



## 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.

Políticas de Uso:



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



## SUSCRIPCIÓN

Ingrese sus datos personales en el sitio oficial de la revista:

<http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/vial>

# EN ESTA EDICIÓN

## MÉXICO

### **INFLUENCIA DE VARIABLES DE DISEÑO EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA BASE ESTABILIZADA CON ASFALTO ESPUMADO**

*INFLUENCE OF DESIGN VARIABLES ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF A STABILIZED BASE WITH FOAMED ASPHALT*

Fidel García Hernández

Horacio Delgado Alamilla

Domingo Eduardo Campos Hernández

05

## COSTA RICA

### **CRITERIOS AMBIENTALES Y SOCIOECONÓMICOS PARA PRIORIZAR INVERSIONES EN LA RED VIAL DE COSTA RICA**

*ENVIRONMENTAL AND SOCIOECONOMIC CRITERIA TO PRIORITIZE INVESTMENTS IN THE ROAD NETWORK OF COSTA RICA*

Rodrigo Arias García

José David Rodríguez Morera

12

## COSTA RICA

### **CONCEPTUALIZACIÓN DEL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES PARA LA EVALUACIÓN DE SUPERFICIES DE PAVIMENTO EN COSTA RICA**

*CONCEPTUALIZATION OF THE DIGITAL IMAGE PROCESSING FOR THE ASSESSMENT OF PAVEMENT SURFACES IN COSTA RICA*

Luis Diego Herra Gómez

20

## COSTA RICA

### **CONTEXTO DE LAS ESPECIFICACIONES DE REGULARIDAD SUPERFICIAL EN PROYECTOS DE REHABILITACIÓN COSTARRICENSE**

*SURFACE ROUGHNESS SPECIFICATIONS CONTEXT IN COSTA RICAN REHABILITATION PROJECTS*

Verónica Solís Salas

27

## COSTA RICA

### **CLASIFICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE RIESGOS EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA DESARROLLADOS POR MEDIO DE ALIANZAS PÚBLICO-PRIVADAS (APP) EN COSTA RICA**

*RISK CLASSIFICATION AND ALLOCATION IN INFRASTRUCTURE PROJECTS DEVELOPPED THROUGH PUBLIC PRIVATE PARTNERSHIPS (PPP) IN COSTA RICA*

Ricardo José Chacón Vega

37

ESTA REVISTA ES PRODUCIDA POR:



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

LanammeUCR

PITRA

Programa de  
Infraestructura del  
Transporte

ESTA REVISTA ESTÁ INDEXADA EN:



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

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

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

El presente número de la revista comprende artículos enfocados en el diseño de materiales, mantenimiento de pavimentos y economía. El primer artículo titulado **Influencia de variables de diseño en las propiedades mecánicas de una base estabilizada con asfalto espumado** se enfoca en la evaluación de las propiedades mecánicas de este material a través de mediciones de resistencia a la tensión indirecta, ángulo de fricción interna y cohesión y módulo resiliente. Los resultados muestran las bondades de la cal en las propiedades mecánicas de la base estabilizada.

El artículo **Criterios ambientales y socioeconómicos para priorizar inversiones en la red vial de Costa Rica** propone la introducción de índices ambientales, económicos y sociales como criterios de priorización, tales como el Índice de Progreso Social, el Índice de Competitividad Cantonal y emisión de CO<sub>2</sub>. Los resultados demuestran que es factible elaborar planes de inversión de largo plazo a partir de los insumos disponibles en Costa Rica, en donde se observa que los aumentos de presupuesto tienen un mayor efecto en la rapidez con la que se alcanza una mejor condición de los pavimentos que en la condición en sí. Al mismo tiempo se identifica que la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> tendrá un impacto en la condición de la red pues las intervenciones de reconstrucción son las que requieren actividades de mayor emisión de contaminantes.

El tercer artículo llamado **Conceptualización del procesamiento digital de imágenes para la evaluación de superficies de pavimento en Costa Rica** propone la implementación de procesos automatizados que permitan generar un inventario de necesidades de mantenimiento preventivo de una manera ágil, objetiva y segura a través del procesamiento digital de imágenes. De este modo, el registro digital de imágenes podría considerarse como un insumo muy valioso para mejorar la eficiencia en cuanto a la inversión ejecutada en un determinado sistema de carreteras.

En la misma línea del artículo anterior, el artículo **Contexto de las especificaciones de regularidad superficial en proyectos de rehabilitación costarricense** presenta un análisis de la aplicabilidad de las especificaciones establecidas en el *Manual de especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes de Costa Rica* (CR 2010) y algunos requisitos de los carteles de licitación para nueve proyectos en Costa Rica intervenidos con sobrecapa asfáltica en los últimos dos años. La investigación permite extender recomendaciones para la mejora de las especificaciones actuales.

Finalmente, el artículo **Clasificación y distribución de riesgos en proyectos de infraestructura desarrollados por medio de alianzas público-privadas (APP) en Costa Rica** enfatiza en la necesidad de considerar la identificación, clasificación y distribución de riesgos como el fundamento de una buena administración de proyectos Alianzas Público-Privadas (APP), en el tanto el autor considera que esta distribución es usualmente mal ejecutada tanto en Costa Rica como en el mundo. De esta manera, este artículo pretende proveer a los profesionales, políticos, inversionistas e investigadores un mejor entendimiento de la distribución de riesgos en proyectos de infraestructura pública desarrollados mediante APP.

**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

# Influencia de variables de diseño en las propiedades mecánicas de una base estabilizada con asfalto espumado

*Influence of design variables on the mechanical properties of a stabilized base with foamed asphalt*

**Fidel García Hernández**

Universidad Autónoma de Chihuahua  
fidel@dicym.uson.mx

**Domingo Eduardo Campos Hernández**

Universidad Autónoma de Querétaro  
domingoeduardoc@gmail.com

**Horacio Delgado Alamilla**

Instituto Mexicano del Transporte  
hdelgado@imt.mx

**Fecha de recepción:** 22 de febrero de 2018 / **Fecha de aprobación:** 26 de abril de 2018

## RESUMEN

La construcción y conservación de nuevas carreteras requiere de muchos recursos tanto naturales como económicos, ya que el reciclado de materiales es una de las técnicas más utilizadas en la actualidad, por lo cual es importante conocer las propiedades mecánicas del tipo de aplicación a utilizar.

El presente trabajo se enfoca en la evaluación de las propiedades mecánicas de una base estabilizada con asfalto espumado (reciclado en frío). El estudio analizó la influencia de dos variables de diseño como son el tipo de filler activo (cal y cemento portland) y el contenido de asfalto espumado (2.2 a 2.4%). Los parámetros utilizados en la evaluación fueron la resistencia a la tensión indirecta, el ángulo de fricción interna y cohesión (ensayo triaxial) y el módulo resiliente.

Los resultados muestran que la inclusión de cal mejora las propiedades mecánicas de la base estabilizada. En lo referente a los parámetros mecánicos se observó que las mezclas estabilizadas con asfalto espumado presentan un aumento de su resistencia en comparación con una base granular tradicional, siendo la pérdida de cohesión el modo de falla de este tipo de estabilización.

**PALABRAS CLAVES:** Asfalto espumado, tensión indirecta, base estabilizada, ensayo triaxial.

## ABSTRACT

*The construction and conservation of new roads requires many natural and economic resources, so the recycling is one of the most used techniques currently, so it is important to understand the mechanical properties of the type of application to be used.*

*The present paper focuses on the evaluation of the mechanical properties of a stabilized base with foamed asphalt (cold recycled). The study analyzed the influence of two design variables such as the type of active filler (lime and cement) and the content of foamed asphalt (2.2 to 2.4%). The parameters used in the evaluation were indirect tensile strength, friction angle and cohesion (triaxial test) and resilient modulus (MR).*

*The results indicate that the addition of lime improves the mechanical properties of the stabilized base. Regarding mechanical parameters, it was observed that the stabilized mixtures with foamed asphalt show an increase in their resistance compared to a granular base, being the loss of cohesion the failure mode of this type of stabilization.*

**KEY WORDS:** Foamed asphalt, tensile strength, stabilized bases, triaxial test, resilience module.

## INTRODUCCIÓN

El asfalto espumado se realiza mediante la inyección de una pequeña cantidad de agua fría con aire comprimido sobre asfalto caliente, el intercambio de calor espontáneo deriva en un fenómeno físico que espuma al asfalto. Este proceso altera temporalmente las propiedades físicas del asfalto, ya que el asfalto caliente entra en contacto con el agua fría, provocando que este último se convierta en vapor, el cual es atrapado por miles de pequeñas burbujas de asfalto. Este proceso reduce considerablemente la viscosidad del asfalto y aumenta sus propiedades adherentes lo que posibilita el mezclado con materiales fríos y húmedos.

Se ha observado que el asfalto espumado se distribuye principalmente hacia las partículas finas, por lo que; usualmente el contenido de asfalto se utiliza en el rango del 2-5% y se encuentra en función del contenido de finos del material a estabilizar (Marek y Anna 2013), (Saleh 2007) y al utilizar una alta cantidad de asfalto propicia una mayor flexibilidad en las mezclas, pero una menor resistencia a la deformación permanente (Jenkins et al., 2007).

En lo referente a la estructura granulométrica, los finos son necesarios para una mejor dispersión en una estabilización con asfalto espumado; sin embargo, el exceso de ellos reduce la permeabilidad y la capacidad de drenaje, lo cual disminuye las propiedades de una base hidráulica (Dal Ben y Jenkins 2014). De igual forma, al elaborar una estabilización con asfalto

espumado es crucial vigilar los contenidos de humedad de los materiales, ya que los agregados húmedos propician a una inadecuada dispersión del asfalto y por consiguiente mala unión de estos; lo que conlleva a un impacto en cuanto al daño inducido por humedad, así como una reducción de la durabilidad a largo plazo (Abbas et al., 2013).

La estabilización mediante asfalto espumado tiene como propósito construir una base de alta calidad mediante la reutilización de los materiales existentes en la estructura del pavimento. El asfalto espumado crea una unión discontinua en el material granular, mejorando tanto su cohesión como su susceptibilidad a la humedad (Wirtgen, 2012), con respecto a las propiedades mecánicas de este tipo de mezclas los manuales de diseño de Wirtgen y Australian Roads (Wirtgen, 2012), (Marek y Anna 2013), mencionan que uno de los beneficios que se obtiene es el incremento de la Cohesión (C) sin afectar significativamente el Ángulo de Fricción ( $\phi$ ). En lo referente a la tensión indirecta en condición seca y saturada se ha concluido por Marek y Anna (2013) que al incrementar el contenido de asfalto espumado la mezcla es menos susceptible a la humedad.

## DISEÑO DE UNA BASE ESTABILIZADA CON ASFALTO ESPUMADO

El diseño de una base estabilizada con asfalto espumado fue realizado siguiendo el esquema descrito en la Figura 1.

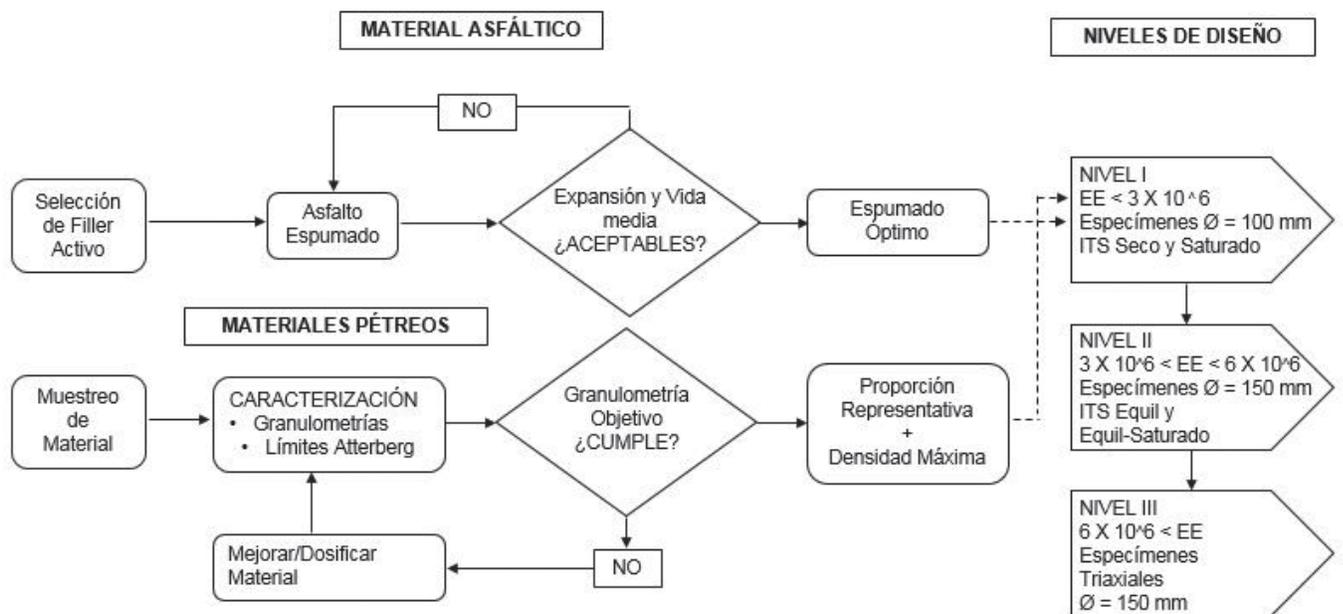


Figura 1. Diagrama de flujo para bases estabilizadas con asfalto espumado

## Caracterización Del Material

El presente estudio fue realizado con un material recuperado combinado de Carpeta asfáltica-Base granular (50% RAP y 50% Base hidráulica), el cual fue mezclado con un material de Banco (material virgen) con calidad de base hidráulica de Tamaño Nominal (TN) de 1 1/2". El material de RAP + BASE tuvo un Límite Líquido (LL) de 23.6% y un Índice de Plasticidad (IP) de 5.2%. Para el caso del material de banco los valores fueron inapreciables, por lo cual el material no necesita un pretratamiento inicial (adicción de cal). El material asfáltico empleado en el estudio fue clasificado como un PG 64-16, al cual no se le adicionó ningún aditivo o polímero.

Estos materiales fueron mezclados en una proporción de 80 % de material RAP + BASE y 20% de material de Banco. La granulometría obtenida al igual que los límites granulométricos se presentan en la Figura 2, es importante mencionar que son los límites granulométricos los que definen el máximo porcentaje de RAP a utilizar, debido a que la granulometría que se obtiene con el fresado generalmente no cumple con la especificación, por lo cual se tiene que utilizar material pétreo de aporte.

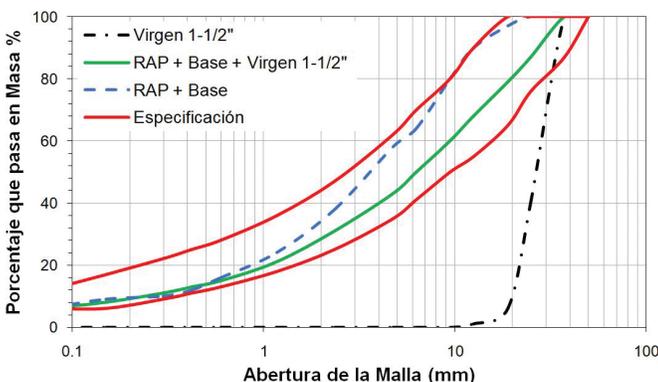


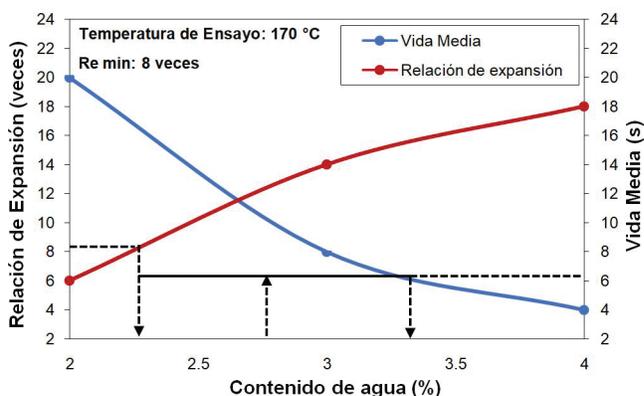
Figura 2. Límites granulométricos para bases espumadas.

Después del mezclado se determinó el Peso Volumétrico Seco Máximo (PVSM,  $\gamma_d$ ) mediante la norma AASHTO T-180. La compactación se realiza en cinco (5) capas, aplicando cincuenta y seis (56) golpes por capa, con un pisón de 4.54 kg y una altura de caída de 45.7 cm en un molde de 152.4 mm de diámetro interior. Los resultados obtenidos fueron de 8% de contenido óptimo de humedad y un PVSM de 2080 kg/m<sup>3</sup>.

## Propiedades Espumantes Del Asfalto

Este punto tiene como objetivo determinar el porcentaje de agua, así como la temperatura óptima del asfalto que se requiere para producir las mejores propiedades espumantes de un asfalto,

con el propósito de obtener una mayor área de contacto y un mejor revestimiento de los agregados. La determinación se realiza mediante dos parámetros: Relación de expansión  $Re$  (medida de la viscosidad del asfalto espumado) y vida media  $\tau_{1/2}$  (medida de la estabilidad del asfalto espumado). Para encontrar los valores de  $Re$  y  $\tau_{1/2}$ , se procede a realizar un barrido de temperaturas (160° C, 170 °C y 180 °C) y de contenidos de agua (2%, 3% y 4%). La Figura 3 presenta la evaluación a 170 °C (temperatura óptima para el espumado), así como los requerimientos de aceptación y los valores obtenidos para cada temperatura.



TEMPERATURA DE PRUEBA (°C)	CANTIDAD DE AGUA (%)	VIDA MEDIA (SEG)	RELACIÓN DE EXPANSIÓN (VECES)
160	2.7	8.5	9.8
170	2.7	10.5	12.2
180	2.7	8.5	9.5

Figura 3. Determinación de propiedades espumantes a 170°C y valores obtenidos a 3 temperaturas

## DISEÑO DE LA MEZCLA DE MATERIALES (FÓRMULA DE TRABAJO)

La metodología para el diseño de la base estabilizada con asfalto espumado considera tres niveles de diseño, los cuales están definidos de acuerdo con el tránsito al cual va a estar sometido el pavimento asfáltico.

### Nivel I: Necesidad De Filler Activo

El presente nivel de diseño tiene como objetivo establecer si la mezcla de materiales (Base hidráulica - RAP) necesita la inclusión de un filler activo. Para esta determinación se realizará un ensayo de susceptibilidad a la humedad mediante el ensayo de Tensile Strength Ratio (TSR, por sus siglas en inglés). Los dos fillers activos utilizados para este tipo de material es la cal y el cemento Portland en porcentajes de 1%. Por lo cual, se realiza

una evaluación con cada una de las tres variables (Sin filler, 1% de cal y 1% de cemento). Todas las mezclas fueron realizadas con 2.4% de asfalto espumado, el cual es el valor recomendado por la metodología para granulometrías con <50% de material que pasa la malla de 4.75 mm con porcentajes entre 7 y 10 de material que pasa la malla de 0.075 mm (Wirtgen, 2012). Las probetas fueron elaboradas a un PVSM de 2080 kg/m<sup>3</sup> y una humedad de 8%.

La mezcla sin filler activo obtuvo un valor de TSR en seco de 219 kPa y no obtuvo resistencia en condición saturada, por lo cual no cumple con los requisitos mínimos. En la evaluación en seco de las dos mezclas con filler activo, presentada en la Figura 4, se puede observar que ambas cumplen con el requisito mínimo establecido en la metodología. Sin embargo, en condición saturada la mezcla con cemento portland pierde considerablemente su resistencia, por lo cual se considera inadecuada. La mezcla de materiales con cal también tuvo una reducción de su resistencia en condición saturada pero menos significativa, por lo cual se considera que este filler activo es el más adecuado para la mezcla de materiales propuesta.

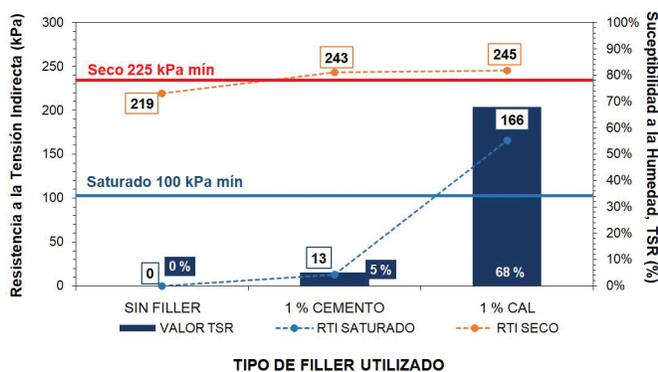


Figura 4. Susceptibilidad a la humedad para diferentes tipos de fillers activos, Nivel I

### Nivel II: Contenido De Asfalto Espumado

En este nivel, se pretende determinar el contenido óptimo de asfalto espumado que requiere el material. Una vez seleccionada una de las tres variantes analizadas en el Nivel I, se realiza un barrido de contenidos de asfalto espumado (4 porcentajes), determinando el mejor desempeño mediante el ensayo de susceptibilidad a la humedad. Las probetas fueron elaboradas a un PVSM de 2080 kg/m<sup>3</sup> y una humedad de 8%. Los resultados presentados en la Figura 5 indican que solo la mezcla con 2.2 de asfalto espumado no cumple con la especificación establecida en la metodología. Se considera que la dispersión de los resultados es de 5%, por lo cual el valor óptimo de espumado será 2.4% (Primer valor aceptable \* 1.05). Esta evaluación determina la fórmula de trabajo de la base hidráulica estabilizada con asfalto espumado.

