



## DEFINICIÓN DE LA REVISTA

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

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

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

## REQUERIMIENTOS PARA PUBLICACIÓN DE ARTÍCULOS

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

## REVISIÓN DE ARTÍCULOS

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

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

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



## SUSCRIPCIÓN

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

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

Políticas de Uso:



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

# EN ESTA EDICIÓN

## COSTA RICA

### **APROXIMACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL DAÑO POR HUMEDAD DE INTERFACES ASFALTO-AGREGADO**

PHYSICO-CHEMICAL APPROACH OF MOISTURE DAMAGE SUSCEPTIBILITY OF BINDER-AGGREGATE INTERFACES

Alejandra Baldi-Sevilla

Mavis L. Montero

José Aguiar-Moya

Luis Guillermo Loría-Salazar

05

## COSTA RICA

### **LOS CONCEPTOS DE FONDEO Y FINANCIAMIENTO EN EL DESARROLLO DE PROYECTOS POR MEDIO DE PARTICIPACIÓN PÚBLICO-PRIVADA (PPP)**

THE CONCEPTS OF FUNDING AND FINANCING WHEN DEVELOPING PROJECTS THROUGH PUBLIC PRIVATE PARTNERSHIPS (PPP)

Federico Villalobos Carballo. Economista

10

## COSTA RICA

### **CONFIGURACIÓN ESPACIAL DE LA CIUDAD DE CARTAGO Y SU RELACIÓN CON VOLÚMENES VEHICULARES**

SPATIAL CONFIGURATION OF CARTAGO CITY AND ITS RELATIONSHIP WITH TRAFFIC VOLUMES

Marcos Alberto Martínez Martínez

Jonathan Agüero Valverde

18

ESTA REVISTA ES PRODUCIDA POR:



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

PITRA

Programa de  
Infraestructura del  
Transporte

ESTA REVISTA ESTÁ INDEXADA EN:



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

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

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

# EDITORIAL

El presente número de la revista cuenta con artículos ampliamente variados en los ámbitos de ciencia de materiales, economía y modelación. El primer artículo titulado **Aproximación fisicoquímica de la susceptibilidad al daño por humedad de interfaces asfalto agregado** presenta un análisis de una de las principales causas del daño por humedad en la mezcla asfáltica, como lo es la deficiente afinidad química de la interfaz asfalto-agregado. La debilidad de la interfaz puede deberse a una pobre interacción entre ambos materiales, lo que aumenta la predisposición del asfalto a ser desplazado por el agua. En este artículo se evalúa la interacción asfalto-agregado a partir de mediciones de Energía Superficial en dos tipos de agregado: caliza y grava de río (silícea) y tres tratamientos de asfaltos: original, modificado con diatomita y modificado con nanosilica. Los resultados revelan que la calidad de la interfaz formada, así como el efecto de los aditivos, depende del tipo de agregado. En general, la evaluación fisicoquímica de asfaltos y agregados genera indicadores que pueden ser utilizados para la selección de materiales y combinaciones resistentes ante el daño por humedad en las mezclas asfálticas.

El artículo **Los conceptos de fondeo y financiamiento en el desarrollo de proyectos por medio de participación público-privada (PPP)** muestra la visión de un economista en el área de inversión en proyectos de infraestructura vial. Los modelos de participación público-privada (PPP) comúnmente son adoptados como la solución para desarrollar la obra pública que el Estado no puede financiar, sin embargo, aún cuando el sector privado asuma en su balance parte del financiamiento, alguien deberá pagar por servicios prestados. Aquí es donde se marca la diferencia entre fondeo y financiamiento. Las fuentes de fondeo se refieren al origen de los ingresos que generará el proyecto, como tarifas que se cobran a los usuarios, pagos del Estado o una combinación de ambos. Por su parte, el financiamiento corresponde a los recursos financieros que forman parte de la estructura de capital utilizada para el desarrollo del proyecto, es decir créditos, bonos, y aportes de accionistas. La diferenciación de ambos conceptos es clave en la toma de decisiones para el desarrollo de proyectos de obra pública que requiere la economía de país.

Por último, el artículo **Configuración espacial de la ciudad de Cartago y su relación con volúmenes vehiculares** desarrolla un análisis para determinar la correlación entre las características urbanas de esta ciudad, tales como movimiento de personas y vehículos, valor de la tierra, y ubicación del comercio y las calles que forman la red de caminos. Para ello se elaboró un análisis de segmento unitario, estableciendo la prioridad de las vías en cada intersección y recopilando información al recorrer la ciudad. El modelo estadístico que mejor se ajusta al comportamiento observado corresponde al exponencial multivariado, en donde se incluyó una variable categórica para las calles con orientación Norte-Sur y flujo en una sola dirección para mejorar la correlación. El estudio concluye que la sintaxis espacial es un método rápido y económico que puede brindar una guía para ejecutar estudios más detallados sobre la red actual y en etapas tempranas de futuros proyectos.

**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

Óscar 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

# Aproximación fisicoquímica de la susceptibilidad al daño por humedad de interfaces asfalto-agregado

*Physicochemical approach of moisture damage susceptibility of binder-aggregate interfaces*

**Alejandra Baldi-Sevilla**

LanammeUCR, Costa Rica.  
[alejandra.baldi@ucr.ac.cr](mailto:alejandra.baldi@ucr.ac.cr)

**Mavis L. Montero**

Escuela de Química.  
[mavis.montero@ucr.ac.cr](mailto:mavis.montero@ucr.ac.cr)

**José Aguiar-Moya**

LanammeUCR, Costa Rica.  
[jose.aguiar@ucr.ac.cr](mailto:jose.aguiar@ucr.ac.cr)

**Luis Guillermo Loría-Salazar**

LanammeUCR, Costa Rica.  
[luis.loriasalazar@ucr.ac.cr](mailto:luis.loriasalazar@ucr.ac.cr)

**Fecha de recepción:** 11 de agosto de 2017 / **Fecha de aprobación:** 1 de septiembre de 2017

## RESUMEN

El daño por humedad es reconocido por tener consecuencias severas en el desempeño de la mezcla asfáltica. Una de las causas del daño por humedad es la mala afinidad química de la interfaz asfalto-agregado formada cuando el primero recubre al segundo durante el proceso de mezcla. La debilidad de la interfaz puede deberse a una pobre interacción entre ambos materiales, lo que aumenta la predisposición del asfalto a ser desplazado por el agua. En este estudio, la calidad de la interfaz asfalto-agregado fue aproximada mediante la medición de la Energía Superficial de los materiales involucrados. Se tomaron como muestra dos tipos de agregado, una Caliza y una Grava de río (sílicea), los cuales fueron combinados con tres asfaltos: un asfalto modificado con diatomita, un asfalto modificado con nanosilica y un asfalto control. Las combinaciones propuestas fueron evaluadas mediante indicadores fisicoquímicos relacionados con el daño por humedad como el trabajo de adhesión, el trabajo de desplazamiento y la Razón de Energía. Se encontró que la calidad de la interfaz formada depende del tipo de agregado empleado. Además, se pudo evaluar si los aditivos resultan convenientes en la reducción de la susceptibilidad a la humedad, lo cual es dependiente del tipo de agregado con el que se combinen. En general, a partir de la estimación de la Energía Superficial del asfalto y agregado pueden obtenerse indicadores relevantes en cuanto a la formación de interfaces. De esta forma, es posible la evaluación fisicoquímica de asfaltos y agregados para la selección de materiales y combinaciones resistentes ante el daño por humedad.

**PALABRAS CLAVES:** energía superficial, goniometría, interfaces, daño por humedad, adhesión, diatomita, nanosilica.

## ABSTRACT

*Moisture damage is one of the most severe distresses in pavements. Among the causes of moisture damage is the poor quality of the binder-aggregate interface formed during mixing. The weakness of the interface might be due to a poor interaction between materials, which increases the susceptibility of binder of being removed from the aggregate surface by water. In this study, the quality of the binder-aggregate interface was approached by means of surface energy measurements of several binder-aggregate combinations. Two different aggregate sources were investigated: a limestone and a gravel, which were combined with three asphalt binders: a diatoms-modified binder, a nanosilica-modified binder and neat binder as control. The proposed combinations were evaluated by means of physicochemical indicators related to moisture damage, such as work of adhesion, work of debonding and energy ratio. It was found that the quality of the interface is highly related to the aggregate source. Furthermore, several anti-strip additives were evaluated in terms of reduction of water susceptibility of the combinations and it was observed that their efficiency is dependent on the aggregate source with which the modified binder is combined. In summary, various parameters associated to interfaces can be obtained from surface energy measurements of binders and aggregates. This technique allows the physicochemical evaluation of binders and aggregates and the information obtained might be used as criteria for appropriate selection of water-resistant materials.*

**KEY WORDS:** surface energy, interfaces, moisture damage, adhesion, diatoms, nanosilica.

## INTRODUCCIÓN

El daño por humedad es una de las fallas más severas en el pavimento, especialmente en climas húmedos donde las precipitaciones son constantes durante todo el año. El agua penetra la mezcla asfáltica mediante una serie de mecanismos (Masad et al. 2007), los cuales han sido un importante objeto de estudio (Taylor y Khosla 1983; Kiggundu y Roberts 1988; Terrel y Shute 1989; Little y Jones 2002) e involucran tanto al asfalto, como al agregado y a los vacíos de la mezcla asfáltica (Cho y Bahia 2007; Caro et al. 2008).

La presencia de agua en una mezcla asfáltica provoca el detrimento de sus propiedades fundamentales, dejando como resultado el debilitamiento de la cohesión del mastic asfáltico y pérdidas de adhesión entre el asfalto y el agregado (Kiggundu y Roberts 1988), principalmente. La naturaleza de estos deterioros hace del agua un catalítico para otras fallas como la deformación permanente y el agrietamiento (Cho y Kim 2010), por lo que crece la necesidad de producir combinaciones de asfalto y agregado resistentes a los efectos desfavorables de la humedad.

