunicaciones y Transporte (2014). *Manual de señalización vial y dispositivos de seguridad*. Dirección General de servicios técnicos, sexta edición. México. Recuperado 11 mayo 2016 de: [http://sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/NUEVOSENAL\\_AMIENITO/manualSenalamientoVialDispositivosSeguridad.pdf](http://sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/NUEVOSENAL_AMIENITO/manualSenalamientoVialDispositivosSeguridad.pdf)
22. Secretaria Distrital de Movilidad (2016). *Respuesta oficio solicitud sobre Informe Accidentalidad sistema Transmilenio*, Colombia. Recuperado 2 abril 2016 de: [www.movilidadbogota.gov.co/](http://www.movilidadbogota.gov.co/)
23. Tignor, S (1999). *Traffic Control devices*. Washington, D.C.: Institute of Transportation Engineers.
24. Transmilenio (2014) *Informe de Gestión Transmilenio*. Recuperado 4 abril 2016 de: [http://www.transmilenio.gov.co/sites/default/files/informe\\_de\\_gestion\\_2014\\_version\\_final\\_1.4\\_22\\_de\\_abril\\_de\\_2015.pdf](http://www.transmilenio.gov.co/sites/default/files/informe_de_gestion_2014_version_final_1.4_22_de_abril_de_2015.pdf)

# Uso de la bicicleta en Costa Rica: repaso histórico y caracterización del tipo de ciclistas y su movilidad en el entorno vial nacional

*Use of bicycle in Costa Rica: historical review and characterization of the type of cyclists and their mobility on the national road system*

**Bohián Pérez Stéfanov**

Antropólogo-Investigador

Área de Investigación

Observatorio Costarricense de Seguridad Vial

Consejo de Seguridad Vial.

[bohian@gmail.com](mailto:bohian@gmail.com)

**Fecha de recepción:** 04 de agosto de 2017 / **Fecha de aprobación:** 01 de septiembre de 2017

## RESUMEN

Son muy pocas las investigaciones sobre el uso de la bicicleta en Costa Rica. En los últimos años, dentro de los estudios de movilidad, transporte y seguridad vial, el tema del ciclismo ha ido ganando terreno como opción para la movilidad y posible solución al congestionamiento vial de las ciudades. Sin embargo, se ha desconocido y marginado aquellas localidades donde la bicicleta no solo es un medio de transporte de uso masivo consolidado históricamente, sino que forma parte íntegra de las estructuras sociales y económicas de las comunidades y sus dinámicas culturales.

Con la ampliación y mejoras de la red vial nacional, así como la implementación de políticas públicas que desconocen la importancia del uso de la bicicleta dentro de espacios sociales de alta complejidad, han generado un impacto directo y negativo en los patrones de movilidad de estas poblaciones, aumentando el riesgo de incidentes de tránsito.

Se proponen dos categorías para comprender el uso de la bicicleta: los ciclistas utilitarios, grupo heterogéneo cuyo elemento en común es el uso cotidiano de la bicicleta desde el espacio simbólico de sus comunidades y realidades históricas, muchas de ellas rurales; y el del ciclista recreativo, más homogéneo y con características más específicas, común a espacios urbanos y con un uso de la bicicleta más orientado al deporte no profesional y el esparcimiento.

**PALABRAS CLAVE:** Bicicleta, ciclismo, seguridad vial, movilidad segura, ciclistas utilitarios, ciclistas recreativos, cultura, sociedad.

## ABSTRACT

*There is very few research on the use of bicycles in Costa Rica. Over the last years, the use of bicycles has been positioned throughout studies of mobility, transportation and road safety as an important mobility alternative and a possible solution to road traffic congestion in the cities. However, localities where the bicycle has not only been a historically consolidated means of transportation, but also an integral part of the social and economic structures of the communities and their cultural dynamics, they have been ignored and not been acknowledged.*

*With the construction and improvement of the National Road Network, and the implementation of public policies that do not consider the importance of the use of the bicycle within social spaces of high complexity, a direct and negative impact on the mobility patterns of these populations has been generated, increasing the risk of traffic accidents.*

*Two categories are proposed to understand the use of the bicycle: utilitarian cyclists, a heterogeneous group whose common element is the daily use of the bicycle from the symbolic space of their communities and historical realities, many of them on a rural context; and recreational cyclists, more homogenous and with more specific characteristics, common to urban spaces and with a bicycle use more oriented to non-professional sport and recreation.*

**KEYWORDS:** Bicycle, cycling, road safety, safe mobility, utilitarian cyclist, recreational cyclist, culture, society.

## INTRODUCCIÓN

En el presente artículo se hace un breve repaso de la creación y evolución del velocípedo, entendido como aquel artefacto de una o más ruedas que funciona exclusivamente por el esfuerzo físico de una persona y que evolucionó en la actual bicicleta. Su redescubrimiento en los últimos años obedece a la creciente necesidad de redefinir los modelos de movilidad urbana dentro de las ciudades con redes viales cada vez más congestionadas y con calidad de vida cada vez menor por los efectos contaminantes de la flota automotor.

Lo anterior como referente para luego comprender el contexto histórico del uso de la bicicleta en Costa Rica, proponiendo la necesaria diferenciación entre lo que denomino **ciclistas utilitarios** y **ciclistas recreativos**; los primeros, como resultado de procesos históricos dentro de los cuales la bicicleta se ha convertido en una construcción simbólica que sobrepasa la dimensión de la propia movilidad, para pasar a ser parte integral del tejido social de comunidades y regiones con uso extendido de la bicicleta entre todos los segmentos de población; y los recreativos, como una tendencia de la última década en donde la bicicleta se consolida como opción para el esparcimiento y deporte de colectivos organizados. Estos últimos con características en común y cierta homogeneidad, frente a un ciclista utilitario con condiciones, necesidades, vulnerabilidades, riesgos y posibilidades muy heterogéneas.

La carencia de estudios científicos sobre el uso histórico de la bicicleta en Costa Rica, más allá del plano deportivo o de las propuestas sobre movilidad con perspectiva arquitectónico-ingenieril de los últimos años, hace de este artículo una primera aproximación que pretende abrir el debate y generar un mayor interés desde un enfoque integral, para comprender la complejidad del uso de la bicicleta y su vinculación a los procesos sociales, históricos, económicos y culturales de muchas comunidades del país.

Busca ampliar el debate sobre la implementación de nuevas obras viales y políticas públicas en seguridad vial, en aquellas regiones donde la bicicleta es de uso cotidiano con profundidad histórica, para así adaptar los procesos y la obra vial final a sus requerimientos, garantizando la movilidad segura de las personas y la consolidación de la bicicleta como alternativa para la movilidad sustentable.

La base para este artículo se desprende de las múltiples investigaciones en movilidad y seguridad vial desde un enfoque cualitativo y social que se han realizado desde el Área de Investigación y Estadísticas del Consejo de Seguridad Vial, con especial énfasis en algunos de los cantones con mayor arraigo en el uso de la bicicleta, como Osa (COSEVI, 2012), Puntarenas (COSEVI, 2013), Cañas y Liberia (COSEVI, 2014, 2017), Limón y Pococí (COSEVI, 2016), entre otros.

## ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LA BICICLETA MODERNA

Cabe mencionar que algunas referencias buscan el origen del velocípedo (todo vehículo de una o más ruedas que se impulsa exclusivamente por la fuerza humana) entre algunas de las primeras grandes civilizaciones de la historia, como Egipto y China (Sáenz, 2014), o en diseños propuestos por algunos de los principales pensadores del Renacimiento europeo (Bijker, 1995; Sáenz, 2014), sin embargo, para efectos de este artículo se analizará su evolución a partir de los diseños surgidos y consolidados en el siglo XIX en algunos países del occidente europeo, desde donde se maduró el concepto que aún hoy en día centra la representación de lo que es una bicicleta y su uso masivo como vehículo de transporte no motorizado (Bijker, 1995).

La mayor parte de la literatura coincide que la bicicleta, como aquel artilugio de dos ruedas impulsado por la fuerza mecánica de una persona, aparece por primera vez entre finales del siglo XVIII e inicios del siglo XIX, en los países del centro de Europa, primero como una excentricidad de ricos y nobles, para finalmente ser el vehículo de uso masivo entre la clase obrera de la Europa industrial (Bijker, 1995; Harlihy, 2004; Sáenz, 2014) que no solo revolucionó la movilidad en las urbes de inicios del siglo XX, sino también las relaciones sociales y dinámicas culturales en prácticamente la totalidad del mundo.

Se asume que el primer velocípedo de dos ruedas (pero aun sin pedales, ni cadena, ni frenos) fue inventado por el alemán Karl Christian Ludwing Drais alrededor de 1817, o, por lo menos fue en ese año que lo presentó en público, elaborada en madera con la intención de “mejorar el rendimiento del desplazamiento humano” (Sáenz, 2014) nombrándola *Laufmaschine* o Máquina de Correr.

Poco más de 20 años después, el escocés Kirkpatrick MacMillan (1839) construye el primer modelo de un velocípedo con un sistema de propulsión mecánica por medio de pedales bastante artesanales. En sus inicios, todos estos modelos presentaban ruedas en madera, hierro u otro material y era común que la rueda delantera fuese más grande que la trasera (Bijker, 1995; Harlihy, 2004; Sáenz, 2014).

En esos primeros años, la mayoría de personas y autoridades terminaron por rechazar estos modelos rudimentarios de bicicleta, entre otras cosas, por su excesivo costo, pero también, por el alto riesgo para las personas, convirtiéndose los accidentes por caídas y atropellos una novedad que ciudades de Europa, Estados Unidos e incluso de Asia, pasaron a restringir y multar (Sáenz, 2014).

Pero en la Europa victoriana de finales del siglo XIX, y a pesar de los riesgos, la bicicleta se popularizó y existían muchos modelos, algunos bastante estrafalarios, en su mayoría con una rueda más

grande que la otra (para así aumentar el radio de desplazamiento), accionando el sistema de pedaleo montado únicamente sobre la rueda delantera.

Para la década de 1880 los inventores ingleses Henry Lawson y John Kemp Starley fueron perfeccionando lo que llegarían a ser los primeros modelos de bicicleta con dos ruedas de igual tamaño. En 1885 Starley patenta el sistema de pedaleo con cadena en la rueda trasera y frenos, lo que se llegaría a conocer como *safety bicycle* o bicicleta segura por su innovadora forma y distribución, contrarrestando los diseños con rueda delantera mucho más grande, permitiendo ubicar los pedales a una distancia segura del suelo. Se considera como el inspirador del modelo moderno de las bicicletas (Bijker, 2004; Sáenz, 2014; Harlihy, 2004).

En 1890 John Boyd Dunlop diseñó lo que se llegaría a convertir en las ruedas de neumático con cámara de aire, en aquel entonces a base de caucho y que se podían inflar, lo que revolucionó el uso y modelos de las bicicletas, reduciendo su peso y tamaño, tornándolas más seguras.

Las innovaciones del diseño, junto a la producción en línea y el uso de variadas materias primas en su elaboración, permitieron que el costo de la bicicleta se redujera paulatinamente (Bijker, 1995; Harlihy, 2004; Sáenz, 2014), aumentando su disponibilidad y uso entre la creciente clase obrera y público en general.

Este acumulado de innovaciones en el diseño permitió que para inicios del siglo XX se tuviera un modelo estándar de bicicleta moderna que se ha mantenido casi inalterado hasta la actualidad, caracterizándose por un marco central en forma de “diamante” o de rombo, también llamado doble triángulo, que se convierte en la estructura base sobre la cual se montan las demás partes (Harlihy, 2004; Carreon y otros, 2011).

Proponiendo una clasificación muy general e inicial para Costa Rica, podemos decir que predominan tres estilos de bicicletas: el primer estilo, con características para carretera o carrera, que mantienen gran parte de la estructura descrita, siendo su principal modificación el tener unas ruedas muy delgadas y algunas sin neumáticos.

El segundo estilo y quizás de los más popularizados, es el conocido como “montañera” o todo terreno, caracterizándose por tener una estructura más robusta y pesada, incluyendo ruedas mucho más gruesas. En ambos modelos se ubican diferentes sistemas de frenado, cambios y otras innovaciones.

En una tercera categoría, muy genérica y heterogénea, podemos ubicar una serie de bicicletas con diferentes diseños, tamaños y variables, con una estructura intermedia entre los dos modelos anteriores, con finalidad más bien de uso cotidiano o doméstico, que, si bien cuentan con todos los elementos ya descritos, pueden

carecer de sistema de cambios o tener uno mucho más sencillo, lo mismo que el sistema de frenado. Presentan ruedas gruesas y asientos más anchos, pero con características muy básicas.

## USO HISTÓRICO DE LA BICICLETA EN EL MUNDO

Históricamente la movilidad de las personas se lograba mediante el caminar del individuo o con la ayuda de animales de tiro. Pero siempre se ha tenido el impulso por desarrollar máquinas que permitieran la movilidad humana de una forma más independiente y con mayor rendimiento, superando las limitantes físicas del cuerpo (Bijker, 1995).

Aunque desde finales del siglo XVIII las máquinas de vapor y otros inventos irrumpieron en la vida cotidiana de las sociedades occidentales, se necesitaron más de ciento cincuenta años (hasta mediados del siglo XX), para que la humanidad en su conjunto sustituyera de forma masiva la tracción animal, por otra mecánica y automotor: el carro.

En los cien años que transcurrieron entre la primera locomotora a vapor (década de 1780) y el primer vehículo de combustión interna (década de 1880), la bicicleta se erigió como el primer vehículo de tracción no animal que modificó sustancialmente la forma de traslado y movilidad de poblaciones enteras, sobre todo en las grandes ciudades de Europa, Norteamérica y Asia, consolidándose hasta convertirse en el medio de transporte favorito (y único) para millones de personas, impactando el desarrollo de sus estructuras sociales y dinámicas culturales (Bijker, 1995). Aunque en sus inicios fue un artilugio accesible solo a los sectores de mayor poder económico de Europa (Sáenz, 2014), ya para inicios del siglo XX su uso estaba extendido por el mundo, impactando sobre todo las clases obreras de los países industrializados.

Su fácil maniobrabilidad, bajo costo de adquisición, economía en su uso, velocidad, durabilidad, mantenimiento y reparación sencilla, accesibilidad a prácticamente cualquier tipo de entorno, edad y sector social, apuntaló a la bicicleta como el primer gran reformador de las dinámicas de movilidad en el mundo, extendiéndose y adaptándose a las necesidades, requerimientos y usos variados de cada región y país, incluso de cada usuario (Herlihy, 2004; EC, 1999).

Con la irrupción de los vehículos automotores de menor costo a partir de la década de 1910, en conjunto con el auge de un sistema cultural de consumo al estilo occidental en las últimas cinco décadas; disminuyó el uso de la bicicleta pasando a ser más un objeto para el entretenimiento y deporte, que vehículo para la movilidad, sobre todo en los entornos urbanos y metropolitanos. Aunque su presencia se ha mantenido como rasgo distintivo en la

movilidad de millones de personas en el mundo, particularmente en zonas rurales.