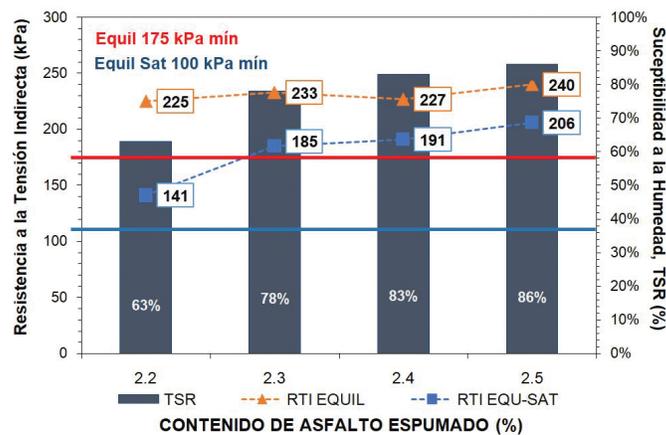


Figura 5. Contenido óptimo de asfalto con 1% de cal, Nivel II.

De estas dos primeras evaluaciones se observa que a pesar de que todos los valores de  $RTI_{SECO}/RTI_{EQUIL}$  son de magnitudes similares, las propiedades en condición saturada son diferentes. Por lo cual, se puede concluir que el indicador clave en el diseño Nivel I y II es la resistencia de la mezcla condición saturada, lo cual se debe tomar en cuenta tanto en el diseño como en el control de calidad de la base estabilizada con asfalto espumado, ya que uno de los principios del diseño es asegurar la cohesión de la mezcla con asfalto espumado en condiciones de humedad.

### Nivel III: Propiedades Mecánicas

Este nivel tiene como objetivo evaluar las propiedades mecánicas de la mezcla de materiales definida en los dos niveles previos. Los parámetros por evaluar son el valor de cohesión y el ángulo de fricción interna, los cuales serán determinados mediante un ensayo de triaxial. Para esta evaluación se fabricaron 8 especímenes de ensayo y se evaluaron cuatro condiciones de confinamiento (0 kPa, 50 kPa, 100 kPa y 200 kPa).

La determinación de los valores de cohesión (C) y del ángulo de fricción ( $\phi$ ) se realizó mediante el Círculo de Mohr- Coulomb. En esta evaluación se obtuvo una cohesión promedio de 248 kPa, la cual es ligeramente inferior al valor mínimo 250 kPa, y un ángulo de fricción promedio de 45° (Mínimo 40°) (Wirtgen, 2012). Las probetas fueron elaboradas a un PVSM de 2080 kg/m<sup>3</sup> y una humedad de 8%.

## INDICADOR PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS

Una de las dudas fundamentales que se tienen al utilizar esta metodología es la capacidad estructural que pueden obtener las bases estabilizadas con asfalto espumado. Por lo cual, fue necesario realizar una evaluación del  $M_R$  (Modulo Resiliente) de la base estabilizada.

Debido a que el  $M_R$  no es un valor único; sino que éste depende del confinamiento y la carga axial aplicada al espécimen se optó por graficar el valor de  $M_R$  medido vs. Esfuerzo volumétrico ( $\theta$ ), donde:

$$\theta = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (1)$$

Donde  $\theta$  es el esfuerzo volumétrico,  $\sigma_1$ = Esfuerzo principal mayor,  $\sigma_2$ = Esfuerzo principal intermedio (igual a  $\sigma_3$  para la prueba de  $M_R$  en el espécimen cilíndrico),  $\sigma_3$ = Esfuerzo principal menor.

La Figura 6 presenta los resultados obtenidos en la evaluación del  $M_R$  en probetas de 150mm de diámetro y 300 mm de altura, la secuencia de evaluación de acuerdo a NCHRP 01-28A: Pre-acondicionamiento de 1000 repeticiones de carga  $\sigma_{1max} = 227.7$  kPa (33 psi) y esfuerzo cíclico de 207 kPa (30 psi) de una onda haversiana (carga 0.1 s y reposo 0.9 s), posteriormente se aplican 30 secuencias variando la carga axial y la presión de confinamiento (20.7, 41.4, 69, 103.5 y 138 kPa). La Figura 6 presenta los resultados obtenidos en el ensayo de módulo resiliente para tres diferentes materiales: Base hidráulica convencional, Base con material reciclado 2.4% de asfalto espumado y 1% de cal, Base con material reciclado 0% de asfalto espumado y 1% de cal. Las probetas fueron elaboradas a un PVSM de 2080 kg/m<sup>3</sup> y una humedad de 8%.

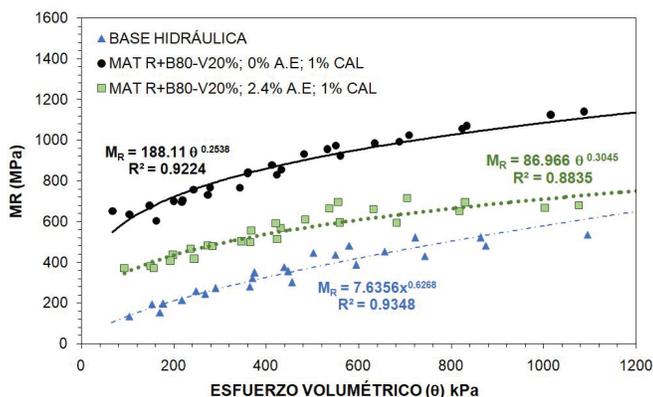


Figura 6. Módulo Resiliente para una base estabilizada con 2,4% y 0% de asfalto espumado y 1% de cal vs base hidráulica convencional

Se puede observar que la base estabilizada con 2.4% asfalto espumado tiene valores superiores de  $M_R$  con respecto a una base granular tradicional en todo el rango de esfuerzos volumétricos evaluados. Este aumento se puede asociar al material recuperado (RAP) el cual es un material que tiene una mayor rigidez que un material granular. Si se compara la mezcla reciclada con y sin asfalto espumado, se observa que la adición del asfalto espumado reduce los valores del  $M_R$ , esta reducción aumenta con el esfuerzo volumétrico. Siendo el aporte del asfalto espumado la mejora de

la flexibilidad y cohesión, lo cual se traduce en una reducción en la rigidez de la mezcla de materiales (valor del  $M_R$ ). Debido al incremento en los valores de  $M_R$  de una base con material reciclado con respecto a una base hidráulica tradicional, se puede concluir que la condición más desfavorable del diseño será la pérdida de cohesión y no propiamente la capacidad de carga, ya que la inclusión del RAP, al ser un material más rígido, incrementa los valores de  $M_R$ .

## INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO.

Con el objetivo de entender el comportamiento de los parámetros de diseño de la base estabilizada con asfalto espumado, se realizó un análisis del efecto del tipo de filler activo y porcentaje de asfalto espumado en la resistencia a la tensión indirecta, Cohesión, ángulo de fricción y Módulo Resiliente ( $M_R$ ).

## INFLUENCIA DEL FILLER ACTIVO

La evaluación de la influencia del tipo de filler en los parámetros antes mencionados se presenta la Figura 7. Para el ensayo de resistencia a la tensión indirecta, la evaluación fue realizada tanto en condición de seca como en condición saturada y en tres diferentes contenidos de asfalto espumado. Para el caso del ensayo triaxial y ensayo módulo resiliente las evaluaciones se realizaron para un contenido de asfalto espumado de 2.4%.

De los resultados obtenidos se puede observar que la mezcla con cal fue la que presentó menos susceptibilidad a la humedad. De igual forma se puede observar que la adición de un filler activo disminuye la susceptibilidad a la humedad de la mezcla, ya que en condición original la mezcla no resistía el acondicionamiento previsto en el ensayo. En las curvas tangenciales de los círculos de Mohr (Figura 7b) se puede observar que existe un cambio en el comportamiento del material con la adición de un filler activo (cambio de pendiente), siendo que la adición del filler aumenta la cohesión (2.2 veces para el cemento y 3.1 para la cal) y presenta una reducción del ángulo de fricción (20% para el cemento y 12% para la cal). Los resultados obtenidos en el módulo resiliente (Figura 7c) muestran que al utilizar asfalto espumado se incrementa el valor de  $M_R$  a bajos esfuerzos volumétricos ( $\theta$ ) en comparación de una base hidráulica tradicional. Para los materiales con filler activo el valor de  $M_R$  incrementa en todo el rango de esfuerzos volumétricos, siendo que el valor de  $M_R$  incrementa con el nivel del esfuerzo volumétrico mejorando su relación esfuerzo-deformación y por ende su capacidad estructural cuando forme parte de un pavimento.

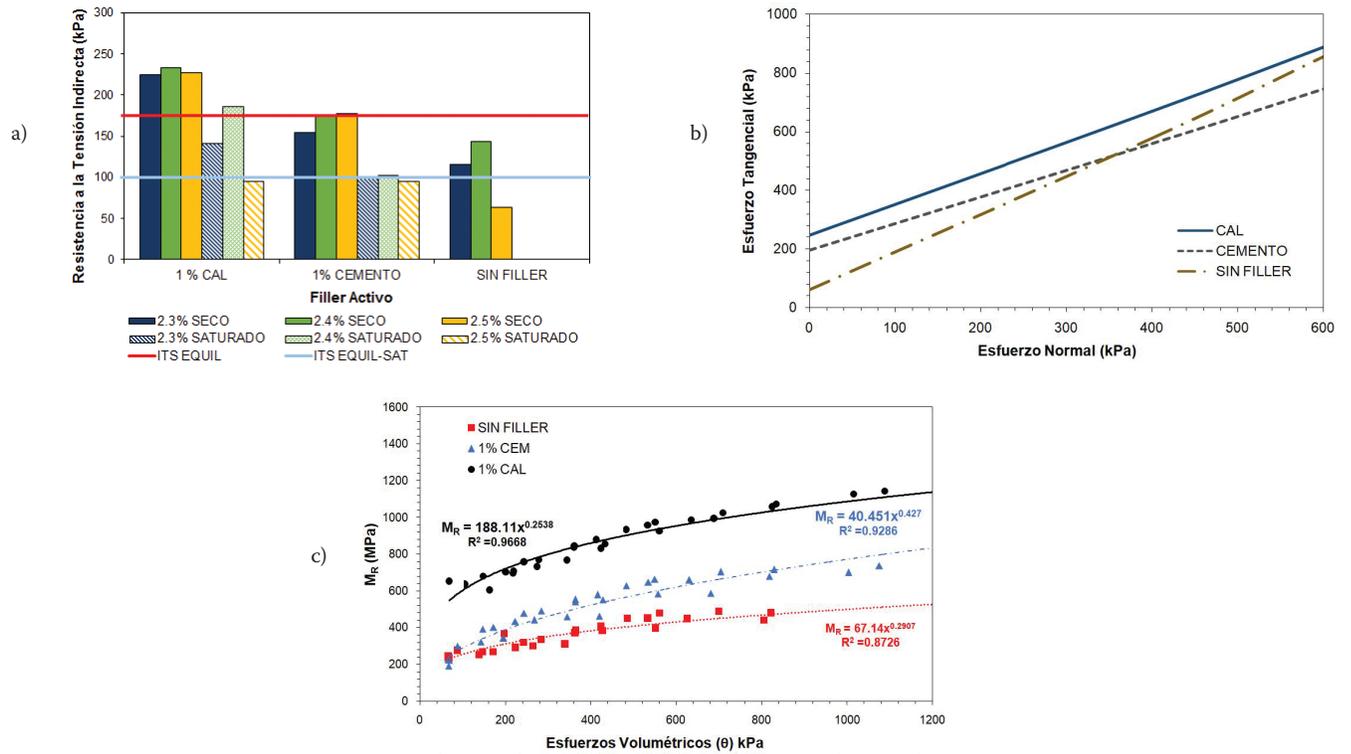


Figura 7. Influencia del filler en las propiedades mecánicas de la base estabilizada (+base)

## INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE ASFALTO ESPUMADO

La evaluación fue realizada con tres diferentes concentraciones de asfalto espumado (2.3%, 2.4% y 2.5%). Para el caso del ensayo triaxial y ensayo módulo resiliente las evaluaciones se realizaron con 1% cal (Figura 8).

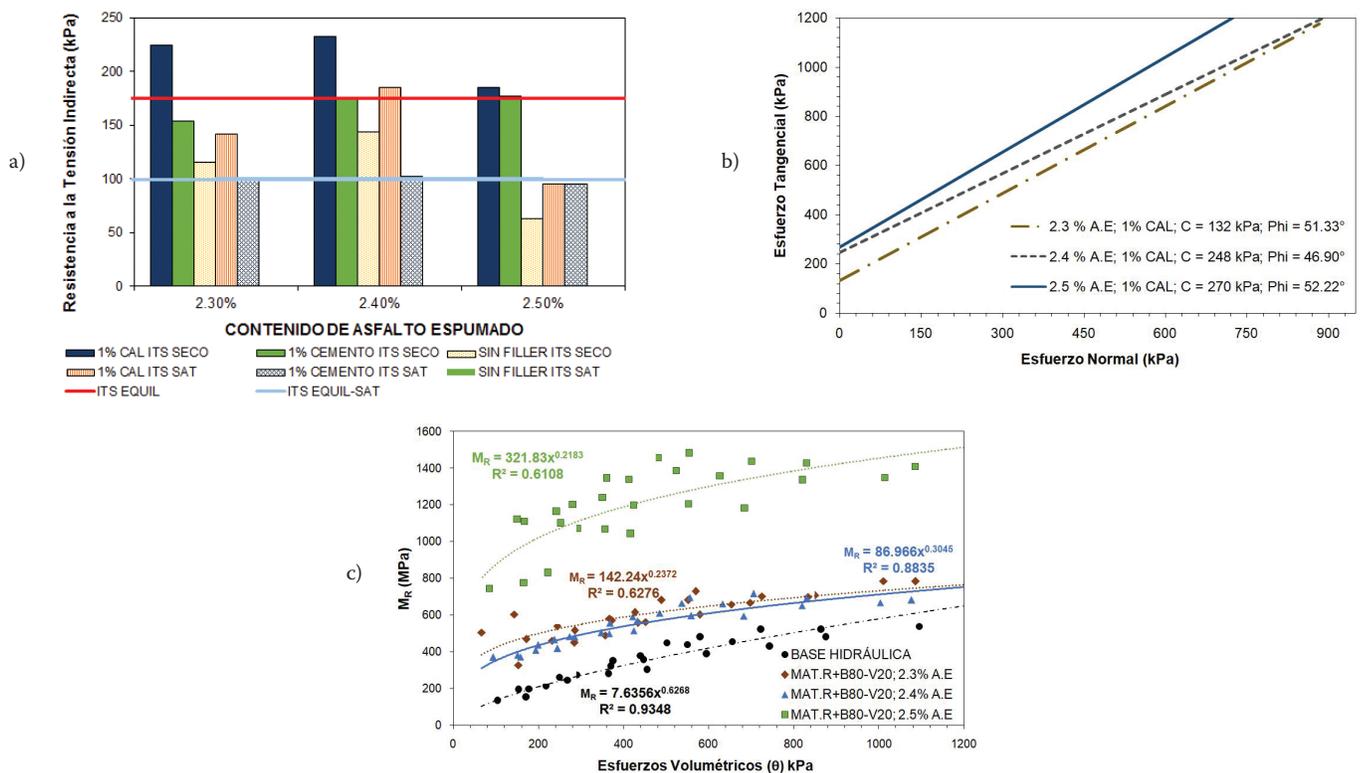


Figura 8. Influencia del contenido de asfalto espumado en las propiedades mecánicas de la base estabilizada

De la Figura 8a es posible apreciar, que al aumentar el contenido de asfalto espumado el valor  $RTI_{Seco}$  incrementa y posteriormente decae mostrando como valor óptimo el 2.4%. No obstante, aun cuando los valores obtenidos se encuentren por encima del valor mínimo requerido, el desempeño de la mezcla sigue en función de los valores obtenidos de  $RTI_{Saturado}$ . En las curvas tangenciales de los círculos de Mohr (Figura 8b) se puede observar que al incrementar el contenido de asfalto espumado se incrementa la cohesión de la base estabilizada, en cuanto al ángulo de fricción el comportamiento no tiene una tendencia clara. Los resultados muestran que para los contenidos de asfalto espumado de 2.3 y 2.4% los valores de  $M_R$  son similares (Figura 8c), mientras que al aumentar el valor a 2.5% se observa un aumento significativo en el valor del  $M_R$ , lo cual indica que al adicionar un mayor porcentaje de asfalto espumado se mejora la capacidad de carga de la base estabilizada.

## COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Existen diferentes metodologías para la estabilización de bases granulares, siendo el mayor beneficio de la estabilización con asfalto espumado la posibilidad de incorporar altos porcentajes de material reciclado (RAP) sin la necesidad de utilizar una fuente de calor. Esto también se podría realizar con una base estabilizada con asfalto convencional (base negra). Sin embargo, los porcentajes de asfalto serían superiores aumentando el costo de la estabilización, aunado al consumo de energía asociado a la fabricación de la mezcla de materiales.

El reto inicial en el diseño de la base estabilizada con asfalto espumado es definir una granulometría debido a que el material recuperado del pavimento (RAP) en general no cumple con los requerimientos establecidos en la metodología y es necesario agregar material granular de aporte. Por lo cual el procedimiento de obtención del RAP (escarificado-fresado de la carpeta) juega

un rol fundamental en el porcentaje de material reciclado que se puede utilizar en una base estabilizada con asfalto espumado.

En la evaluación de la resistencia a la tensión indirecta, se pudo observar que los valores en condición seca son similares para cada una de las variantes analizadas, siendo la evaluación en condición saturada el parámetro de selección de la mezcla de materiales en una base estabilizada con asfalto espumado, por lo cual se le debe prestar especial atención en los procesos de diseño y control de calidad de este tipo de estabilizaciones.

Se pudo observar que con el aumento del contenido de asfalto espumado se reduce la susceptibilidad a la humedad, al igual que genera un aumento en la cohesión obtenida en el ensayo triaxial. Siendo que para concentraciones altas se presenta un aumento en el valor del  $M_R$ , cabe mencionar que el aumento de este parámetro aumenta el costo de la obra. Por lo cual, la selección adecuada del contenido de asfalto espumado se debe de realizar mediante un análisis costo-beneficio.

En cuanto a la adición del filler, se observó una mejora la cohesión del material, sin embargo, reduce la fricción de la base estabilizada. No obstante, la adición del filler incrementa notablemente los valores de  $M_R$  en comparación con una base granular convencional. Para el caso particular de este estudio, el filler que obtuvo el mejor desempeño en los ensayos fue la cal.

Los valores de módulo resiliente obtenidos con las bases estabilizadas con asfalto espumado con RAP fueron superiores a los de una base granular. Este aumento está asociado a que el RAP tiene una mayor rigidez que el material granular. Por lo cual, se concluye que con la inclusión del RAP no se tendrá un problema en lo referente a la resistencia de la base estabilizada, lo cual asegura el desempeño siempre y cuando los criterios de cohesión y resistencia a la tensión indirecta en condición húmeda sean los adecuados.

## REFERENCIAS

1. Abbas, A., Ali, A., Nazzal, M., Alhassan, A., Roy, A., & Powers, D. (2013). Effect of temperature reduction, foaming water content, and aggregate moisture content on performance of foamed warm mix asphalt, *48*, 1058–1066. *Construction and Building Materials*.
2. Austroads Ltd. (2015). Technical Report AP-T303-15. Design and Performance of Foamed Bitumen Stabilised Pavements: Progress Report 3. Sydney, Australia.
3. Dal Ben, M., & Jenkins, K. J. (2014). Performance of cold recycling materials with foamed bitumen and increasing percentage of reclaimed asphalt pavement, *15:2*, 348-371. *Road Materials and Pavement Design*.
4. Jenkins, K. J., Long, F. M., & Ebels, L. J. (2007). Foamed bitumen mixes= shear performance?. *International Journal of Pavement Engineering*, *8(2)*, 85-98.
5. Marek, I., & Anna, C.-K. (2013). Laboratory Study on Mechanical Parameters of Foamed Bitumen Mixtures in the Cold Recycling Technology, *57*. *Modern Building Materials, Structures and Techniques*.
6. Saleh, M. F. (2007). Effect of rheology on the bitumen foamability and mechanical properties of foam bitumen stabilised mixes. *International Journal of Pavement Engineering*, *8(2)*, 99-110.
7. Wirtgen. (2012). *Wirtgen Cold Recycling Technology*. Windhagen, Alemania: Wirtgen GmbH, Pages: 104-107.