La calidad de la interfaz asfalto-agregado formada durante la producción de una mezcla asfáltica es evaluada a partir del conocimiento de la energía superficial (ES) de los materiales involucrados. La ES permite predecir ciertas características fundamentales de la interfaz, tales como la fuerza de adhesión y la tendencia del asfalto a desprenderse de la superficie del agregado en presencia del agua (Chen et al. 2003).

### Energía Superficial

La energía superficial es una propiedad esencial en todo material y es determinada por las interacciones fisicoquímicas que ocurren en su superficie. La ES se divide en dos componentes, según el tipo de interacción que se dé en el material. El componente dispersivo  $\gamma^{LW}$ , correspondiente a las interacciones de Lifshitz-van der Waals, y el componente polar  $\gamma^{AB}$ , que incluye las interacciones en las que hay flujo de electrones e iones hidronio (van Oss et al. 1988). El componente polar se subdivide a su vez en los componentes ácido de Lewis,  $\gamma^+$ , y básico de Lewis,  $\gamma^-$  (Good y van Oss 1991) (ver Ecuación 1).

$$\gamma = \gamma^{LW} + \gamma^{AB} = \gamma^{LW} + 2\sqrt{\gamma^+ \gamma^-} \quad (1)$$

La ES, así como sus componentes, pueden estimarse a partir de la medición del ángulo de contacto formado entre un líquido de prueba y la superficie de interés. Los ángulos de contacto obtenidos se relacionan con la ES del material a partir de la Ecuación 2 (Hefer et al. 2006).

$$\gamma_L (1 + \cos \theta) = 2\sqrt{\gamma_S^{LW} \gamma_L^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_S^+ \gamma_L^-} + 2\sqrt{\gamma_S^- \gamma_L^+} \quad (2)$$

donde los subíndices  $L$  y  $S$  representan al líquido de prueba y al sólido de interés, respectivamente;  $\theta$  es el ángulo de contacto formado entre estos dos materiales.

### Adhesión y Desnudamiento del Asfalto

La formación de la interfaz asfalto-agregado es un proceso fisicoquímico que involucra la interacción de las superficies de ambos materiales. Por esta razón, la ES del asfalto y del agregado es utilizada en la estimación de indicadores como la adhesión y la susceptibilidad al desplazamiento del asfalto (desnudamiento) por efecto del agua.

El trabajo de la adhesión ( $W_{AB}$ ) entre dos fases se estima a partir de la Ecuación 3.

$$W_{AB} = \gamma_A + \gamma_B - \gamma_{AB} \quad (3)$$

donde  $\gamma_A$  es la energía superficial del agregado,  $\gamma_B$  es la energía superficial del asfalto y  $\gamma_{AB}$  es la energía de la interfaz agregado-asfalto.

El desplazamiento por efecto del agua ( $W_{ABW}^{wet}$ ) se calcula según la Ecuación 4 y es una estimación de la facilidad con la que la humedad alcanza la interfaz y desplaza al asfalto de la superficie del agregado.

$$W_{ABW}^{wet} = \gamma_{AW} + \gamma_{BW} - \gamma_{AB} \quad (4)$$

El parámetro de Razón de Energía (ER, por sus siglas en inglés) (ver Ecuación 5) cuantifica la relación entre los procesos de adhesión y desplazamiento que ocurren en la mezcla asfáltica.

$$ER = \frac{W_{AB}}{W_{ABW}^{wet}} \quad (5)$$

El ER sirve como criterio en la evaluación de las combinaciones asfalto-agregado puesto que, de acuerdo con investigaciones previas (Bhasin et al. 2006), se establece que el valor de  $W_{AB}$  sea tan alto y el valor de ( $W_{ABW}^{wet}$ ) tan bajo que permitan la obtención de un ER superior a 0.8. De esta forma, la combinación asfalto-agregado se considera resistente al daño por humedad.

Se considera que estos indicadores pueden ser utilizados en la determinación de la susceptibilidad a la humedad de la interfaz asfalto-agregado. Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación es evaluar la resistencia al daño por humedad de distintas combinaciones asfalto-agregado, a partir de la estimación de la energía superficial de ambos materiales.

## METODOLOGÍA

En el presente estudio se utilizó un tipo de asfalto (PG 70-22) a manera de asfalto control, el mismo fue modificado con 4% de Diatomita y con 4% de Nanosilica, individualmente. Adicionalmente, se utilizaron dos fuentes distintas de agregado, una caliza y una grava silícea. La energía superficial de cada uno de estos materiales se obtuvo con la ayuda del goniómetro y la aplicación de la Ecuación 2. La explicación completa de las transformaciones matemáticas y demás detalles de la medición pueden encontrarse en la literatura (Bhasin y Little 2006; Arabani y Hamedi 2011; Hefer et al. 2013). Los datos obtenidos se encuentran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Valores de ES de los materiales propuestos

Material		Energía Superficial (ES), erg/cm <sup>2</sup>				
		$\gamma_{TOTAL}$	$\gamma^{LW}$	$\gamma^{AB}$	$\gamma^+$	$\gamma^-$
Asfaltos	Control	20.1	19.0	1.03	0.128	2.07
	4% Diatomita	17.5	16.7	0.836	0.0380	4.59
	4% Nanosilica	21.8	10.9	3.9	6.98	6.31
Agregados	Caliza	42.1	39.4	2.77	0.226	8.49
	Grava silícea	54.7	46.9	27.9	0.572	26.5

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Tabla 1 se observa que el asfalto control tiene un mayor carácter dispersivo comparado con el carácter polar. Esto es esperable debido a que el asfalto está compuesto por moléculas orgánicas de baja polaridad. Además, se observan los cambios fisicoquímicos que le ocurren al asfalto luego de la modificación. La incorporación de aditivos inorgánicos como la diatomita y la nanosilica en el asfalto control reducen el valor del componente dispersivo y, en el caso de la modificación con nanosilica, aumenta significativamente el valor del componente polar. En el caso de los agregados, se encontró que ambos materiales son altamente dispersivos. Sin embargo, ambos difieren significativamente en términos de polaridad ya que la grava silícea tiene un componente polar básico que triplica al de la caliza, dando como resultado un componente polar total diez veces más grande para la grava silícea. Las diferencias observadas entre los agregados se deben a la composición química de cada uno. La grava está conformada por minerales tales como óxidos de silicio y aluminio que incrementan su basicidad, mientras que la caliza está compuesta principalmente por calcita, un mineral de menor basicidad.

Los cambios observados en la fisicoquímica del asfalto luego de la modificación tienen repercusiones en la manera en la que éste se adhiere al agregado. A su vez, la mineralogía de cada agregado es igualmente determinante en el proceso de adhesión. Para ilustrar estas afirmaciones, la Figura 1 muestra el trabajo de adhesión obtenido para las combinaciones propuestas.

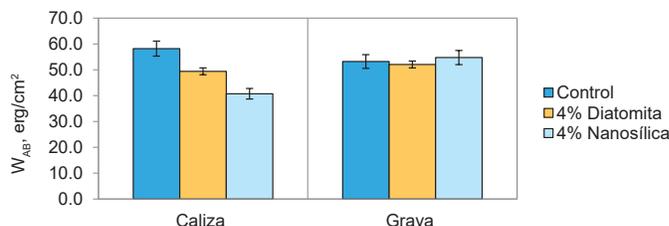


Figura 1. Trabajo de adhesión para las combinaciones propuestas

En el caso de las combinaciones de asfalto con el agregado calizo se observa que éste tiene una mayor adhesión con el asfalto control que con los asfaltos modificados. Es decir, la modificación con diatomita y nanosilica al 4% resulta en una reducción de la adhesión con el agregado calizo. Por otro lado, los valores de adhesión de las combinaciones producidas con la grava silícea se mantienen constantes, sin embargo, se observa un ligero aumento en la adhesión para la combinación de la grava silícea y el asfalto modificado con nanosilica. En resumen, para estos dos agregados la adición de nanosilica y diatomita al 4% no ofrece una mejora significativa en términos de adhesión.

Desde otro punto de vista, de acuerdo con la Figura 1, el asfalto control tiene una mayor compatibilidad con la caliza que con la grava silícea, ya que el valor del trabajo de adhesión es más alto para tal agregado. Adicionalmente, se observa que la presencia de nanosilica al 4% aumenta en mayor grado la compatibilidad del asfalto con la grava, mientras que disminuye la compatibilidad con el agregado calizo. En otras palabras, el uso de nanosilica como aditivo es ventajoso si en el diseño de mezcla se pretende utilizar agregado tipo grava silícea. Tales observaciones resultan útiles al diseñar una mezcla asfáltica, puesto que permiten seleccionar al aditivo adecuado según el tipo de agregado a emplear, de forma que la adhesión mejore o no sea afectada en gran medida. Sin embargo, en términos de daño por humedad es necesario considerar además el comportamiento que exhibirá cierta combinación en presencia del agua. Al respecto, el trabajo de desplazamiento para las combinaciones estudiadas se ilustra en la Figura 2.