A pesar de los embates del modernismo en el consumo de vehículos automotores, la bicicleta resistió y no desapareció. Ante los nuevos paradigmas del pensamiento humano respecto a su impacto en el equilibrio ecológico del planeta, la bicicleta ha empezado a reinventarse como la única y mejor opción para la movilidad sustentable de las personas, sobre todo en las grandes urbes y ciudades, de donde metódicamente se intentó marginar (ITDP, 2012).

Sus calidades propias están siendo revalorizadas bajo el nuevo esquema de la huella ecológica que el ser humano está generando en el planeta con sus necesidades de transporte diario. El bajo costo, la cero emisión de cualquier tipo de gases o desechos, su versatilidad como vehículo para ciudades cada vez más estrechas, más el extra que implica el esfuerzo de la persona para su impulso (convertido en ejercicio físico dentro de sociedades cada vez con mayores índices de sedentarismo y obesidad), está logrando que la bicicleta como vehículo se ubique en el foco de atención de todo estudio de urbanismo, movilidad, seguridad vial y transporte que se estime serio y responsable (EC, 1999; ITDP, 2012).

En la actualidad, muchas de las principales metrópolis del mundo y ciudades con altos estándares de calidad de vida, tienen en la bicicleta uno de sus principales pilares, con impactos positivos y directos en la salud de la población, la movilidad, el ordenamiento urbano y la prevención de accidentes de tránsito (Fletsbearaad, 2010; EC, 1999).

## LA BICICLETA EN COSTA RICA

Para Costa Rica no se pudieron identificar estudios o investigaciones concretas que rescaten la presencia de la bicicleta como medio de transporte en las dinámicas históricas y socioculturales del país o sus comunidades.

En términos generales, la presencia de la bicicleta en las investigaciones académicas se encuentra apenas en los últimos años, siguiendo la tendencia mundial por repensar los espacios urbanos y opciones de movilidad por medios sustentables y sostenibles que no contaminen ni impacten más los sistemas de tránsito ya de por sí colapsados.

Hay una importante referencia bibliográfica en cuanto a la práctica del ciclismo como deporte y deporte élite, incluso con algunas referencias en estudios de género, a través de las cuales se rescatan unos pocos datos históricos sobre la bicicleta en Costa Rica (Hughes, 2012; Ulloa, 2010). De ellas podemos rescatar algunas inferencias históricas.

Para finales del siglo XIX, muchas de las grandes ideas del modernismo, liberalismo y avances tecnológicos se impulsaban desde los países del Occidente como Francia, Inglaterra y Alemania, que como se señaló, desarrollaron las principales innovaciones del modelo actual de bicicleta.

Es en estos mismos países que muchos de los intelectuales costarricenses de la época e hijos de familias acomodadas fueron a realizar sus estudios o a participar de las redes mercantiles con las potencias europeas. Hay extensos estudios que demuestran la influencia de las ideas europeas de la época en el pensamiento liberal de la intelectualidad costarricense (Salazar, 1990; Morales, 1993; Molina, 2002; Quesada, 2007).

Por tanto, no resulta extraño suponer que una innovación como la bicicleta, que para la segunda mitad del siglo XIX era la moda en París y Londres, terminara por ser importada por los liberales intelectuales costarricenses a las calles del San José del siglo XIX, época en la cual el máximo exponente del transporte de personas y cargas era sin duda la yunta de bueyes y la carreta y los animales de tiro.

Es probable que las primeras bicicletas significaran un marcado contraste dentro del contexto de la ciudad de San José y sus calles en tierra; hay una referencia que para finales del siglo ubica en lo que es hoy el parque España, la práctica de carreras en bicicleta con la participación de algunas de las familias más influyentes de la época (Hughes, 2012).

El ciclismo como práctica profesional de élite siguió acaparando espacios hasta ser considerado de manera oficial como deporte y tener su primer campeonato nacional en la década de 1940. Eso sí, un deporte exclusivamente masculino. No fue hasta los Juegos Nacionales de 1990 que se dio la primera participación femenina en ciclismo profesional (Sánchez, 1991; Hughes, 2012).

Otros estudios publicados no se encontraron. Es así que en el marco de estudios de movilidad y riesgos en seguridad vial impulsados desde el Área de Investigación y Estadísticas del Consejo de Seguridad Vial a partir del año 2012 en cantones y regiones fuera del Valle Central como Osa (COSEVI, 2012), San Carlos, Puntarenas (COSEVI, 2013), Pococí, Limón (COSEVI, 2016), Liberia, Cañas (COSEVI, 2014, 2017), Pérez Zeledón (COSEVI, 2012), se empezaron a recabar datos e información que documentó la presencia de la bicicleta como medio de transporte, no solo para la movilidad de las personas en su cotidianidad, sino también en la construcción de complejas redes de socialización, llegando a convertirse la bicicleta en un elemento importante para comprender y explicar algunos de los procesos históricos, socioculturales y económicos de gran parte de las zonas rurales del país, vinculadas a algunas de las principales arterias viales

como las rutas nacionales 1 y 2 (Interamericana), 21 (Nicoya), 23 (Barranca), 17 (Puntarenas), 32 (Limón) y 34 (Costanera).

Sobre el uso cotidiano de la bicicleta entre la población de Costa Rica fuera del Valle Central, no se ha podido encontrar una referencia directa, aunque parece ser que su extensión en el territorio obedece tanto a condiciones propias del terreno (y no tanto climáticos) como a factores culturales e históricos.

En cuanto a la topografía del terreno como categoría de análisis, se ha podido registrar y observar que hay una clara relación entre aquellas regiones con una geografía regular, sin abruptos cambios altitudinales, con extensas zonas llanas o con leves ondulaciones, con la presencia histórica del uso de la bicicleta en la cotidianidad de las poblaciones (Osa, Limón, Cañas, Puntarenas, entre otros); frente a aquellas otras regiones, más montañosas y accidentadas como las del Valle Central, en donde si bien se registra un uso histórico de la bicicleta, pareciera que su alcance fue mucho más limitado, o, fue más propensa a ser sustituida por otros medios de transporte.

Sobre los factores culturales e históricos, se pueden identificar algunos elementos comunes entre aquellos cantones con una preponderancia particular en el uso de la bicicleta como medio de transporte masivo. En principio, es común que sean zonas costeras y rurales (como Puntarenas, Quepos, Osa Limón, Sixaola), aunque no exclusivamente (como Cañas, Liberia, Santa Cruz o Nicoya) pero que en general tienen en el sector agropecuario y de monocultivos su principal actividad económica (banano, plátano, palma, caña, naranjas, piña), así como fuertes procesos migratorios de múltiples orígenes en diferentes momentos históricos.

Un hecho documentado que al parecer influyó en el cambio cultural en cuanto al uso de la bicicleta lo es el fuerte proceso migratorio de población asiática, principalmente de China, con un arraigo que muchas veces se debe buscar en los finales del siglo XIX, con los planes de construcción y ampliación de la red ferroviaria en el país o de los monocultivos de las grandes transnacionales. La presencia de inmigrantes chinos en Puntarenas, Cañas, Limón y Ciudad Cortés ha sido analizada en varios estudios (Fonseca 1979; 2016; Loría, 2000).

A partir de tradiciones orales recabadas entre informantes mayores de Ciudad Cortés en Osa, en Cañas (Guanacaste) y en el centro de Puntarenas (cantón), fue común escuchar que los primeros recuerdos de bicicletas en las calles de esos pueblos de la primera mitad del siglo XX se remontan a comerciantes chinos y sus familias.

Quizás con estilos mucho más burdos que las bicicletas de la élite económica de San José, estos primeros vehículos rápidamente

se empezaron a posicionar dentro de las dinámicas cotidianas de movilidad de las poblaciones locales, que por primera vez vieron en la bicicleta esa opción de transporte para distancias que antes se tenían que recorrer a pie y en mucho más tiempo. Esto sin duda generó un importante cambio cultural, que aún perdura y se puede reconocer entre sus poblaciones.

Para la segunda mitad del siglo XX, la bicicleta ya era un constructo permanente en los procesos sociales, económicos y culturales de las regiones costeras y rurales fuera del Valle Central. No solo como medio de transporte, sino como parte de las dinámicas socioculturales de las comunidades y sus habitantes, lo que se deduce del hecho que muchas personas con más de 70 años, aun hoy día guardan recuerdos de la presencia de la bicicleta desde sus épocas de infancia.

En la actualidad, en cualquiera de estos cantones, la bicicleta sigue siendo parte intrínseca de los procesos culturales y de socialización de sus poblaciones. Su uso masivo es fácilmente observable en todas sus calles, en las escuelas y colegios, instituciones públicas y en los fines de semana, entre todos los segmentos de sus pobladores y de todas las edades.

Se destaca que el clima no parece ser un factor determinante en la consolidación de la bicicleta como medio de transporte, por cuanto los cantones que registran un uso masivo de la misma, presentan también condiciones de alta humedad y temperatura, intensa radiación solar, así como fuertes y prolongadas temporadas de lluvia.

## ANÁLISIS SOBRE EL USO SOCIAL DE LA BICICLETA EN COSTA RICA

En este apartado se propone una nomenclatura diferenciada para el análisis del uso de la bicicleta: por un lado, se definen a **los ciclistas utilitarios**, como aquellos usuarios tradicionales para quienes la bicicleta no es solo un medio de transporte, sino que cumple muchas otras funciones de alcance cultural y simbólico, predominando en espacios rurales; en otro grupo estarían aquellos que es común denominar como **ciclistas recreativos**, cuyo uso de la bicicleta se inserta dentro de una tendencia coyuntural del hacer deporte colectivo, en condiciones y con características muy distintas al ciclista utilitario, aunque muchas veces comparten los mismos espacios viales y sociales.

La idea central es aportar detalles en las características y diferencias de estos dos segmentos de usuarios de la bicicleta: el primero heterogéneo y variado, con elementos en común más bien simbólicos y con profundidad histórica; el segundo más homogéneo, de extracción temporal más reciente y de espacios más bien urbanos. Estas diferencias generan distintas necesidades

para su movilidad segura, por tanto es fundamental tenerlas presente de previo a los procesos de construcción y planificación de la red vial del país y el equipamiento para la movilidad segura de las vías, incluyendo la construcción de ciclovías y/o ciclorutas.

### **Uso de la bicicleta y dinámicas culturales en Costa Rica: el ciclista utilitario**

Todo proceso de movilidad entre una población responde tanto a necesidades económicas como a condiciones sociales, culturales y ambientales.

Para las localidades de Costa Rica en las que aún persiste un uso extendido de la bicicleta como medio de transporte, se ha podido identificar su impacto en la modelación de los patrones de movilidad, pero también en el desarrollo de las relaciones interpersonales y el cambio social; incluso su vinculación a los procesos formativos y cognitivos de las personas. Para el ciclista utilitario, la bicicleta ocupa la mayor parte del tiempo dedicado a su movilidad, independientemente de la necesidad: traslado de personas o bienes, acceso a servicios, educación, trabajo, recreación, independientemente del día, hora o condición.

En los territorios de los cantones de Osa, Puntarenas y Cañas, para muchos de los niños la bicicleta se convierte en el eje fundamental para su socialización a través del juego con sus semejantes y la familiarización con el entorno, con el cual interactúan a través de la bicicleta y en el que forman sus lazos y relaciones que posteriormente definen su desarrollo personal. Es común escuchar expresiones como “aquí, antes se aprende a andar en bicicleta que a caminar” (COSEVI, 2012).

En la adolescencia, a través de entrevistas con jóvenes locales, se plantea que la bicicleta parece convertirse en un objeto que les permite canalizar los ímpetus de rebeldía e independencia propios de la edad. Aseguran que la bicicleta les permite movilizarse a largas distancias sin depender de otros medios de transporte que requieren dinero o la autorización (y/o acompañamiento) de los adultos: las escapadas al río o las pedaleadas en grupo; la visitas al parque y el cortejo entre pares, son ejemplos de aquello que la bicicleta les permite hacer, consolidándola como una extensión de su personalidad y asimilando su importancia en los procesos formativos.

Es común observar entre los y las jóvenes la personalización de la bicicleta a través de calcomanías, pinturas especiales u otras técnicas que les ayuden en su diferenciación, pero también a consolidar la construcción de la propia identidad y su reconocimiento entre sus pares. Es así que en el imaginario de las personas de estas comunidades existen las bicicletas que con rasgos “femeninos” y aquellas que con rasgos “masculinos”

(pero también están las “neutrales”), que más que relaciones de poder, denotan la extensión al objeto de cualidades culturales de los sujetos, diferenciando sus propiedades en acorde a las necesidades de los individuos por extender su identidad a través de la bicicleta.

La bicicleta es quizás el vehículo más inclusivo que existe: aun y las personalizaciones mencionadas, no genera ningún tipo de barrera social para su uso, como sí existe para otros vehículos (según estadísticas del COSEVI, más del 85% de conductores acreditados para carros y motocicletas del país son varones), mucho menos limitaciones en cuanto a condición económica, pertenencia étnica u orientación de género.

No se necesitan permisos especiales ni se incluyen restricciones por edad: desde niños de pocos años, hasta adultos mayores octogenarios se pueden observar montando una bicicleta en las calles de Liberia, Cañas, Puntarenas, Ciudad Cortés o Limón. Esta potenciación de la autonomía es un elemento fundamental en la comprensión de la bicicleta como elemento central en los procesos de conformación comunal y cambio cultural.

Pero la bicicleta también evidencia un uso colectivo. El llevar a los amigos, o a la pareja, “en barra”, “en ancas”, “sobre la manivela”, etc., refiere a las posibilidades de uso de este vehículo, que, por un lado, responde a las necesidades de transporte, pero sobre todo, formar parte de las estructuras sociales de la comunidad. Es común ver al ciclista utilitario regresar en grupo del trabajo o el estudio, charlando animadamente y compartiendo los espacios.

Desde una lectura *cultural*, la bicicleta es un objeto de enculturación que consolida los lazos sociales y se convierte en eje central de las redes de socialización y los procesos no institucionalizados de enseñanza-aprendizaje al estar presente en todos los momentos de la vida de las personas y formar parte inseparable del paisaje social y cultural de las comunidades.

A los ciclistas utilitarios no se les puede considerar como homogéneos o con características determinadas y uniformes, ni mucho menos agruparlos dentro de colectivos específicos. No ven la bicicleta como un vehículo para el traslado o el ejercicio, sino como extensión de sus relaciones en la cotidianidad de su entorno y un objeto que soluciona sus necesidades diarias de movilidad y socialización, cargado de simbolismos culturales.

Por ello, rara vez asocian la bicicleta y su uso con las políticas de restricción en circulación, movilidad, ordenamiento vial o seguridad vial impulsadas desde las instituciones estatales o locales, al contrario, consideran cualquier acción de control sobre las bicicletas por parte de las autoridades, como una violación a su privacidad y un abuso del Estado.

Para estas comunidades y sus gentes, para cuando se llegaron a construir los actuales sistemas viales y de transporte, la bicicleta ya estaba, ya formaba parte intrínseca de sus procesos históricos de movilidad. Para ellos, la ampliación de la red vial es simplemente un elemento más en la transformación del entorno, al cual la bicicleta se adapta siguiendo los patrones culturales de las necesidades particulares. Este divorcio conceptual y contextual es lo que ha abierto la enorme brecha en poder garantizar su movilidad segura; la bicicleta no es vista como un medio de transporte (aunque lo sea), sino como parte fundamental de sus relaciones cotidianas. Para el ciclista utilitario el uso de la bicicleta no es opcional.