# Criterios ambientales y socioeconómicos para priorizar inversiones en la red vial de Costa Rica

*Environmental and socioeconomic criteria to prioritize investments in the road network of Costa Rica*

**Rodrigo Arias García**

Consultor, Costa Rica  
rag.1393@gmail.com

**José David Rodríguez Morera**

LanammeUCR, Costa Rica  
jose.rodriguezmorera@ucr.ac.cr

**Fecha de recepción:** 07 de marzo de 2018 / **Fecha de aprobación:** 03 de mayo de 2018

## RESUMEN

Dada la ausencia de la implementación formal de un Sistema de Gestión de Pavimentos para la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica, no han existido procesos de planificación de largo plazo sobre la inversión en los pavimentos de esa red. La presente investigación busca demostrar, además de la factibilidad de realizar planes de inversión de largo plazo (20 años) en pavimentos flexibles, también la posibilidad de utilizar índices ambientales, económicos y sociales como criterios de priorización.

Para la elaboración de planes de inversión, se estimó la condición del pavimento a través de un índice compuesto por la capacidad funcional y la capacidad estructural, en cada sección de control de la Red Vial Nacional. A cada una de estas secciones se le agregó información de tránsito, jerarquía de la ruta y otras características. Posteriormente, se estimó empleando como referencia los costos de la licitación pública 2014LN-000018-0C00, el valor de cada una de las intervenciones según la ventana de operación en que se encuentre el pavimento.

Utilizando la herramienta informática *Woodstock*, se emplearon técnicas de optimización lineal para realizar escenarios de inversión incorporando diferentes criterios de priorización. De esta forma se emplearon el Índice de Progreso Social, el Índice de Competitividad Cantonal y la emisión de CO<sub>2</sub>, como criterios para priorizar las inversiones en las diferentes secciones de control de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica.

Con los resultados, es posible confirmar la factibilidad de elaborar planes de inversión de largo plazo a partir de los insumos disponibles en Costa Rica. Además, se observa que los aumentos de presupuesto tienen un mayor efecto en la rapidez con la que se alcanza una mejor condición de los pavimentos que en la condición en sí. Asimismo, la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> tendrá un impacto en la condición de la red pues las intervenciones de reconstrucción son las que requieren actividades de mayor emisión de contaminantes.

**PALABRAS CLAVES:** gestión de pavimentos, planes de inversión; criterios de priorización; nivel de red.

## ABSTRACT

*Given the absence of a formal implementation of a Pavement Management System for the National Paved Road Network of Costa Rica, there are no long-term planning processes of investments in the pavements. The research presented herein aims to demonstrate, in addition to the feasibility of perform long-term investment plans (20 years), that prioritization criteria on environmental, social and economical aspects can be included in the plan.*

*For the preparation of investment plans, the condition of the pavement was estimated through an index composed of functional capacity and structural capacity in each section of the National Road Network. Each of these sections contains characteristics referring to traffic, route hierarchy and others. Subsequently, costs of maintenance techniques are estimated using contract 2014LN-000018-0C00.*

*Through Woodstock software, linear optimization techniques were used to carry out investment scenarios incorporating different prioritization criteria. In this way, the Social Progress Index, the Cantonal Competitiveness Index and the CO<sub>2</sub> emission are used as criteria to prioritize investments in the sections of the National Paved Road Network of Costa Rica.*

*With the results, it is possible to confirm the feasibility of preparing long-term investment plans based on the inputs available in Costa Rica. In addition, it is observed that the budget increases have a greater effect on the lapse with which a better condition of the pavements is achieved than in the condition itself. Likewise, the reduction of CO<sub>2</sub> emissions will have an impact on the condition of the network, since reconstruction interventions are those that require activities with a higher emission of pollutants.*

**KEY WORDS:** pavement management; investment plan; prioritization criteria; network level.

## INTRODUCCIÓN

El presente artículo muestra los resultados de incorporación criterios económicos, sociales y ambientales en la priorización de inversiones en una red vial pavimentada. La gestión de redes viales pavimentadas constituye un reto para las instituciones y agencias de transporte. Las restricciones presupuestarias, las necesidades de inversión de acuerdo a la condición de los pavimentos e incluso las expectativas del público son las variables principales con las cuales las instituciones deben buscar la mejor forma de utilizar los recursos disponibles para el mantenimiento y desarrollo de las redes viales.

Sin embargo, la importancia alcanzada por los temas ambientales debido a las amenazas planteadas por fenómenos asociados al cambio climático, así como la dinámica de la participación ciudadana en los asuntos públicos hace que las políticas de mantenimiento de infraestructura tenga un foco más amplio en sus consideraciones. Por esta razón, este trabajo ensaya la incorporación de criterios de priorización relacionados con estas áreas, todo dentro del marco de la filosofía de gestión de pavimentos (basada también en la gestión de activos de transporte *-transportation asset management-*).

Tal como la cita la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas de Chile (2014), la gestión vial es “el conjunto de operaciones que tienen por objetivo conservar adecuadamente y por un determinado período, una carretera o una red vial en condiciones apropiadas de seguridad, comodidad y capacidad estructural, bajo las condiciones ambientales locales. Lo anterior debe ejecutarse minimizando los requerimientos financieros, con el máximo beneficio social posible y con los menores impactos ambientales negativos”.

Específicamente, un Sistema de Gestión de Pavimentos es, según Solminihaç (1998), “el conjunto de operaciones que tienen como objetivo conservar por un período de tiempo las condiciones de seguridad, comodidad, y capacidad estructural adecuadas para la circulación, soportando las condiciones climáticas y de entorno de la zona en que se ubica la vía en cuestión. Todo lo anterior minimizando los costos monetario, social y ecológico”.

De acuerdo con la Asociación de Transportes de Canadá (1997), el objetivo es cumplido mediante la comparación de alternativas de inversión tanto a nivel de red, como de proyecto, los cuales son los dos niveles que componen un Sistema de Gestión de Pavimentos (Haas, 1993). En la siguiente Figura 1 se observa la estructura típica dentro de un Sistema de Gestión de Pavimentos.



Figura 1. Estructura típica de un Sistema de Gestión de Pavimentos

Dentro estos procesos de gestión de pavimentos, el plan de inversiones es fundamental pues es la “brújula” que dirige los esfuerzos en la dirección correcta para concretar los objetivos planteados. Los criterios de priorización de las inversiones son el mecanismo para concretar las intenciones de la inversión más allá de mejorar la condición de la superficie de rodadura en una red vial.

Utilizando el caso de la RVN pavimentada de Costa Rica, se determinó la condición del pavimento a partir del Índice de Regularidad Internacional (IRI) y deflectometría medidos por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR). Además, se estimaron los costos asociados a su ventana de operación de mantenimiento. Posterior a esto, usando herramientas informáticas de optimización lineal, se incorporan en esta investigación criterios económicos, sociales y ambientales para modelar la priorización de las inversiones en la Red Vial Nacional pavimentada de Costa Rica.

## ANTECEDENTES

La metodología utilizada para el desarrollo del planes de inversión que siguió esta investigación tiene su primer antecedente en la tesis de grado “Plan de Inversiones a Nivel Estratégico para la Zona 1-9 de Conservación Vial de CONAVI” (Chaverri y Madrigal, 2011). En ese trabajo se estableció el procedimiento de modelos de optimización lineal para planes de inversión a largo plazo. Además se creó la subrutina del modelo de optimización en el programa de cómputo *Woodstock*.

Posteriormente, esta metodología se aplicó a la totalidad de la RVN pavimentada en la investigación “Plan de inversión a nivel estratégico en pavimentos flexibles de la Red Vial Nacional” (Rodríguez y Chaverri, 2012). En ese trabajo se desarrollaron diferentes escenarios de inversión para desarrollar un plan de inversiones óptimo para el mantenimiento de la RVN. Para la priorización de la inversión se emplearon criterios como el tránsito promedio diario y la pertenencia de la ruta a la red vial estratégica del país. (Figura 2)

## OBJETIVOS

### **Objetivo General**

Desarrollar un plan de inversiones a nivel de red para pavimentos flexibles de la Red Vial Nacional que incorpore criterios de priorización relacionados con aspectos ambientales, sociales y económicos de acuerdo con insumos disponibles en el país.

### **Objetivos Específicos**

- Determinar la condición del pavimento a través de un índice compuesto por la capacidad funcional y estructural para las secciones de control de los pavimentos flexibles de la Red Vial Nacional, según los parámetros IRI y FWD medidos en la evaluación técnica de la RVN del LanammeUCR que comprende los años 2014 - 2015.
- Explorar el uso de índices o criterios ambientales, sociales y económicos que puedan ser incorporados en la priorización de inversiones en pavimentos flexibles de la Red Vial Nacional.
- Realizar diferentes escenarios de inversión para la RVN considerando criterios ambientales, sociales y económicos, mediante la aplicación de técnicas de optimización lineal.

## METODOLOGÍA

La metodología de la presente investigación se muestra en la Figura 2. Como se observa, la metodología se conforma de tres principales etapas: recolección de la información, procesamiento de la información sobre la RVN pavimentada de Costa Rica y estimación de la condición del pavimento según sección de control; y por último, utilización de la herramienta informática *Woodstock* para optimización lineal.

### **Base de Datos Sobre la RVN Pavimentada**

La RVN pavimentada de Costa Rica cuenta con amplia información sobre la condición de sus pavimentos. La evaluación bial que realiza el LanammeUCR mide índices como el IRI, deflectometría y el *Grip Number* (resistencia al deslizamiento). En este caso, la información de la condición funcional (IRI) y la (deflectometría) de la evaluación 2014-2015 fueron utilizadas para la determinación de un índice de condición del pavimento (PCI) en cada sección de control de la red vial analizada.

Además de la condición del pavimentos, a cada sección de control se le asignó la información del Índice de Progreso Social (CLACDS, 2016) e Índice de Competitividad Cantonal (Castro, 2015) correspondiente a la zona geográfica que cada ruta nacional atraviesa. Con esto se buscó crear información relacionada con aspectos sociales y económicos.

Por último, para incorporar el criterio ambiental se obtuvieron los valores de emisión de CO<sub>2</sub> de tratamientos de mantenimiento vial similares a los empleados en la modelación de las inversiones en la RVN realizadas en este trabajo. Así, se utilizó como referencia los resultados obtenidos por Chehovits y Galehouse (2010) para diferentes actividades de mantenimiento de los pavimentos.

### **Estimación de la Condición de los Pavimentos**

Utilizando la información de la regularidad superficial y de la capacidad de los pavimentos flexibles de la RVN de Costa Rica, se procedió a estimar su condición mediante un índice compuesto por ambas mediciones. Este índice PCI (*Pavement Condition Index*) es calculado para cada sección de control la RVN asignando un peso de 50% a cada uno de estos componentes (Mata, 2010), luego de haber procesado los datos provenientes de la evaluación bial.

Una vez estimada la condición de cada pavimento, ésta se clasificó en categorías (Muy Bueno, Bueno, Regular, Pobre y Muy Pobre) cuya condición está asociada a ventanas de operación y sus respectivos costos (Preservación, Rehabilitación Menor,

Rehabilitación Mayor, Reconstrucción Menor y Reconstrucción Total). Las curvas de deterioro utilizadas para la modelación son las propuestas por Amador (2011) citadas por Rodríguez (2012).

### Optimización Lineal para el Plan de Inversiones

A través de la herramienta informática *Woodstock* de Remsoft Inc. se procedió a realizar escenarios de inversión en los pavimentos flexibles de la RVN de Costa Rica. En este caso se ensayaron escenarios que utilizaron como criterios de priorización los índices de progreso social y de competitividad cantonal,

además de los escenarios típicos correspondientes a restricción presupuestaria (función objetivo minimizar costos y maximizar condición del pavimento), restricción de plazo para conseguir metas de condición (función objetivo eliminar pavimentos en estado “muy pobre”).

En el caso del aspecto ambiental, éste fue modelado incorporando la emisión de CO<sub>2</sub> de cada tratamiento como un costo ambiental. Por lo tanto, el objetivo en la modelación fue la reducción de la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>.

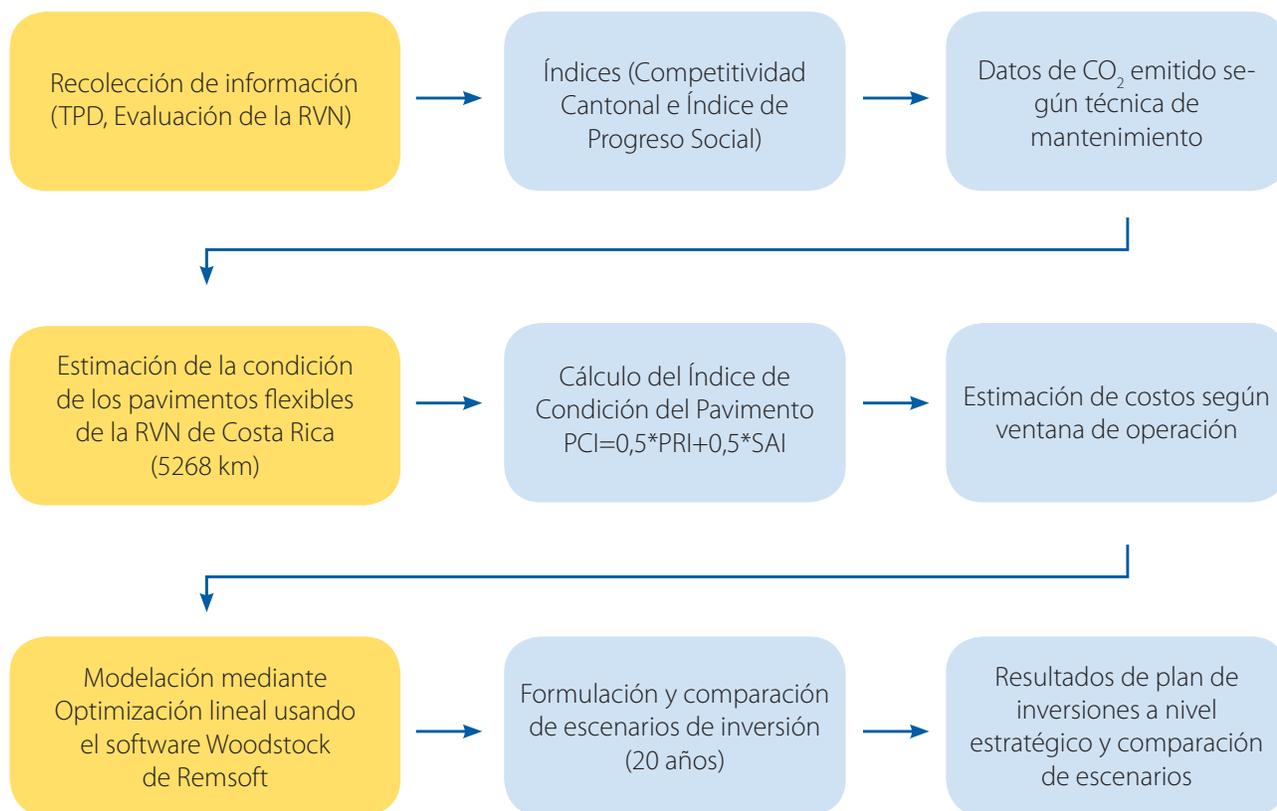


Figura 2. Metodología de trabajo para la incorporación de criterios ambientales, sociales y económicos en la priorización de inversiones en pavimentos flexibles a nivel de red

## RESULTADOS

### Estimación de la Condición del Pavimento (PCI)

El Índice de Condición del Pavimento es el indicador utilizado para determinar la condición del pavimento en esta investigación. Este índice se puede obtener a partir de las mediciones realizadas en las evaluaciones técnicas, al relacionar la deflectometría (FWD) con la regularidad superficial (IRI). Según Chaverri & Madrigal (2011) este índice puede calcularse de la siguiente manera:

$$PCI = k_1 * SAI + k_2 * PRI \quad (1)$$

Donde,  $SAI$  = índice de adecuación estructural derivada a partir de los datos del deflectómetro de impacto FWD,  $PRI$  = índice de regularidad superficial del pavimento derivado a partir del IRI,  $k_1$  y  $k_2$  son factores de peso relativo en el índice. Los valores de  $PRI$  para cada sección del pavimento pueden ser calculados mediante una función normalizadora que traduce cada valor de IRI en una escala de 0 – 100 (Chaverri & Madrigal, 2011):

$$PRI_j = 100 \left( \frac{IRI_{max} - IRI_j}{IRI_{max} - IRI_{min}} \right) \quad (2)$$

En la anterior ecuación,  $PRI_j$  es el índice de regularidad superficial del pavimento de la  $j$ -ésima sección de una carretera (tramo homogéneo),  $IRI_j$  es el valor medido de IRI para la  $j$ -ésima sección,  $IRI_{max}$  e  $IRI_{min}$  son los valores máximos y mínimos de IRI para toda la Red en estudio, para un nivel de confianza del 98%.

El índice de adecuación estructural ( $SAI$ ) provee una medida de la capacidad de carga o resistencia del pavimento. La ecuación (4) ha sido desarrollada al tomar la resistencia del pavimento expresada por el parámetro base de deflexiones conocido como “ $AREA$ ” (ecuación 3) normalizado por la deflexión en el centro de carga,  $D_0$  (la cual se corrige por temperatura) y luego se convierte en un índice escalado entre 0 – 100 para la formulación del PCI.

$$AREA = 150 * \left( \frac{D_0 + 2D_1 + 2D_2 + D_3}{D_0} \right) \quad (3)$$

Donde,  $D_0, D_1, D_2, D_3$  son deflexiones medidas desde el centro del plato de carga del deflectómetro de impacto (FWD) de las ordenadas a 0 mm, 300 mm, 600 mm y 900 mm respectivamente.

$$SAI_j = 100 \left( \frac{AREA_j - AREA_{min}}{AREA_{max} - AREA_{min}} \right) \quad (4)$$

En esta ecuación,  $SAI_j$  es el índice de adecuación estructural para el  $j$ -ésimo tramo homogéneo,  $AREA$  se define como se muestra en la ecuación (3),  $AREA_{max}$  y  $AREA_{min}$  son los valores máximos y mínimos del  $AREA$  a nivel de toda la red, con un intervalo de confianza del 98%.

Con el resultado del valor del PCI se clasifica la condición del pavimento, como se ve el Cuadro 1, y de acuerdo a esto se define el tipo de tratamiento que debe recibir el pavimento (ventana de operación). Los rangos de PCI fueron tomados de la experiencia del Departamento de Transportes de New Brunswick en Canadá (2002) reseñada por Madrigal y Chaverri (2011).

Cuadro 1. Escala de clasificación del PCI y su ventana de operación.

Condición	Rango <sup>1</sup>	Tratamiento	Costo según Tránsito (USD)		
			Bajo	Medio	Alto
Muy Bueno	80 - 100	Preservación (sobrecapa no estructural 4cm - SNE-)	\$27.767,85		
Bueno	60 - 80	Rehabilitación menor (Sobrecapa estructural)	\$34.709,81	\$62.477,66	\$90.245,51
Regular	40 - 60	Rehabilitación mayor (Sobrecapa estructural)	\$69.419,62	\$104.129,44	\$131.897,29
Pobre	25 - 40	Reconstrucción menor (Base Estabilizada + Capa Asfáltica)	\$154.669,23	\$164.856,87	\$191.933,43
Muy Pobre	0 - 25	Reconstrucción total (Nueva estructura)	\$190.258,10	\$230.084,11	\$241.144,23

<sup>1</sup> Rangos establecidos por *New Brunswick Department of Transportation, Canadá* (2002).

Los costos utilizados corresponden a los establecidos en los contratos de conservación vial perteneciente a la licitación pública 2014LN-000018-0C00 en Costa Rica. Se empleó el valor promedio para los ítems con precios unitarios diferentes por zona geográfica. En el Cuadro 1 se muestra el costo de las intervenciones por kilómetro de carril según la intensidad de tránsito que presenten. Para estimar los costos se empleó un ancho de carril promedio de 3,33 m obtenido de los registros para la RVN pavimentada de Costa Rica.

### Índices para la Priorización de Inversiones en el Pavimento de la RVN de Costa Rica

#### Índice de Competitividad Cantonal

El Índice de Competitividad Cantonal (ICC) evalúa la capacidad productiva de cada cantón, y demás factores que influyan en su desarrollo. Asimismo, permite identificar los campos en los que se requieren intervenciones institucionales o políticas públicas (Castro, 2015). Se definen cinco categorías del ICC con el fin de distribuir los cantones y visualizar su evolución con respecto a la última medición: muy alta, alta, media, baja y muy baja.

#### Índice de Progreso Social

El Índice de Progreso Social (IPS) permite evaluar la eficacia con la cual el éxito económico de un país o región se traduce en progreso social. Para realizar la medición del progreso social, el IPS considera tres dimensiones: necesidades humanas básicas, fundamentos de bienestar, y oportunidades. A su vez, estas tres dimensiones se subdividen en 12 componentes, que agrupan 46 indicadores (CLACDS, 2016). Se clasifica el desempeño de cada cantón en: bueno, regular y malo.

#### Costo Ambiental de las Intervenciones en los Pavimentos Flexibles

Para determinar el costo ambiental (entendido como emisiones de CO<sub>2</sub>) de las intervenciones se emplearon los valores de la investigación de Chehovits y Galehouse (2010). En el Cuadro 2 se muestra la emisión de CO<sub>2</sub> de cada uno de los tratamientos, por kilómetro de carril, utilizados en la presente investigación.