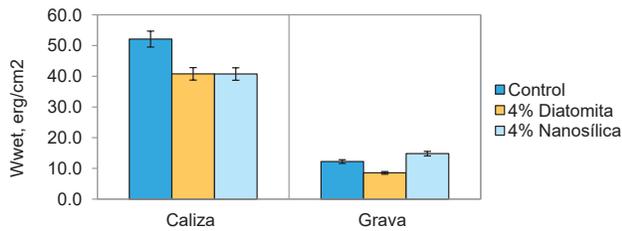


Figura 2. Trabajo de desplazamiento en presencia del agua para las combinaciones propuestas

Al tener en cuenta que el valor del  $W_{wet}$  debe ser bajo, es posible observar en la Figura 2 que la modificación del asfalto con diatomita y nanosilica tiene un efecto favorable en las combinaciones que involucran a la caliza, ya que estos aditivos reducen el trabajo de desplazamiento y, por tanto, reducen la tendencia del asfalto al desnudamiento. Por otra parte, entre las combinaciones producidas con la grava silícea, destaca la combinación con asfalto modificado con diatomita, la cual tiene el valor de  $W_{wet}$  más bajo. Lo anterior representa para el asfalto una menor tendencia a ser desplazado por el agua. No obstante, de acuerdo con la Figura 2, la combinación de la grava silícea con el asfalto modificado con nanosilica tiene un  $W_{wet}$  más alto comparado con el asfalto control. Por tanto, puede inferirse que este aditivo aumenta levemente la susceptibilidad del asfalto ante la humedad.

La Figura 2 muestra la superioridad de la grava silícea al producir interfaces asfalto-agregado menos propensas al colapso por el agua. La magnitud del trabajo de desplazamiento de las combinaciones que involucran a este agregado son significativamente inferiores comparadas con las combinaciones producidas con la caliza, lo cual hace de la grava silícea un agregado apto para utilizarse en zonas con altos niveles de humedad.

El criterio final acerca del desempeño ante la humedad de las diferentes combinaciones se obtiene al observar los resultados de la Razón de Energía (ER) en la Figura 3. Un valor de ER alto (mayor a 0.8) para cierto par asfalto-agregado es sinónimo de que el mismo tendrá una alta resistencia al daño por humedad (Bhasin et al. 2006).

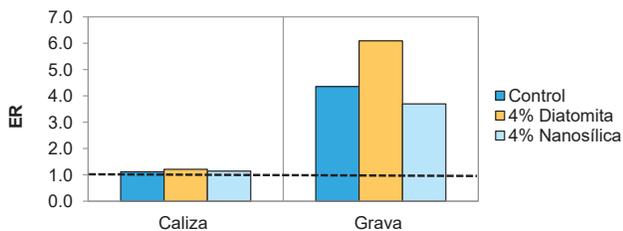


Figura 3. Razón de Energía (ER) para las combinaciones propuestas. El valor límite de 0.8 está marcado con una línea discontinua

La Figura 3 muestra que todas las combinaciones propuestas tienen un valor de ER superior a 0.8 por lo que puede considerarse que todas se desempeñarán adecuadamente en presencia de humedad. Sin embargo, se observa además que las combinaciones producidas con la grava silícea superan significativamente aquellas producidas con la caliza. Lo anterior permite inferir que la utilización de grava silícea como agregado en una mezcla asfáltica reduce la susceptibilidad de la misma ante el daño por humedad. Nótese además que la modificación del asfalto control con diatomita aumenta el valor de ER para ambos agregados, no así la modificación con nanosilica la cual inclusive reduce el valor de ER del asfalto combinado con la grava silícea. Se concluye nuevamente que estas observaciones sirven como criterio en la elección de los materiales adecuados durante el diseño mezcla.

Los resultados obtenidos en este estudio son consistentes con los obtenidos en un estudio previo (Aguar-Moya et al. 2015) en el cual se evaluó la fuerza de adhesión y resistencia al agua de varias combinaciones asfalto-agregado mediante un ensayo mecánico llamado Fuerza del Enlace Adhesivo o Adhesive Bond Strength (ABS) en inglés, en el que se mide la fuerza necesaria para separar mecánicamente al asfalto de la superficie del agregado. A mayor presión requerida, mayor se considera la adhesión entre los materiales (Aguar-Moya et al. 2016).

En el estudio mencionado se emplearon varios tipos de agregado, entre ellos grava silícea y agregado calizo, los cuales fueron combinados con varios tipos de asfalto, incluyendo asfaltos modificados con nanosilica y diatomita. Los autores encontraron que la modificación del asfalto diatomita y con nanosilica da como resultado una mayor adhesión particularmente con la grava silícea en condiciones secas. En condiciones húmedas los autores observaron que la grava silícea se combina fuertemente con el asfalto, tanto modificado como sin modificar, por lo que se requirió mayor fuerza para separar al mismo del agregado. Tales observaciones refuerzan los resultados del presente estudio, en el que se destaca la superioridad de la grava silícea sobre el agregado calizo y la utilidad de aditivos como la diatomita como promotor de la resistencia al daño por humedad.

## CONCLUSIONES

La estimación de la calidad de la interfaz asfalto-agregado formada en una mezcla asfáltica es posible con la implementación del goniómetro. Tal equipo permite obtenerla energía superficial de los materiales, mediante un procedimiento sencillo y de bajo costo. La información de ES obtenida permite a su vez el cálculo de indicadores relevantes, tales como la adhesión y

el desnudamiento. De esta forma, es posible predecir de manera fisicoquímica el comportamiento que exhibirá la interfaz asfalto-agregado ante el daño por humedad.

A su vez, esta técnica es de gran ayuda en la elección de materiales de mayor resistencia ante el daño por humedad. En general, el presente estudio permitió concluir que la adición de diatomita al asfalto mejoraría significativamente el desempeño ante la humedad para los dos agregados seleccionados. Adicionalmente, se observó que, de los dos tipos de agregados, la grava silícea produce las interfaces más resistentes a la humedad.

Las observaciones de este estudio correlacionan correctamente con el ensayo mecánico BBS, el cual es sencillo de aplicar y podría

ser utilizado igualmente en la selección de materiales durante el diseño de mezcla. Se recomienda la ampliación de la cantidad y tipo de combinaciones asfalto-agregado a evaluar, incluyendo aditivos de distinta naturaleza química, tales como polímeros y diatomita. Se recomienda, además, la caracterización mecánica del material empleando mezcla asfáltica.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, LanammeUCR y al Centro de Electroquímica y Energía Química, CELEQ por el apoyo brindado a esta investigación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguiar-Moya, J. P., Salazar-Delgado, J., Baldi-Sevilla, A., Leiva-Villacorta, F., Loría-Salazar, L. (2015). Effect of Aging on Adhesion Properties of Asphalt Mixtures with the Use of Bitumen Bond Strength and Surface Energy Measurement Tests. *Trans. Res. Rec.: J. Trans. Res. Board*, 2505, pp. 57-65. doi: 10.3141/2505-08
2. Aguiar-Moya, J. P., Baldi-Sevilla, A., Salazar-Delgado, J., Pacheco-Fallas, J., Loría-Salazar, L., Reyes-Lizcano, F., Cely-Leal, N. (2016). Adhesive Properties of Asphalts and Aggregates in Tropical Climates. *Int. J. Pavement. Eng.*, 1-10. doi: 10.1080/10298436.2016.1199884
3. Arabani, M., & Hamed, Gh. H. (2011). Using the Surface free energy method to evaluate the effect of polymeric aggregate treatment on moisture damage in hot-mix asphalt. *J. Mater. Civ. Eng.* 23, 802-811. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000228
4. Bhasin, A., Masad, E., Little, D. & Lytton, R. (2006). Limits on Adhesive Bond Energy for Improved Resistance of Hot Mix Asphalt to Moisture Damage. *Trans. Res. Rec.: J. Trans. Res. Board*, 1970, pp. 3-13. doi: 10.3141/1970-03
5. Caro, S., Masad, E., Bhasin, A., & Little, D. N. (2008). Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms. *Inter. J. Pavement Eng.*, 9(2), 81-98. doi: 10.1080/10298430701792128
6. Chen, D., Little, D., Lytton, R., & Hostle, J. (2003). Moisture Damage Evaluation of Asphalt Mixture by Considering Both Moisture Diffusion and Repeated Load Conditions. *Transport. Res. Rec.* 1832 (03-2730), 42-49. doi:10.3141/1832-06
7. Cho, D., & Bahia, H. U. (2007.) Effects of Aggregate Surface and Water on Rheology of Asphalt Films. *Transport. Res. Rec.* 1998, 10-17. doi: 10.3141/1998-02
8. Cho, D., & Kim, K. (2010). The Mechanisms of Moisture Damage in Asphalt Pavement by Applying Chemistry Aspects. *J. Civ. Eng.* 14(3), 333-342. doi: 10.1007/s12205-010-0333-z
9. Good, R. J., and van Oss, C. J., (1991). The Modern Theory of Contact Angles and the Hydrogen Bond Components of Surface Energies. Plenum Press, New York.
10. Hefer, A., Bhasin, A., & Little, D. (2006). Bitumen Surface Characterization Using a Contact Angle Approach. *J. Mater. Civ. Eng.* 18, 759-767. doi: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:6(759)
11. Kiggundu, B. M., & Roberts, F. L. (1988). Stripping in HMA mixtures: State-of-the-art and critical review of test methods. NCAT Report No. 88-2, National Center for Asphalt Technology, Auburn University.
12. Little, D. N., & Jones, D. R. (2002). Chemical and mechanical processes of moisture damage in hot-mix asphalt pavement. Moisture Sensitivity of Asphalt Pavement: A National Seminar, San Diego, CA, 37-70.
13. Masad, E., Arambula, E., Ketcham, R. A., Abbas, A. R., & Martin, A. E. (2007). Nondestructive measurements of moisture transport in asphalt mixtures. *J. Assoc. Asp. Pav. Tech.*, 76, 919-952.
14. Nejad, M., Hamed, Gh. H., & Azarhoosh, A. R. (2013). Use of surface free energy method to evaluate effect of hydrate lime on moisture damage in hot-mix asphalt. *J. Mater. Civ. Eng.* 25, 1119-1126. doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000650
15. Taylor, M. A., & Khosla, N. P. (1983). Stripping of Asphalt Pavements: State of the Art. Transportation Research Record 911.
16. Terrel, R. L., & Shute, J. W. (1989). Summary report on water sensitivity, SHRP-A/IR-89-003. Strategic Highway Research Program, National Research Council Washington D.C.
17. van Oss, C. J., Chaudhury, M. K., & Good, R. J. (1988). Interfacial Lifshitz-van der Waals and Polar Interactions in Macroscopic Systems. *Chem. Rev.*, 88, 927-941. doi: 10.1021/cr00088a006

# Los conceptos de fondeo y financiamiento en el desarrollo de proyectos por medio de participación público-privada (PPP)

*The concepts of funding and financing when developing projects through public private partnerships (PPP)*

**Federico Villalobos Carballo. Economista, MBA**

Infraestructura, Economía, Financiamiento, PPPs

[federico.villalobos@gmail.com](mailto:federico.villalobos@gmail.com)

**Fecha de recepción:** 14 de agosto de 2017 / **Fecha de aprobación:** 19 de septiembre de 2017

## RESUMEN

El objetivo principal de los modelos de participación público-privada (PPP) es su potencial introducir eficiencias a lo largo de la vida de los proyectos. Sin embargo, en condiciones de restricciones fiscales es común que los esquemas PPP se posicionen como la solución para desarrollar la obra pública que el Estado no puede financiar. En este sentido, es necesario aclarar que aún y cuando el sector privado asuma en su balance parte del financiamiento, alguien deberá pagar por servicios prestados. Aquí es donde se marca la diferencia entre fondeo y financiamiento.