### ***Nuevas tendencias de uso de la bicicleta: el ciclista recreativo***

Aunque no existen estudios específicos, en las investigaciones cualitativas y de observación ya mencionadas, se ha podido documentar el aumento en la última década del uso de la bicicleta con fines específicamente recreativos o de deporte.

Como se ha mencionado, desde la década de 1940 en Costa Rica existe el ciclismo como deporte élite al que se dedican de manera profesional hombres y mujeres. Sin embargo, ha sido una tendencia de los últimos años el aumento de colectivos que usan la bicicleta con fines de esparcimiento y ejercicio de manera metódica y organizada, sin alcanzar niveles de profesionalización o participar en eventos deportivo de élite.

Estos colectivos se caracterizan por estar integrados por personas con cierto poder adquisitivo que les permite la compra de bicicletas de mayor costo económico que el promedio, además del equipamiento especializado para la práctica del ciclismo, incluyendo dispositivos e indumentaria de seguridad (casco, luces, ropa y zapatos especiales, etc.). Suelen hacer grandes recorridos de decenas de kilómetros, tanto sobre carretera como a campo traviesa, mezclando características de montaña y pista, sobre todo en fines de semana, pero no exclusivamente. En general, la bicicleta no forma parte de su cotidianidad ni es un medio de transporte.

Se mueven en grupo, tienen una estructura jerárquica interna, muchos acceden a esquemas organizacionales más formales como las asociaciones deportivas; suelen tener tarifas de ingreso/afiliación, además de cuotas mensuales; responden a liderazgos internos; cuentan con códigos de comportamiento, formales e informales, sobre su circulación en las vías; y suelen integrarse dentro de colectivos más grandes a nivel regional o incluso nacional. Esta estructura les permite tener una mayor presencia en espacios políticos y de toma de decisiones. Su

organización les permite tener posturas bastante homogéneas en temas de interés y establecer líneas discursivas o de acción en consenso.

Para la década del 2000, era más común identificar estos grupos recreativos dentro del Valle Central, sin embargo, en el último decenio se han extendido a casi todas las ciudades y comunidades más pobladas del país. También existen en los cantones con predominancia de ciclistas utilitarios como Liberia, Cañas, Osa, Limón, etc. En estas locaciones es común que el ciclista utilitario también tenga una faceta de ciclista recreativo. Muchos dentro de este sector se han convertido en promotores del movimiento que impulsa la bicicleta como opción a la movilidad, sobre todo en los entornos urbanos.

Cabe destacar que para la zona metropolitana del Valle Central, se ha ido extendiendo el grupo de ciudadanos que abogan por el impulso de la bicicleta como medio de transporte alternativo, sin embargo, aun siendo una minoría, para efectos de esta clasificación los tendríamos que ubicar en un intermedio entre el ciclista utilitario y el recreativo, ya que la bicicleta para ellos no trasciende más allá del transporte y siempre es opcional. Se podrían considerar como parte de una fase inicial, transicional hacia el ciclista utilitario, aunque con una mayor abertura hacia las políticas de movilidad segura y uso de dispositivos de seguridad.

## **CONCLUSIONES**

Este es apenas un planteamiento inicial para generar una mayor discusión y evidenciar los vacíos en la investigación sobre la movilidad de las personas en bicicleta. El principal error de las políticas públicas sobre movilidad, infraestructura vial y seguridad vial, es considerar el uso y usuarios de la bicicleta como algo homogéneo, sin valorar las condiciones específicas de los diversos usuarios. Se suele tomar como referencia al ciclista recreativo, ignorando por completo la complejidad que deviene en el uso de la bicicleta por parte de los ciclistas utilitarios, para quienes este vehículo trasciende la simple funcionalidad de trasladarse.

Si bien en el país se han construido varios kilómetros de infraestructura para ciclistas (Méndez, s.f.), la evidencia ha demostrado que han sido obras con poco o nulo alcance en la resolución del conflicto que deviene de la interacción del parque automotor con ciclistas, y sobre todo con los ciclistas utilitarios. El alcance de esas obras en la disminución de siniestros de tránsito es más bien limitado.

Parte de las conclusiones de los estudios de movilidad y seguridad vial en los cantones con predominancia de ciclistas utilitarios, es que las obras en seguridad vial no responden a sus necesidades, o, mejor dicho, las nuevas obras llegan a generar necesidades externas que complejizan aún más su relación en el uso de la bicicleta.

El impacto de las obras viales y planificación urbana ejerce presión y aumenta la vulnerabilidad precisamente de estos segmentos de población, para quienes la bicicleta no es una opción para su movilidad, sino un elemento intrínseco a su cotidianidad y el desarrollo de todas las actividades personales, culturales y económicas.

El discurso que predomina en los foros de discusión sobre movilidad y seguridad vial suelen mantener en su perspectiva al ciclista recreativo o a los nuevos ciclistas que se quieren incluir en la movilidad de las grandes urbes como respuesta al congestionamiento vial, que, como se ha descrito, forman parte de colectivos muy diferentes, con características socioculturales, económicas y necesidades muy particulares, lo que a su vez deviene en exposiciones al riesgo en carretera muy diferentes.

Al no tener presente a este otro sector, el del ciclista utilitario, que es mayoritario, incluso masivo en cantones como Osa, Liberia, Puntarenas, Limón, Siquirres, Cañas, Pococí, entre otros, seguirá generando políticas públicas e intervenciones de alcance mínimo o incluso negativo, tanto en el ordenamiento del espacio como en la prevención de siniestros viales.

Es indispensable que en las políticas públicas, las nuevas obras viales y las obras complementarias en seguridad vial para ciclistas deben generarse a partir de estudios cualitativos y cuantitativos que permitan comprender al ciclista utilitario, sobre todo en aquellos contextos en donde su presencia es masiva.

No escapan a esta análisis, las contradicciones del discurso académico y de las políticas públicas actuales que buscan estimular y rescatar el uso de la bicicleta dentro del Valle Central como opción para una movilidad sostenible y amigable con el entorno, mientras en aquellas localidades en donde la bicicleta ya es parte intrínseca de los esquemas de movilidad, se implementen obras y políticas públicas que más bien restringen y reprimen el uso de la bicicleta, con carreteras cada vez menos amigables y más inseguras con los ciclistas utilitarios o restricciones cada vez más agresivas en el control de su circulación. Y el efecto es claro, aunque no se haya medido cuantitativamente: cada vez más ciclistas utilitarios parecen incitados a cambiar su medio de transporte, muchas veces por una motocicleta.

Es urgente el llamado a la necesidad de incluir este tipo de consideraciones técnicas de orden cualitativo en la toma de decisiones sobre las vías de desarrollo a seguir en las políticas de mejora y ampliación del sistema vial nacional y cantonal.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acuña, V. H. y Molina, I. (1991). *Historia económica y social de Costa Rica (1750-1950)*. 1era ed. San José: Editorial Porvenir.
2. Bijker, W. (1995). *Of Bicycles, Bakelites, and bulbs: Toward a Theory of Sociotechnical Change*. MIT Press.
3. Cardoso, C. (1976). La formación de la hacienda cafetalera en Costa Rica (siglo XIX). *Avances de Investigación. Proyecto de historia social y económica de Costa Rica 1821-1945*. San José, No. 4 (1976), pp. 1-61.
4. Carreón, A.; Martínez, A. y Treviño, X. (2011). *Manual del ciclista urbano de la Ciudad de México*. Editor Bruno Aceves Humana. Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal, México.
5. Harlihy, D. (2004). *Bicycle: The History*. Designed by Sonia Shannon by BW&A Books, Inc. Printed in the United States of America by Quebecor World, Taunton, Mass.
6. Hilje, B. (1991). *La colonización agrícola de Costa Rica (1840-1940)*. San José, Editorial Universidad Estatal a Distancia.
7. Hughes, J. (2012). *Análisis histórico de la participación femenina en ciclismo en Costa Rica y en el mundo*. Trabajo Final de Graduación.
8. European Communities. (1999). *Cycling: the way ahead for towns and cities*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, Belgium.
9. Fletsberaad. (2010). *The bicycle capitals of the world: Amsterdam and Copenhagen*. Fetsberaad Expertise Centre for Cycling Policy, The Netherlands.
10. Fonseca Herrera, Z. (1979). *Los chinos en Costa Rica en el siglo XIX*. San José, tesis de Licenciatura en historia, Escuela de Historia y Geografía, Facultad de Ciencias Sociales, Universidad de Costa Rica.

11. Fonseca Herrera, Z. (2016). Las migraciones chinas a Costa Rica en el siglo XIX. En *Historia comparada de las migraciones en las Américas*, Ed. Galeana de Valadés. México: UNAM, Instituto de Investigaciones Jurídicas.
12. Fumero, P. (2000). Vida cotidiana en el Valle Central: 1850-1914. Los cambios asociados con la expansión del café. Ana María Botey (coord). Costa Rica. *Desde las sociedades autóctonas hasta 1914*. San José: Editorial de la Universidad de Costa Rica: pp. 303-338.
13. Instituto para Políticas para el Transporte y el Desarrollo (IDTP). (2012). *Planes Integrales de Movilidad: Lineamientos para una movilidad urbana sustentable*. Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo, México.
14. Loría Chaves, M. (2000). *Los inmigrantes chinos dentro de la comunidad costarricense (1870-1910)*. Tesis de Licenciatura en historia, Facultad de Ciencias Sociales: Universidad de Costa Rica.
15. Méndez Hernández, H. (sf). *Estudio de Impacto de Ciclovías en Costa Rica: Promoviendo sistemas alternativos y articulados de transporte urbano en Costa Rica*. Fundación para el desarrollo urbano, FUDEU.
16. Molina, I. (2002). *Costarricense por dicha. Identidad nacional y cambio cultural en Costa Rica durante los siglos XIX y XX*. San José, Editorial EUCR.
17. Morales, G. (1993). *Cultura oligárquica y nueva intelectualidad en Costa Rica: 1880-1914*. Heredia, Editorial EUNA.
18. Quesada, F. (2007). *La modernización entre cafetales: San José, Costa Rica, 1880-1930*. Renvall Institute for Area and Cultural Studies, University of Helsinki, Finland.
19. Sáenz García, R.M. (2014). *La bicicleta y sus orígenes en Europa*. Posgrado de Antropología. Universitat Jaume I de Castello.
20. Salazar, O. (1990). *El apogeo de la república liberal en Costa Rica 1870-1914*. San José, Editorial de la Universidad de Costa Rica, 1990.
21. Sánchez, R. (1991). *Campeonatos nacionales de ciclismo, primera división 1940-1990*. San José, C.R.: VASA.

## INFORMES FINALES

22. Consejo de Seguridad Vial (COSEVI). (2012). *Seguridad Vial: construcción histórica, redes sociales y contexto sociocultural del cantón de Osa, Pacífico Sur*: Informe Final, Bohián Pérez Stéfanov, Inv., Área de Investigación y Estadísticas, COSEVI.
23. Consejo de Seguridad Vial (COSEVI). (2013). *Seguridad Vial en zonas costeras, el caso de Puntarenas*. Informe Final, Bohián Pérez Stéfanov, Inv., Área de Investigación y Estadísticas, COSEVI.
24. Consejo de Seguridad Vial (COSEVI). (2013a). *Seguridad Vial: construcción histórica, turismo y contexto sociocultural del cantón de San Carlos, Zona Norte*. Informe Final, Bohián Pérez Stéfanov, Inv., Área de Investigación y Estadísticas, Dirección de Proyectos, Consejo de Seguridad Vial.
25. Consejo de Seguridad Vial (COSEVI). (2013b). *La Independencia en dos ruedas, 15 de septiembre, 2013*. Informe de actividad, Área de Investigación y Estadísticas, COSEVI.
26. Consejo de Seguridad Vial (COSEVI). (2014). *Análisis de riesgos y debilidades en la gestión de la Seguridad Vial en la ampliación de la carretera Interamericana Norte, eje Cañas – Liberia*. Informe Final, Bohián Pérez Stéfanov, Inv., Área de Investigación y Estadísticas, COSEVI.
27. Consejo de Seguridad Vial (COSEVI). (2016). *Construcción y análisis de perfiles de riesgo en Seguridad Vial y movilidad segura de la Ruta 32: estado actual y escenarios ante una posible ampliación entre la intersección con la ruta nacional 4 y el centro de Limón*. Informe Final, Bohián Pérez Stéfanov, Inv., Área de Investigación y Estadísticas, COSEVI.
28. Consejo de Seguridad Vial (COSEVI). (2017). *Evaluación desde la Seguridad Vial del proceso de gestión del proyecto de ampliación de la Ruta 1, tramo Cañas – Liberia*. Informe Final, Bohián Pérez Stéfanov, Inv., Área de Investigación, Dirección de Proyectos, Consejo de Seguridad Vial.

# Mejores prácticas para diseñar mezclas asfálticas con pavimento asfáltico recuperado (RAP)

*Recommended best practices for using rap in asphalt pavements for Costa Rica*

**Ing. Fabricio Leiva-Villacorta, Ph.D., MBA**

NCAT, Universidad de Auburn, Alabama

[leivafa@auburn.edu](mailto:leivafa@auburn.edu)

**Ing. Adriana Vargas-Nordbeck, Ph.D., MBA**

NCAT, Universidad de Auburn, Alabama

[vargaad@auburn.edu](mailto:vargaad@auburn.edu)

**Fecha de recepción:** 21 de febrero de 2017 / **Fecha de aprobación:** 26 de julio de 2017

## RESUMEN

La utilización de pavimento asfáltico recuperado (RAP en inglés) en carreteras se ha convertido en una estrategia importante para ayudar a compensar el aumento del precio de las materias primas y mejorar la sostenibilidad de la infraestructura de transporte. La forma de caracterizar los materiales de reciclado, el diseño de mezcla, los ensayos de desempeño y las prácticas constructivas no siguen ninguna práctica estándar conocida. El objetivo de este estudio fue el identificar las mejores prácticas para el diseño y producción de mezclas asfálticas con RAP. El documento propuesto proporciona una guía para el uso eficaz de los materiales de RAP e incluye recomendaciones sobre la manipulación y el almacenamiento del RAP, ensayos de este material, producción de mezclas que contienen RAP, y las prácticas de control de calidad durante la producción de las mezclas que contienen RAP.

**PALABRAS CLAVES:** RAP, mezcla asfáltica, desempeño, pavimentos, mejores practicas.

## ABSTRACT

*Utilization of RAP in asphalt pavements has become an important strategy to help offset rising raw material prices and to improve the sustainability of our transportation infrastructure. Characteristics of the recycled materials, mix designs, performance and construction practices do not follow any known standard practice. The objective of the proposed document is to identify best practices for specification, design, production, testing, and placement of RAP mixes. The proposed document provides guidance for the effective use of reclaimed asphalt pavement (RAP) materials in pavements specifically for Costa Rica. The document includes recommendations on when milling should be considered as part of pavement rehabilitation, best practices for handling and stockpiling RAP, testing the RAP, designing mixes with RAP, production of mixes containing RAP, and quality control practices during production of mixtures containing RAP.*

**KEYWORDS:** RAP, asphalt mixture, performance, pavements, best practices.

## INTRODUCCIÓN

Los materiales asfálticos recuperados durante las operaciones de rehabilitación o reconstrucción pueden ser utilizados nuevamente en mezclas asfálticas como agregado y ligante complementario. El aumento del uso de RAP en proyectos de construcción de carreteras y la rehabilitación en todo el mundo se ha convertido en una estrategia importante para ayudar a compensar los crecientes costos de las materias primas y mejorar la sostenibilidad de las infraestructuras de transporte. El uso de RAP reduce los costos asociados a los materiales y el transporte. Los costos de los materiales comprenden aproximadamente 70 por ciento del costo total de producción de una mezcla asfáltica, siendo en este caso, el ligante asfáltico el material de mayor costo (Copeland, 2011).