Cuadro 2. Emisión de CO<sub>2</sub> por kilómetro de carril según intensidad de tránsito

Clasificación	PCI	Tratamiento	Intensidad de tránsito		
			Bajo	Medio	Alto
Muy bueno	80-100	SNE	16237.08		
Bueno	60-80	Reh. Menor	20296.35	36533.43	52770.51
Regular	40-60	Reh. Mayor	40592.70	60889.05	77126.13
Pobre	25-40	Rec. Menor	87299.28	91425.15	109630.26
Muy pobre	0-25	Rec. Total	115893.99	140066.46	145504.35

Fuente: Chehovits y Galehouse (2010)

### Escenarios de Inversión a Largo Plazo en la RVN Pavimentada de Costa Rica

El objetivo planteado con la elaboración de los escenarios de inversión es proyectar la evolución de la condición de los pavimentos en el largo plazo (20 años) ante diferentes estrategias. La ventaja de los análisis de largo plazo, bajo los principios de un Sistema de Gestión de Pavimentos, es que a través de la comparación de alternativas de inversión es posible disminuir la incertidumbre sobre la eficacia de las políticas de mantenimiento aplicadas.

El plazo de análisis está relacionado con la recomendación de analizar, a nivel de red o estratégico, el impacto de las decisiones en un período de al menos el doble del período de vida útil del activo. Por esta razón, en el caso de los pavimentos se recomienda mantener un plazo de análisis de al menos 20 años.

En la Figura 3 se muestra la salida para el escenario “Optimizar puro” que busca maximizar la condición de los pavimentos de la RVN de Costa Rica, utilizando una restricción presupuestaria de USD\$135 millones, monto semejante al que invierta la agencia gubernamental encargada (Consejo Nacional de Vialidad). Como se observa, a la mitad del período, los pavimentos en Muy Pobre, Pobre y Regular condición son eliminados si se siguen las estrategias descritas en el Cuadro 1.

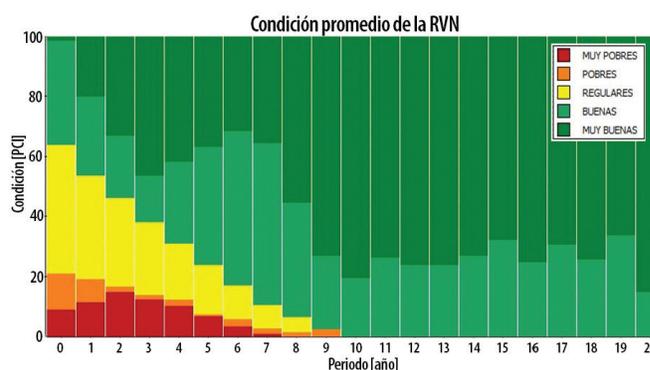


Figura 3. Evolución de la condición de la RVN pavimentada de Costa Rica al maximizar el PCI con un presupuesto anual de USD \$135 millones crecimiento anual de 5%

Otro de los escenarios de inversión típicos a analizar son los que modelan el efecto de la variación en el propio monto del presupuesto. En la Figura 4 se observa el resultado de la comparación, teniendo como restricciones que RVN estratégica (rutas principales definidas por el Ministerio de Obras Públicas de Costa Rica) alcanza un PCI promedio de 65 al primer año, y un PCI promedio mínimo de 80 (condición muy buena) al año 5.

Como se puede ver, incrementar el presupuesto en un 50% (presupuesto inicial de \$202,5 millones) influye poco en el estado final de la red. El efecto de incrementar el presupuesto se manifiesta en el tiempo requerido para obtener una condición muy buena de la red vial, pues al aumentar el presupuesto un 50% se obtiene un PCI mayor a 80 en la mitad del tiempo (Figura 4). Este análisis es importante a la hora de decidir estrategias frente otras necesidades en una Administración.

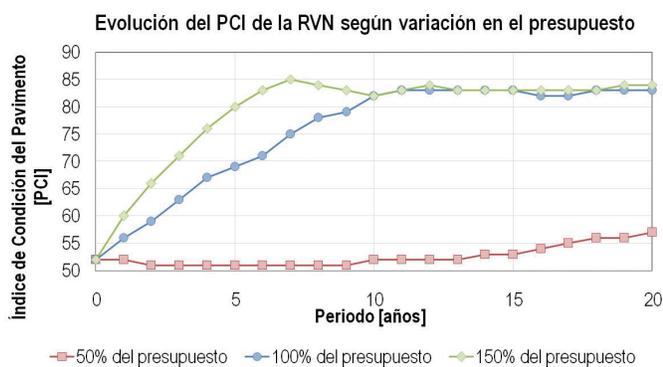


Figura 4. Evolución del PCI de la red según variación en el presupuesto

### Incorporación de Criterios de Priorización Ambientales, Económicos y Sociales

En estos escenarios se busca maximizar la condición promedio de la RVN mientras se realiza la priorización de las secciones a intervenir de acuerdo a diferentes criterios socioeconómicos, por ejemplo: se prioriza la RVN estratégica, las secciones con un elevado tránsito promedio diario, y las secciones que se encuentren en cantones con un bajo Índice de Competitividad Cantonal o Índice de Progreso Social. En la Figura 5 se muestra la evolución de la condición de la RVN de acuerdo al escenario de inversión incluido.

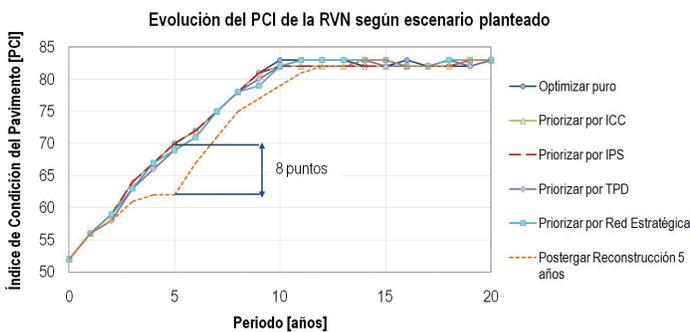


Figura 5. Evolución de la condición de la RVN según el escenario propuesto

Debido a las restricciones utilizadas, no existe diferencia significativa en la condición promedio final de la red vial según el criterio de priorización seleccionado. Sin embargo, si hay diferencia en el tiempo requerido para alcanzar un valor promedio bueno. En los distintos escenarios modelados, la RVN finaliza en “Muy Buena” condición (PCI = 83).

El escenario “Postergar Reconstrucción 5 años” surge de la necesidad de modelar los efectos burocráticos en el arranque de los proyectos. Es decir, si las reconstrucciones se postergan un período de 5 años mientras se realizan los procesos administrativos necesarios, el costo para el usuario será una brecha de hasta 8 puntos promedio en la condición de las rutas que utiliza.

### Criterio Ambiental

Con este escenario se busca reducir la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> de las distintas intervenciones, estableciendo requisitos de condición mínimos al pavimento (restricciones en la optimización lineal). Por ejemplo, una condición promedio “Muy Buena” de la RVN estratégica, o la eliminación de las secciones en pobre o muy pobre condición.

Como el objetivo de este escenario no es optimizar la condición de la red sino minimizar la emisión de CO<sub>2</sub>, la condición final de la red vial es inferior al escenario “Optimizar puro”, pues únicamente busca cumplir con las restricciones establecidas. Esto se puede observar en la Figura 6 que compara ambos PCI promedios y en la Figura 7 que muestra las cantidades de pavimentos según la condición. En esta última, se observa que las condiciones Pobre y Regulares no se logran eliminar del todo.

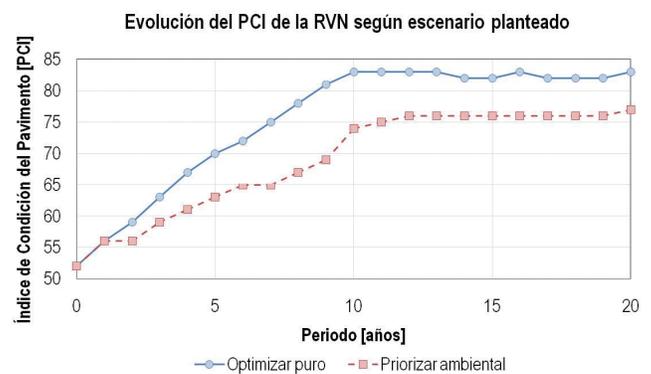


Figura 6. Comparación de la condición de la RVN para los escenarios “Optimizar puro” y “Priorizar ambiental”

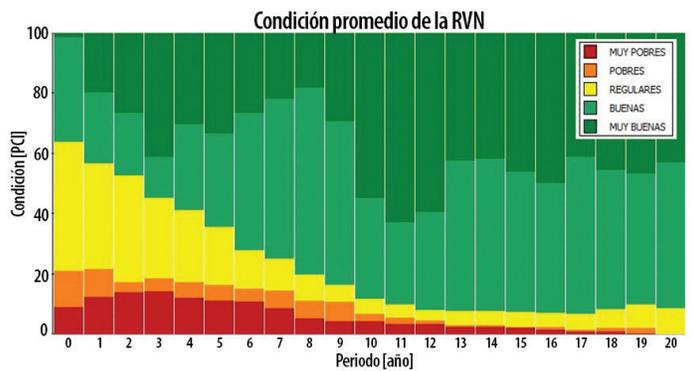


Figura 7. Evolución de la condición de la RVN pavimentada de Costa Rica al minimizar la emisión de CO<sub>2</sub> con un presupuesto anual de USD \$135 millones crecimiento anual de 5%

A pesar de que el escenario solo busca cumplir con las restricciones propuestas al menor coste ambiental posible, la red vial finaliza en buena condición (PCI 6 puntos por debajo del escenario "Optimizar puro"), requiriendo en promedio un 32% menos de inversión anual y emitiendo un 31% menos de contaminantes.

En resumen, tener la posibilidad de realizar análisis de este tipo entre distintos escenarios representa una oportunidad importante para mejorar el diseño de políticas públicas. En el análisis de largo plazo que disminuye la incertidumbre sobre el impacto de la inversión en los pavimentos, se encuentra la diferencia entre ejecutar un presupuesto en estrategias inadecuadas e invertir un presupuesto de forma óptima.

De esta forma, las agencias encargadas pueden conocer con antelación el estado final del activo, la inversión requerida y la cantidad de CO<sub>2</sub> emitida en su mantenimiento, lo que permite alinear las políticas de inversión con las metas planteadas por parte de un gobierno, por ejemplo en materia ambiental.

## CONCLUSIONES

- Todo plan de inversiones en pavimentos debe seguir los principios de un Sistema de Gestión de Carreteras para obtener resultados óptimos, es decir, se debe aplicar el tratamiento adecuado, en la sección apropiada, en el tiempo indicado.
- Se obtiene un mismo resultado en la condición promedio final del pavimento al realizar una optimización pura (sin ninguna restricción socioeconómica) que si se realiza la priorización de inversiones considerando aspectos socioeconómicos debido a incluir restricciones similares. Al incluir criterios sociales, económicos y ambientales en la toma de decisiones se invertirá en zonas donde se pueden lograr externalidades positivas debido a la inversión realizada.
- Un incremento en el presupuesto asignado para atender la red vial no representa una gran mejoría en la condición final de la red, sino un adelanto en el tiempo necesario para alcanzar un buen estado. Esto representa una mejora en el desarrollo socioeconómico de una región o país, pues la condición del patrimonio vial se encuentra relacionada con el gasto de combustible y los egresos por mantenimiento de los vehículos de parte de los usuarios. De la misma forma, se garantizan condiciones de seguridad y confort para los usuarios en la carretera en un menor tiempo. Por su parte, una reducción en el presupuesto si afecta negativamente la condición final de la red.
- Se debe encontrar un equilibrio entre condición de la red vial, presupuesto y emisión de CO<sub>2</sub>, pues los tratamientos más costosos económica y ambientalmente son aquellos que permiten levantar la condición de las secciones en pobre o muy pobre estado, de ahí la importancia de un enfoque preventivo, en lugar de uno reactivo.

## REFERENCIAS

1. Amador, L., Chaverri, J., & Rodríguez, J. (2012). *A Pavement Management System for Costa Rica: a case study*. San José: LanammeUCR.
2. Castro, A. (2015). *Fichero cantonal 2016*. San José: Instituto de Formación y Estudios en Democracia.
3. Chaverri, J., & Madrigal, D. (2011). Modelos de optimización lineal para realizar planes de inversiones de largo plazo en una red de pavimentos. *Infraestructura Vial*, 22-30.
4. Chehovits, J., & Galehouse, L. (2010). Energy usage and greenhouse gas emissions of pavement preservation processes for asphalt concrete pavements. California: 1st International Conference of Pavement Preservation.
5. CLACDS. (2016). *Índice de Progreso Social 2016*. San José: INCAE Business School.
6. Dirección de Vialidad de Chile. (2014). *Manual de Carreteras: Volumen N° 7 Mantenimiento Vial*. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas.
7. Mata, D. (2010). Índices de Condición de Pavimentos Flexibles. Trabajo Final de Graduación, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.
8. Rodríguez, J. D. (2012). *Plan de inversión a nivel estratégico en pavimentos flexibles de la Red Vial Nacional*. San José, C. R.: TFG: Escuela de Ingeniería Civil, UCR.
9. Hass, R.; Hudson, W.R.; Zaniewski, J. (1993). *Modern Pavement Management*. R.E. Krieger Publishing Company, Florida
10. Solminihaç, H. (1998). *Gestión de Infraestructura Vial*. Chile: Ediciones Universidad Católica de Chile.

# Conceptualización del procesamiento digital de imágenes para la evaluación de superficies de pavimento en Costa Rica

*Conceptualization of the digital image processing for the assessment of pavement surfaces in Costa Rica*

**Luis Diego Herra Gómez**

Unidad de Auditoría Técnica, LanammeUCR

Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica

[luis.herragomez@ucr.ac.cr](mailto:luis.herragomez@ucr.ac.cr)

**Fecha de recepción:** 14 de febrero de 2018 / **Fecha de aprobación:** 03 de mayo de 2018

## RESUMEN

La atención oportuna de un sistema de carreteras mediante actividades de mantenimiento rutinario, como la construcción de baches y el sellado de grietas, es una práctica reconocida por su buena relación costo-beneficio, al evitar que el pavimento se deteriore aceleradamente por el efecto del clima y del tránsito, reduciendo la necesidad de realizar intervenciones mayores y costosas.

Sin embargo, pese a que las actividades de mantenimiento rutinario pueden ser muy beneficiosas, en Costa Rica, identificar los puntos en carretera que requieren ser atendidos mediante este tipo de intervenciones es una labor que está sesgada al criterio de quien realiza la auscultación visual de deterioros, y dependiendo de la ruta que está siendo evaluada podría ser una actividad peligrosa en términos de seguridad vial y seguridad ciudadana si se consideran zonas de riesgo social.

Ante este panorama, se requiere contar con procesos automatizados que permitan generar un inventario de necesidades de mantenimiento de una manera ágil, objetiva y segura. Para ello, actualmente existen diversas alternativas que permiten automatizar el recuento de necesidades de mantenimiento preventivo de una carretera, siendo el procesamiento digital de imágenes una de las más útiles para este fin.

El procesamiento digital de imágenes permite, mediante el uso de algoritmos aplicados a un registro fotográfico de la carretera, definir criterios de intervención para las actividades de mantenimiento rutinario. Lo anterior, con el objetivo de identificar con mayor certeza los deterioros bajo cierto umbral de severidad presentes en una carretera.

De este modo, el registro digital de imágenes podría considerarse como un insumo muy valioso para mejorar la eficiencia en cuanto a la inversión ejecutada en un determinado sistema de carreteras, sin olvidar que este tipo de herramientas constituyen un complemento que no debe reemplazar el criterio técnico de los profesionales a cargo del sistema.

**PALABRAS CLAVES:** Conservación vial, evaluación de carreteras, procesamiento digital, GPR.

## ABSTRACT

*The timely attention of a road system through minor maintenance activities, such as potholes repair techniques and crack sealing, is a practice recognized for its good cost-benefit ratio, by preventing the pavement from an accelerated deterioration due to the effect of climate and transit, reducing the need of major and expensive interventions.*

*However, although minor maintenance activities can be very beneficial, in Costa Rica, identifying road segments that require these types of interventions is a work that could be biased to the criteria of those who perform the visual auscultation of deteriorations, and depending on the route that is being evaluated, it could be a dangerous activity in terms of road safety.*

*Given this scenario, it is necessary to have automated processes that allow generating an inventory of preventive maintenance needs in an agile, objective and safe manner. To do this, there are currently several alternatives that allow automating the count of preventive maintenance needs of a road, being digital image processing one of the most used.*

*The digital image processing allows, by using algorithms applied to a road photographic record, to define intervention criteria for minor maintenance activities, in order to identify with greater certainty the deteriorations under a certain threshold of severity present in a road.*

*In this way, the digital image registry could be considered as a very valuable input to improve efficiency in terms of the investment made in a certain road system, without forgetting that this type of tools are a complement that should not replace the technical criteria of the professionals in charge of the road management system.*

**KEY WORDS:** Road Preservation, Road Assessment, Digital Processing, GPR.

## INTRODUCCIÓN

El presente artículo muestra una revisión bibliográfica enfocada a la aplicación práctica del procesamiento digital de imágenes para el registro de necesidades de mantenimiento rutinario en una red vial. Además, en este documento se abarcan los principales aspectos que caracterizan al esquema de conservación vial para la atención del sistema de carreteras en Costa Rica. A partir de las características de este modelo de conservación, se recuerda la necesidad que tiene el estado costarricense por mejorar su red vial mediante soluciones eficientes que involucren el menor gasto posible.

La atención oportuna de un sistema de carreteras es un aspecto fundamental en la labor de gestión de un sistema de pavimentos, pues el hecho de atender deterioros que están en una etapa temprana, como grietas y baches pequeños, permite evitar un deterioro acelerado de la estructura de pavimentos, y como consecuencia la necesidad de realizar una mayor inversión para restablecer la condición inicial de la carretera. Esta tendencia se ilustra en la Figura 1, que corresponde a la curva de deterioro teórica de un pavimento. Dicha curva muestra los costos relativos de inversión asociados a la recuperación de la condición de una carretera tanto en etapas tempranas de su deterioro, como cuando la condición del pavimento es tal que requiere de una rehabilitación, evidenciando que en un periodo de tiempo relativamente corto los costos de atención de una carretera se pueden aumentar significativamente.

La información que se genera a partir de las evaluaciones de pavimentos es el eje central de la gestión de un sistema de carreteras, pues constituye un insumo fundamental para la toma de decisiones (Rodríguez, 2014). Reconociendo la importancia que tiene la atención de un pavimento en etapas tempranas de su deterioro, se muestra el procesamiento digital de imágenes como un complemento valioso para que la red vial costarricense sea atendida de forma eficiente.

## CONTEXTO COSTARRICENSE EN EL MANTENIMIENTO Y EVALUACIÓN DE PAVIMENTOS

El sistema de carreteras representa uno de los activos más importantes con los cuales puede contar un Estado, y se constituye como un actor clave para el progreso, al permitir el traslado de bienes, personas y la oferta servicios en beneficio del desarrollo socioeconómico de una región. En Costa Rica, el sistema de carreteras, más conocido como red vial nacional, permite conectar a las regiones más alejadas del país con las principales ciudades, siendo la red vial costarricense una de las más densas de América (Loría Salazar et al., 2014).

Esta condición trae consigo una serie de beneficios desde el punto de vista socioeconómico, pues dicha red permite conectar fácilmente las zonas productivas y turísticas con los centros poblacionales más concurridos. Sin embargo, si mantener un sistema de

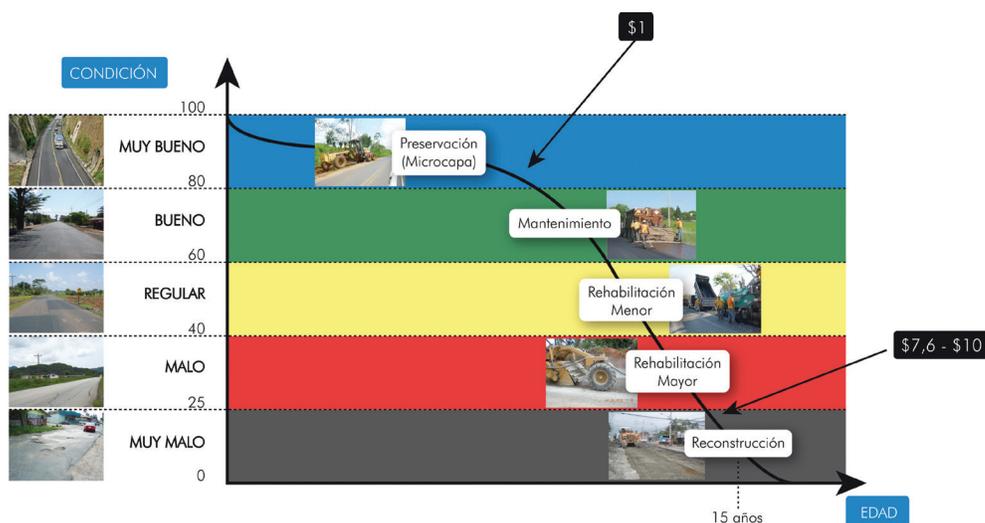


Figura 1. Curva de deterioro de los pavimentos flexibles y los costos relativos de su intervención calibrada a las condiciones de Costa Rica

(Rodríguez, 2014)

carreteras es una actividad costosa, el hecho de contar con una red vial densa exige un reto para los tomadores de decisiones del sector transporte en Costa Rica, quienes cuentan con un presupuesto limitado para atender estas actividades de mantenimiento.