Las fuentes de fondeo se refieren al origen de los ingresos que generará el proyecto. Específicamente pueden ser pagos del usuario (tarifas), pagos del Estado (recursos de impuestos) o una combinación de ambos. El financiamiento corresponde a los recursos financieros que forman parte de la estructura de capital utilizada para el desarrollo del proyecto, es decir créditos, bonos, y aportes de accionistas. La diferenciación de ambos conceptos es clave en la toma de decisiones para desarrollar los proyectos de obra pública que requieren nuestras economías.

**PALABRAS CLAVES:** Participación Público-Privada, PPP, financiamiento, infraestructura.

## ABSTRACT

*The main objective of Public Private Partnerships (PPP) models is to generate efficiency gains throughout the project lifecycle. However, in a budget- constrained environment, PPPs are viewed as a tool for developing the projects which the government able to finance. That said, it is important to distinguish the concepts of project funding and project financing.*

*Funding refers to the sources of income to repay for the project investments during its life: taxes and tariffs. Financing refers to money invested. Broadly speaking, financing could take the form of public debt, private debt or private equity. Therefore, private money is not "free money" and funding will be needed to repay for it. Having a clear understanding of these elements is crucial within the decision-making process in public infrastructure development.*

**KEY WORDS:** Public Private Partnerships, PPP, financing, infrastructure.

## INTRODUCCIÓN

El Banco Mundial (2014) define la participación público-privada (PPP)<sup>1</sup> como contratos de largo plazo entre el sector privado y una entidad gubernamental para la provisión de un activo público o servicio, en la cual el sector privado asume riesgos significativos y responsabilidad gerencial con una remuneración financiera ligada al desempeño. Por su parte, Eurostat (2016) en su publicación “*A Guide to the Statistical Treatment of PPPs*” describe la participación público-privada (PPP) como contratos de largo plazo para la provisión de un activo público y sus respectivos servicios a cambio de pagos al sector privado basados en la disponibilidad y/o uso de la infraestructura desarrollada. Es decir, a diferencia de la contratación convencional donde la empresa es proveedora del Estado, en las PPP la firma privada concesionaria recibe un pago basado en el servicio prestado. Asimismo, el contratista asume dentro de la estructura de capital un rol de accionista, es decir, solamente generará flujo de caja para recuperar su inversión y obtener el rendimiento esperado en tanto logre cumplir con los objetivos operativos y financieros.

Si bien el objetivo principal de los modelos PPP es su potencial introducir eficiencias a lo largo de la vida de los proyectos, es común que en ambientes de restricciones fiscales se posicione el esquema como la salida para desarrollar la obra pública requerida. Sin embargo, es necesario tener claro que aún y cuando el sector privado asuma en su balance el financiamiento, alguien deberá pagar por servicios prestados. Aquí es donde se marca la diferencia entre fondeo y financiamiento.

Las fuentes de fondeo se refieren al origen de los ingresos que generará el proyecto. Específicamente pueden ser pagos del usuario (tarifas), pagos del Estado (recursos de impuestos) o una combinación de ambos. El financiamiento corresponde a los recursos que deberán repagarse como parte de la estructura de capital utilizada para el desarrollo del proyecto, es decir créditos, bonos, y aportes de accionistas (European PPP Expertise Centre 2016).

## ESTRUCTURA FINANCIERA EN PROYECTOS PPP

La estructura financiera de proyectos PPP se basa en el esquema de financiamiento de proyecto (conocido internacionalmente como *project finance*). El *project finance* es un modelo que consiste en respaldar el financiamiento con los mismos recursos generados por el proyecto. Además, la transferencia de riesgos del sector público al privado se materializa por medio de los recursos propios que aporta el concesionario dentro de la estructura de

1 También conocida como alianza o asociación público-privada (APP), colaboración público-privada (CPP) o concesión de obra pública.

financiamiento. Específicamente, hay cinco elementos que caracterizan el *project finance* (Gatti, 2013):

- Los compromisos financieros son asumidos por una compañía creada con el propósito específico del proyecto, la cual es legalmente independiente de los promotores. Esta es conocida como vehículo o sociedad de propósito especial (Special Purpose Vehicle - SPV por sus siglas en inglés).
- Las operaciones de los acreedores son sin recurso o con recurso limitado sobre los patrocinadores del proyecto. Los patrocinadores participan en el proyecto por medio del aporte de capital o recursos propios (*equity*, por su nombre en inglés) y la gestión del negocio.
- Los riesgos del proyecto son asignados a aquellos actores que pueden gestionarlos de la mejor manera -entiéndase a un costo menor-.
- Los flujos de caja del proyecto deben ser suficientes para cubrir los costos operativos y atender el servicio de la deuda (principal e intereses). Dadas la prioridad en el pago, únicamente los recursos residuales pueden ser utilizados para pagar dividendos a los patrocinadores como compensación por los recursos propios (*equity*) aportados.
- El colateral de los acreedores lo constituye el derecho sobre los recursos generados por el proyecto. En una iniciativa PPP los activos del proyecto son propiedad del Estado, razón por la cual los mismos no son considerados por los acreedores en su análisis crediticio. Aún el derecho de vía, no se consideraría pues en caso de un pobre desempeño financiero del proyecto, no sería posible activar los mismos como forma de garantía.

En este sentido, la adecuada estructuración financiera de un proyecto APP pasa por un delicado equilibrio entre los diversos intereses de los principales participantes del esquema. Específicamente, en una estructura básica de “*project finance*” los siguientes son los actores centrales:

- **Usuarios:** El objetivo central de una PPP es satisfacer sus necesidades con un servicio eficiente y de calidad.
- **Estado:** En su calidad de representante de los usuarios, busca mejorar los estándares de calidad en el servicio sin ignorar las limitaciones fiscales que imponen una restricción presupuestaria en sus funciones.
- **Accionistas:** Son los dueños de la sociedad de propósito especial y quienes aportan los recursos propios al proyecto (*equity*). No poseen un rendimiento financiero fijo o

garantizado al ser quienes asumen en mayor proporción los riesgos transferidos por el Estado.

- **Acreeedores:** Son bancos u otros inversionistas institucionales que aportan recursos al proyecto en forma de deuda. Reciben un rendimiento fijo en forma de intereses. Típicamente exigen ciertas limitaciones y protección para su participación, siendo la Razón de Cobertura del Servicio de la Deuda (RCSD) una de las principales.

Dentro de esta estructura es relevante diferenciar las características de los recursos propios (de accionistas) versus los recursos ajenos (acreeedores como bancos e inversionistas institucionales). Los acreeedores esperan un pago fijo por el servicio de la deuda, considerando el principal y los intereses, dicho pago estará protegido mediante limitaciones y condiciones que incluirán en el contrato de deuda.

Por su parte, los recursos aportados por los accionistas de la sociedad no tienen un rendimiento garantizado, sino que recibirán dividendos solamente en caso de que el proyecto sea adecuadamente gestionado y que se cumplan las proyecciones de costo y demanda esperados. Dicho de otra manera, los recursos propios son la esencia de la transferencia de riesgos pues son los accionistas del proyecto los que asumirán de manera directa los posibles sobrecostos, atrasos, caídas en demanda proyectada, etc. En este sentido, es también esperable que los recursos propios posean un rendimiento esperado mayor al rendimiento fijo que reciben los acreeedores, debido al nivel de riesgo que enfrentan. Este elemento es muy importante pues usualmente se comete el error de comparar la rentabilidad esperada por los accionistas de un proyecto APP con el costo de la deuda del Estado, siendo que esta última no considera el costo de los riesgos que retiene el Estado en un proyecto desarrollado bajo el esquema convencional.