Mediante la sustitución de una parte de los materiales vírgenes con RAP, especialmente en las capas intermedia y superficial, se puede obtener mayores beneficios económicos. En estas capas se utiliza el ligante (material más costoso) para proporcionar una resistencia a la tracción, proteger ante el daño por humedad y proporcionar una superficie de rodadura regular y resistente al deslizamiento.

Khandal y Mallik (1997) estiman que un ahorro de hasta un 34 % podría ser generado para mezclas que contienen hasta un 50 % de RAP. McDaniel y Nantung (2005) informaron en un análisis beneficio-costos, realizado por el Departamento de Transportes de Indiana, que el ahorro en materiales puede ir desde \$ 330,000 USD al año, cuando se incorpora 5 % de RAP a un poco más de 5 millones de toneladas de material de base.

El uso de RAP también conserva la energía, preserva los recursos naturales y reduce la cantidad de escombros de construcción que se coloca en los vertederos. Un estudio preparado para el Departamento de Transporte del Estado de Nueva York (National Technology Development LLC, 2009) cuantifica la energía y el impacto ambiental del uso de RAP en mezclas asfálticas a través de varios modelos matemáticos que combinan el secado-calefacción, transporte, procesamiento y energías caloríficas. Se encontró que el uso de RAP dio lugar a ahorros de energía significativos, y que la diferencia en el consumo de energía se ve afectada por el contenido de RAP, la humedad en el RAP, y la temperatura de descarga de la mezcla. Además, se estima que el uso de bajos contenidos de RAP tiende a aumentar las emisiones de CO<sub>2</sub> mientras que lo contrario es cierto para un alto contenido de RAP. Sin embargo, la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> del uso de RAP se presenta principalmente por la distancia más corta o nula de acarreo del RAP.

Está claro que la rehabilitación efectiva de pavimentos asfálticos a veces requiere la eliminación de capas asfálticas envejecidas. Si las agencias, departamentos de transporte y la industria no han desarrollado técnicas adecuadas para utilizar RAP, los costos de rehabilitación de pavimentos asfálticos aumentarían significativamente para cubrir los costos de eliminación de los materiales no reciclados. Por lo tanto, el uso eficaz de RAP resuelve un problema ambiental más amplio en que el material no ocupa espacio en los vertederos.

Este documento proporciona una guía para el uso eficaz de los materiales asfálticos recuperados. El documento incluye recomendaciones sobre las mejores prácticas para la manipulación, el almacenamiento del RAP, el diseño de mezcla con RAP, ensayos de laboratorio, producción de mezclas que contienen RAP y las prácticas de control de calidad durante la producción.

## OBJETIVO

El objetivo de este estudio fue el identificar las mejores prácticas para el diseño y producción de mezclas asfálticas con RAP. El objetivo secundario es sugerir revisiones y ajustes a especificaciones, a las prácticas de preservación del pavimento y elaborar directrices para el uso de los materiales recuperados en pavimentos asfálticos.

## PRÁCTICAS PROPUESTAS

Este documento se divide en las siguientes áreas: Manejo del material recuperado, caracterización del RAP, diseño de la mezcla asfáltica, producción y control de calidad de las mezclas que contienen RAP. Dentro de algunas de las secciones se proponen especificaciones.

### *Manejo del material recuperado*

La variabilidad del RAP hace que sea difícil controlar el contenido de asfalto, la granulometría y los vacíos de aire de la mezcla durante la producción, especialmente en porcentajes altos de RAP (Solaimanian y Tahmoressi, 1996). El uso de técnicas adecuadas para el almacenamiento y procesamiento del RAP puede ayudar a controlar su variabilidad. Estas técnicas incluyen la eliminación de la contaminación, la separación de los apilamientos de RAP de diferentes fuentes, el procesamiento (trituration o fraccionamiento) del RAP, el almacenamiento del RAP procesado utilizando una superficie pavimentada, inclinada para reducir el contenido de humedad, y finalmente, la caracterización del RAP inmediatamente después de ser procesado (Zhou et al. 2010).

Reducir al mínimo el contenido de humedad en los apilamientos de RAP es importante para la calidad de la mezcla y la eficiencia de la planta. Si el material de RAP tiene un alto contenido de humedad, esta primero se debe convertir en vapor antes de que el ligante de asfalto puede ser calentado lo suficiente como para ser reactivado. Esta energía que se consume en el secado del RAP afecta a la temperatura a la que el agregado virgen se calienta. Para reducir al mínimo la humedad en el RAP, los apilamientos deben ser construidos en forma cónica en áreas que drenan el agua lejos de la base. Otras medidas, tales como cubrir los apilamientos de RAP con un techo de un edificio abierto por los lados también puede ayudar a minimizar el contenido de humedad (Copeland, 2011).

El procesamiento del RAP implica uno o más pasos para crear materiales consistentes que pueden ser utilizados en un alto porcentaje y cumplir con los estándares de las mezclas de asfalto de alta calidad (Copeland, 2011). El procesamiento adicional de material triturado puede o no ser necesario para obtener una consistencia adecuada. Como mínimo, los materiales de RAP deben ser tamizados a través de una malla de 38.1 mm antes de entrar en la planta para eliminar los trozos más grandes de RAP ya que el calor no puede penetrar a fondo a través de densas partículas de RAP mayor que 38.1 mm durante el proceso de mezcla. Se recomienda establecer tolerancias en la granulometría del RAP antes y después del procesamiento de  $\pm 4\%$  del material pasando el tamiz No 8 y  $\pm 1\%$  en el tamiz No. 200 (West et al. 2013). La mayoría de las fuentes de RAP se volverán un agregado grueso bien graduado, comparable a, o tal vez ligeramente más fino y más variable que, agregados naturales triturados (Chesner et al. 1998).

Se deben hacer pruebas de laboratorio para determinar si el contenido de asfalto y la granulometría son consistentes con los resultados utilizados en el diseño de la mezcla y que el material es constante a través de la reserva de RAP. El contenido de asfalto y las pruebas de granulometría de los materiales utilizados en la producción de mezcla deben ser obtenidos a una frecuencia de una prueba por cada 1 000 toneladas de material utilizado (West et al. 2013).

Se considera una buena práctica incluir al menos 10 resultados para estimar las estadísticas del apilamiento. La desviación estándar máxima recomendada para el contenido de asfalto es de 0.5 %. La desviación estándar máxima recomendada para el porcentaje de material pasando el tamiz de la mediana es de 5.0 % y la desviación estándar máxima recomendada para el porcentaje pasando el tamiz de 0.075 mm es del 1.5 % (West et al. 2013).

### ***Métodos de ensayo para la caracterización del RAP***

Se recomienda el método de extracción de disolvente (AASHTO T 164) para la determinación del contenido de asfalto de muestras de RAP. El ligante asfáltico recuperado debe ser analizado para determinar su grado de desempeño (PG) utilizando AASHTO M 320. La granulometría del agregado extraído de las muestras de RAP debe ser determinado de acuerdo con AASHTO T 30. La gravedad específica ( $G_{sb}$ ) debe ser determinada usando AASHTO T 84 y T 85 para las porciones finas y gruesas, respectivamente, del agregado recuperado de los ensayos de extracción. No se recomienda la estimación de la gravedad específica del agregado del RAP a partir de la gravedad específica máxima teórica del RAP ( $G_{mm}$ ) ya que esto dará lugar a un  $G_{sb}$  sobreestimado y un error en el VMA calculado que probablemente daría lugar a una mezcla de pobre desempeño.

### ***Diseño de mezcla asfáltica con RAP***

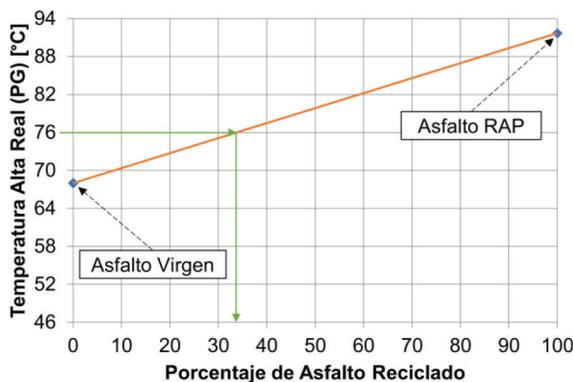
La metodología de diseño de mezcla Superpave para las mezclas que incorporan RAP es similar al diseño de la mezcla de todos los materiales vírgenes, con las siguientes excepciones (National Technology Development LLC, 2009):

- El agregado del RAP es tratado como otro de los apilamientos para mezclar y pesar, pero se debe calentar a temperaturas inferiores para evitar cambiar las propiedades del ligante del RAP;
- La gravedad específica del agregado de RAP debe ser determinado;
- La cantidad de ligante aportado por el RAP debe tenerse en cuenta cuando se dosifican los agregados;
- El contenido total de asfalto de la mezcla incluye el ligante proporcionado por el RAP; y
- Un cambio en el grado del ligante virgen puede ser necesaria dependiendo de la cantidad de RAP, del grado de desempeño deseado, y la rigidez del ligante del RAP. Para las mezclas que contienen alta cantidad de RAP, este proceso implica el uso de un gráfico de mezcla o la ecuación de mezcla para determinar la cantidad de RAP a utilizar, si el grado de desempeño del ligante virgen es conocido o para seleccionar el grado del ligante virgen si se conoce el porcentaje de ligante del RAP.

## Selección del Grado de Desempeño del Ligante Virgen

Hay varios factores que pueden afectar el grado de mezcla para cualquier diseño de mezcla en particular, incluida la compatibilidad del RAP y ligantes vírgenes, temperatura de mezclado, tiempo de mezclado, rigidez/viscosidad del ligante del RAP y ligantes vírgenes y las proporciones relativas de la RAP y ligantes vírgenes. La norma AASHTO R 35 recomienda tres niveles de uso de RAP. El primer nivel establece la cantidad máxima de RAP (15 %) que se puede utilizar sin cambiar el grado del ligante virgen. El segundo nivel, de 15 a 25 %, se puede utilizar cuando el grado de desempeño del ligante virgen se reduce en un grado. El tercer nivel es para los contenidos de RAP superiores (más del 25 %); para estos contenidos más altos, es necesario extraer, recuperar, y ensayar el ligante RAP para construir un gráfico de mezcla.

La Figura 1 muestra un ejemplo del proceso de selección de contenido de RAP. Para este ejemplo, se requiere un ligante PG



76-22 para un proyecto. Al utilizar las temperaturas críticas reales que definen el grado de desempeño del ligante virgen y el extraído del RAP se observa que un contenido de 34 % de RAP proveerá el grado PG especificado.

## Ensayos para evaluar el desempeño del ligante asfáltico

El contenido de ligante en el RAP varía típicamente entre 3 y 7 por ciento en peso. Este ligante es más rígido debido al envejecimiento causado por la exposición del pavimento al oxígeno atmosférico (oxidación) durante el uso y la intemperie (Chesner et al. 1998). Por lo tanto, es importante evaluar la mezcla resultante de ligantes (virgen/RAP) para determinar la forma en que la porción del ligante envejecido puede afectar al desempeño. Existen varias pruebas que han sido utilizadas como métodos para evaluar el desempeño ligante asfáltico en Costa Rica. La mayoría de estas pruebas requieren un mayor desarrollo, estudios de aceptación y precisión, y la investigación de validación de campo antes de que sean adecuados para su uso en las especificaciones.

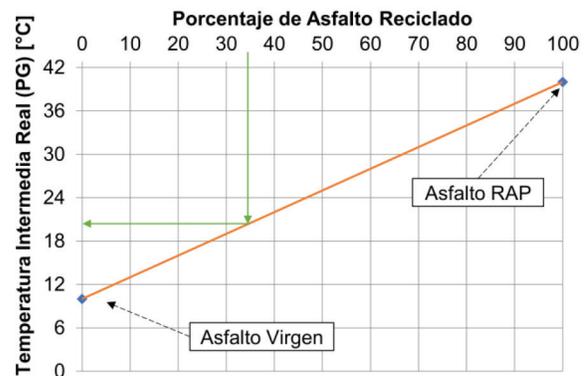


Figura 1. Ejemplo de escogencia del porcentaje de RAP por la mezcla de ligantes

## Ensayo de agrietamiento por fatiga

Para caracterizar el comportamiento a la fatiga del ligante, un análisis de fatiga con carga cíclica se puede aplicar utilizando el Reómetro Dinámico de Cortante. El ensayo se realiza a la temperatura intermedia del grado PG y consiste en someter la muestra a una frecuencia angular de 10 rad/s, en el modo controlado (10 %) de acuerdo con las recomendaciones del NCHRP 459 (Bahia et al. 2001). La Figura 2 muestra un ejemplo de los resultados del ensayo donde el Módulo complejo  $G^*$

a cortante tiende a disminuir con el paso del tiempo. A cierto punto se presenta una caída drástica en el módulo que coincide con el ángulo de fase máximo encontrado durante el ensayo. Este punto se considera como el inicio del estado de falla por fatiga del material. Este ensayo se recomienda aplicar en el ligante virgen, y en la proporción o combinación RAP/ligante virgen seleccionada para el diseño de mezcla, con el objetivo de evaluar el potencial aumento en la susceptibilidad al agrietamiento por fatiga aportado por el ligante envejecido.

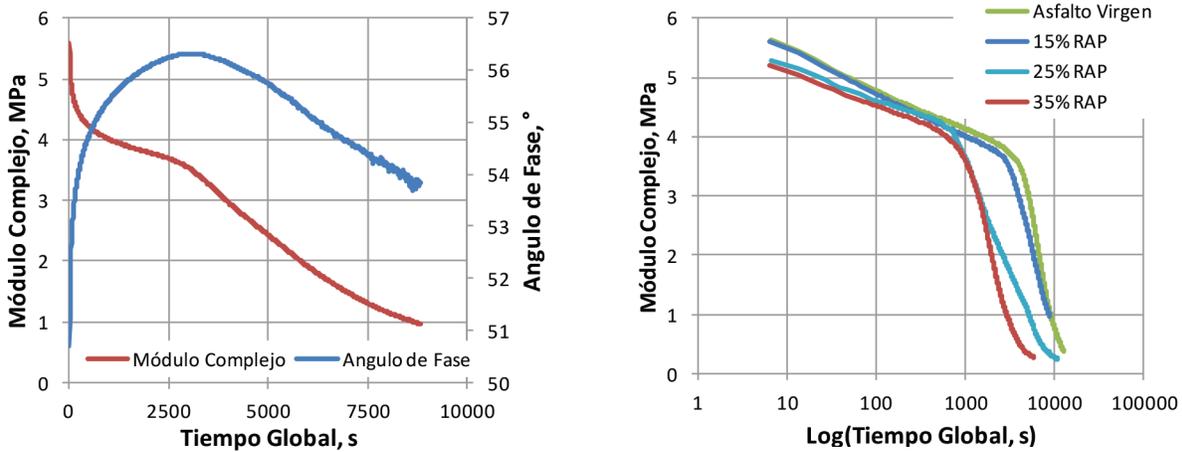


Figura 2. Ejemplo de ensayo de fatiga.