Actualmente, el esquema de conservación vial en Costa Rica se basa en el pago por actividades mediante precios unitarios, donde empresas privadas concursan para optar por el mantenimiento de una de las 22 zonas de conservación que componen al país. Cada una de estas zonas tiene definido un listado de actividades para el mantenimiento vial según sus características, por ejemplo: construcción de muros de retención, colocación de sobrecapas asfálticas, construcción de baches, tuberías, entre otros; cuyo precio y unidad de pago fueron acordados con la Administración previo al inicio de cada contrato.

Ahora bien, como este sistema de contratación se basa en precios unitarios, el contratista usualmente solo se preocupa por ejecutar las actividades que la Administración le solicite. Bajo este esquema, la Administración debe asumir la tarea de identificar cuáles tramos de la red vial requieren ser intervenidos, así como la magnitud de estas inversiones. De este modo, si se tiene en cuenta que el recurso humano disponible por el Estado para el registro de necesidades en la red vial es escaso, surge la necesidad de contar con apoyo técnico adicional, es acá donde aparece un tercer actor en el sistema de conservación vial costarricense: los administradores viales.

Los administradores viales son empresas contratadas por el Estado con el propósito de que estos sean un apoyo para la Administración en cuanto al registro de necesidades y supervisión de las actividades realizadas por los contratistas asignados a cada una de las 22 zonas de conservación vial. De esta forma, para definir la estrategia de inversión en el mantenimiento de la red vial nacional, la Administración cuenta con el apoyo de los administradores viales y como insumo adicional cuenta con informes de evaluación de la red vial nacional emitidos bienalmente por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR).

Estos informes de evaluación categorizan en términos de fricción superficial, de regularidad superficial y desde un punto de vista estructural la condición del sistema de carreteras en Costa Rica, sugiriendo estrategias de intervención de acuerdo con el estado de cada una de las rutas que componen la red. Lo anterior, le ha permitido a la Administración tener claridad sobre el panorama general de las carreteras en el país y las necesidades de cada ruta en términos de la magnitud de la intervención que conviene realizar, ya sean actividades de mantenimiento rutinario, colocación de una sobrecapa, rehabilitación, o incluso si es necesaria, una reconstrucción de la carretera.

Para los casos en que la condición de la ruta amerita una reconstrucción, rehabilitación o sobrecapa, la definición del alcance de las intervenciones está sujeta a un diseño formal, que toma en cuenta variables como las características de los materiales existentes, importancia de la ruta y condiciones climáticas de la zona, que permiten definir con detalle la magnitud de las obras. Por otra parte, cuando la condición de la ruta es relativamente buena y solo se requiere de actividades de mantenimiento rutinario, los administradores viales son los que, mediante auscultaciones visuales, sirven de apoyo para la Administración, sugiriendo estrategias de intervención como la colocación de sellos de grietas, construcción de baches, entre otros.

Con el objetivo de brindar una herramienta que lograra homogenizar y sistematizar los criterios de auscultación para el diagnóstico imparcial, objetivo y técnicamente sustentado de la evaluación de los pavimentos flexibles y rígidos en Costa Rica (LanammeUCR 2012), el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) oficializó el Manual de auscultación visual de pavimentos de Costa Rica (MAV-2016).

Sin embargo, pese a que la oficialización del MAV-2016 representó un gran avance en aras de reducir el criterio subjetivo a la hora de realizar un levantamiento de deterioros, el proceso de auscultación visual llevado a cabo para determinar las necesidades de mantenimiento rutinario de una carretera es tedioso y en muchas rutas resulta peligroso en términos de seguridad vial. Adicionalmente factores climáticos y zonas de riesgo social aumentan el sesgo y la inseguridad de quien realiza las auscultaciones visuales provocando que exista cierto margen de error asociado a la selección óptima de estas actividades de mantenimiento. Por lo tanto, con tal de optimizar las estrategias de intervención a la red vial costarricense, surge la necesidad de automatizar los procesos de identificación de deterioros menores mediante técnicas ágiles, eficientes y objetivas, siendo la técnica del procesamiento digital de imágenes una de las alternativas más utilizadas para tal propósito.

## **PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES PARA LA EVALUACIÓN DE SUPERFICIES DE PAVIMENTO**

La utilización de las diferentes regiones del espectro electromagnético ha permitido reunir información sobre un mismo objeto en una gran variedad de formas, que van desde fotografías hasta imágenes térmicas. El uso de esta información constituye un insumo muy valioso que ha permitido el avance tecnológico de diversas profesiones, tales como la medicina –con la implementación de rayos x–, y la geología –con el uso de termografía infrarroja

para la detección de planos de falla- (Schnebele et al., 2015). Para la detección de deterioros superficiales en pavimentos también es frecuente el uso de las distintas regiones del espectro electromagnético, siendo el espectro visible, con el recuento de imágenes digitales, una de las regiones más utilizadas para tales fines de evaluación.

Las imágenes digitales se pueden considerar como funciones  $f(x,y)$  que han sido discretizadas tanto en coordenadas espaciales como en luminosidad, donde las variables independientes  $x,y$  representan una ubicación y el valor de  $f$  para cualquier par  $(x,y)$  permite determinar la luminosidad (o nivel de gris) de la imagen en dicho punto. Así, una imagen puede ser considerada como una matriz cuyas filas y columnas identifican un punto en la imagen, y el correspondiente valor de cada uno de estos puntos (también llamados píxeles) permite identificar el nivel de gris correspondiente (Escalante, 2006).

Los métodos de procesamiento digital de imágenes son técnicas que, al considerar el componente numérico de una fotografía, y mediante la aplicación de algoritmos de segmentación, permiten convertir una imagen digital en otra, donde se resalte cierta información de interés, atenuando o eliminando aspectos irrelevantes de la imagen según el tipo de aplicación que se esté llevando a cabo (Alvarado, 2012).

El procesamiento digital de imágenes es un campo de investigación abierto, cuyo constante progreso ha requerido de una integración multidisciplinaria entre diversos campos como la computación, las matemáticas y la medicina, ya que la inquietud del ser humano por imitar ciertas funciones biológicas del cuerpo humano que intervienen en la percepción y manipulación de imágenes, ha sido uno de los principales motivos que han impulsado el origen de esta técnica (Escalante, 2006).

El sistema visual humano, por ejemplo, puede inferir que los objetos continuos existen incluso cuando su apariencia visual está distorsionada por la presencia de otros objetos en la escena visual o por la ausencia de líneas o contornos en el objeto

percibido. Dada la imagen de la Figura 2, resulta casi inevitable observar una disposición de círculos y triángulos. Sin embargo, no hay círculos o triángulos completos en la imagen, en lugar de ello, partes de estas formas están dispuestas de tal manera que la mente tiene que inferir para construir objetos perceptuales continuos (Kast, 2012).

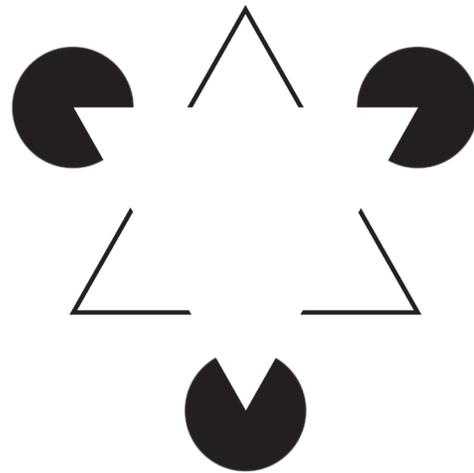


Figura 2. Triángulo de Kanizsa (Kast, 2012)

Por lo tanto, el cerebro humano está dotado con la capacidad de reconocer patrones en presencia de información sensorial excesiva, que generalmente contiene abundante “ruido” y lo que busca es maximizar la percepción de las señales al tratar de eliminar o atenuar estos elementos que no se consideren importantes (Kast, 2012). Siguiendo esta analogía, el procesamiento digital de imágenes en la detección de deterioros superficiales en pavimentos lo que busca es sacar de contexto aquellas partes de la carretera que se encuentren en buen estado, con el propósito de analizar con mayor facilidad las áreas que requieren de algún tipo de intervención.

### Etapas del Procesamiento Digital de Imágenes

En la Figura 3 se ilustran las etapas a seguir para llevar a cabo el procesamiento digital de imágenes.

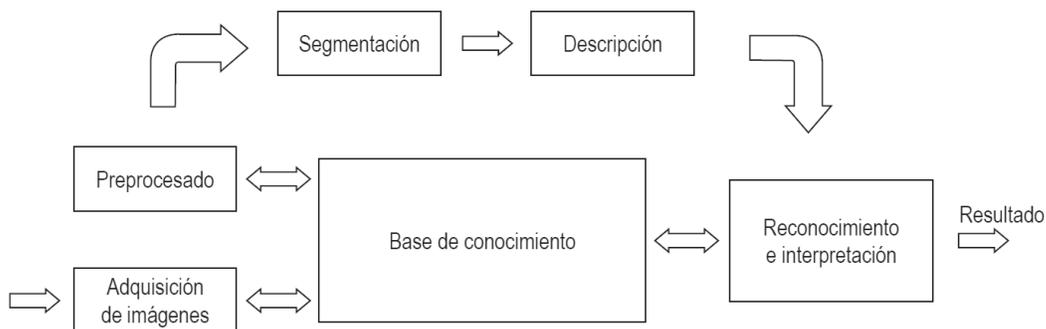


Figura 3. Etapas del procesamiento digital de imágenes (La Serna y Concha, 2009)

Como punto de partida, se requiere adquirir las imágenes que serán procesadas y analizadas. Para propósitos de identificación de deterioros superficiales en una carretera, los vehículos de reconocimiento son una herramienta muy valiosa, pues permiten mediante un registro continuo (imágenes o video), capturar rápidamente múltiples deterioros presentes en el pavimento. En Costa Rica, el LanammeUCR cuenta con el “Geo3D (Trimble)”, herramienta que permite cumplir de manera eficiente con esta primera etapa del procesamiento digital de imágenes (adquisición de imágenes georreferenciadas).



Figura 4. Geo3D propiedad del LanammeUCR

### Mejora de Imágenes Digitales (Preprocesamiento)

Esta etapa se realiza con el propósito de identificar y eliminar aquellas fallas que puedan existir en la imagen, para mejorarla, y que consecuentemente su análisis sea más sencillo (La Serna y Concha, 2009). La aplicación de filtros de mediana es una de las técnicas más utilizadas para la mejora de imágenes de pavimentos. Esta técnica permite homogenizar todos aquellos píxeles de una imagen que cuentan con niveles de gris muy distintos a sus píxeles adyacentes (Ouyang et al., 2011).

Una de las principales ventajas que trae consigo la aplicación de filtros de mediana, es el hecho de que esta técnica permite mejorar la imagen sin la necesidad de eliminar sus bordes o principales rasgos, permitiendo su posterior análisis (Chandel y Gupta 2013). Adicionalmente, a pesar de que el fundamento teórico de esta técnica puede ser complejo, actualmente hay muchos programas computacionales que permiten realizar este trabajo a partir de funciones preprogramadas. Por ejemplo, el software *MathLab* mediante el comando “medfilt2(A)” permite establecer filtros de mediana generando resultados como los que se detallan en la Figura 5, donde se muestra una imagen cuyos píxeles con una escala de gris significativamente distinta fueron homogenizados con el resto de la imagen sin que se diera una pérdida en los rasgos principales de la fotografía.



Figura 5. Mejora de imagen digital a partir de filtro de mediana

### Segmentación de Imágenes Digitales

La segmentación de imágenes digitales es el proceso a partir del cual se sacan de contexto aquellas partes de la imagen que no interesan para el análisis, con el propósito de dar énfasis a ciertos aspectos de la fotografía; para ello, hasta el momento se han desarrollado una gran cantidad de algoritmos de segmentación. A continuación, se describe la aplicación de algunos de estos algoritmos para la detección de huecos y grietas en la superficie de carreteras.

**Algoritmos para la Detección de Bordes:** Un borde se puede considerar como el conjunto de píxeles que existe entre dos secciones homogéneas de una imagen. A lo largo del borde, la función  $f(x,y)$  que describe a una fotografía experimenta un cambio en su valor de escala de grises (Alvarado, 2012), de modo que matemáticamente estos cambios pueden ser detectados y aislados usando derivadas de primer y segundo orden.

En la identificación de deterioros superficiales de una carretera, el uso de algoritmos de borde se ha vuelto una práctica común, puesto que el trazo de una grieta superficial constituye por sí misma un borde. La Figura 6 muestra una imagen de una grieta procesada a partir de un filtro de mediana, que posteriormente con la aplicación de un algoritmo de borde fue separada del resto de la carretera.

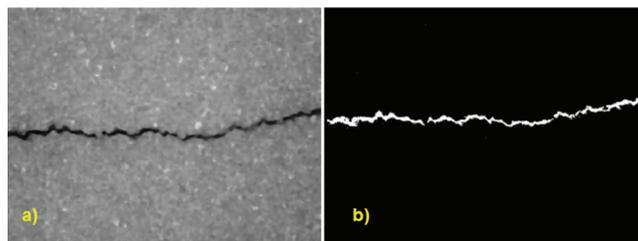


Figura 6. Grieta procesada a partir de un filtro de mediana y posteriormente a partir de un algoritmo de borde (Ouyang et al., 2011)

La detección de huecos requiere de técnicas como la umbralización para poder ser cuantificados de manera automatizada, debido a que por sus características geométricas el uso de algoritmos de borde no es suficiente.

**Umbralización:** Este es uno de los métodos más importantes de la segmentación de imágenes, ya que permite, a partir condiciones aplicadas a los valores de intensidad de gris que componen a una imagen, extraer áreas de una fotografía. Por ejemplo, si se define  $f(x,y)$  como la imagen original,  $g(x,y)$  como la imagen umbralizada y 125 como el valor umbral medido en nivel de gris, es posible a partir de la ecuación (1) extraer el óvalo negro mostrado en la Figura 7.

$$\begin{cases} g(x,y) = 255 & \text{si } f(x,y) \geq 125 \\ g(x,y) = 0 & \text{si } f(x,y) < 125 \end{cases} \quad (1)$$

Donde un valor de intensidad de gris de cero se asocia con el color negro y valores de 255 con el color blanco.



Figura 7. Ejemplo de segmentación mediante umbralización

(La Serna y Concha, 2009)

De forma análoga al ejercicio mostrado, es posible mediante algoritmos de umbralización identificar de manera automatizada huecos en la superficie de un pavimento. Por ejemplo, Koch et al. (2013), a partir del uso de algoritmos para la detección de borde y umbralización, logró identificar satisfactoriamente la ubicación de huecos en una superficie de pavimentos, obteniendo los resultados que se muestran en la Figura 8.



Figura 8. Detección de huecos a partir de algoritmos de detección de borde y umbralización (Koch et al., 2014)

De acuerdo a lo anterior, al emplear la información que se pueda generar de la etapa de segmentación es posible caracterizar los deterioros encontrados, desarrollar bases de datos con un registro de necesidades de mantenimiento y a partir de ello establecer criterios de intervención que le permitan a la Administración costarricense mejorar la eficiencia en cuanto a la inversión que realiza a la red vial nacional.

## CONCLUSIONES

El esquema de conservación vial costarricense, por sus características que se basan en un sistema de precios unitarios, hace requerir a la Administración estatal de un método de auscultación de deterioros eficiente y objetivo que le permita atender pequeños deterioros en el sistema de carreteras de manera oportuna.

En aras de brindar una alternativa que permita identificar este tipo de deterioros, el presente artículo introduce la técnica del procesamiento digital de imágenes. Esta técnica, al permitir identificar deterioros superficiales desde un vehículo en movimiento presenta ciertas ventajas, como la rapidez en el levantamiento de información y la reducción del riesgo a la seguridad vial y la probabilidad de ocurrencia de un asalto en zonas socialmente vulnerables asociada a tener un inspector recorriendo la carreta a pie para observar la condición superficial de la carretera.

Además, el procesamiento digital de imágenes ha sido una técnica ampliamente utilizada en diversos campos de aplicación profesional. Por lo tanto, posee un amplio respaldo y diversas variantes que podrían ayudar a identificar diversos tipos de deterioro en carretera.

En Costa Rica, instituciones como el LanammeUCR cuentan con el recurso material y humano necesario para implementar esta técnica de auscultación visual en la evaluación de la condición de las carreteras.

El fundamento matemático que hay detrás del procesamiento digital de imágenes puede ser complicado; sin embargo, como esta técnica se usa en varios campos de aplicación profesional, la teoría detrás de esta técnica está bien documentada y se cuenta con experiencias de su aplicación para distintos fines.

Por último, pese a las ventajas que conllevan el uso de técnicas como el procesamiento digital de imágenes, se debe tener claro que dicha herramienta hasta el momento no puede sustituir el criterio de un profesional en el área, sino que más bien este tipo de herramientas deben funcionar como un complemento para la toma de decisiones.

## REFERENCIAS

1. Alvarado Moya, J. P. (2012). *Procesamiento y Análisis de Imágenes Digitales*. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
2. Ávila Esquivel, T., Rodríguez Castro, E., Barrantes Jiménez, R., Castro Herrera, J.A., Allen Monge, J., Arriola Guzmán, R., Sequeira Rojas, W. (2012). *Manual de auscultación visual de pavimentos de Costa Rica*. San Pedro: Universidad de Costa Rica.
3. Chandel, R., & Gupta, G. (2013). Filtering algorithms and techniques. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 198-202.
4. Escalante Ramirez, B. (2006). *Procesamiento digital de imágenes*. Distrito Federal, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
5. Kast, R. (2012). *Knowing Neurons*. Recuperado el 11 de noviembre de 2017, de <http://knowingneurons.com/2012/12/19/chords-of-perception/>
6. Koch, C., Jog, G., & Brilakis, I. (2013). Automated Pothole Distress Assessment Using Pavement Video Data. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 370-378.
7. La Serna Palomino, N., & Concha, U. (2009). Técnicas de segmentación en procesamiento digital de imágenes. *Revista de ingeniería de sistemas de informática*, 9-16.
8. Loría Salazar, G., Barrantes, R., Jiménez, D., Lezama, V., Morales, M., Rodríguez, J. D., y otros. (2014). *Vigésimoprimer informe de estado de la nación en desarrollo humano sostenible: Implicaciones en infraestructura y transporte*. San Pedro, Monstes de Oca: Estado de la Nación.
9. Ouyang, A., Luo, C., & Zhou, C. (2011). Surface distresses detection of pavement based on digital image processing. *Computar and Computing Technologies in Agricultures IV*, 368-375.
10. Rodríguez Morera, J. D. (2014). *La auscultación de pavimentos a nivel de red y su importancia en la gestión de carreteras*. San Pedro: LanammeUCR, Universidad de Costa Rica.
11. Schnebele, E., Tanyu, B. F., Cervone, G., & Waters, N. (2015). Review of remote sensing methodologies for pavement management and assesment. *Springer*, 0-19.

# Contexto de las especificaciones de regularidad superficial en proyectos de rehabilitación costarricense

*Surface roughness specifications context in costa rican rehabilitation projects*

**Ing. Verónica Solís Salas**

Ingeniera Civil

veronicass91@gmail.com

**Fecha de recepción:** 31 de marzo de 2018 / **Fecha de aprobación:** 19 de junio de 2018

## RESUMEN

Para garantizar el desempeño del pavimento en proyectos de rehabilitación con sobrecapa asfáltica es necesaria la implementación de especificaciones técnicas, que permitan evaluar la calidad de la construcción. La aplicabilidad de las especificaciones debe ser validada en términos de valores logrados en proyectos previos, en conjunto con referencias de carácter internacional, donde ya hayan entrado en vigencia especificaciones similares y un seguimiento posterior para validar resultados. En el presente proyecto se analiza la aplicabilidad de las especificaciones establecidas en el *Manual de especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes de Costa Rica* y los requisitos del cartel de licitación N°.2014LN-000018-0CV00, para nueve proyectos en Costa Rica intervenidos con sobrecapa asfáltica en los últimos dos años. De la investigación se concluye que los rangos establecidos para las especificaciones costarricenses concuerdan con los establecidos en países como Chile, Colombia, España y Estados Unidos. Adicionalmente, los resultados mostraron que, pese a que tales especificaciones no eran vigentes en el cartel de licitación, se lograron cumplimientos aceptables, lo que indica la aplicabilidad de la normativa a la realidad costarricense. Finalmente, como producto de la investigación, se definieron mejoras a las especificaciones actuales que pueden ser verificadas posteriormente en los nuevos proyectos que entraran en ejecución.