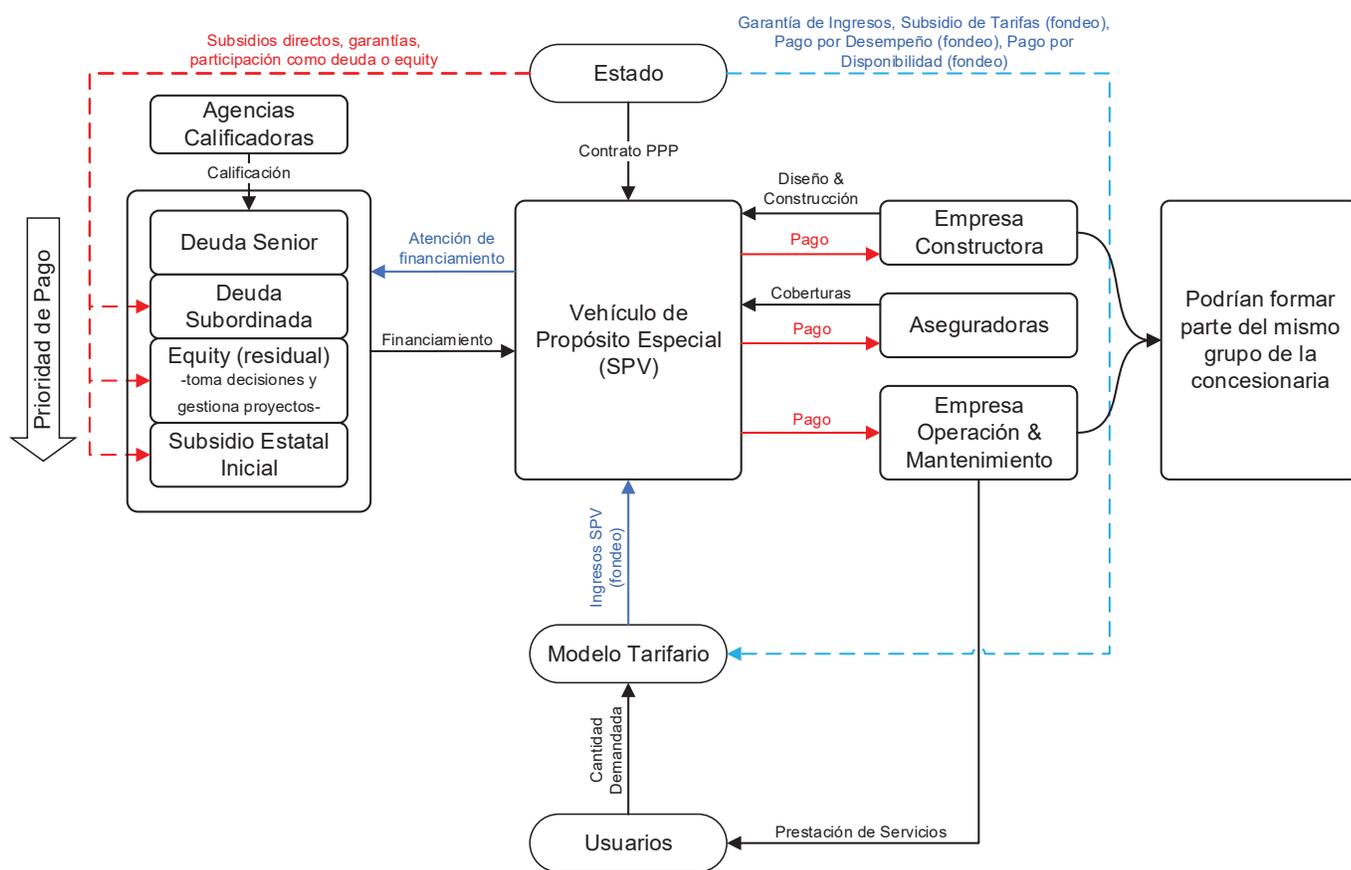


Figura 1. Estructura Básica de Financiamiento de Proyectos PPP

## FUENTES DE FONDEO

Las fuentes de fondeo corresponden a los potenciales ingresos que se generarán al prestarse el servicio por parte de la empresa concesionaria. Específicamente pueden ser pagos del usuario (tarifas), pagos del Estado (recursos de impuestos) o una combinación de ambos. Las fuentes de financiamiento, por su parte, corresponden a los recursos que deberán repagarse como parte de la estructura de recursos utilizados para el desarrollo del proyecto, es decir créditos, bonos, y aportes de accionistas (European PPP Expertise Centre, 2016).

La diferenciación de conceptos de fondeo y financiación es central en modelos PPP, debido a que normalmente se asume la premisa errónea de que la posibilidad de cobrar una tarifa ya resuelve por sí solo el problema. Seguidamente se detallan las fuentes de fondeo típicas en proyectos PPP.

Tarifas sobre los usuarios: Este tipo de ingreso se da por ejemplo en los proyectos convencionales de carretera con peaje, donde los ingresos de la empresa estarán determinados por la cantidad y tipo de vehículos que transiten, así como el modelo tarifario establecido. En lo que respecta a la determinación de la tarifa existen diversas metodologías como el precio máximo (price cap por su nombre en inglés), ingreso máximo (revenue cap) y la basada en la tasa interna de retorno (TIR) para la empresa concesionaria (rate of return). Cada una de estas formas de estimar la tarifa inicial de un proyecto generan incentivos o desincentivos distintos sobre las decisiones que tomará la empresa.

Por su parte los criterios de ajuste de la tarifa en el tiempo constituyen un elemento fundamental en el análisis financiero. Por ejemplo, si la tarifa se modifica con base en variaciones en el valor de la moneda local respecto a una moneda extranjera, quiere decir entonces que el riesgo de tipo de cambio se está trasladando a los usuarios, misma lógica que aplicaría a otros indicadores económicos como la tasa de interés, inflación, inflación de economías externas, entre otros.

Pagos directos del Estado basados en uso: Consisten en pagos realizados por el Estado de acuerdo con la cantidad de usuarios del servicio. En este esquema el Estado traslada a la empresa total o parcialmente el riesgo de demanda.

Pagos directos del Estado basados en disponibilidad y desempeño: Consisten en pagos realizados por el Estado siempre y cuando la infraestructura se encuentre disponible y cumple con determinados indicadores de desempeño (KPIs por sus siglas en inglés). Al igual que sucede con las tarifas directas sobre los usuarios, la metodología de determinación inicial y el ajuste de los pagos que realice el Estado serán determinantes en la asignación de riesgos y establecimiento de incentivos.

Bonos y penalidades: Los bonos y penalidades pueden establecerse de manera independiente o bien ligarse a los mecanismos de tarifa directa o pagos del Estado. Estas pueden estar ligadas a hitos o factores especiales de desempeño.

Otros ingresos: Los proyectos podrían incorporar otros ingresos como la explotación de áreas comerciales e incluso la captura de valor de las propiedades que presentan una plusvalía producto del nuevo servicio (US Federal Highway Administration, 2010).

La determinación de las fuentes de fondeo estará directamente relacionada con la demanda estimada por el servicio que brindará el proyecto, la cual también será un determinante de la inversión inicial y costos periódicos de operación y mantenimiento. En este sentido, la proyección de la demanda en el análisis financiero del proyecto debe considerar la capacidad para la cual ha sido previsto. En caso de que la demanda crezca de manera acelerada los costos de operación y mantenimiento es posible que se incrementen y que a su vez sean necesarias nuevas inversiones para atender la creciente demanda. Además, las proyecciones deben considerar el impacto del precio en la cantidad demandada del servicio, es decir la elasticidad-precio (Ortúzar y Willumsen, 2011).

Asimismo, el análisis financiero deberá considerar los escenarios de estrés necesarios<sup>2</sup> con el fin de evaluar posibles escenarios negativos que atenten contra la viabilidad del proyecto, mitigando así la posible existencia de un sesgo optimista tanto en la estimación de la demanda como de la inversión inicial y costos recurrentes del proyecto. En lo que respecta a demanda, las diferencias entre los las proyecciones iniciales y los resultados finales pueden ser causadas por un pobre análisis inicial, limitada o inexistente aproximación de la disposición a pagar de los usuarios (en proyectos con cobro sobre el usuario), la no consideración de otras alternativas públicas o privadas que puedan constituir un sustituto del servicio en cuestión, no tomar en cuenta el impacto de cambios tecnológicos, el periodo que tarde del proyecto en alcanzar su nivel de ingresos base -ramp up-, entre otros. (Ortúzar y Willumsen, 2011).

---

2 Diferentes metodologías pueden ser aplicadas. De las más extendidas están las simulaciones de Monte Carlo.



Figura 2. Posibles Fuentes de fondeo (generación de ingresos) en una PPP

## FINANCIAMIENTO DEL PROYECTO

El financiamiento del proyecto corresponde a la estructura de capital sobre la cual se fundamenta el desarrollo del proyecto. Los recursos aportados en el financiamiento serán repagados con el flujo de caja libre que genere el proyecto por medio de las fuentes de fondeo y una vez atendidos los compromisos de inversiones, operación, mantenimiento u otros que puedan surgir durante el ciclo de vida del proyecto. En este sentido, es importante diferenciar entre flujo de caja del proyecto y flujo de caja de los accionistas.

**Flujo de Caja Libre del Proyecto (FCLp):** El FCLp corresponde al flujo de efectivo generado por el proyecto después de inversiones iniciales (construcción, intereses capitalizados, etc.), costos de operación y mantenimiento, cánones e impuestos. El FCLp corresponde al flujo generado sin considerar endeudamiento, es decir equivale al caso donde el 100% del proyecto es desarrollado con recursos propios (equity). Para que un proyecto sea financieramente viable deberá contar con un FCLp que genere una Tasa Interna de Retorno (TIR) igual o superior al costo ponderado del capital que se emplearía en el proyecto (WACC<sup>3</sup> por sus siglas en inglés).

**Flujo de Caja Libre de los accionistas (FCLa):** El FCLa corresponde al flujo de efectivo generado para los accionistas, es decir el flujo del proyecto considerando el impacto del financiamiento con terceros. En este sentido, atender el servicio de la deuda (principal e intereses) representa una salida de efectivo, mientras que el desembolso de nueva deuda representa un ingreso de efectivo. Para efectos del accionista, el endeudamiento tiene sentido siempre y cuando el costo de la deuda adquirida sea menor a la TIR del proyecto.

3 Weighted Average Cost of Capital (WACC).

Considerando los flujos de caja libre es posible determinar si un proyecto es financieramente viable (bancable). Esto se dará siempre y cuando el valor presente de los flujos sea mayor a 0. Los acreedores requerirán que los flujos positivos del proyecto excedan a los flujos negativos en una magnitud tal que les brinde un nivel de protección adecuado. Por su parte los accionistas estarán interesados además que el flujo les permita obtener un determinado rendimiento por los recursos aportados dado el nivel de riesgo del proyecto.