### Ensayo para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad

Debido a las condiciones ambientales y la naturaleza de los materiales de zonas tropicales, el potencial del daño por la presencia de humedad es de especial interés para las mezclas de Costa Rica y otros países con alta precipitación. Para caracterizar la susceptibilidad a la humedad del ligante, se recomienda una prueba basada en una modificación realizada al equipo llamado PATTI (por sus siglas en inglés) que mide la fuerza de tracción requerida para despegar el ligante de la superficie de agregado (BBS, en inglés) (Morales et al. 2011). Este tipo de análisis es muy útil en la identificación del tipo de falla que es probable que ocurra por adherencia entre el agregado y el ligante asfáltico o debido a la fuerza de cohesión o la durabilidad del ligante asfáltico o ambas. La Figura 3 muestra el equipo recomendado y un ejemplo de los resultados de las pruebas de tracción (Aguar-Moya et al. 2013). El ensayo trata, básicamente, de la medida de la resistencia a la tracción (POTS) y se realiza bajo dos tipos de condicionamiento, 24 horas en estado seco y 96 horas en estado húmedo. Además, la pérdida porcentual de resistencia a la tracción entre las

condiciones seca y húmeda se puede utilizar como medida de la susceptibilidad a la humedad. Este ensayo se recomienda aplicar en el ligante virgen, y en la proporción o combinación RAP/ligante virgen seleccionada para el diseño de mezcla, con el objetivo de evaluar el potencial aumento en resistencia o daño por humedad aportada por el ligante envejecido.

### Ensayo de deformación permanente

El ensayo Multi Stress Creep Recovery (MSCR), definido en ASTM D 7405, fue introducido recientemente para evaluar los ligantes asfálticos a temperaturas de servicio elevadas, en particular para evaluar el esfuerzo o carga de resistencia. Esta prueba permite la clasificación de ligantes en la alta temperatura PG, de acuerdo con la carga de tráfico, a partir de la norma, a la carga de tráfico pesado, muy pesado y extremo. Este ensayo se recomienda aplicar en el ligante virgen, y en la proporción o combinación RAP/ligante virgen seleccionada para el diseño de mezcla con el objetivo de evaluar el potencial aumento en resistencia a la deformación permanente aportada por el ligante envejecido.



Figura 3. Ejemplo de equipo PATTI y resultados del ensayo.

## Pruebas adicionales para evaluar las propiedades del ligante asfáltico

### Análisis Termogravimétrico

El análisis termogravimétrico (TGA) es un método de análisis térmico en la que los cambios en propiedades físicas y químicas de los materiales se mide como una función del aumento o disminución de los ciclos de temperatura (con velocidad de calentamiento constante), o como una función del tiempo (con temperatura constante y/o pérdida constante de masas) (Coats y Redgern, 1963; Leiva-Villacorta et al. 2014). TGA se utiliza comúnmente para determinar características seleccionadas de materiales que exhiben ya sea la pérdida de masa o ganancia debido a la descomposición, oxidación, o la pérdida de volátiles del aglutinante de asfalto. La Figura 4 muestra un ejemplo de las pruebas realizadas en ligantes envejecidos y sin envejecer. Como se muestra, la pérdida de masa del ligante virgen (no envejecido) es mayor que el ligante envejecido a lo largo del incremento de temperatura. A una temperatura de mezcla típica de 160 °C hay una diferencia significativa en la pérdida de peso calculada entre muestras. Además, una temperatura más baja de descomposición (comienzo de la aceleración del ritmo de pérdida de peso) se puede observar para el ligante no envejecido.

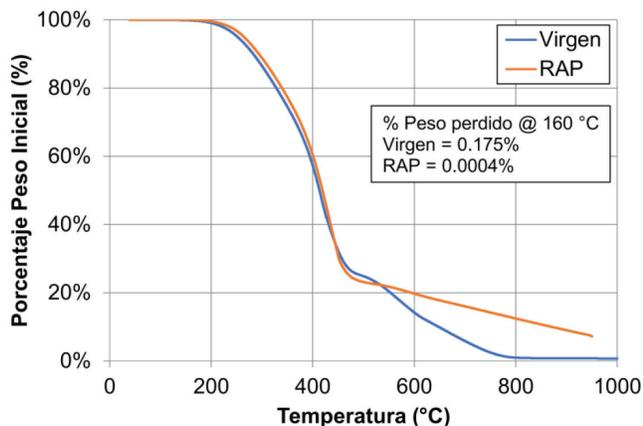


Figura 4. Ejemplo de análisis termogravimétrico.

### Análisis de Calorimetría de Barrido Diferencial

El análisis de calorimetría de barrido diferencial (DSC) se utiliza ampliamente para la determinación de las transiciones térmicas provocadas por las transiciones de primer orden, tales como la fusión y la cristalización de las especies cristalizables (Leiva-Villacorta et al. 2014; Elseifi et al. 2010). La transición vítrea,  $T_g$ , acreditado como un fenómeno de segundo orden que tiene lugar en la región amorfa de la muestra, puede ser también definido por DSC, pero depende en gran medida de la naturaleza del material

y su contenido de fracciones cristalizables (Bahia y Anderson, 1993). Por debajo de la temperatura de transición vítrea, el asfalto se comporta como un cristal y aparece frágil y afecta al comportamiento a la fatiga del ligante y la mezcla. La Figura 5 muestra un ejemplo de la prueba DSC realizada en ligantes no envejecidos y envejecidos. Esta figura muestra que una mayor cantidad de calor está siendo introducido en el sistema, de la muestra envejecida, con el fin de producir un proceso endotérmico tal como fusión. Esta cantidad de energía adicional se ve reflejada durante la producción de mezclas asfálticas con material de RAP. A mayor contenido de RAP no sólo se tiende a elevar la temperatura del agregado virgen para minimizar la cantidad de humedad que contiene el RAP, sino también para que el asfalto envejecido se comporte de manera fluida durante el proceso de mezclado. También se espera obtener temperaturas más altas de transición vítrea ( $T_g$ ) y mayor porcentaje de fracciones a cristalizar durante la muestra envejecida que puede afectar negativamente a su comportamiento a la fatiga.

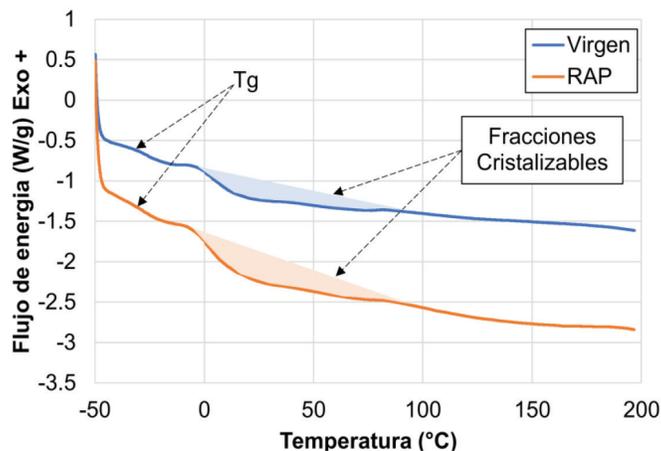


Figura 5. Ejemplo de Análisis de Calorimetría de Barrido Diferencial.

### Análisis Infrarrojo con Espectroscopía Infrarroja de Transformada de Fourier

Este análisis de infrarrojo del espectro infrarrojo (FTIR) es una técnica utilizada para identificar y cuantificar cantidades de materiales conocidos y desconocidos (Leiva-Villacorta et al. 2014; Thermo Nicolet Corporation, 2001). En esta técnica, la radiación infrarroja se hace pasar a través de una muestra; parte de esta radiación es absorbida por la muestra y parte de ella se hace pasar a través de la muestra (transmisión). El espectro resultante representa la absorción molecular y de la transmisión, la creación de una huella digital molecular de la muestra (Thermo Nicolet Corporation, 2001; Kuptsov, 1994; Mason et al. 2001). El ligante asfáltico presenta cambios físicos y químicos cuando se somete a un proceso de oxidación térmica. Esto puede ser causado por

la pérdida de volátiles o muestras de bajo peso molecular, o incluso por la formación de enlaces de hidrógeno. Los grupos forman típicamente aglutinantes de asfalto con el envejecimiento son los ácidos carboxílicos (-COOH), cetonas (C-CO-C), sulfóxidos (R-SO-R) y anhídridos (C-O-C) (Norin y Strömvall, 2004). Estos productos de oxidación forman grupos polares con fuerte interacción que aumenta la viscosidad y el cambio de las propiedades de flujo. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de aumento en la intensidad y la aparición de diferentes picos entre las bandas de 800 a 1200 cm<sup>-1</sup> (sulfóxidos) y entre las bandas 1600 a 1800 cm<sup>-1</sup> (carboxílicos) debido a la oxidación del ligante y en este caso se observa que el grupo predominante fue el de sulfóxidos.

Una técnica complementaria a los análisis previos es el análisis FTIR de gases, mediante el acoplado al TGA. Esta técnica permite identificar químicamente espectros infrarrojos de los gases emanados por el TGA en toda la cinética termogravimétrica del material, brindando información de los gases que se podrían emanar durante el proceso de modificación o de producción en planta.

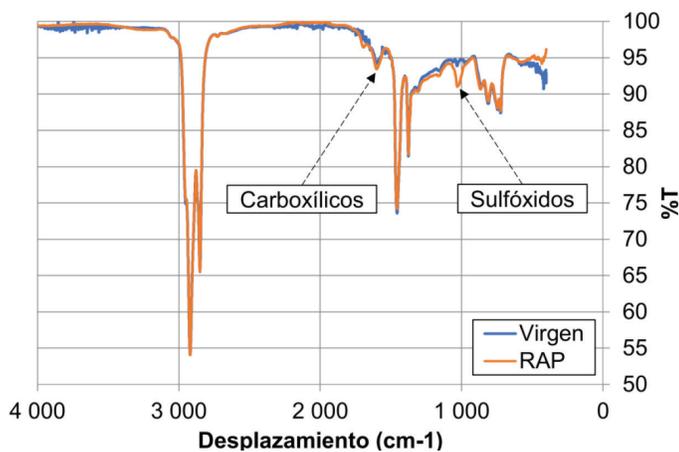


Figura 6. Ejemplo de Análisis FTIR

### Análisis de contaminantes en el RAP

Hay preocupaciones ambientales relacionadas con la posible descarga de contaminantes a partir de material fresado. Naftaleno, hidroxitoluenobutilado (BHT) y ftalato de dibutilo (DBP) son algunos de los semi-volátiles más dominantes presentes en el RAP (Norin y Strömvall, 2004; Legret et al. 2005). El material del escape de los vehículos, los neumáticos de caucho y el material de asfalto en sí son todas fuentes de emisión probables, determinados a partir de los contaminantes orgánicos liberados en los apilamientos de RAP. La técnica más utilizada para el análisis de este tipo de contaminantes es la cromatografía de gases, aunque existe una tendencia clara a favor de la cromatografía líquida (Campíns-Falcó

et al. 2010, Cháfer-Pericás et al. 2008), dado los problemas de blanco que se observa o que presenta la cromatografía de gases para estos compuestos. La cromatografía líquida (CL) está ganando popularidad debido a que muchos de los contaminantes ambientales son polares, presentan baja volatilidad y son lábiles.

### Ensayos para evaluar desempeño de la mezcla

Hay un número importante de ensayos bien conocidos que han sido utilizados como métodos para evaluar los diferentes tipos de deterioros en pavimentos asfálticos. Sin embargo, la mayoría de estas pruebas requieren un mayor desarrollo, estudios de rigurosidad y de precisión, y la validación de campo antes de que sean adecuados para su uso en las especificaciones.

### Agrietamiento por fatiga

La información sobre el desempeño del pavimento a largo plazo, aunque escasa, sugiere que mezclas con RAP pueden ser más susceptibles a agrietamiento por fatiga. Por lo tanto, la identificación de un ensayo de fatiga simple para evaluar la calidad de una mezcla RAP es esencial. Existen varios ensayos para evaluar el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas, tales como fatiga a flexotracción y ensayo Overlay. El ensayo Overlay fue desarrollado por el Instituto de Transporte de Texas y ha sido utilizado con éxito como una simple y rápida prueba de desempeño de agrietamiento por fatiga. El ensayo Overlay (TEX-248-F) se lleva a cabo en muestras recortadas de mezcla compactada en el compactador giratorio o núcleos de campo que se adhieren a una placa metálica con una separación en el centro. Las muestras de ensayo se someten a muy altos esfuerzos de tracción repetidos que dan lugar a la iniciación de grietas y la propagación hasta alcanzar la falla.

El ensayo de fatiga a flexotracción (AASHTO T 321) ha sido ampliamente utilizado en mezclas asfálticas y específicamente ha sido utilizado por varios investigadores (Shen y Carpenter, 1929; Shu et al. 2007; Monismith et al. 1961; Vargas-Nordcbeck et al. 2008) para evaluar la resistencia a la fatiga de las mezclas con RAP. Se recomienda el uso de este ensayo para diseño y verificación de la mezcla asfáltica con RAP y como complemento de control de calidad se recomienda el ensayo Overlay.

### Ensayo para evaluar la susceptibilidad al daño por humedad

La susceptibilidad a la humedad de todas las mezclas normalmente se evalúa mediante la determinación de la resistencia a la tracción diametral en muestras secas y húmedas de acuerdo con AASHTO T 283. En esta prueba, presiones internas de agua en las mezclas se producen por saturación al vacío seguido de un acondicionamiento en agua caliente. Otra forma de medir dicha

susceptibilidad es utilizando el dispositivo rueda cargada de Hamburgo. La prueba se lleva a cabo de acuerdo con AASHTO T 324 y las muestras se someten a una carga estandarizada mientras están sumergidas bajo agua caliente. En este proceso, el punto de inflexión o desnudamiento del agregado se utiliza normalmente para evaluar el daño por humedad. Se recomienda el uso de este ensayo para diseño y verificación de la mezcla asfáltica con RAP y como complemento de control de calidad se recomienda AASHTO T 283.

### Ensayo de deformación permanente

Diversos estudios que han utilizado ensayos mecánicos o fundamentales para evaluar las mezclas que contienen RAP han concluido que la resistencia a la deformación aumenta (Mohammad et al. 2006; Drescher et al. 1993). Dos de los ensayos que se utilizan comúnmente para evaluar la deformación permanente son AASHTO T 340 (Analizador de Pavimento Asfáltico) y AASHTO T 324 (dispositivo de rueda de Hamburgo).