**PALABRAS CLAVES:** IRI, regularidad superficial, sobrecapas, especificaciones

## ABSTRACT

*To guarantee pavement performance in rehabilitation projects with asphalt overlays, the implementation of technical specifications that enables the assessment of its construction quality is necessary. The applicability of the specifications must be validated in terms of achieved values from past projects altogether with international references, where similar specifications have gone into effect, followed up with the validation of the results. In the present project, the applicability of the specifications from the Manual of general specifications for road and bridge constructions in Costa Rica is analyzed with the requirements of bid paper N°2014LN-000018-0CV00 for nine projects with asphalt overlay interventions in the last two years. From the investigation it can be concluded that the established range of values in the specifications matches the ones in countries like Chile, Colombia, Spain and United States. Additionally, the results showed that, even though said specifications were not valid for the bid paper, acceptable compliance was achieved, which indicates the applicability of the normative in the Costa Rican reality. Finally, as a product of the investigation, improvements for the current specifications were defined, where these can be verified in actual projects.*

**KEY WORDS:** IRI, roughness, overlays, specifications

## INTRODUCCIÓN

El Índice de Regularidad Internacional, IRI, se calcula utilizando una simulación del modelo de cuarto de carro, que circula sobre mediciones del perfil longitudinal de una carretera a una velocidad de simulación de 80 km/h. El IRI es utilizado en el control, aceptación y recepción de proyectos nuevos y de rehabilitación de carreteras, ya que permite evaluar y garantizar la funcionalidad del pavimento, brindando mayor seguridad y confort a los conductores, así como disminuir costos de operación y costos de mantenimiento.

Para una correcta aplicación del IRI como indicador de la condición funcional del pavimento es necesario validar las normativas existentes, con el fin de garantizar que las obras viales cumplan con condiciones de calidad, confort y seguridad al usuario de acuerdo a valores que pueden ser alcanzados en campo. Generalmente, en proyectos de rehabilitación se establecen porcentajes de mejora para determinar el porcentaje de pago al constructor de la obra. Estos porcentajes de pago, influenciarán de forma directa en los costos de operación y funcionalidad de la carretera, por lo que deben ser determinados con criterios técnicos de las normativas que, a su vez, permitan una adecuada evaluación de la regularidad superficial del pavimento. A continuación, se comentará acerca de las normativas vigentes en Costa Rica, relacionadas con este tema.

### *Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (CR-2010)*

En la sección 401.17 Control de regularidad (IRI) en sobrecapas, reciclajes con sobrecapas o sobrecapas sobre fresados, de mezcla asfáltica en caliente, se establece los requisitos para el pago de trabajos de rehabilitación asociado a la regularidad superficial del pavimento luego de ser intervenido por una sobrecapa asfáltica y los factores de pago según el porcentaje de mejora en el IRI luego de la rehabilitación.

El porcentaje de mejora del IRI se determina al medir la regularidad superficial del pavimento antes y después de la colocación de la sobrecapa en toda la longitud del proyecto. Dicho porcentaje debe de realizarse con un decimal para segmentos de 100 metros, mediante la Ecuación 1:

$$\%Mejora = \left[ \frac{IRI_{Original} - IRI_{Final}}{IRI_{Original}} \right] * 100 \quad (1)$$

El factor de pago de la obra se determina según el porcentaje de mejora en el IRI de segmento de 100 metros y el tipo de sobrecapa asfáltica, como se muestra en el Cuadro 1.

*Cuadro 1. Factor de pago en sobrecapas según porcentaje de mejora del IRI.*

Sobrecapa simple <sup>(1)</sup> % de mejora del IRI	% de pago del valor de la carpeta según mejora <sup>(1)</sup>	Multi-Capa <sup>(2)</sup> % de mejora del IRI	% de pago del valor de la carpeta según mejora <sup>(2)</sup>
≥ 50	100	≥ 60	100
35 < 50	75	40 < 60	75
25 < 35	50	30 < 40	50
15 < 25	25	20 < 30	25
< 15	Rechazo <sup>(3)</sup>	< 20	Rechazo <sup>(3)</sup>

(1) Para sobrecapas sencillas sin ningún otro trabajo previo de corrección como fresado, rectificación y/o prenivelación en más del 25% de la superficie de la calzada existente.

(2) Para sobrecapas sencillas con otras operaciones previas, tales como fresado, rectificación y/o prenivelado, seguido de uno o más sobrecapas, o dos o más sobrecapas colocadas sobre el pavimento sin fresado, rectificado o prenivelado.

(3) Cuando las correcciones no son permitidas o no son efectuadas por el Contratista.

Fuente: Adaptado de Ministerio de Obras Publicas y Transportes, 2010

Las áreas defectuosas pueden ser corregidas según el método de corrección aprobado por el Ingeniero del proyecto. En caso de realizar correcciones, se debe obtener nuevamente el IRI en las áreas corregidas, y con el valor obtenido se sustituye el original.

El cálculo del IRI para sobrecapas asfálticas debe realizarse con equipos clase 1, según la clasificación de equipos definida por el Banco Mundial, y reportarse para secciones de 100 metros. Se asume que el cálculo del IRI es determinado con las indicaciones de la sección 401.16, debido a que no se especifica un método. Se establece que el IRI se debe reportar en tramos de 100 metros y, en caso de presentar singularidades, éstas afectan el sector de 100 metros, por lo cual no se tomará en cuenta en la evaluación. (Ministerio de Obras Públicas y Transportes, 2010)

### Cartel de Licitación Pública N°. 2014LN-000018-0CV00

Esta licitación establece en la sección: *Control de regularidad (IRI) en sobrecapas, reciclajes con sobrecapas o sobrecapas sobre fresados, de mezcla asfáltica en caliente (Mantenimiento Periódico)*, que el pago para proyectos de rehabilitación se calculará de igual manera que lo establecido en el CR-2010; sin embargo, se realiza una enmienda que modifica los criterios de aceptación y pago.

Se establece que el uso de estas estrategias de intervención se debe justificar técnica y económicamente por parte del Ingeniero en proyectos que presentan valores de IRI mayores a 6,4 m/km junto con una capacidad estructural deficiente. (Consejo Nacional de Vialidad, 2014)

En el cartel se establecen requisitos de aceptación que implicaría el pago del 100% de las labores realizadas según el valor inicial del IRI. Estos requisitos son presentados en el Cuadro 2.

*Cuadro 2. Especificación de IRI recomendada para colocación de sobrecapas asfálticas en proyectos de conservación vial según Enmienda N°2 al cartel de licitación pública N°.2014LN-000018-0CV00*

Rango inicial de IRI (m/km)	IRI Final (m/km)
2,5 - 3,6	Reducción del 10%
3,6 - 6,4	≤ 3,2
> 6,4	Reducción del 50% y ≤ 5

Fuente: Adaptado de Consejo Nacional de Vialidad, 2015

El cartel de licitación para el mantenimiento y rehabilitación de la red vial pavimentada indica que la medición del perfil se debe realizar en intervalos de 25 mm. La enmienda N°2 al cartel de licitación indica que la evaluación del IRI se debe realizar en tramos de 100 metros, al igual que el CR-2010, donde el cálculo se

debe realizar antes e inmediatamente después de la intervención. En caso de incumplimiento el contratista debe corregir las áreas defectuosas en tramos de 100 metros, para alcanzar los valores mostrados en el Cuadro 2, en caso de no cumplirlos la obra será rechazada. (Consejo Nacional de Vialidad, 2015)

## OBJETIVOS

### Objetivo General

Evaluar la aplicación de las especificaciones del Índice de Regularidad Internacional (IRI) en los proyectos de rehabilitación carreteros en Costa Rica.

### Objetivos Específicos

- Procesar datos obtenidos en campo por la Unidad de Auditoría Técnica y la Unidad de Gestión y Evaluación de Red Vial Nacional del LanammeUCR-PITRA en proyectos de rehabilitación para la evaluación de la normativa nacional de IRI.
- Analizar la información recopilada y procesada de los proyectos bajo las especificaciones establecidas en la sección 401.17 del CR-2010 y en el cartel de licitación N°. 2014LN-000018-0CV00.
- Dar recomendaciones para la normativa costarricense utilizada en proyectos de rehabilitación carreteros.

## METODOLOGÍA

Para la realización del proyecto, se recopilaron datos del IRI en pavimentos flexibles de rutas pertenecientes a la Red Vial Nacional Pavimentada. La información de la condición previa a la colocación de la sobrecapa asfáltica se obtuvo de la Evaluación de Red Vial Nacional del 2015, facilitados por la Unidad de Gestión y Evaluación de Red Vial Nacional del Programa de Infraestructura del Transporte (PITRA) del LanammeUCR. Para la condición posterior, se realizaron mediciones de perfil y cálculo del IRI en nueve proyectos nuevos de rehabilitación con sobrecapa asfáltica, facilitados por la Unidad de Auditoría Técnica del PITRA.

Después de recopilar los datos de IRI de cada uno de los proyectos, se procesó la información para su posterior análisis. El procesamiento de información se realizó siguiendo el procedimiento establecido en el CR-2010 y en el cartel de licitación para conservación vial. Se obtuvieron resultados individuales para cada proyecto y se realizaron análisis estadísticos con t-pareada para determinar si las especificaciones fueran adecuadas a la realidad de los proyectos de rehabilitación.

## DESARROLLO

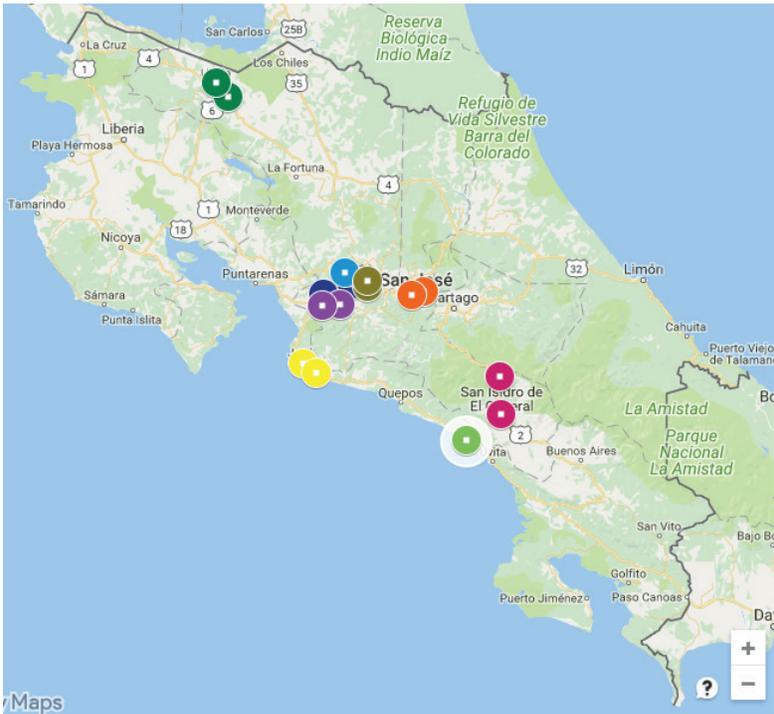
Para el desarrollo de la investigación se seleccionaron nueve proyectos de la Red Vial Nacional Pavimentada intervenidos mediante la colocación de una sobrecapa asfáltica, los cuales se listan a continuación:

Los datos de IRI para cada uno de los proyectos, antes de la rehabilitación, utilizados en el desarrollo de esta investigación se adquieren de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica del periodo 2014-2015. Estos datos presentan el IRI en intervalos de 100 m, de igual forma como lo solicita la normativa, sin embargo, no descartan las singularidades presentes y son calculados en un solo sentido del proyecto, esto debido a que se utilizan los datos de la Evaluación de la Red Vial Nacional realizada por el LanammeUCR.

Cuadro 3. Rutas y secciones de control intervenidos mediante sobrecapa asfáltica

Proyecto	Ruta Nacional	Sección de control
Atenas – San Mateo	3	20100, 20111, 20112
Circunvalación (Calle Blancos – Hatillo 8)	39	19089, 19095, 19096, 19097, 19098, 19099, 19100, 19101, 19102, 19103, 19104 y 19105
Jacó - Playa Hermosa	34	60140
Tárcoles – Turrubares	137	10171 y 10172
Upala – Colonia Puntarenas	4	20022
Piedra Alta – San Isidro	2	30680, 10003, 10010 y 10020
Palmares – Atenas	135	20502 y 20510
Turrúcares – La Garita	136	20450
San Isidro - Barú	243	10930, 10941, 10942 y 60480

	Atenas – San Mateo
	Circunvalación
	Jacó – Playa Hermosa
	Tárcoles – Turrubares
	Upala – Colonia Puntarenas
	Piedra Alta – San Isidro
	Palmares – Atenas
	Turrúcares – La Garita
	San Isidro - Barú

Para el caso de los datos de IRI después de la aplicación de la sobrecapa asfáltica se realizó la medición del perfil longitudinal cada 10 cm, utilizando un perfilómetro inercial, por lo que se promedian diez valores consecutivos para determinar el IRI de 100 m.

En el procesamiento de los datos no se descartan las singularidades presentes en el proyecto, sin embargo, para el análisis probabilístico se descartan los valores atípicos presentes, los cuales podrían representar la presencia de alguna singularidad en el sector analizado o secciones que podrían ser corregidas. Además, debido a que la normativa realiza una comparación antes y después de la colocación de una sobrecapa asfáltica fue necesario el uso del software ArcGIS 10.4.1 para darle un kilometraje a cada sección de 100 m evaluada y lograr realizar una comparación de aproximadamente el mismo sector. Se define como valores atípicos aquellos valores mayores a 1,5 veces el rango intercuartil que podrían representar alguna singularidad.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los proyectos de sobrecapa se clasifican en dos tipos: sobrecapa simple de mejora y multicapa de mejora. Se realiza un Análisis de Varianza (ANOVA) para determinar si existe variabilidad entre los proyectos, comparando la condición inicial de los proyectos, basándose en el IRI inicial según el tipo de sobrecapa asfáltica.

El análisis de la especificación se realiza en tramos donde la técnica de intervención aplicada es la correcta según la capacidad estructural y funcional de la vía basado en lo especificado en el informe de Evaluación de la Red Vial Nacional 2015 (LanammeUCR, 2015), por lo que se eliminan del proyecto Calle Blancos - Hatillo 8 los tramos pertenecientes a las secciones de control 19095, 19102, 19103 y 19105. La eliminación de estos tramos se realiza para evaluar si se cumplen los requisitos establecidos cuando la técnica de rehabilitación es la que se propone en la ERVN2015.

### CR-2010

#### Sobrecapa simple de mejora

En la Figura 1, se muestra una comparación mediante diagrama de cajas de diversos proyectos clasificados como sobrecapa simple, donde se observa diferencias por proyecto. Los resultados del ANOVA rechazan la hipótesis de igualdad entre las medias de los valores iniciales de IRI de los proyectos clasificados como sobrecapa simple de mejora. Las comparaciones realizadas en parejas mediante Tukey obtienen 5 diferentes agrupaciones para los 6 proyectos de sobrecapa lo que muestra una alta variabilidad

entre la condición inicial de cada proyecto, por lo que se realiza un análisis descriptivo al aplicar la normativa establecida en la sección 401.17 del CR-2010.

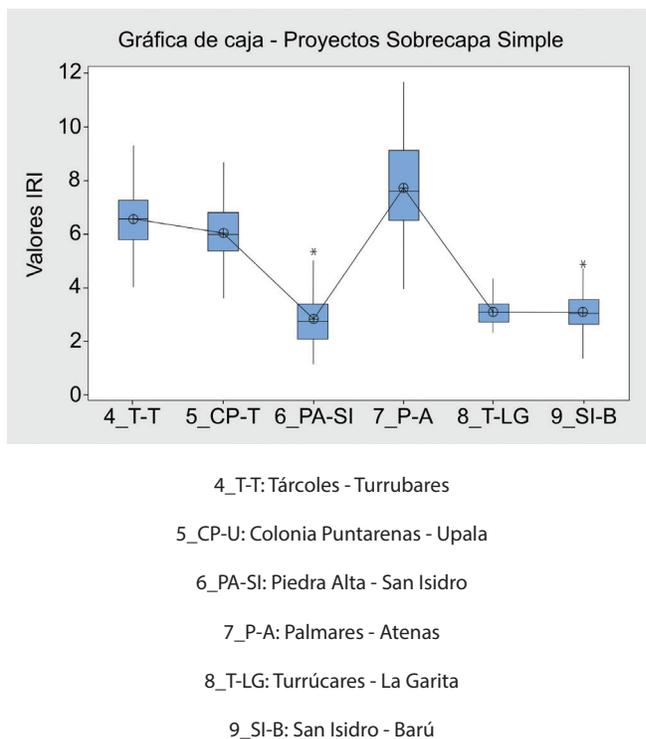


Figura 1. Diagrama de cajas para los proyectos de sobrecapa simple según la condición inicial de IRI

En la Figura 2 y Cuadro 3, se muestra que únicamente un 16% de los tramos evaluados clasifican en condición de aceptación, por lo que reciben un 100% del pago por labores realizadas. Por otro lado un 37% del total de tramos presentan porcentajes de mejora inferiores al 15%, implicando el rechazo de estos tramos.

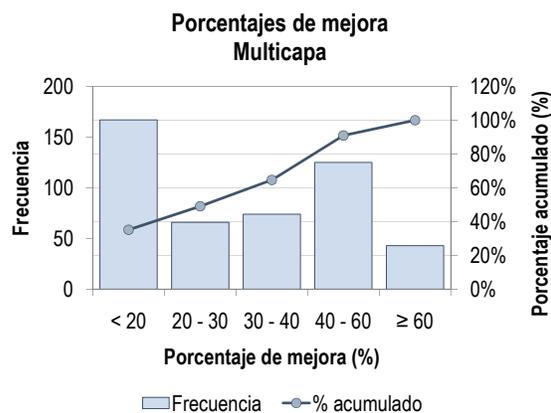


Figura 2. Distribución tramos según porcentajes de mejora para proyectos de sobrecapa simple.

Cuadro 4. Resultados de evaluación según sección 401.17 del CR-2010, proyectos de sobrecapa simple

Proyecto	Porcentaje de pago según CR-2010				
	100%	75%	50%	25%	Rechazo
Sobrecapa simple	16%	22%	13%	13%	37%

El valor promedio de IRI inicial para todos los tramos era de 4,0m/km y luego de la intervención fue de 2,7m/km, lo que implica una disminución promedio de 1,3 m/km. En todos los tramos de sobrecapa simple se obtuvo un porcentaje de mejora promedio de 22%, lo que implica un pago del 25% de las obras. Se obtiene que un 21% de los tramos empeoran la condición de regularidad, mientras que un 79% presenta alguna mejoría luego de la aplicación de la sobrecapa asfáltica, sin embargo, no se logran cumplir las especificaciones del CR-2010.

### Multicapa de mejora

En la Figura 3, se muestra un diagrama de cajas de los valores iniciales de IRI para cada proyecto clasificado como multicapa de mejora, donde se observa diferencias por proyecto. Se realiza un ANOVA para determinar si los proyectos cuentan con condiciones de regularidad similares previas a su intervención, el cual indica que al menos una de las medias es diferente. Por ser únicamente tres proyectos de multicapa de mejora se realiza un análisis descriptivo, en lugar de estadístico, de la aplicación de normativa del CR-2010. En la Figura 4 se presenta estos resultados y la distribución de los tramos restantes según el porcentaje de mejora.

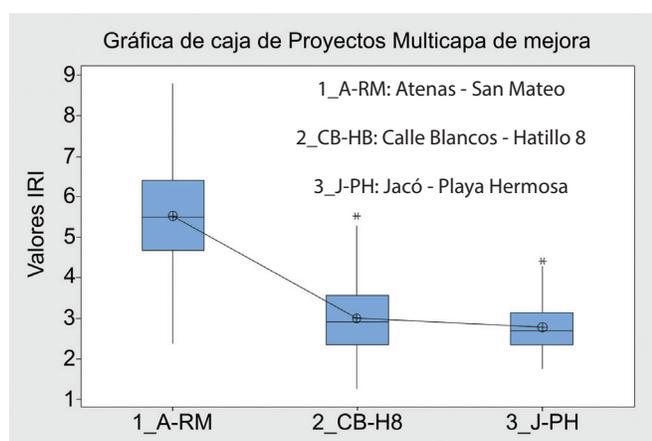


Figura 3. Diagrama de cajas para los proyectos de multicapa de mejora según la condición inicial de IRI

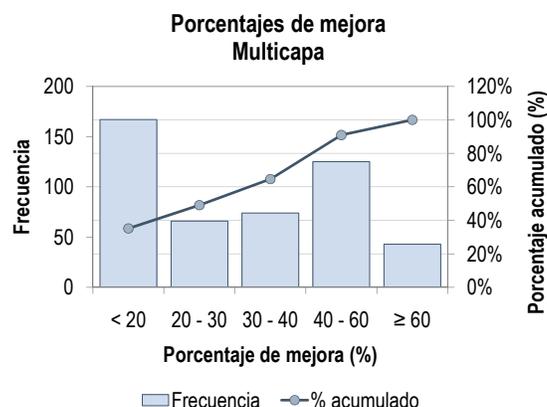


Figura 4. Distribución tramos según porcentajes de mejora para proyectos de multicapa de mejora.

En el Cuadro 5 se puede observar que un 9% de los tramos cumplen con el requisito para el criterio del pago del 100%; mientras que un 35% presentan porcentajes de mejora inferiores al 20%, lo que implica el rechazo de dichos tramos.