De esta manera se determina el volumen de financiamiento. Este corresponde al monto de recursos (equity y deuda) que puede asumir un proyecto dada las inversiones requeridas y la generación de flujo de caja libre esperada. En el caso de acreedores, elementos como la razón de cobertura del servicio de la deuda (RCSD) determinarán la cantidad de recursos que estarían dispuestos a aportar, mientras los accionistas se enfocarán en elementos como la tasa interna de retorno (TIR). Todos los indicadores estarán ligados a los tipos de riesgos asignados al concesionario, al Estado o a los usuarios, así como a otros elementos externos al proyecto como la seguridad jurídica que brinda el país, el desempeño de la economía local y la disposición a pagar de los usuarios (en los casos que corresponde), pues estos impactarán la predictibilidad de los flujos proyectados.

### Estructura de Financiamiento

La determinación de la estructura financiera pasa por el adecuado balance entre las expectativas de riesgo/rendimiento de acreedores y accionistas del proyecto. Uno de los principales elementos de la estructura financiera es la relación equity/deuda o recursos propios/deuda.

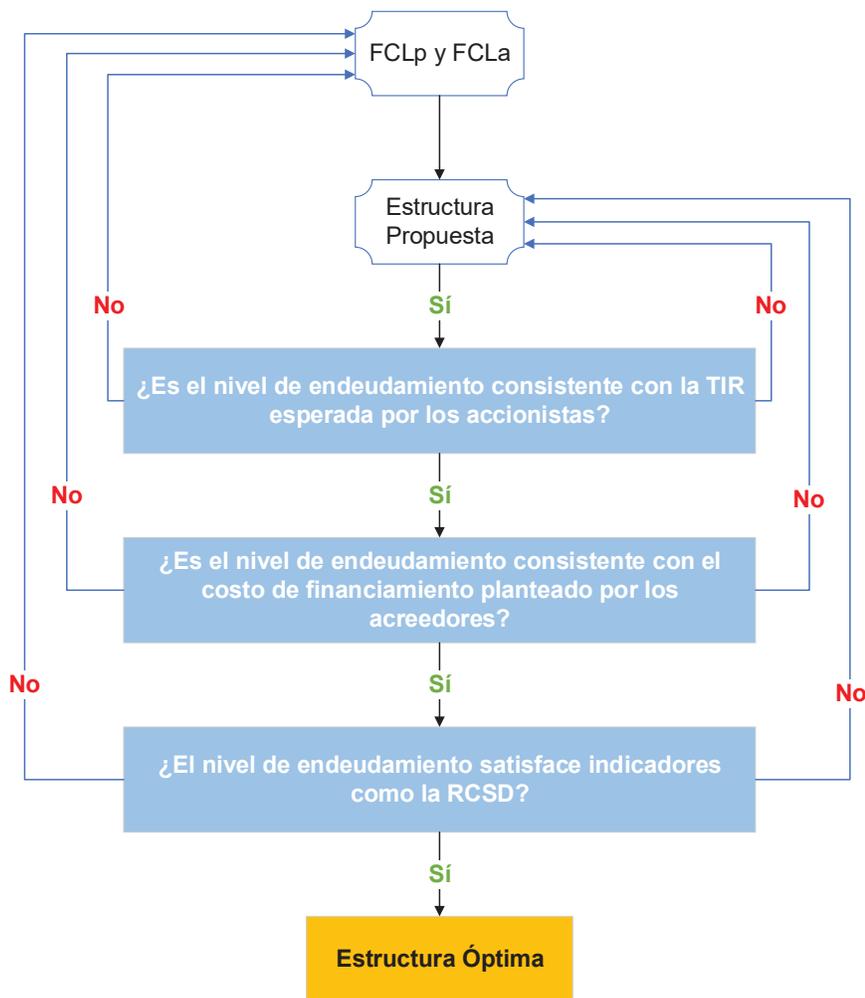
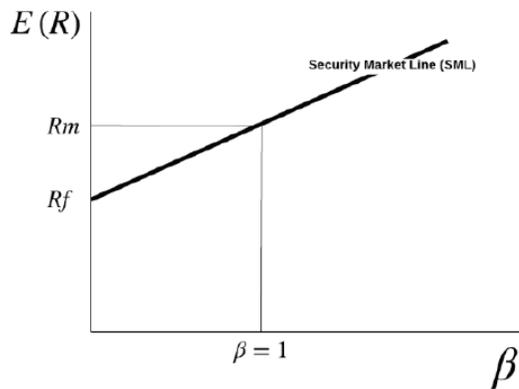


Figura 3. Determinación de la estructura de financiamiento de un proyecto PPP (Adaptación de Gatti 2013)

Los accionistas buscarán el mayor nivel de endeudamiento posible para potenciar el retorno de su inversión (TIR). Por el contrario, los acreedores buscarán establecer límites a dicho endeudamiento pues niveles muy elevados podrían deteriorar la calidad del crédito, exponiéndolos a riesgos no tolerables. La relación equity/deuda no dependerá únicamente del nivel del flujo generado por el proyecto sino también del perfil de los riesgos y la asignación que se realice de los mismos. En términos generales, la estructuración financiera de los proyectos PPP requieren por lo general un aporte de recursos propios (equity) de entre un 10% y un 40% de la inversión inicial, pudiendo ser mayor en caso particularmente complejos.

### **Rendimiento esperado por el concesionario**

A diferencia de los acreedores, que poseen un derecho prioritario sobre los flujos generados, los accionistas recibirán los flujos residuales luego de atender las inversiones, egresos recurrentes y servicio de la deuda. Es decir, asumen un nivel de riesgos mayor, debiendo en algunos casos inyectar recursos adicionales si así lo requiere la estructura del proyecto. En este sentido, la TIR esperada estará sujeta a muchos elementos como: la asignación de riesgos entre las partes, las condiciones económicas imperantes, la confianza que brinda el país para este tipo de inversiones, etc. Propiamente para la estimación de la TIR esperada se utiliza el modelo de valoración de activos financieros, o más comúnmente conocido como CAPM por las siglas en inglés de *Capital Asset Pricing Model* (CAPM).



$$E(R) = R_f + (R_m - R_f) \cdot \beta$$

Rendimiento Esperado = Precio del Tiempo + Cantidad de Riesgo \* Precio del Riesgo

$R_f$  Precio del Tiempo: Tasa Libre de Riesgo

$R_m$  Rendimiento de mercado

$\beta$  Beta: variación en rendimiento del activo ante variaciones en rendimientos del mercado

$$\beta = \frac{Cov\ i,m}{\sigma_m^2}$$

Covarianza variación rendimiento del activo y variación de rendimiento de mercado

Varianza del rendimiento de mercado

$\rho_{i,m}$  Correlación rendimientos mercado y rendimientos del activo

$\sigma_i$  Desviación estándar rendimientos del activo

$\sigma_m$  Desviación estándar rendimientos del mercado

$$\rho_{i,m} = \frac{Cov\ i,m}{\sigma_i \sigma_m} \quad \rho_{i,m} \cdot \sigma_i \sigma_m = Cov\ i,m$$

$$\beta = \frac{\sigma_i \sigma_m \rho_{i,m}}{\sigma_m^2} = \frac{\sigma_i \rho_{i,m}}{\sigma_m}$$

Figura 4. Rendimiento esperado por el concesionario según modelo CAPM.

El CAPM es uno de los principales modelos del mundo financiero y describe la relación esperada de riesgo y rendimiento en activos individuales. Es decir nos brinda el rendimiento esperado de un activo financiero dado el riesgo de mercado (sistemático) medido por medio del indicador Beta. El modelo CAPM fue desarrollado de manera independiente por Willam Sharpe, John Lintner y Jan Mossin, razón por la cual también se le conoce como el modelo Sharpe-Lintner, Mossin (GARP 2017). El CAPM es uno de los principales modelos del mundo financiero y describe la relación esperada de riesgo y rendimiento en activos individuales. El modelo CAPM se basa en los siguientes elementos centrales:

- $R_f$ : Tasa Libre de Riesgo. Generalmente esta hace referencia a los títulos de referencia emitidos por el Estado.
- $R_m$ : Rendimiento del mercado. Hace referencia a índices accionarios o rendimientos seleccionados de una determinada industria.
- Beta: Es la variación entre el rendimiento del activo y el rendimiento del mercado. En el caso del portafolio de mercado el Beta=1 pues corresponde al rendimiento representativo del mercado.

### Indicadores críticos para los acreedores

El cierre financiero del proyecto pasa por compatibilizar las expectativas de riesgos y rendimiento de los acreedores con aquellas de los accionistas. Dentro de esta dinámica, los acreedores podrían solicitar condiciones como las siguientes: disponibilidad de suficiente equity para compensar sobre-costos o demoras en el inicio de operaciones, contrato de llave en mano en firme para el diseño y construcción con un contratista con adecuado rating crediticio, reservas de efectivo para atender costos de operación y mantenimiento por un tiempo determinado, reservas de efectivo para atender el servicio de la deuda por un tiempo determinado, concreción de todos los seguros requeridos, y la inclusión cuando así se requiera de algunas coberturas para elementos como el riesgo político<sup>4</sup>. Para dar seguimiento al cumplimiento de las condiciones, los acreedores establecerán dentro del contrato de crédito indicadores de desempeño crediticio.