### Ejemplo de especificaciones basadas en el desempeño de la mezcla

Las especificaciones actuales incluidas en el Manual de especificaciones para la construcción de la Carreteras de Costa Rica CR-2010 (MOPT, 2010) incluye criterios que son aplicables para cualquier tipo de mezcla asfáltica. El Cuadro 1 muestra un ejemplo de especificaciones basadas en el desempeño de mezclas asfálticas en Costa Rica. No se espera ningún cambio de estas especificaciones que deben aplicarse en mezclas de RAP.

Cuadro 1. Ejemplo de especificaciones basadas en el desempeño de la mezcla (LanammeUCR 2013)

| Parámetro  | Especificación | Método Estándar |
|--|----------------|-----------------|
| TSR  | ≥ 80%          | AASHTO T 283    |
| Resistencia a la tensión (secas)   | ≥ 700 kPa      | AASHTO T 283    |
| Deformación Permanente en equipo APA a 60°C  | ≤ 2,5 mm       | AASHTO T 340    |
| Repeticiones a la falla por fatiga a 20 °C para los siguientes niveles de deformación: |                | AASHTO T 321    |
| 400 E-6 mm/mm  | ≥ 300 000      |                 |
| 600 E-6 mm/mm  | ≥ 25 000       |                 |

## SÍNTESIS

En este documento se presentan técnicas adecuadas para la obtención, el almacenamiento, el procesamiento del RAP para producir mezclas de buena calidad. El pavimento de asfalto reciclado debe ser procesado adecuadamente para reducir la variabilidad en la granulometría y el contenido de asfalto. Las muestras deben ser tomadas de forma aleatoria del apilamiento de RAP procesado para identificar la variabilidad de las propiedades del material de RAP. En el proceso de reciclado de pavimentos de asfalto se recomienda que el tamaño máximo de los agregados debe ser de 38 mm. El proceso de producción de RAP puede afectar el tamaño de las partículas y dar lugar a demasiadas partículas de gran tamaño que tendrían que ser tamizadas o eliminados.

El grado de desempeño PG del asfalto debe ser ajustado para tener en cuenta la contribución del material de asfalto reciclado. Para contenidos de menos de 15% RAP no es necesario ajustar el grado PG del ligante virgen. Para contenidos de RAP entre 15% y 25%, se recomienda reducir en un grado el PG del ligante virgen. Para contenidos de RAP mayores 25% el grado apropiado del asfalto virgen debe ser obtenido mediante los gráficos de mezcla.

Se recomienda la evaluación del desempeño de mezclas asfálticas diseñada con RAP, especialmente de alto contenido de RAP. Se recomienda la caracterización del ligante extraído del RAP y del ligante resultante de la combinación virgen/RAP por medio de pruebas reológicas, térmicas, y químicas para una mejor comprensión del ligante y el desempeño de la mezcla.

Actualmente, las especificaciones para construcción de carreteras en Costa Rica incluyen especificaciones que están basadas en el desempeño de las mezclas asfálticas convencionales. El cumplimiento de tales especificaciones debe aplicarse también a las mezclas asfálticas con RAP.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguiar-Moya, José Pablo, Loria-Salazar, Luis, Salazar, Jorge, Corrales-Azofeifa, Jose, Villegas, Ernesto, Corrales-Azofeifa, José P, Hajj, Elie Y. Evaluation of Adhesion Properties of Costa Rican Asphalt Mixtures using the Bitumen Bond Strength (BBS) and Contact Angle Measurement Tests. Transportation Research Board Annual Meeting 2013 Paper #13-0743, Washington DC.
2. Bahia, H. U. and D. A. Anderson. *Glass Transition Behavior and Physical Hardening of Asphalt Binders*. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 62, 93-129. 1993.
3. Bahia, H.U., Hanson, D.L., Zeng, M., Zhai, H., Khatri, M.A., Anderson, R.M., Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design, NCHRP Report No. 459, 2001, NCHRP.
4. C. Cháfer – Pericás, P. Campíns-Falcó y M.C. Prieto-Blanco, Automatic in-tube SPME and fast liquid chromatography. *A* 610, 268-272 (2008) Holanda.
5. Chesner, W.H., R.J. Collins and M.H. MacKay. "User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction". Publication No. FHWA-RD-97-148, Federal Highway Administration, McLean, VA, 1998.
6. Coats, A. W.; Redfern, J. P., Thermogravimetric Analysis: A Review. *Analyst* 88: 906–924. 1963.
7. Copeland, A. Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice. Report No. FHWA-HRT-11-021, Federal Highway Administration, McLean, Virginia, 2011.
8. Drescher, A., Kim, J. R., and D. E Newcomb, Permanent Deformation in Asphalt Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 5, Issue 1, 1993 p. 112-128.
9. Elseifi, M., Mohammad, L.N., Glover, L., Negulescu, I., Daly, W.H., and Abadie, C., Relationship between Molecular Compositions and Rheological Properties of Neat Asphalt Binder at Low and Intermediate Temperatures, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010.
10. F. Zhou, G. Das, T. Scullion, and S. Hu. RAP Stockpile Management and Processing in Texas: State of the Practice and Proposed Guidelines. Report 0-6092-1, Texas Transportation Institute, College Station, Texas, 2010.
11. J. F. Masson, L. Pelletier, P. Collins, Rapid FTIR method for quantification of styrene-butadiene type copolymers in bitumen. *Journal of Applied Polymer Science* 79, 1034 – 1041. 2001.
12. Kandhal, P. and Mallick, R.B. Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments—Participant's Reference Book, Report No. FHWA-SA-98-042, Federal Highway Administration, Washington, DC, 1997.
13. Kuptsov, A.H. Applications of Fourier Transform Raman Spectroscopy in Forensic Science. *Journal of Forensic Sciences, JFSCA*, Vol. 39, No. 2, pp. 305-318. 1994.
14. Legret M1, Odie L, Demare D, Jullien A., Leaching of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons from reclaimed asphalt pavement. *Water Res.* 2005 Sep;39(15):3675-85.
15. Leiva-Villacorta, Fabricio, Villegas-Villegas, Rafael, Aguiar-Moya, José, Salazar-Delgado, Jorge, Loria-Salazar, Luis; Effect of Aging on Rheological, Chemical, and Thermodynamic Properties of Asphalt Components. Transportation Research Board Annual Meeting 2014 Paper #14-4668, Washington DC.
16. LM-PI-UMP-016-R1. Propuesta Mezcla Asfáltica en Caliente División 400 CR-2010, LanammeUCR, Junio, 2013.
17. McDaniel, R. and T. Nantung. Designing Superpave Mixes with Locally Reclaimed Asphalt Pavement: North Central States Jointly Fund Study. TR News, No. 239, National Academies, Washington, D.C., 2005, pp. 28–30.
18. Mohammad, L., Wu, Z., Obulareddy, S. , Cooper, S., and AbadieC., Permanent Deformation Analysis of Hot-Mix Asphalt Mixtures with Simple Performance Tests and 2002 Mechanistic-Empirical Pavement Design Software", *Transportation Research Record*, No. 1970, (2006).
19. Monismith, C., Kenneth, E, and E. Blachmen, Asphalt Behaviour in Repeated Flexure, *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 30, 1961.
20. MOPT Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes. "División 400. Pavimentos Asfálticos y Tratamientos Superficiales." Designación MOPT: CR-2010. San José, Costa Rica, 2010.
21. Morales, R., Velasquez, R., and Bahia, H. U. Measuring the Effect of Moisture on Asphalt–Aggregate Bond with the Bitumen Bond Strength Test. In *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, No. 2209, Transportation Research Board 1 of the National Academies, Washington, D.C., 2011.
22. National Technology Development, LLC. Quantify the Energy and Environmental Effects of Using Recycled Asphalt and Recycled Concrete for Pavement Construction. Phase I Final Report. Report No. C-08-02, NYS Department of Transportation, 2009.
23. Norin M, Strömwall AM. Leaching of organic contaminants from storage of reclaimed asphalt pavement. *Environ Technol.* 2004 Mar;25(3):323-40.

24. P. Campíns-Falcó, J. Verdú-Andrés, A. Sevillano-Cabeza, R. Herráez-Hernández, C. Molins-Legua, Y. Moliner-Martinez, J. Chromatogr. A 1217 (2010) 2695-2702.
25. Shen, S., and S. Carpenter, Application of Dissipated Energy Concept in Fatigue Cracking Endurance Limit Testing, Transportation Research Record No. 1929, Washington D. C., 2005, pp. 165-178.
26. Shu, X., B. Huang, and D. Vukosavljevic, Laboratory Evaluation of Fatigue Characteristics of Recycled Asphalt Mixture, Construction and Building Materials, 2007.
27. Solaimanian, M. and M. Tahmoressi. Variability Analysis of Hot-Mix Asphalt Concrete Containing High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement. Journal of the Transportation Research Board, No. 1543, National Academies, Washington, D.C., 1996, pp. 89-96.
28. Thermo Nicolet Corporation. Introduction to Fourier Transform Infrared Spectroscopy. 2001.
29. Vargas-Nordbeck, Adriana. Watson Donald E.; Moore Jason; Jared David; Wu Peter Evaluation of the Use of Reclaimed Asphalt Pavement in Stone Matrix Asphalt Mixtures. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, Issue 2051, 2008, pp 64-70.
30. West, R., J.R: Willis and M. Marasteanu. "Improved Mix Design, Evaluation, and Materials Management Practices for Hot Mix Asphalt with High Reclaimed Asphalt Pavement Content". NCHRP Report 752, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2013.

# Modelación de demanda de transporte urbano en Costa Rica, de Emme a TransCAD

*Urban transportation demand modelling in Costa Rica, from Emme to TransCAD*

**Ing. Leonardo Castro Rodríguez. M.E., M.B.A.**

Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, Costa Rica

[leonardo.castro@ucr.ac.cr](mailto:leonardo.castro@ucr.ac.cr)

**Ing. Gabriela Picado Aguilar**

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, LanammeUCR, Universidad de Costa Rica, Costa Rica

[gabriela.picadoaguilar@ucr.ac.cr](mailto:gabriela.picadoaguilar@ucr.ac.cr)

**Ing. Stephan Rodríguez Shum**

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, LanammeUCR, Universidad de Costa Rica, Costa Rica

[stephan.rodriguez@ucr.ac.cr](mailto:stephan.rodriguez@ucr.ac.cr)

**Fecha de recepción:** 30 de agosto de 2017 / **Fecha de aprobación:** 13 de noviembre 2017

## RESUMEN

En julio de 2016 la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica y el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales iniciaron el proyecto de investigación Modelo de Demanda de Transporte Urbano de la Gran Área Metropolitana en Plataforma TransCAD (MDT-UCR). En este artículo se describe el proceso de migración de las bases de datos y relaciones analíticas, de Emme2 a TransCAD, del modelo de demanda de transporte urbano de la Gran Área Metropolitana (GAM), calibrado en el Plan Regional Urbano de la Gran Área Metropolitana (PRUGAM) en el 2007. La migración de la base de datos contempló tanto la red de carreteras como la red de transporte público, así como la información relacionada con el transporte público y las variables demográficas y socioeconómicas asociadas al modelo. En el caso de la migración de las relaciones analíticas del modelo de demanda de transporte urbano, se describe la migración por etapas. En términos generales, se resume la metodología para exportar la información de Emme2 hacia TransCAD, las consideraciones tomadas para validar el proceso de migración y el modelo integrado de demanda implementado en TransCAD. Como conclusión principal del artículo se resalta que, de forma preliminar, el modelo de demanda de transporte urbano del PRUGAM pudo migrarse de Emme2 a TransCAD mediante diversos ajustes de forma, pero sin cambios relevantes en las relaciones analíticas. Los métodos presentes en TransCAD son similares o presentan mejoras respecto a los utilizados en Emme2 para el PRUGAM, por lo que se logró replicar el modelo de forma satisfactoria.

**PALABRAS CLAVES:** Demanda, modelación, transporte urbano, Gran Área Metropolitana.

## ABSTRACT

*The Modelo de Demanda de Transporte Urbano de la Gran Área Metropolitana en Plataforma TransCAD (MDT-UCR) project began in 2016, conceived as a research project of the University of Costa Rica, based on a partnership between the Civil Engineering School (EIC) and the National Laboratory of Testing Materials and Structural Models (LanammeUCR). The present article describes the database migration of the urban transportation demand model, from Emme2 to TransCAD, generated as a result of the **Regional Urban Plan for the Great Metropolitan Area of Costa Rica (PRUGAM)**. The databases include the roads and transit networks, the transit system's operational characteristics and the socioeconomic variables used for transportation demand modeling. Each step of the demand model migration process is described. This article covers the methodology used for exporting data generated in Emme2 to TransCAD and the considerations used for validating both the databases' migration process and the results obtained from the migrated urban transportation demand model in TransCAD. The main conclusion drawn from the migration process is that, even though some changes in the structure of the data had to be made, the urban transportation demand model was successfully migrated from Emme2 to TransCAD, without changes to its contents. The analytical methods included in TransCAD are similar to those used in Emme2, so the results obtained by the model were successfully replicated.*

**KEYWORDS:** Demand, modeling, urban transportation, Great Metropolitan Area.

## INTRODUCCIÓN

El modelo para el análisis de la demanda de transporte urbano de la GAM de Costa Rica existente en el 2016 fue generado en el Plan Regional Metropolitano de la GAM (PRUGAM) de 2008 y desarrollado con ayuda del software Emme2. Emme2 es un programa de modelación de demanda de transporte que incorpora, de las cuatro etapas convencionalmente utilizadas para analizar demanda (generación, distribución de viajes, distribución modal, asignación de flujos), únicamente la etapa de asignación de flujos. Sin embargo, por medio de la programación en lenguajes macro del propio software, fue posible desarrollar las primeras tres etapas del modelo mediante procesamiento matricial de datos.

Para el año 2017, la versión del software Emme comercializada por INRO corresponde a Emme4, la cual ya trae incorporadas las cuatro etapas del modelo y puede ser utilizada a través de una interfaz gráfica. Sin embargo, en Costa Rica, el modelo en Emme2 nunca fue totalmente actualizado a la nueva versión y las bases de datos no recibieron mantenimiento. Por lo tanto, en julio de 2016 se inició el proyecto de investigación Modelo de Demanda de Transporte Urbano de la Gran Área Metropolitana (GAM) en Plataforma TransCAD (MDT-UCR), como una colaboración entre la Escuela de Ingeniería Civil (EIC) y el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) de la Universidad de Costa Rica. El objetivo principal del proyecto consistió en migrar, del programa Emme2 a TransCAD, el modelo de demanda de transporte urbano de la GAM desarrollado en el Plan Regional Urbano de la GAM (PRUGAM), así como su actualización y calibración según las condiciones prevalecientes en 2017.

El presente artículo surge como uno de los resultados del MDT-UCR, el cual tiene como fin explicar el proceso de migración de las bases de datos y las relaciones analíticas, las dificultades encontradas y los procesos llevados a cabo para cumplir con el propósito general de contar con un modelo de transporte urbano en plataforma TransCAD.

## OBJETIVO

El objetivo principal del presente artículo consiste en documentar el proceso de migración, de Emme2 a TransCAD, de las bases de datos y relaciones analíticas necesarias para el adecuado funcionamiento del modelo de demanda de transporte urbano.