Cuadro 5. Resultados de evaluación según sección 401.17 del CR-2010, proyectos de multicapa de mejora

Proyecto	Porcentaje de pago según CR-2010				
	100%	75%	50%	25%	Rechazo
Multicapa de mejora	9%	26%	16%	14%	35%

Para la condición inicial se presenta un valor promedio de IRI de 4,1 m/km y después de la intervención se obtiene un valor de 2,8 m/km. El porcentaje de mejora promedio fue de 22%, lo que implica un 25% del pago de obras. Se encuentra un 19% que empeoran su condición de regularidad superficial, mientras que un 81% presentan alguna mejoría en la regularidad superficial, sin embargo, solamente el 8% alcanzan la condición de aceptación de pago del 100%, por lo que no se cumplen los requisitos establecidos en el CR-2010.

### Cartel de Licitación

Debido a las condiciones iniciales variables, se realiza un análisis descriptivo de los tramos de los nueve proyectos mediante los requisitos de aceptación para sobrecapas asfálticas establecidos en la enmienda N°2 del cartel de licitación N°.2014LN-000018-0CV00, según el tipo de tratamiento para compararlo con el análisis realizado para la sección 401.17 del CR-2010.

### Sobrecapa simple de mejora

El Cuadro 6, presenta los resultados de la evaluación de los proyectos clasificados como sobrecapa simple.

Cuadro 6. Resultados de evaluación del cartel de licitación en proyectos de sobrecapa simple

Rango inicial de IRI (m/km)	Requisito de IRI Final (m/km)	Cantidad de tramos	Tramos aprobados	% Aprobados	Tramos rechazados	% Rechazados
< 2,5	-	204	204	100%	0	0%
2,5 - 3,6	Reducción del 10%	380	238	63%	142	37%
3,6 - 6,4	≤ 3,2	293	214	73%	79	27%
> 6,4	Reducción del 50% y ≤5	143	70	49%	73	51%
<b>Total</b>		1020	726	71%	294	29%

En la Figura 5, se observa que un 37% de los tramos tienen valores iniciales de IRI entre 2,5 y 3,6 m/km, de los cuales un 63% tienen aprobación. Los tramos en el rango de 3,6 y 6,4 m/km de IRI inicial, representan un 29% del total y poseen un porcentaje de aprobación del 73% según el cartel de licitación. Por su parte, los tramos con un valor inicial de IRI mayor a 6,4 m/km, el cual representaba el 14% de los tramos, presentaron un 49% de aprobación. En general, los resultados obtenidos indican que los proyectos de sobrecapa simple tuvieron un 71% de aprobación y un 29% de rechazo.

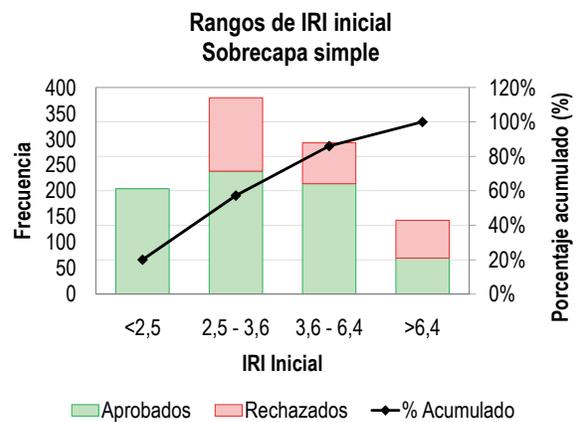


Figura 5. Distribución tramos según valor inicial de IRI, proyectos de sobrecapa simple.

### Multicapa de mejora

El Cuadro 7, presenta los resultados de evaluar los tramos de los proyectos de multicapa de mejora según los requisitos del cartel de licitación.

Cuadro 7. Resultados de evaluación del cartel de licitación en proyectos de multicapa de mejora.

Rango inicial de IRI (m/km)	Requisito de IRI Final (m/km)	Cantidad de tramos	Tramos aprobados	% Aprobados	Tramos rechazados	% Rechazados
< 2,5	-	91	91	100%	0	0%
2,5 - 3,6	Reducción del 10%	135	85	63%	50	37%
3,6 - 6,4	≤ 3,2	196	123	63%	73	37%
> 6,4	Reducción del 50% y ≤5	53	35	66%	18	34%
<b>Total</b>		475	334	70%	141	30%

En la Figura 6, se observa que un 41% del total corresponden a tramos con un IRI inicial entre 3,6 y 6,4 m/km, de los cuales 63% son aprobados; un 28% del total representan tramos con un valor inicial de IRI entre 2,5 y 3,6 m/km con un 63% de aprobación. Además, un 11% del total poseen tramos con valores de IRI mayores a 6,4 m/km, de los cuales 66% son aprobados. Los proyectos de multicapa de mejora tienen un 70% que cumplen con los requisitos de aprobación establecidos por el cartel de licitación y un 30% son rechazados.

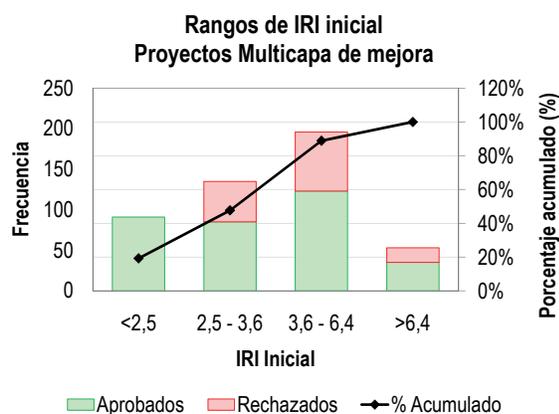


Figura 6. Distribución tramos según valor inicial de IRI, proyectos de multicapa de mejora

## CONCLUSIONES

El IRI es un parámetro ampliamente utilizados en normativas internacionales como parámetro de aceptación tanto de obra nueva como de rehabilitación, pero poco utilizado como criterio para la determinación del factor de pago.

En la normativa costarricense al igual que en la internacional, la determinación del IRI se realiza en tramos de 100 m.

En ciertos proyectos, se realizó una intervención más rigurosa de la que se necesitaba según la condición del pavimento, evidenciando un uso no eficiente de los recursos y no apropiada gestión de proyectos.

En la Figura 7 se muestra la condición antes y después de la intervención. Los resultados obtenidos mostraron que, en ocho de los nueve proyectos analizados, se presentó disminución en el valor de IRI, indicando que una mejor condición de regularidad al rehabilitar los proyectos mediante colocación de una sobrecapa asfáltica.

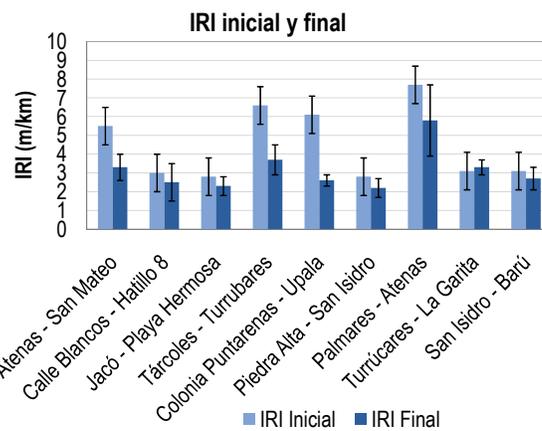


Figura 7. Esquema del análisis de datos

## CR-2010

La evaluación de proyectos mediante esta normativa, utilizando los porcentajes de mejora establecidos para la aceptación y control de pago, no fue adecuada para la realidad nacional debido a factores como condición inicial de proyectos, gestión de proyectos y experiencia en procesos constructivos para mejorar regularidad superficial. En el Cuadro 8 se presenta el resumen de los resultados obtenidos según el factor de pago para cada proyecto analizado anteriormente.

Cuadro 8. Resultados obtenidos de la evaluación mediante la sección 401.17 del CR-2010 para todos los proyectos

Proyecto	Porcentajes de pago según CR-2010				
	100%	75%	50%	25%	Rechazo
Atenas - San Mateo	13%	36%	19%	16%	17%
Circunvalación (Calle Blancos - Hatillo 8)	4%	24%	11%	14%	47%
Jacó - Playa Hermosa	2%	12%	19%	15%	52%
Tárcoles - Turrubares	28%	59%	9%	3%	1%
Upala - Colonia Puntarenas	75%	25%	0%	0%	0%
Piedra Alta - San Isidro	6%	16%	18%	19%	41%
Palmares - Atenas	11%	26%	15%	9%	39%
Turrúcares - La Garita	0%	0%	0%	0%	100%
San Isidro - Barú	0,3%	12%	16%	18%	54%
Sobrecapa simple	16%	22%	13%	13%	37%
Multicapa de mejora	9%	26%	16%	14%	35%

## Cartel de licitación

En el Cuadro 9 se muestra un resumen de los resultados obtenidos según la evaluación de estas especificaciones. Según estos resultados, esta especificación es apta para la implementación como normativa de control y aceptación de proyectos de rehabilitación costarricenses, debido a que se adapta a las condiciones presentes en los proyectos. Con esta normativa se obtienen mejores resultados de aceptación, pues considera el valor de IRI inicial del proyecto, parámetro que influye en la condición de regularidad superficial obtenida después de la intervención.

Existe una relación directa entre el valor IRI inicial y la condición final obtenida luego de la intervención, a menor valor inicial de IRI, menor porcentaje de mejora.

No es adecuado diferenciar el tipo de sobrecapa asfáltica como lo especifica el CR-2010, pues no se encontró relación entre la clasificación de sobrecapa simple de mejora y multicapa de mejora, con los porcentajes de mejora obtenidos y cantidad de tramos aprobados según el tipo de intervención.

Aproximadamente el 20% del total de tramos analizados empeoraron la condición de regularidad superficial, por lo que es necesario implementar las especificaciones para el control de la regularidad superficial, con el objetivo de mejorar los procedimientos constructivos y así obtener estructuras de mejor calidad, disminuir costos de operación vehicular y de mantenimiento de la red vial y alargar la vida útil de los pavimentos.

Se considera el cartel de licitación apto para la implementación del control de proyectos de rehabilitación mediante la colocación de sobrecapa asfáltica.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda que, para la comparación entre la condición inicial y final del pavimento rehabilitado, las mediciones estén referenciadas a un punto común. El caso ideal es establecer puntos específicos de referencia para toda la Red Vial Nacional.

Es necesario implementar un programa de gestión de pavimentos que permita aplicar la intervención adecuada según la condición del pavimento, con el fin de aplicar correctamente la normativa y realizar una mejor gestión de los recursos.

Se recomienda indicar que para valores de IRI menores a 2,5 m/km no se permite que la condición de regularidad superficial empeore.

La especificación para control y aceptación según la condición de regularidad superficial debe considerar la condición inicial del pavimento, pues se determinó que este parámetro influye directamente en el valor del IRI después de la rehabilitación. Adicionalmente, los criterios de evaluación de la red, la conservación vial y la recepción de obra nueva deben ser consistentes entre sí.

La especificación para control de regularidad superficial en proyectos de rehabilitación debe tomar en cuenta el tipo de carretera que se va a intervenir, tránsito que recibe y condición inicial del pavimento, de allí la importancia de la generación de esta información para futuros proyectos. Por otra parte, se recomienda el uso de herramientas estadísticas para velar el cumplimiento de la especificación y controlar la variabilidad del proceso constructivo.

Cuadro 9. Resultados obtenidos de la evaluación mediante el cartel de licitación para todos los proyectos.

Proyecto	Porcentaje de tramos aprobados			Total de tramos aprobados
	$2,5 < IRI_{inicial} < 3,6$	$3,6 < IRI_{inicial} < 6,4$	$6,4 < IRI_{inicial}$	
Atenas - San Mateo	29%	53%	64%	54%
Circunvalación (Calle Blancos - Hatillo 8)	64%	80%	N.A.	80%
Jacó - Playa Hermosa	77%	93%	N.A.	87%
Tárcoles - Turrubares	N.A.	59%	28%	42%
Upala - Colonia Puntarenas	100%	97%	100%	98%
Piedra Alta - San Isidro	80%	90%	N.A.	90%
Palmares - Atenas	N.A.	0%	13%	9%
Turrúcares - La Garita	4%	0%	N.A.	12%
San Isidro - Barú	57%	70%	N.A.	67%
Sobrecapa simple	63%	73%	49%	71%
Multicapa de mejora	63%	63%	66%	70%
Todos los proyectos	63%	70%	54%	71%

Finalmente, y con base en los análisis desarrollados se recomienda la modificar los valores mostrados en el Cuadro 2 por los valores mostrados en el Cuadro 10, eliminando la especificación con valores iniciales de IRI de 2,5 a 3,6 m/km, pues no alcanza una mejora en la clasificación establecida. No obstante, es necesario que ningún tramo empeore la condición de IRI inicial mediante la colocación de una sobrecapa asfáltica.

*Cuadro 10. Recomendación para la especificación de IRI para colocación de sobrecapas asfálticas en proyectos de conservación vial.*

Rango inicial de IRI (m/km)	IRI Final (m/km)
$IRI_{inicial} \leq 3,6$	$\leq IRI_{inicial} \leq 3,2$
$3,6 < IRI_{inicial} \leq 6,4$	$\leq 3,2$
$IRI_{inicial} > 6,4$	Reducción del 50% y $\leq 5$

## REFERENCIAS

1. Consejo Nacional de Vialidad. (2014). Licitación Pública No.2014LN-000018-0CV00. MP y R: Mantenimiento periódico y rehabilitación del Pavimento de la Red Vial Nacional Pavimentada. San José: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
2. Consejo Nacional de Vialidad. (2015). Licitación Pública No.2014LN-000018-0CV00. Enmienda No.2 al Cartel de Licitación MP y R: Mantenimiento periódico y rehabilitación del Pavimento de la Red Vial Nacional Pavimentada. San José: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
3. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2010). Manual de Especificaciones Generales para la construcción de carreteras caminos y puentes CR-2010. San José, Costa Rica: Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
4. Solís, M. V., Leiva, P., Hidalgo, A. E., & Loría, L. G. (2017). Contexto del índice de regularidad internacional (IRI) en proyectos de rehabilitación carreteros. San José: Universidad de Costa Rica.
5. LanammeUCR. (2015). Informe de Evaluación de la Red Vial Nacional Pavimentada de Costa Rica, Años 2014-2014 (Primera Edición ed.). Montes de Oca, San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

# Clasificación y distribución de riesgos en proyectos de infraestructura desarrollados por medio de Alianzas Público-Privadas (APP) en Costa Rica

*Risk classification and allocation in infrastructure projects developed through Public Private Partnerships (PPP) in Costa Rica*

**Ricardo José Chacón Vega**

Máster de Ingeniería en Administración de Proyectos, Universidad de Tsinghua, Beijing, República Popular China; Licenciado en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, Costa Rica  
[rchacon@infraestructurainquieta.org](mailto:rchacon@infraestructurainquieta.org)

**Fecha de recepción:** 21 de junio de 2018 / **Fecha de aprobación:** 10 de julio de 2018

## RESUMEN

El modelo de Alianzas Público-Privadas (APP) para el desarrollo de infraestructura pública ha pasado de ser visto únicamente como un modelo de financiamiento, a ser considerado un modelo de administración. Más allá de sus ventajas conocidas (al involucrar fondos privados y disminuir el endeudamiento público), es considerado actualmente como la mejor forma de transferir los riesgos del sector público al privado. Esta distribución de riesgos entre las partes pública y privada es uno de sus principales factores de éxito, por lo que si se pretende alcanzar el éxito en proyectos locales es indispensable enfocar la atención en este tema. A pesar de su importancia, este proceso de distribución de riesgos ha sido usualmente mal ejecutado alrededor del mundo, y Costa Rica no ha sido la excepción.

En el contexto costarricense, la identificación de riesgos en proyectos APP no ha logrado abarcar todo el espectro existente, es más, ha impactado negativamente los proyectos concesionados. Es por ello que es necesario considerar la identificación, clasificación y distribución de riesgos como el fundamento de una buena administración de proyectos APP. De esta manera, este artículo pretende proveer a los profesionales, locales como internacionales, políticos, inversionistas e investigadores un mejor entendimiento de la distribución de riesgos en proyectos de infraestructura pública desarrollados mediante APP, así como una base para investigaciones y proyectos futuros.

**PALABRAS CLAVES:** Alianzas Público-Privadas, Concesiones, Riesgos, Infraestructura.

## ABSTRACT

*The Public-Private Partnerships (PPP) model for the development of public infrastructure has changed from being perceived only as a finance model, to be considered a management model. Beyond its well-known advantages (such as involving private funding and reducing public debt), it is nowadays considered as the best way for transferring the risks from the public to the private sector. This risk allocation between the public and private parties is one of its critical success factors, hence it is critical to focus in this topic to guarantee the success of future projects. Despite of its relevance, the process of risk allocation has often been poorly executed around the world, and Costa Rica has not been the exception.*

*In Costa Rica, the process of risk identification in PPP projects has failed on comprising all the existing risks, and this situation has had a negative impact in them. The identification, classification and allocation of risks is the foundation of a good management of PPP projects. Therefore, this article aims to provide professionals (locals and foreigners), policy makers, investors and researchers a better understanding of risk allocation in public infrastructure projects developed through PPP, and to help future research and projects.*

**KEY WORDS:** Public-Private Partnerships, Concessions, Risks, Infrastructure.

## I. INTRODUCCIÓN

El modelo de Alianzas Público-Privadas (APP) para el desarrollo de infraestructura pública ha pasado de ser visto como un modelo de financiamiento únicamente, a un modelo de administración. Más allá de sus ventajas conocidas al involucrar fondos privados y disminuir el endeudamiento público, es ahora visto como la mejor forma de transferir los riesgos del sector público al privado. Las APP han sido utilizadas en países desarrollados como el Reino Unido y Alemania en el aprovisionamiento de servicios públicos como educación, salud, manejo de desechos y edificios públicos. En países en desarrollo como China, India, Costa Rica, Chile y otros países Latinoamericanos, debido a la gran demanda en infraestructura, se han concentrado en las áreas de energía, carreteras y manejo de aguas.

La definición de APP varía dependiendo del contexto específico de cada región en el cual se desarrollan, por lo que su definición es aún percibida por profesionales y académicos como ambigua (Alfen, Kalidindi, Ogunlana, Wang, Jungbecker, Jan, Ke, Liu, Singh, y Zhao, 2009). Para este documento se entenderá según la siguiente definición: “El término APP se refiere a una cooperación de largo plazo y regulada contractualmente entre los sectores público y privado para el desarrollo eficiente de tareas públicas combinando recursos (ej. *Know-how*, fondos operacionales, capital y personal) de las partes y distribuyendo los riesgos existentes del proyecto apropiadamente según su capacidad de administrar cada riesgo (Alfen, et al. 2009).

Como es de esperar, los proyectos APP varían en su alcance, industria y tamaño, pero todos comparten cuatro características principales: 1) los riesgos son compartidos entre las partes pública y privada, 2) los proyectos son desarrollados a través de inversión privada y ciclo de vida completo del proyecto, 3) la relación contractual entre las partes es de largo plazo (por lo general décadas) y, por último, 4) hay innovación relacionada con las especificaciones de proyecto, niveles de servicio y mecanismos de pago. Es así como este modelo ha permitido mantener los costos fuera de la hoja de balance pública y reducir el gasto público, manteniendo los niveles de inversión altos y evitando las restricciones del sector público para acceder a préstamos.

Más recientemente, en países líderes como el Reino Unido, el modelo APP ha sido visto como una manera de distribuir riesgos en los proyectos de infraestructura pública (Li, Akintoye, Edwards y Hardcastle, 2005). Esto se debe a que la distribución de riesgos entre las partes es una característica inherente de estos proyectos y además es uno de sus principales factores críticos de éxito. Sin embargo, a pesar de su importancia, la distribución de riesgos a

nivel internacional ha sido frecuentemente mal manejada (Ng y Loosemore, 2007). Costa Rica no es la excepción, lo cual se ve reflejado en la falta de especificidad en la identificación y descripción de los riesgos, ausencia de procedimientos adecuados para la administración de riesgos e inmadurez del sistema jurídico (Chacón, 2016).

En el caso costarricense, la pobre administración de riesgos se ha sumado a la falta de experiencia en el desarrollo de proyectos de infraestructura bajo el modelo APP. A pesar de que la Ley de Concesiones No. 7762 ya ha cumplido 20 años de vigencia, apenas se han completado 4 proyectos y uno, Carretera San José San Ramón (CSJSR), fue rescindido en el año 2012. El fracaso de un proyecto de estas dimensiones ha generado ondas expansivas que han impactado la opinión pública, apoyo político y sentimiento de inversionistas *vis-à-vis* el desarrollo de infraestructura pública y el modelo APP en sí. Estos eventos deben ser considerados como hitos históricos, después de los cuales se deben cambiar los paradigmas en la manera en que se están abordando los principales retos del país.

El primer paso para cambiar estos paradigmas es asegurar que todos los involucrados en proyectos de infraestructura pública tengan claro cuáles son sus principales factores de éxito y de fracaso, para así actuar proactivamente, de manera efectiva y eficiente en su solución. Como se explicará en las próximas secciones, dada la relación que existe entre una adecuada distribución de riesgos y el éxito de los proyectos APP, es necesario crear instrumentos que puedan ser utilizados en el futuro cercano y se desarrollen a mediano y largo plazo. Este documento aborda la discusión sobre el origen, importancia y aplicación de una adecuada distribución de riesgos contractual entre las partes pública y privada en proyectos de infraestructura pública.