Razón de Cobertura del Servicio de la Deuda (RCSD): indica la razón entre flujo de caja libre antes del servicio de la deuda y el servicio de la deuda (intereses+principal). En teoría el menor monto del indicador sería 1.0x donde los flujos se utilizarían

4 Principalmente este tipo de coberturas es comercializado por bancos multilaterales o mecanismos de soporte de proyectos creados por los gobiernos.

enteramente para el pago del servicio de la deuda. Sin embargo, esto no sería aceptable por los acreedores pues mantener una RCSD de 1.0x implicaría que cualquier desviación de las proyecciones realizadas implicaría que no se podrían atender los compromisos. Las RCSD dependen de las características de cada proyecto. En el sector transporte se observan con frecuencia RCSD entre 1.35x y 1.50x (Gatti 2013).

Razón de Cobertura de la Vida del Crédito (RCVC<sup>5</sup>): es la razón entre el valor presente del Flujo de Caja Libre antes de Servicio de la Deuda y el saldo de los compromisos crediticios futuros (principal e intereses).

En lo que respecta a la vinculación de la TIR y la estructura de financiamiento, la TIR del inversionista se incrementará a medida

5 Conocido en inglés como Loan Life Coverage Ratio (LLCR).

el nivel de endeudamiento se incremente y el costo de la deuda esté por debajo de la TIR del proyecto. Sin embargo, mayores niveles de endeudamiento implican un mayor riesgo para los acreedores lo que se traduce en una menor calidad del crédito y por ende en una mayor tasa de interés. Otro elemento por considerar son los cronogramas de inversión por parte de los accionistas, ya que entre más concentrados estén al inicio del proyecto, menor será la TIR obtenida.

Tener clara la distinción entre los conceptos de fondeo y financiamiento permite mejorar la toma de decisiones clave para desarrollar los proyectos que requieren nuestras economías. Las PPP permiten alinear los incentivos del sector público y privado, propiciando la eficiencia y mayores ganancias en el desarrollo de obras públicas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Boyer, M., Gravel, É. & Mokbel, S. (2013). *The Valuation of Public Projects: Risk, Cost of Financing and Cost of Capital*. Ontario, Canadá. C.D. Howe Institute.
2. Banco Mundial, Banco Asiático de Desarrollo & Banco Interamericano de Desarrollo (2014). *Public Private Partnerships: Reference Guide Version 2.0*. Washington DC, Estados Unidos.
3. Correa, G. & Rozas, P. (2006). *Desarrollo urbano e inversiones en infraestructura: elementos para la toma de decisiones*. Santiago, Chile. Serie DRNI No 108. CEPAL.
4. European PPP Expertise Centre (2016). *Hurdles to PPP Investments: A Contribution to the Third Pillar of the Investment Plan for Europe*. Luxemburgo, Luxemburgo. European PPP Expertise Centre.
5. European PPP Expertise Centre (2011). *A Guide to Guidance: Sourcebook for PPPs*. Luxemburgo, Luxemburgo. European PPP Expertise Centre.
6. Eurostat (2016). *A Guide to the Statistical Treatment of PPPs*. Luxemburgo, Luxemburgo.
7. Gatti, S. (2013). *Project finance in theory and practice: designing, structuring and financing private and public projects*. Estados Unidos de América. Academic Press.
8. Global Association of Risk Professionals -GARP- (2017). *Foundations of Risk Management*. Nueva York, Estados Unidos.
9. HM Treasury (2013). *The Green Book: Appraisal and Evaluation in Central Government*. Londres, Inglaterra. Gobierno del Reino Unido.
10. HM Treasury (2013). *Public Sector Business Cases: Using the Five Case Model. Green Book Supplementary Guidance on Delivering Public Value from Spending Proposals*. Londres, Inglaterra. Gobierno del Reino Unido.
11. Infrastructure Australia (2008). *National Public Private Partnership Guidelines. Volume 2: Practitioners' Guide*. Canberra, Australia. Gobierno Australiano.
12. Infrastructure Australia (2008). *National Public Private Partnership Guidelines. Volume 3: Commercial Principles for Social Infrastructure*. Canberra, Australia. Gobierno Australiano.
13. Infrastructure Australia (2008). *National Public Private Partnership Guidance. Volume 4: Public Sector Comparator Guidance*. Canberra, Australia. Gobierno Australiano.
14. Infrastructure Australia (2008). *National Public Private Partnership Guidance. Volume 7: Public Sector Commercial Principles for Economic Infrastructure*. Canberra, Australia. Gobierno Australiano.
15. Infrastructure Australia (2012). *Australia's Public Infrastructure: Part of the Answer to Removing the Infrastructure Deficit*. Canberra, Australia. Gobierno Australiano.
16. Infrastructure Ontario (2007). *Assessing Value for Money: A Guide to Infrastructure Ontario's Methodology*. Ontario, Canadá. Gobierno de Ontario.
17. Naciones Unidas (2008). *Guidebook on Promoting Good Governance in Public-Private Partnerships*. Ginebra, Suiza. Naciones Unidas.
18. Organisation for Economic Co-Operation and Development (2007). *OECD Principles for Private Sector Participation in Infrastructure*. París, Francia. OECD.
19. PPP Canadá (2013). *Identifying P3 Potential: A Guide for Federal Departments & Agencies*. Ottawa, Canadá.
20. Weber, B. & Alfen, H. (2010). *Infrastructure as an Asset Class: Investment Strategies, Project Finance and PPP*. West Sussex, Reino Unido: Wiley.

# Configuración espacial de la ciudad de Cartago y su relación con volúmenes vehiculares

*Spatial configuration of Cartago city and its relationship with traffic volumes*

**Marcos Alberto Martínez Martínez**

Ingeniero Civil, Costa Rica

[m.martimarcr@gmail.com](mailto:m.martimarcr@gmail.com)

**Jonathan Agüero Valverde**

Investigador

Programa de Investigación en Desarrollo Urbano Sostenible (ProDUS). Universidad de Costa Rica

[jonathan.aguero@ucr.ac.cr](mailto:jonathan.aguero@ucr.ac.cr)

**Fecha de recepción:** 29 de agosto de 2017 / **Fecha de aprobación:** 08 de noviembre de 2017

## RESUMEN

La sintaxis espacial estudia la configuración de elementos espaciales y las relaciones entre ellos. Para una ciudad, estos elementos son las calles que forman su red de caminos. La sintaxis espacial busca establecer relaciones entre esta composición espacial y características urbanas como el movimiento de personas y vehículos, el valor de la tierra, y la ubicación del comercio. Este estudio busca determinar la correlación entre esta configuración y el volumen vehicular que pasa por la red en la ciudad de Cartago, Costa Rica. Para obtener esta correlación, se elaboró un análisis de segmento unitario, estableciendo la prioridad de las vías en cada intersección y recopilando información al recorrer la ciudad. Posteriormente se consideran varios modelos estadísticos para encontrar el mejor ajuste de los datos. La correlación más alta se consigue al utilizar un modelo exponencial multivariado. Incluir una variable categórica para las calles con orientación Norte-Sur y flujo en una sola dirección mejora considerablemente el coeficiente de determinación; tomar en cuenta sólo una variable lleva a una sobrestimación del volumen del tráfico para estos casos. Se concluye que la sintaxis espacial es un método rápido y económico que puede brindar una guía para ejecutar estudios más detallados sobre la red actual y etapas tempranas de futuros proyectos.

**PALABRAS CLAVES:** sintaxis espacial, segmento unitario, integración, profundidad.

## ABSTRACT

*Spatial syntax studies the configuration of spatial elements and the relationships between them. For a city, these elements are the streets that form its road network. Spatial syntax seeks to establish relationships between this spatial composition and urban characteristics such as the movement of people and vehicles, the land value, and the location commercial activities. This study seeks to determine the correlation between this configuration and the vehicular volume of the road network in the city of Cartago, Costa Rica. To obtain this correlation, a unit segment analysis was performed, establishing the priority of the roads at each intersection and gathering field information of the network. Subsequently, several statistical models were considered to find the best fit of the data. The highest correlation is achieved using an exponential multivariate model. Including a categorical variable for North-South streets with unidirectional flow considerably improves the fit of the model. On the other hand, considering only one variable leads to an overestimation of traffic volume for these cases. It is concluded that spatial syntax analysis is a fast and economical method that can provide a guide to execute more detailed studies on the current network and early stages of future projects.*

**KEY WORDS:** spatial syntax, unit space, integration, depth.

## INTRODUCCIÓN

La sintaxis espacial es un campo que estudia la configuración de elementos espaciales y sus relaciones topológicas. En el caso de las ciudades dichos elementos corresponden a las calles que forman la red de caminos. La sintaxis espacial trata de buscar relaciones entre esta composición espacial y características urbanas como el movimiento de personas y vehículos, el valor de la tierra y la ubicación del comercio, entre otros. Es un área de estudio que “ha emergido como un programa internacional usado para la investigación y práctica en más de 50 países alrededor del mundo” (Major, 2015).

Este método estudia la red utilizando principios topológicos y describiendo conexiones de unidades espaciales mediante análisis de profundidad usando teoría de gráficos. Se busca establecer el valor de la integración para las calles de la red, esta es una característica indicativa de qué tan accesible es un elemento desde cualquier otro punto de la red. La sintaxis espacial propone que “la configuración de la red urbana de calles es en sí misma un importante determinante de los flujos de movimiento” (Hillier, 2005) y esto ha llevado a que se investigue su relación con el tránsito de peatones y vehículos.

Los modelos de sintaxis espacial son un “enfoque flexible para representar una red compleja de transporte a escala urbana, eficiente en recursos y tiempo” (Patterson, 2016). Los datos que se requieren para modelar son aquellos relacionados con la configuración de calles (Barros et al., 2007) y los resultados del análisis de sintaxis se correlacionan con otras variables tales como flujos vehiculares o peatonales.