## MODELO DE DEMANDA DE TRANSPORTE URBANO EN COSTA RICA

### Generalidades

Desde el 2003 se utilizó el *software* Emme2 en Costa Rica para modelar la demanda de transporte urbano de la GAM. Los modelos en esta versión del *software* se generaban a través de códigos en lenguaje de macro, los cuales eran activados por medio de una ventana de comandos. Esto representaba una ventaja porque brindaba gran flexibilidad con respecto a los modelos utilizados para la aplicación de las primeras tres etapas, ya que a través del lenguaje macro se podía programar cualquier tipo de procedimiento matricial requerido para su aplicación. De igual forma, esta facilidad tenía sus desventajas, pues requería de un conocimiento avanzado del lenguaje de programación de los macros utilizado por Emme2.

La base de datos acoplada a Emme2 surgió como resultado del PRUGAM. Esta base de datos fue generada en el año 2007 y su desarrollo incluyó diferentes actividades y componentes: una encuesta de hogares específicamente diseñada para el modelo de demanda, conteos de tránsito y de viajes en transporte público, proyecciones de población y otras variables socioeconómicas.

Para efectos del proyecto MDT-UCR se utiliza el *software* TransCAD, el cual permite la modelación de demanda de transporte urbano integrada con Sistemas de Información Geográfica (SIG). TransCAD tiene incorporadas las cuatro etapas tradicionales de modelación de demanda de transporte urbano: generación de viajes, distribución de viajes, selección modal y asignación de flujos. Adicionalmente, es capaz de leer diferentes tipos de archivos asociados a SIG.

En términos de modelación, TransCAD cuenta con una interfaz gráfica que permite al usuario acceder a cada una de las etapas del proceso de modelación. Cada etapa tiene ecuaciones típicas asociadas, de manera que el usuario puede incorporar los coeficientes de las ecuaciones correspondientes o introducir los valores mediante una planilla de cálculo. Si no se tienen las ecuaciones calibradas, se pueden elegir, de tablas ya incorporadas al sistema TransCAD, valores típicos según las diferentes características demográficas de la región en estudio. Esto no se recomienda en el caso de la aplicación del modelo en Costa Rica, ya que estos valores están calibrados a partir de casos de estudio en Estados Unidos y no necesariamente coinciden con los patrones de movilidad en Costa Rica.

Para la modelación en el proyecto MDT-UCR se utilizó como punto de partida el esquema de zonas y la base de datos del PRUGAM, la cual incluía la red de carreteras con la respectiva caracterización de las vías a nivel de nodos y enlaces, rutas de transporte público con el trazado de los recorridos e información de los servicios provistos por ruta, así como las ecuaciones e

información socioeconómica necesarias para la modelación de demanda de transporte urbano.

## ASPECTOS TÉCNICOS DE LA MIGRACIÓN DEL MODELO DE DEMANDA DE TRANSPORTE URBANO DE LA GRAN ÁREA METROPOLITANA: DE EMME A TRANSCAD

### *Base de Datos en Emme2*

La base de datos de PRUGAM está compuesta por la red de carreteras, la información relacionada a los servicios de transporte público, datos demográficos, datos socioeconómicos y los métodos analíticos calibrados para las cuatro etapas de la modelación. Para la migración del modelo se incluyeron las 424 zonas internas y 14 zonas externas definidas en el Estudio de Oferta y Demanda de Transportes de la GAM incluido en PRUGAM (2007), para las cuales ya se tenían los valores demográficos, socioeconómicos y las variables de modelación asociadas a todos los pares origen-destino.

### **Red de Carreteras**

La red de carreteras se encontraba caracterizada a través de nodos y enlaces. Los nodos están georreferenciados y los enlaces se codifican a partir de la ubicación de los nodos. Los nodos y enlaces son una representación gráfica de las intersecciones y carreteras, respectivamente, sobre las cuales el modelo asigna los viajes en vehículo privado y transporte público. En los archivos de nodos y enlaces se incluyó información asociada a la longitud, velocidad permitida, capacidad de la vía, cantidad de carriles y sentido del flujo vehicular, información base que caracteriza las condiciones existentes de la red vial de la GAM.

### **Transporte Público**

En la base de datos se incluyeron 431 rutas de transporte público urbano de la GAM. La codificación de los sistemas de transporte público corresponde al trazado de cada ruta, generado a partir de los nodos de la red de carreteras, lo cual permite visualizar el recorrido de cada una de las rutas del sistema. Además del trazado, se incluyó el nombre y número de la ruta, la velocidad promedio de operación, la capacidad por tipo de vehículo, el tiempo de espera en parada y el período de arribo. Estos datos caracterizan las condiciones existentes de los servicios de transporte público masivo en la GAM, en modalidad autobús y tren.

### **Variables Socioeconómicas y para Modelación**

Se incluyeron en el modelo aquellas variables socioeconómicas consideradas significativas en la determinación de la demanda

de viajes urbanos, tales como el ingreso por hogar, la posesión vehicular, la población por zona, el tamaño del hogar y la proporción de personas por hogar que se dedican a los tres propósitos determinados para el modelo: trabajo, estudio y otros. Con base en estas variables se desarrollaron las ecuaciones de producción de viajes, así como las tasas de atracción para cada una de las zonas del modelo, según cada uno de los propósitos indicados.

Las ecuaciones de selección modal utilizaron como insumo la posesión vehicular, así como otras variables asociadas al costo de uso de los dos modos de transporte considerados (autobús y vehículo privado), tales como el costo y consumo de combustible y las tarifas por servicio de transporte público.

De manera complementaria, se determinaron variables específicas necesarias para la etapa de distribución de viajes. Esta etapa requiere de una matriz de impedancia o de tiempos de viaje y los factores de fricción, parámetros que permiten ajustar el modelo basado en costos asociados a cada par origen-destino, y usando como referencia la matriz de viajes observados según una encuesta de hogares. Estas variables se determinaron para cada uno de los tres propósitos de viaje analizados (trabajo, estudio, otros).

### *Migración de las Bases de Datos a TransCAD*

#### **Red de Carreteras y Transporte Público**

Las redes de carreteras y transporte público generadas a partir de PRUGAM, fueron introducidas al programa Emme2 mediante archivos de texto con formato ".in", siguiendo los protocolos establecidos del software para la codificación de estos archivos. TransCAD tiene incorporada una rutina que permite importar y procesar los archivos con extensión ".in", siempre que estos sigan los protocolos de codificación establecidos en Emme2. Sin embargo, es necesario que tanto los archivos de la red de carreteras, formada por nodos y enlaces, como el de transporte público, compuesto por rutas, se encuentren ubicados en una misma carpeta al momento de la migración. La red de transporte público estaba codificada a partir de los nodos y enlaces de la red de carreteras, por lo que no tenía coordenadas geográficas y no podía ser migrada de forma independiente.

Producto de la migración de los archivos base se generaron cuatro capas, las cuales incluyen los enlaces y nodos de la red de carreteras y las rutas y paradas de transporte, con sus respectivos atributos y características determinados en el PRUGAM. Dentro de la base de datos de PRUGAM, no se definió la ubicación exacta de las paradas de cada ruta de transporte público, por

lo que en el modelo cualquier nodo dentro del trazado de la ruta es considerado una parada. Para efectos de la modelación macroscópica de la demanda, esto no es considerado una limitación, ya que permite observar los patrones de flujo de viajes en transporte público sin considerar las restricciones de oferta del sistema, es decir, las paradas establecidas.

Se verificó la ubicación de los nodos y enlaces para asegurar que los centroides, nodos y tramos de carretera estuvieran correctamente ubicados y con la escala correspondiente. TransCAD facilitó la verificación de la ubicación de estos elementos, ya que tiene incorporada la opción de cargar mapas tales como *OpenStreetMap*, *Google Maps* o *Google Satellite* en conjunto con las capas de nodos y enlaces. Sin embargo, fue necesario modificar las coordenadas de los nodos del sistema proyectado Lambert Norte al sistema geográfico WGS84, de manera que la red generada calzara correctamente con la visualización de la aplicación *OpenStreetsMaps* utilizada por TransCAD.

Para validar la migración se verificó la cantidad de enlaces, velocidades, capacidades, cantidades de carriles y sus respectivas direcciones. Sin embargo, los parámetros de cantidad de enlaces y direcciones de flujo presentaron variaciones al ser migradas. La cantidad de enlaces en Emme2 es cercana a 25.000, pero al migrar la red a TransCAD se obtuvieron aproximadamente 13.000 enlaces. Esta condición surgió por los siguientes motivos:

- Emme2 requiere especificar como enlaces independientes cada sección de vía que presente características diferentes por sentido, ya sea cantidad de carriles, capacidad o velocidad.
- Para modelar en Emme2, los consultores decidieron contar cada sentido de un enlace como un enlace distinto, por lo que una vía de dos sentidos en Emme2, equivale a dos enlaces.
- TransCAD unifica automáticamente los enlaces que comparten la misma ubicación, y genera un único enlace bidireccional con la información correspondiente a cada sentido, aún cuando presenten características diferentes por sentido de circulación.

Este proceso automático de unificación generó la necesidad de revisar los valores de velocidad, cantidad de carriles y capacidad por sentido de cada enlace contra el indicador de dirección de TransCAD, de forma que la información del resto de variables fuera congruente con la direccionalidad de los enlaces y no generara errores al modelar.

Para confirmar que la red de transporte público fue migrada de forma correcta, se verificó tanto el código de ruta como los trazados, de forma que fueran congruentes con los recorridos de cada servicio. Además, se revisó que los atributos de las rutas fueran migrados de manera congruente con lo establecido en PRUGAM. En términos de la red de carreteras y de sistemas de transporte público, se comprobó que existe compatibilidad entre los sistemas Emme2 y TransCAD, y la migración fue realizada de manera satisfactoria.

### Variables Socioeconómicas y para Modelación

Cada una de las variables socioeconómicas utilizadas en el PRUGAM se encontraba en un archivo “.in” independiente. Sin embargo, se pudieron migrar todos los archivos de forma simultánea al guardarlos dentro de la misma carpeta. Las variables socioeconómicas utilizadas en el modelo de demanda, fueron:

- Población
- Personas por hogar
- Proporción trabajadores por hogar
- Proporción estudiantes por hogar
- Proporción otros por hogar
- Ingreso familiar
- Atracción relativa trabajadores por zona
- Atracción relativa estudiantes por zona
- Atracción relativa otros por zona
- Posesión vehicular por hogar

Estas variables se agruparon en un solo archivo, con forma de cuadro, al ser migradas a TransCAD, ya que la modelación en este software se facilita al referirse a un único archivo que contenga todas las variables.

Otras variables para modelación que se migraron con el mismo procedimiento, fueron:

- Matriz de tiempos de viaje entre pares origen - destino.
- Tabla de factores de fricción por propósito.
- Matriz de relación de costo percibido de viaje por transporte público entre costo percibido de viaje por vehículo privado.

Estas variables fueron almacenadas como matrices o cuadros según corresponde. La posesión vehicular fue utilizada como

vector en Emme2; sin embargo, en TransCAD se requiere en forma de matriz, por lo que fue convertida a dicho formato manteniendo el valor de posesión vehicular fijo para los orígenes, pues ahí es donde se producen los viajes.

### Migración de Relaciones Analíticas del Modelo de Demanda de Transporte Urbano

Para migrar el modelo de demanda de transporte urbano de la plataforma Emme2 a TransCAD hubo que recurrir a procedimientos adicionales a la migración directa de los archivos “.in”. Las consideraciones y procesos realizados por etapa, así como la generación del modelo en lenguaje en lote (*batch*), se detallan a continuación.

#### Generación de Viajes

Producto de la incorporación de los archivos “.in”, se tenían las variables necesarias para calcular las producciones de viajes para los tres propósitos de viaje (trabajo, estudio, otros) con base en las ecuaciones del PRUGAM. Sin embargo, las ecuaciones de generación establecidas por defecto en TransCAD consideran únicamente ecuaciones logit binario o de regresión lineal, mientras que las ecuaciones de generación determinadas en PRUGAM no siguen ninguna de estas dos formas, por lo que no podían ser determinadas a través de la interfaz de producciones. Por esta razón, fue necesario realizar el cómputo de producciones mediante la planilla de cálculo que forma parte de TransCAD, cuya interfaz es similar a la de Excel.

En las ecuaciones 1, 2 y 3 se muestra el cálculo de producción de viajes por zona y para cada propósito (trabajo, estudio y otros), respectivamente.

$$P_t = \frac{p_a}{h} * (0,35983 * T_h + 0,04827 * I) \quad r^2 = 0,54 \quad (1)$$

$$P_e = \frac{p_a}{h} * (0,16222 * E_h + 0,02797 * I) \quad r^2 = 0,54 \quad (2)$$

$$P_o = \frac{p_a}{h} * (0,01112 * h + 0,01622 * I) \quad r^2 = 0,05 \quad (3)$$

donde:

$P_t$ : producción de viajes con propósito trabajo [viajes/hogar en 2 horas pico a.m.]

$P_e$ : producción de viajes con propósito estudio [viajes/hogar en 2 horas pico a.m.]

$P_o$ : producción de viajes con otros propósitos [viajes/hogar en 2 horas pico a.m.]

$P_a$ : población por zona para el año a [personas]

$h$ : tamaño del hogar [personas/hogar]

$T_h$ : trabajadores en el hogar [número de trabajadores/hogar]

$E_h$ : estudiantes en el hogar [número de estudiantes/hogar]

$I$ : ingreso familiar estandarizado [ingreso familiar/salario mínimo vigente]

Las atracciones relativas de viajes por cada zona se anexaron al cuadro de viajes calculados con base en las ecuaciones de producción, ya que TransCAD requiere que ambas se encuentren en el mismo cuadro con el fin de efectuar el proceso de balanceo. Dicho proceso se realizó manteniendo las producciones fijas, debido a que hay más confiabilidad en la estimación de las producciones que en la estimación de las atracciones. Adicionalmente, las ecuaciones de producción dan como resultado viajes de personas, mientras que las tasas de atracción se consideraron en términos de proporciones, por lo que debían ser estandarizadas en términos de viajes de personas. Como resultado del balanceo se obtienen los viajes atraídos en cada una de las zonas consideradas en el estudio.

#### Distribución de Viajes

TransCAD permite replicar el modelo de gravedad generado en el PRUGAM, acotado a producciones. La interfaz del *software* permite establecer la matriz de tiempos de viajes como el costo generalizado entre los pares origen-destino e introducir los valores de impedancia en formato de cuadro, generados a partir de la función de impedancia por propósito que se ilustra en el gráfico de la Figura 1. Esta figura muestra el comportamiento de las funciones de impedancia por propósito. Dado que para la modelación en Emme2 se contaba con los archivos “.in” con los factores de fricción discretos, por propósito y en intervalos de un minuto, esta información pudo ser incorporada directamente al modelo en TransCAD a través del proceso de lectura de estos archivos, descrito anteriormente.