## II. IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS

### 2.1 Riesgos en Proyectos de Infraestructura

La provisión de servicios públicos como educación, defensa, salud y justicia involucran ciertas formas de riesgo. Este riesgo toma forma de objetivos no alcanzados, retrasos, pérdidas financieras, corrupción, ineficiencia o costo de oportunidad de haber entregado el mismo servicio de otra manera (NAO, 1999). Sin embargo, a pesar de la gran escala e importancia de los proyectos de infraestructura pública desarrollados a través de APP, la administración de los riesgos se mantiene altamente variable, intuitiva, subjetiva y poco sofisticada (Akintoye, Hardcastle, Chinyio y Assenova, 2001).

Para administrar los riesgos en la industria de la construcción y en el desarrollo de infraestructura pública a través del modelo APP se ha utilizado ampliamente el modelo desarrollado por Al-Bahar y Crandall (1990). Este se conoce como Sistema de Administración de Riesgos de la Construcción (*Construction Risk Management System, CRMS*) y fue desarrollado primordialmente para ayudar a los contratistas a identificar, analizar y administrar los riesgos. Este modelo se basa en cuatro partes principales: identificación, análisis y evaluación, respuesta, y sistema de administración.

## 2.2 Distribución de Riesgos

El término “distribución de riesgos” se refiere a la medida principal de asignación de los principales factores de riesgo entre los involucrados del proyecto, eso es entre los sectores público y privado, excluyendo los usuarios; y si ambas partes asumen alguno de ellos, se trata un mecanismo de riesgo compartido (Li et al. 2005). Por otra parte, los riesgos también pueden ser asignados a una tercera parte, los usuarios, en el nombre de los cuales el sector público (Gobierno) negocia los términos del acuerdo (Irwin et al. 1999 y Arndt, 1998).

Su importancia yace en que una adecuada distribución de riesgos es uno de los principales Factores Críticos de Éxito (*Critical Success Factors, CSFs*) en proyectos APP (Zhang, 2005). En orden de importancia, los principales CSFs por considerar son: 1) viabilidad económica, seguido por 2) una apropiada distribución riesgos vía arreglos contractuales confiables, 3) paquete financiero saludable, 4) consorcio y concesionario confiables con fuerte capacidad técnica y 5) un entorno de inversión favorable.

En cualquier proceso de distribución de riesgos, la cantidad de riesgos transferidos del sector público al sector privado puede ser descrita de acuerdo con distintos perfiles mostrados en la Figura 1. En el modelo tradicional de compras públicas, mostrado como “Contratos de Servicio”, el Gobierno asume todos los riesgos. En contrapartida, la Privatización es cuando el sector privado asume prácticamente todos los riesgos asociados con el proyecto (Alfen et al., 2009).

## 2.3 Proceso de Asignación de Riesgos Entre las Partes

### 2.3.1 Identificación de una Mala Distribución de Riesgos

Identificar una buena o mala distribución de riesgos no tiene que ser una tarea subjetiva y debe abordarse con rigurosidad. Para lograr esto es necesario que las personas responsables desarrollen su criterio profesional el cual, a su vez, debe ser nutrido por investigación académica y experiencia institucional.

Según la experiencia internacional, la distribución de riesgos usualmente tendrá fallas en términos de: 1) logro de una fijación de precios óptima y precisa de los riesgos para los sectores involucrados, y 2) monitoreo adecuado del rendimiento con respecto a la generación de valor en la forma de innovación, beneficios sociales y retos globales como cambio climático, salud, demografía, seguridad, entre otros (Roumoustos y Macário, 2013). Por otra parte, un proyecto APP con riesgos mal distribuidos entre las partes presentará una de las siguientes situaciones (Abednego y Ogunlana, 2006):

1. Una decisión no puede ser tomada en el momento preciso (surgen oposiciones de todo tipo).
2. El contrato tiende a dar más ventajas al dueño del proyecto.
3. Desinformación entre los involucrados del proyecto.
4. Una respuesta apropiada no puede ser dada de una manera efectiva.
5. Falta de planeamiento y control sobre el proyecto.
6. La relación entre los sectores público y privado parece ser más jerárquica que asociativa.
7. Durante las etapas de construcción y operación de proyectos existe una clara ausencia de efectividad y eficiencia.
8. Los usuarios permanecen insatisfechos.



Figura 1. *Continuum* de transferencia de riesgos en proyectos APP

### 2.3.2 Pasos para Alcanzar una Adecuada Distribución de Riesgos

En general, para garantizar una adecuada distribución, se debe asignar cada riesgo a la parte que sea más capaz, así como la parte que tenga acceso a una mayor cantidad de opciones para mitigarlo o reducir los costos a la hora de asumirlo. Cuando las partes logran acordar una estrategia óptima de distribución de riesgos se logra alcanzar el mayor valor por el dinero (*value for money*); lo que a su vez se traduce en el menor costo posible. Sin embargo, en la práctica, esta es una tarea compleja (Alfen et al., 2009).

Dicho lo anterior, una adecuada distribución dependerá de cómo las partes involucradas asignen un precio específico a cada uno de los riesgos, con base en: su costo, probabilidad de ocurrencia y posible impacto. Así se han creado cinco diferentes puntos que deben ser considerados cuando se asignen los riesgos a un sector en específico. El riesgo debe ser asignado a la parte que:

1. Está completamente consciente de los riesgos que asumirá.
2. Posee la mayor capacidad, es decir, experiencia y autoridad, para manejar el riesgo de una manera efectiva y eficiente. Por lo tanto, cobrando el *premium* más bajo sobre el riesgo.
3. Tiene los recursos para lidiar con el riesgo en caso de que se materialice en un evento.
4. Está dispuesto a asumir el riesgo.
5. Se le ha permitido cobrar un *premium* apropiado por asumir el riesgo.

Los puntos mencionados previamente deben ser complementados con factores adicionales que permitan determinar el momento adecuado para asignar cada riesgo y proveer una solución alternativa (Abednego y Ogunlana, 2006). Por lo tanto, los factores que necesitan ser considerados son:

¿Qué riesgo será asignado?

¿Quién posee las mayores capacidades para asumir el riesgo?

¿Cuándo es el momento adecuado para asignarlo?

¿Cuál es la mejor manera de asignar el riesgo? Es decir, buscando la mejor estrategia para prevenir y minimizar sus consecuencias en caso de ocurrencia.

En el caso en que los puntos previos no sean cumplidos, se podría generar un efecto “rebote” entre las partes y, en última instancia, será el sector público quien probablemente asumirá los riesgos de vuelta en forma de mayores riesgos, mayores *premiums* y problemas con el proyecto.

Cualquiera sea la distribución de los riesgos, se debe registrar de una manera clara y segura a través de un documento contractual; por lo que es de vital importancia tener un aporte legal fuerte desde el inicio del ciclo de vida del proyecto (Asian Development Bank, 1997). Asimismo, es importante que los involucrados tengan una actitud proactiva, visión de largo plazo y se incentive a las distintas instituciones públicas a educarse y realizar investigación en temas relacionados con distribución riesgos en proyectos APP. Esta forma de abordar los proyectos permitirá reducir el costo de la etapa de negociación contractual (Ke, Wang, Chan y Lam, 2010) y asegurará el óptimo desarrollo del proyecto, evitando así el aumento innecesario de los costos debidos a una mala transferencia de riesgos (Asian Development Bank, 2000). De hecho, los largos retrasos en los procesos de negociación son precisamente una de las principales características de los proyectos APP, sin importar su ubicación geográfica (Hwang, Zhao y Shu, 2013).

## 3. CLASIFICACIÓN DE RIESGOS

Para lograr un manejo eficiente y eficaz de los riesgos, es necesario identificarlos y clasificarlos en tres categorías principales: Nivel Meta, Grupo, Factor de Riesgo. A continuación, se presentarán los factores de riesgo en proyectos de infraestructura pública desarrollados mediante APP, así como su clasificación en las distintas categorías y su asignación (entre las partes pública y privada) propuesta según la experiencia internacional y nacional.

Por otra parte, se sugiere una asignación para cada riesgo basada en la experiencia internacional y nacional. Esta asignación no es una regla inalterable dada la naturaleza única de cada proyecto de infraestructura desarrollado mediante APP. Dicho lo anterior, también se debe considerar que en la práctica costarricense se ha tenido un enfoque miope, enfocado únicamente en riesgos de diseño, construcción y operación y se han dejado de lado los riesgos políticos, sociales y de relación; mismos que han sido los responsables del fracaso de proyectos como CSJSR y de la gran resistencia al desarrollo de proyectos de infraestructura mediante APP. Por lo tanto, es indispensable que los encargados de cada proyecto abarquen todos los factores de riesgo mencionados y acuerden una distribución óptima entre las partes involucradas. Los factores de riesgo se han asignado según las siguientes categorías:

**Privado:** el sector privado asume el riesgo.

**Público:** el sector público, es decir el Gobierno o el Estado, asume el riesgo.

**Compartido:** el riesgo es compartido entre los sectores público y privado.

### 3.1 Categoría de Riesgos Nivel Macro

El Nivel Macro comprende los riesgos originados exógenamente, es decir externos al proyecto (Cuadro 1). Este nivel se enfoca en riesgos a nivel nacional o de industria y riesgos naturales. Los factores de riesgo en este nivel son, por lo general,

asociados con condiciones políticas y legales, condiciones económicas, sociales y climáticas. En esencia, estos riesgos surgen a partir de eventos que ocurren más allá del sistema de fronteras del proyecto, mismos que cruzan esos límites e impactan el proyecto y sus resultados. Los Grupos de Riesgo incluidos en el nivel macro son: legal, macroeconómico, natural, político y social.

Cuadro 1. Categorización de factores de riesgo en proyectos APP, nivel macro

Grupo	Factor de riesgo	Asignación
Legal	Cambios en la regulación de impuestos	Público
	Sistema jurídico inmaduro	Público
	Marco jurídico y regulatorio inconsistente	Público
	Cambio regulatorio industrial	Público
	Documento contractual inconsistente	Compartido
	Interpretación del contrato	Compartido
	Cambio de legislación	Público
Macroeconómico	Volatilidad en la tasa de inflación	Compartido
	Eventos económicos mayores	Público
	Volatilidad en la tasa de interés	Compartido
	Mercado financiero pobre	Privado
Natural	Descubrimientos arqueológicos	Público
	Ambiental	Privado
	Fuerza mayor	Compartido
	Geotécnico / Condiciones geológicas / Condiciones de suelo	Privado
	Eventos climáticos	Privado
Político	Expropiación o nacionalización de bienes	Público
	Intervención gubernamental: acciones u omisiones	Público
	Falta de apoyo por parte del Gobierno	Público
	Proceso de toma de decisiones pobre	Público
	Fuerte oposición u hostilidad política	Público
	Inestabilidad gubernamental	Público
Social	Corrupción, sobornos y tráfico de influencias	Compartido
	Falta de experiencia del sector privado en proyectos APP.	Privado
	Nivel de oposición pública en contra del proyecto	Compartido
	Huelgas, revueltas o conmoción civil	Privado
	Vandalismo	Privado

### 3.2 Categoría de Riesgos Nivel Meso

El Nivel Meso Incluye los riesgos originados endógenamente, es decir, los eventos de riesgo y sus consecuencias que ocurren dentro de los límites del sistema del proyecto. Estos involucran

problemas de implementación del proyecto APP, tales como: demanda o uso del proyecto, ubicación, diseño, construcción y tecnología. Los grupos de riesgo incluidos en el nivel meso son: construcción, diseño, operación, financiamiento, selección y riesgos residuales (Cuadro 2).

Cuadro 2. Categorización de factores de riesgo en proyectos APP, nivel meso

Grupo	Factor de riesgo	Asignación
Construcción	Sobrecosto de construcción	Privado
	Materiales deficientes	Privado
	Retrasos y finalización y de la construcción	Privado
	Falla del contratista	Privado
	Variaciones contractuales excesivas	Compartido
	Fluctuación en el costo de los materiales (a causa de decisiones Gubernamentales)	Público
Construcción	Fluctuación del costo de los materiales (a causa del sector privado o causas ajenas al control Gubernamental)	Privado
	Insolvencia o incumplimiento de subcontratistas o suplidores	Privado
	Cambios tardíos en el diseño	Compartido
	Disponibilidad de materiales y mano de obra	Privado
	Obtención del consentimiento público o del propietario privado para el uso de tierra adicional (uso temporal)	Privado
	Mala calidad de mano de obra	Privado
	Adquisición de sitios de relleno o depósito y otros sitios adicionales requeridos fuera del proyecto	Compartido
	Seguridad y salud ocupacional	Privado
	Instalaciones de apoyo	Compartido
	Puesta en marcha según tiempo y costo	Privado
	Defectos latentes no divulgados en infraestructura existente	Privado
Diseño	Retrasos en permisos y aprobaciones	Compartido
	Diseño deficiente / Diseño general	Privado
	Técnicas de ingeniería no probadas y aplicación de técnicas innovadoras	Privado
Operación	Competencia externa y exclusividad	Compartido
	Construcción de infraestructura adicional para el mejoramiento del servicio e infraestructura vinculada al proyecto principal	Público
	Mantenimiento general	Privado
	Deficiente red de carreteras y embotellamientos	Público
	Baja productividad operativa	Privado
	Costos de mantenimiento mayores de lo esperado	Privado
	Mantenimiento más frecuente de lo esperado	Privado
	Sobrecosto operativo	Privado
	Ingresos operativos menores de lo esperado	Privado
Falla total del operador	Privado	

Operación	Vehículos sobrecargados	Privado
	Cambios en el alcance del proyecto	Privado
	Calidad y continuidad del servicio	Privado
	Derrumbes y obstrucción de la carretera	Privado
	Accidentes de tránsito / Incidentes en la carretera	Privado
Financiamiento	Cierre financiero o disponibilidad financiera	Privado
	Atracción financiera de inversionistas	Privado
	Tipo de cambio	Compartido
	Altos costos financieros	Privado
	Auditoría financiera insuficiente	Compartido
	Ingresos insuficientes	Compartido
	Capital limitado por retrasos, flujo de caja, problemas de liquidez	Privado
	Cambios tarifarios	Público
Selección	Disponibilidad y adquisición de terrenos	Público
	Uso de suelos	Público
	Nivel de demanda	Compartido
Residual	Condición de las instalaciones al momento de la transferencia	Privado
	Equipo obsoleto prematuramente y cambio de tecnología	Privado
	Valor residual	Público

### 3.3 Categoría de Riesgos Nivel Micro

El Nivel Micro representa los riesgos encontrados en las relaciones entre las partes involucradas. Estos riesgos son formados desde las primeras etapas del proyecto y son la consecuencia de las diferencias inherentes entre los sectores público y privado en la gestión de contratos. Estos riesgos también son endógenos, pero difieren de la categoría meso en que están relacionados con

una de las partes (pública o privada) en lugar de estar relacionados con el proyecto. La razón principal para proponer esta categoría de riesgo yace en el hecho de que, por lo general, el sector público tiene responsabilidad social, mientras que el sector privado es dirigido motivado por la búsqueda de ganancias económicas. Los grupos de riesgo incluidos en el nivel micro son: relación y terceras partes (Cuadro 3).

Cuadro 3. Categorización de factores de riesgo en proyectos APP, nivel micro

Grupo	Factor de riesgo	Asignación
Relación	Cambio de propiedad por parte del sector privado	Compartido
	Conflicto de intereses entre los accionistas del concesionario	Privado
	Incapacidad del consorcio	Público
	Diferencias entre los socios en los métodos de trabajo y conocimiento	Compartido
	Distribución inadecuada de la autoridad en la asociación	Compartido
	Distribución inadecuada de responsabilidades y riesgos	Compartido
	Falta de experiencia en el modelo APP	Compartido
	Falta de compromiso de cada una de las partes	Compartido
	Mala organización y coordinación	Privado
	Licitación poco competitiva	Público
Terceras partes	Seguros	Privado
	Crisis de personal y disputas laborales	Privado
	Responsabilidad civil hacia terceros	Privado

## 4. CONCLUSIONES

El modelo APP para el desarrollo de infraestructura pública les ha permitido a múltiples gobiernos mantener los costos fuera de la hoja de balance pública y reducir el gasto público, manteniendo los niveles de inversión altos y evitando las restricciones del sector público para acceder a préstamos. Este modelo se ha convertido además en la principal manera de transferir los riesgos del sector público al sector privado y así ejecutar los proyectos más eficiente y eficazmente.

Dicha transferencia de riesgos, además de ser una característica inherente de las APP, es uno de sus principales Factores Críticos de Éxito. A pesar de su importancia, las prácticas de administración de riesgos en Costa Rica, así como en el resto del mundo, se han mantenido como intuitivas, subjetivas y poco sofisticadas. El entendimiento de esta situación es entonces indispensable para que las instituciones encargadas y los profesionales responsables tomen acción para contrarrestar estas fallas.

Las matrices de clasificación y distribución de riesgos presentadas en este documento son la herramienta fundamental para optimizar los procesos de negociación y garantizar el correcto desarrollo de cada proyecto. Si bien cada factor de riesgo puede ser asignado a distintas partes según las características de cada proyecto, es in-

dispensable que los responsables de proyectos abarquen la totalidad de los factores y cambien el enfoque miope que se ha tenido hasta el día de hoy en riesgos constructivos por un enfoque más integral que incluya riesgos Políticos, Sociales y de Relación, los cuáles han tenido el mayor impacto en el contexto nacional.

Asimismo, esta herramienta debe ser parte de un objetivo mayor para crear una guía general que asista la implementación y manejo de asociaciones entre el gobierno y el sector privado para el desarrollo eficiente de infraestructura.

## AGRADECIMIENTOS

Alejandro Rodríguez, Vicepresidente, Banco Centroamericano de Integración Económica (BCIE)

Álvaro Borbón, Asociado de Operaciones, Banco Interamericano de Desarrollo (BID)

José Alfredo Sánchez, Vicepresidente, Constructora MECO S.A.

Lil Moya, Secretaría de Planificación Sectorial, Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT)

Wang Shou Qing, Director Adjunto, Comité Experto, Centro para APP, Universidad Tsinghua, R.P. China

## REFERENCIAS

1. Abednego, M.P., y Ogunlana, S.O. (2006). *Good project governance for proper risk allocation in public-private partnerships in Indonesia*. International Journal of Project Management 24 (7), 622–634.
2. Akintoye, A., Hardcastle, C., Chinyio, E., y Assenova, D. (2001). *Framework for risk assessment and management of private finance initiative projects*. Glasgow, Escocia, Reino Unido: Universidad Glasgow Caledonian.
3. Al-Bahar, J.F., y Crandall, K.C. (1990). *Systematic risk management approach for construction projects*. ASCE J Construction Engineering Management;116(3):533-47.
4. Alfen, H. Q., Kalidindi, S., Ogunlana, S., Wang, S.Q., Abednego, M., Frank-Jungbecker, A., Jan, A., Ke, Y., Liu, Y.W., Singh, L.B., y Zhao, G. F. (2009). *Public-Private Partnership in Infrastructure Development: Case Studies from Asia and Europe*. Bauhaus-Universität Weimar.
5. Arndt, R.H. (1998). *Risk allocation in the Melbourne city link project*. Journal of Project Finance;4(3):11-24.
6. Asian Development Bank. (1997). *Technical assistance for legal training in BOT/BOOT infrastructure development*. TAR:TRA 30150, Metro Manila, Filipinas.
7. Asian Development Bank. (2000). *Developing Best Practices for Promoting Private Sector Investment in Infrastructure: roads*. In ADB Report on PSP Roads, Asian Development Bank, Manila, Filipinas, pp.101-106.
8. Chacón Vega, R.J. (2016). *Risk Allocation for Public-Private Partnerships in Costa Rica*. Universidad Tsinghua, Pekín, R.P. China.
9. Hwang B.-G., Zhao X., Shu Gay M.J. (2013). *Public private partnership projects in Singapore: Factors, critical risks and preferred risk allocation from the perspective of contractors*. International Journal of Project Management, Vol. 31, 424-433.

10. Irwin, T., Klein, M., Perry, G., y Thobani, M. (1999). *Managing Government Exposure to Private Infrastructure Risks*. The World Bank Research Observer, vol. 14, no. 2
11. Ke, Y., Wang S.Q., Chan, A., y Lam, P. (2010). *Preferred risk allocation in China's public-private partnership (PPP) projects*. International Journal of Project Management 28, 482-492.
12. Li, B., Akintoye, A., Edwards, P. J., and Hardcastle, C. (2005). *The allocation of risk in PPP/PFI construction projects in the UK*. International Journal of Project Management, 23(1), 25-35.
13. National Audit Office (NAO). (1999). *Examining the value for money of deals under the private finance initiative*. Londres, Reino Unido.
14. Ng, A., y Loosemore, M. (2007). *Risk allocation in the private provision of public infrastructure*. International Journal of Project Management 25 66-76.
15. Roumboutsos, A., y Macário, R. (2013). *Public private partnerships in transport: theory and practice*. Built Environment Project and Asset Management, Vol. 3 Iss 2 pp. 160 – 164.
16. Zhang, X. (2005). *Critical success factors for Public-Private Partnerships in Infrastructure Development*. Journal of Construction Engineering Management, 131(1):3-14.





UCR

---