En la ecuación 4 se muestra el modelo de gravedad utilizado para la etapa de distribución de viajes.

$$T_{ij}^p = P_i^p \frac{A_j^p f(C_{ij})}{\sum_{k=1}^n A_k^p f(C_{ik})} \quad (4)$$

donde:

$T_{ij}^p$  : número de viajes de la zona i a la j para el propósito p

$P_i^p$  : número de viajes producidos en la zona i para el propósito p

$A_j^p$  : número de viajes atraídos en la zona j para el propósito p

$C_{ij}$  : costo generalizado de viajar entre las zonas ij

$f(C_{ij})$  : función de impedancia para viajar entre las zonas ij

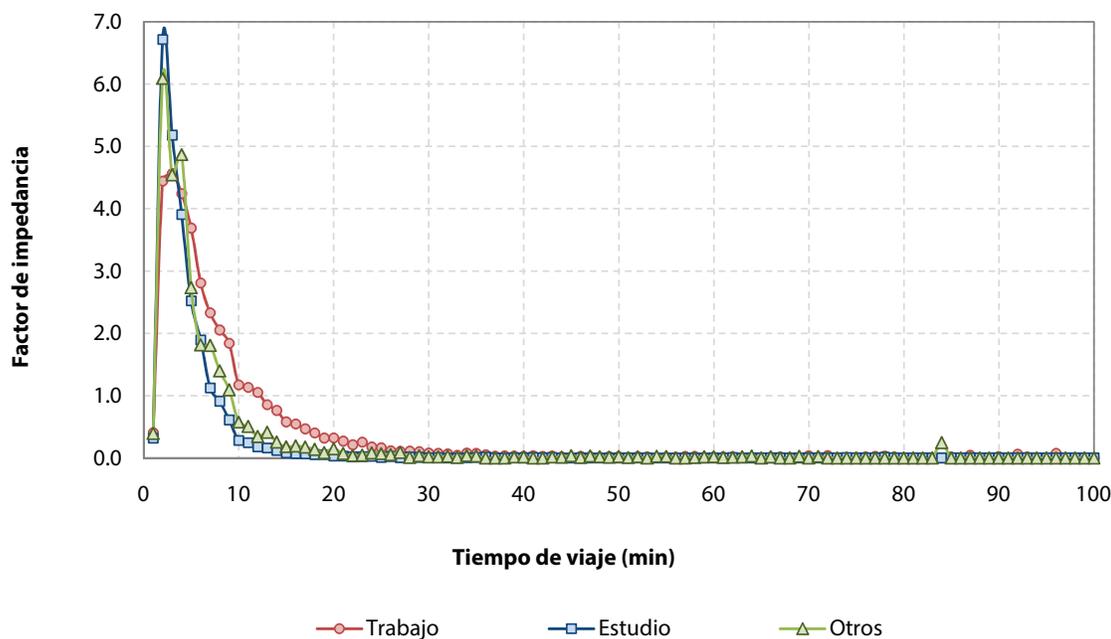


Figura 1. Funciones de impedancia por propósito de viaje (L.C.R. Logística S.A., 2007)

### Selección Modal

Se efectuó la selección modal a partir del modelo Logit Multinomial utilizado en el PRUGAM. El modelo logit utilizado requiere de dos insumos: la relación de costo percibido de viajar en transporte público con respecto al vehículo privado, y la posesión vehicular por zona, ambos en forma matricial.

En las ecuaciones 5, 6 y 7 se muestran las formulaciones Logit de selección modal por propósito de viaje.

$$P(TP)_{trabajo} = \frac{e^{-11,32613X_1 - 11,90138X_2 + 13,12483}}{1 + e^{-11,32613X_1 - 11,90138X_2 + 13,12483}} \quad (5)$$

$$P(TP)_{estudio} = \frac{e^{-24,24499X_1 - 5,63014X_2 + 18,25250}}{1 + e^{-24,24499X_1 - 5,63014X_2 + 18,25250}} \quad (6)$$

$$P(TP)_{otros} = \frac{e^{-14,49212 - 4,85766X_2 + 13,90893}}{1 + e^{-14,49212X_1 - 4,85766X_2 + 13,90893}} \quad (7)$$

donde:

$P$ : probabilidad de escogencia del transporte público

$X_1$ : relación entre los costos percibidos de viaje por transporte público con respecto al vehículo privado

$X_2$ : posesión vehicular de la zona de origen del viaje

$1 - P(TP)$ : probabilidad de escogencia del vehículo privado

### Asignación de Viajes en Vehículo Privado

Para efectuar la asignación de viajes en vehículo privado fue necesario contar con la red de carreteras migrada y las propiedades por enlace: cantidad de carriles, velocidad y capacidad por sentido. Las características de la vía determinan los parámetros alfa y beta utilizados en la función cónica que permite simular el congestionamiento en las vías.

Para las asignaciones de flujos en Emme2, se utilizó una función cónica modificada, de manera que al superar relaciones volumen/

capacidad de 1,05, se desincentivara el uso de rutas congestionadas por medio de la incorporación de una asíntota en la función. TransCAD, sin embargo, tiene incorporadas diferentes bibliotecas de enlace dinámico (DLL) para la asignación de flujos, las cuales no son fácilmente modificables. Por lo tanto, se mantuvieron las funciones cónicas originales, sin la incorporación de la asíntota utilizada en Emme2.

El método de asignación utilizado en Emme2, Equilibrio del Usuario, es similar al que se encuentra disponible en TransCAD, Equilibrio del Usuario Conjugado, de tal forma que se lograron replicar los volúmenes asignados en el modelo original. La principal diferencia entre ambos métodos consiste en que, según Caliper (2015), el método Equilibrio del Usuario Conjugado requiere menor tiempo de procesamiento para alcanzar la convergencia. Por lo tanto, a pesar de que no fue posible modificar la función cónica, esto no representó un inconveniente.

### Asignación de Viajes en Transporte Público

En la asignación de viajes en transporte público se utilizó la información asociada a las características operativas de las rutas de transporte público masivo (autobús y tren). Emme2 utiliza el método de Estrategias Óptimas, mientras que TransCAD utiliza el método de *Equilibrium Pathfinder*. La principal diferencia entre ambos métodos es que Estrategias Óptimas optimiza en términos del tiempo de viaje, por lo que no considera las tarifas para encontrar la ruta óptima del usuario, mientras que el método de *Equilibrium Pathfinder* optimiza en términos del costo generalizado y sí considera las tarifas. Sin embargo, esto no quiere decir que el modelo de PRUGAM establecido en Emme2 no considerara las tarifas dentro de su modelación, sino que se debió hacer un procesamiento adicional de los valores de tarifa para que se incluyeran como una demora adicional en los tiempos de viaje. Esta consideración adicional no es requerida en TransCAD y se pueden introducir las tarifas como una variable adicional del modelo.

Adicional al método utilizado para la asignación, se encontraron tres diferencias principales entre la modelación en Emme2 y TransCAD:

a) Los tiempos de viaje para cada ruta de transporte público son calculados automáticamente, con base en la longitud y velocidad de operación por enlace en Emme2. Sin embargo, TransCAD no calcula esos tiempos por defecto, por lo que es necesario calcularlos de previo a la asignación. Esto se efectúa mediante la planilla de cálculo de TransCAD, la cual permite determinar el tiempo de viaje para cada velocidad diferenciada por enlace.

b) Las diferentes rutas de transporte público se agrupan con base en su velocidad de operación y cada grupo es considerado como un modo de transporte diferente. Se genera una tabla de modos, codificada con base en las indicaciones de TransCAD. Esta tabla es necesaria para considerar diferentes modos de viaje (tren y autobús) y velocidades distintas dentro de un mismo modo (rutas urbanas, rutas interurbanas, rutas expresas). Además, su función principal es asignar pesos y factores diferenciados por modo en la modelación, lo cual no era posible con Emme2.

c) Emme2 considera la capacidad del transporte público por modo (autobús o tren) y, según la frecuencia del servicio, estima la capacidad horaria. Por otra parte, TransCAD no calcula automáticamente el valor de capacidad horaria, motivo por el cual, previo a la asignación, mediante la planilla de cálculo fue necesario estimar la capacidad horaria para cada ruta de transporte público.

Debido a las diferencias mencionadas, la asignación de transporte público requiere de calibración adicional, la cual no fue necesaria en la asignación de vehículo privado. Por esta razón, los valores obtenidos de la asignación en Emme2 no pueden ser comparados de forma directa con los obtenidos en TransCAD.

### Modelo en lote (*Batch*)

El proceso de modelación se puede efectuar tanto a través de la interfaz gráfica de TransCAD, como por medio de la generación de archivos en lote. Al igual que se había realizado con Emme 2 desde el 2007, en 2017 se programaron rutinas en lote (*batch*) en TransCAD, para así automatizar el análisis de distintos escenarios, de manera que se redujera la interacción del usuario con el sistema y se agilizará el proceso de generación de resultados. Es importante señalar que los códigos en Emme2 son diferentes a los de TransCAD, pues cada sistema maneja sus propios protocolos y formatos particulares, por lo que no son compatibles entre sí.

En Emme2, el código para recrear el modelo tuvo que ser generado en su totalidad a partir de la digitación de archivos de texto. Por otro lado, TransCAD permite la grabación de macros para cada etapa del modelo, realizadas a través de la interfaz gráfica, los cuales pueden ser modificados y procesados posteriormente.

A pesar de la facilidad de generar el código por medio de los macros en TransCAD, fue necesario programar algunos procesos intermedios de preparación de la base de datos. Estos procesos no podían ser generados a partir de la grabación de

macros, ya que no corresponden a procedimientos asociados a las cuatro etapas de modelación de demanda de transporte urbano. Esto generó la necesidad de programar un paso intermedio entre la selección modal y la asignación de viajes, el cual permitiera agregar los viajes por propósito según el modo, así como agrupar los resultados de la asignación de vehículos privados de las zonas internas y externas, ya que éstos se generan de forma independiente. Por otro lado, y como se mencionó anteriormente, el proceso preestablecido por TransCAD para la etapa de generación de viajes no pudo ser adecuado para introducir las ecuaciones propias de producción de viajes, por lo que también tuvo que ser desarrollado de manera independiente de los macros.

A pesar de lo anterior, por medio del lenguaje en lote se pudo reproducir el modelo de cuatro etapas en su totalidad, con

resultados satisfactorios para cada una de las etapas. El código generado en lote puede ser modificado para la evaluación de diferentes escenarios de asignación, tanto por cambios en la red de carreteras como en la red de transporte público. También puede ser modificado para reflejar variaciones en cualquiera de los parámetros asociados a las primeras tres etapas del modelo. Adicionalmente, permite las corridas de diferentes escenarios y años horizonte de manera consecutiva, sin necesidad de intervenciones adicionales.

### Resumen de Generalidades del Proceso de Migración

En el cuadro 1 se resumen generalidades del proceso de migración del modelo, enfocado en la implementación de la metodología para aplicar los algoritmos de cada etapa y comparando los programas Emme2 y TransCAD 7.0.

Cuadro 1. Comparación por etapa del proceso de migración del modelo de demanda de transporte urbano de la GAM en Emme2 y TransCAD 7.0

| Etapa                                      | Software  |  |
|--|---|--|
|  | Emme2   | TransCAD 7.0   |
| Generación de viajes                       | No cuenta con rutinas preelaboradas, sin embargo, mediante arreglos matriciales y lenguaje de macros permite su implementación.                                     | Generado desde la interfaz gráfica en la planilla de cálculo o mediante programación en lote ( <i>batch</i> ).   |
| Balanceo de viajes                         |   |  |
| Distribución de viajes                     | Se utiliza el método de Gravedad acotado en las producciones, este fue implementado mediante la programación en macros, ya que no cuenta con rutinas preelaboradas. | Se implementó desde el menú correspondiente al método de Gravedad y se grabó el macro asociado al método para correrlo como <i>batch</i> .                                 |
| Selección modal                            | El método Logit Multinomial fue implementado mediante programación en macros, ya que no cuenta con rutinas preelaboradas.   | Se ejecutó el método Logit Multinomial desde el menú en la interfaz gráfica y se grabó el macro asociado al método para correrlo en lote.                                  |
| Asignación de viajes en vehículo privado   | El método utilizado fue Equilibrio del Usuario, el cual se implementó desde la línea de comandos y mediante programación en macros.                                 | El método utilizado fue Equilibrio del Usuario Conjugado, el cual se ejecutó desde la interfaz gráfica mediante los menús predeterminados y mediante programación en lote. |
| Asignación de viajes en transporte público | El método utilizado fue Estrategias Óptimas, el cual se implementó desde la línea de comandos y mediante programación en macros.                                    | El método utilizado fue Equilibrium Pathfinder, el cual se ejecutó desde la interfaz gráfica mediante los menús predeterminados y mediante programación en lote.           |

## CONCLUSIONES

- i. La base de datos completa de PRUGAM pudo migrarse de Emme2 a TransCAD, mediante diversos ajustes de forma, pero no de contenido en las variables, con excepción de la función cónica modificada, la cual tuvo que ser migrada en su forma original (sin asíntotas).
- ii. Los métodos presentes en TransCAD son similares a los utilizados en Emme2 para el modelo de PRUGAM, por lo que el modelo de cuatro etapas del PRUGAM se pudo reproducir de manera satisfactoria en la plataforma TransCAD.
- iii. Hasta que no se realice una nueva encuesta de hogares en la GAM, debidamente diseñada y aplicada, la base de datos del PRUGAM representa un insumo de gran valor para realizar las modelaciones de demanda de transporte urbano en la GAM.
- iv. La migración de la base de datos de la red de carreteras, transporte público, información demográfica y

socioeconómica, desde Emme2 hacia TransCAD, se realizó de forma considerablemente expedita por las facilidades de TransCAD para importar archivos en formato “.in”, correspondientes a Emme2.

- v. TransCAD permite asignar pesos y factores diferenciados por modo para la asignación de viajes en transporte público, lo que permite modelar, de manera más realista, las diferencias percibidas por los usuarios entre los viajes en diferentes rutas de autobús y en tren. Por el contrario, Emme2 únicamente permitía definir parámetros globales para todas las rutas de transporte público.
- vi. La interfaz gráfica de TransCAD 7.0 permite que usuarios inexpertos se familiaricen con programas de modelación de demanda. Por otra parte, mediante archivos en lote, los usuarios más experimentados pueden personalizar las diferentes fases del modelo de cuatro etapas, esto gracias a las capacidades de programación en lote existentes en TransCAD.

A la fecha de presentación del artículo, los autores se encontraban en el proceso de recopilación de datos de campo (aforos vehiculares y volúmenes movilizados en transporte público) para iniciar con la calibración y actualización del modelo. Con base en esa información se procede a verificar que los valores correspondientes a la asignación en vehículo privado reflejan lo que ocurre en la realidad y se calibran los pesos asociados a los diferentes factores involucrados en la modelación de transporte público (tarifa, tiempo de espera, tiempo de viaje, etc.).

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean manifestar su profundo agradecimiento a la Unidad de Seguridad Vial y Transportes del Programa de Infraestructura del Transporte (LanammeUCR) por su colaboración general, así como por facilitar el equipo necesario y las condiciones logísticas para el desarrollo del proyecto de investigación “Modelo de Demanda de Transporte Urbano en la GAM” (MDT-UCR).

## REFERENCIAS

1. L.C.R. Logística S.A. (2007). *Estudio de Oferta y Demanda de Transportes de la GAM. Tomo 1 Plan Regional Urbano de la Gran Área Metropolitana: Componente Movilidad y Transporte*. Informe Final. Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos. San José, Costa Rica.
2. Caliper, (2015). *Manual de Usuario: Modelación de Demanda de Transporte con TransCAD vs 7.0*. Estados Unidos.





UCR

---