Usando sintaxis espacial se ha estudiado la colocación de paradas de transporte público como en el trabajo realizado por Carpio-Pinedo (2014) para buses en Madrid y el de Kishimoto et al. (2007) para sistemas de tren ligero en Maebashi. Además, se ha buscado como se relaciona con otras características del movimiento, Raford (2007) establece un Índice de Riesgo Peatonal en la ciudad de Oakland, mientras que Anderson (2005) examina las variaciones espaciales para colisiones en carreteras de Londres.

Igualmente se ha investigado el cambio y crecimiento de las ciudades, como se puede encontrar en los artículos de Batty, Besussi y Chin (2003) que analizan la expansión urbana, y el de Kim y Batty (2011) donde intentan desarrollar un modelo de crecimiento urbano. Además, se han analizado los efectos de construir vías de circunvalación ya que tienen “profundo impacto en la estructura de una ciudad” (Van Nes, 2001).

Jayasinghe et al. (2015), sugieren que la influencia de la geometría de la red en el tránsito puede enriquecer su análisis y servir de guía

para justificar decisiones de planificación y de formulación de estrategias para enfrentar el problema del transporte. Mainieri y Rigatti (2007), consideran la posibilidad de construir anillos de circunvalación aplicando sintaxis espacial y establecen que es necesario que estas rutas alternativas compitan en términos de linealidad, conectividad e integración con la ruta principal de la zona.

Estudios previos sugieren que, en conjunto con otras aplicaciones, la sintaxis espacial puede capturar las tendencias en viajes vehiculares simplemente analizando la accesibilidad espacial presente en la morfología urbana (Penn et al. 1998; Karimi and Mohamed 2003; Dawson, 2003).

El propósito de este estudio es evaluar la configuración espacial de la ciudad de Cartago y su relación con los volúmenes vehiculares presentes en la red. El resto de este artículo está dividido de la siguiente manera: primero se introduce la metodología luego se presentan los datos utilizados y finalmente se muestran las conclusiones y recomendaciones.

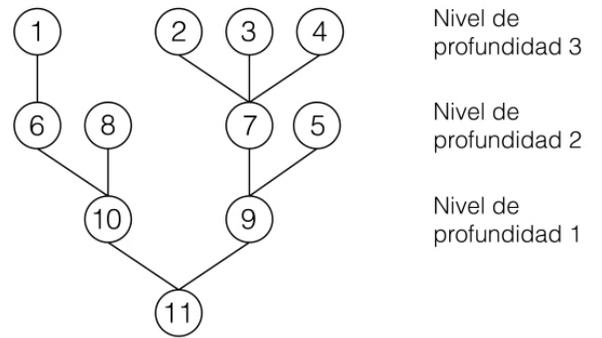
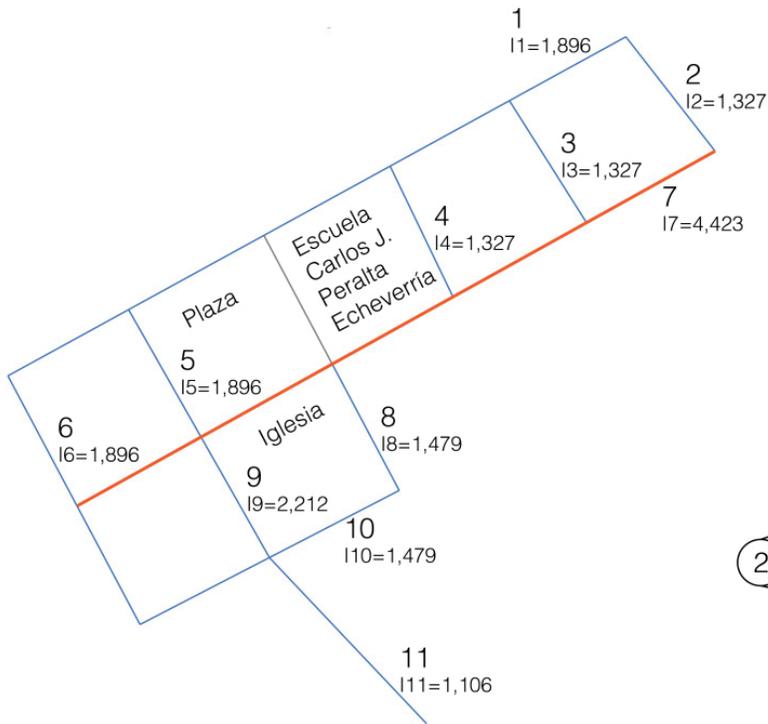
## METODOLOGÍA

La siguiente descripción está basada en los conceptos presentados en “The social logic of space” (Hillier y Hansen, 1984) donde se encuentran las bases teóricas y los conceptos de topología de redes necesarios para estudiar la configuración de ciudades o edificios mediante sintaxis espacial. La descripción metodológica también se apoya en el trabajo titulado “An integrated approach to modeling vehicular movement networks: trip assignment and space syntax” (Paul, 2009) y en el artículo “Axial Analysis: A syntactic approach to movement network modeling” (Paul, 2011).

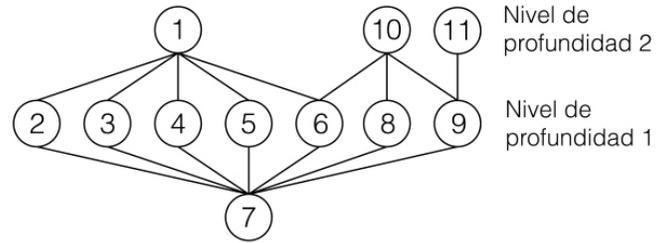
### *Conceptos Importantes*

La profundidad o nivel de profundidad se refiere a la distancia topológica entre componentes de la red. En la Figura 1 se muestra una simplificación de la red para Guadalupe de Cartago y los niveles de profundidad para los elementos 11 y 7. Los niveles de profundidad o relación se definen por el contacto directo de los segmentos en la red topológica. Así por ejemplo, se observa que el segmento 7 (marcado en rojo) se conecta con 7 segmentos en el primer nivel de profundidad y 3 segmentos en el segundo nivel. Por otro lado, el segmento 11 se conecta con los segmentos 9 y 10 en el primer nivel, 5, 6, 7 y 8 en el segundo nivel y 1, 2, 3, y 4 en el tercer nivel de profundidad. El segmento 11 necesita un nivel más para alcanzar cada parte de la red.

La profundidad promedio para un elemento se calcula de forma ponderada:



(a)



(b)

Figura 1. Guadalupe de Cartago – Integración y Profundidad.

$$\bar{D} = \frac{\sum d \cdot n}{k - 1} \quad (1)$$

$$RA = \frac{2(\bar{D} - 1)}{k - 2} \quad (2)$$

donde

$\bar{D}$  = profundidad promedio

$d$  = profundidad

$n$  = número de unidades de espacio en una profundidad específica

$k$  = total de unidades de espacio en el sistema ( $\sum n$ )

La conectividad, por otra parte, se define como la cantidad de elementos que se pueden relacionar desde un punto en el primer nivel de profundidad. En la Figura 1, el segmento 7 tiene una conectividad de 7 mientras el segmento 11 tiene una conectividad de 2.

La medida de profundidad es relativa a la localización de cada unidad en el sistema y depende del tamaño del sistema por lo que no puede ser comparada a menos que se use una escala común. La escala de simetricidad determina la medida relativa de una profundidad promedio y se define dentro del intervalo que encierra el valor más alto y bajo de profundidad promedio en el sistema. Esta medida relativa se conoce como “Asimetría Relativa” y se calcula de la siguiente forma:

El tamaño del sistema influye los valores de accesibilidad de las unidades de espacio. Las asimetrías relativas de dos sistemas distintos no se pueden comparar en la misma escala a menos que se normalicen, esto se logra mediante la Asimetría Relativa Real (RRA). Para calcular RRA primero debe estimarse un factor que distingue los sistemas basado en su tamaño que comúnmente se conoce como  $D_k$ :

$$D_k = \frac{2 \{k[\log_2(\frac{k+2}{3}) - 1] + 1\}}{(k-1)(k-2)} \quad (3)$$

Y tenemos también que la Asimetría Relativa Real es:

$$RRA = \frac{RA}{D_k} \quad (4)$$

Definimos integración entonces como el inverso de Asimetría Relativa Real:

$$I = \frac{1}{RRA} \quad (5)$$

Para la Figura 1 se observa que el elemento más integrado es 7, mientras que 11 tiene la menor integración. Un elemento es una unidad de espacio, y para el caso de las ciudades, estas unidades son las calles.

El análisis de integración se puede realizar de forma global o local, esto significa que se puede establecer un límite superior al nivel de profundidad de análisis para los elementos y de esta forma hacer más regional el estudio pero son las “características de configuración globales, más que las locales, las que son importantes en el funcionamiento urbano” (Pereira, et al., 2012).

### **Tiempo de viaje**

Para poder utilizar la sintaxis espacial como herramienta de asignación de viajes es necesario considerar el tiempo de viaje. Al estudiar configuraciones de ciudad dónde existen distintas opciones de ruta podemos asegurar que la mayoría de los usuarios van a decidirse por el camino que requiera menos tiempo. Para esto se define un segmento unitario que consiste en “una sección de camino entre dos puntos de decisión” (Paul, 2009). Un punto de decisión es una intersección donde los usuarios de la red tienen la posibilidad de escoger un cambio en la trayectoria en su recorrido.

En un sistema de carreteras en árbol, el segmento unitario es simplemente la distancia más corta entre dos puntos de decisión, porque el sistema sólo le da al usuario un camino posible, sin necesidad de elegir. En cambio, un sistema en red permite al usuario escoger su ruta y en este caso la velocidad de una sección de calle se vuelve la principal consideración para decidir por dónde ir. Entonces existe una “jerarquía de caminos que ayuda a los viajeros a entender cuáles segmentos de ruta tienen características de movilidad mayores que otros” (Paul, 2009). Es mediante esta clasificación que se da la forma en que el usuario entiende y relaciona esta velocidad de desplazamiento en el sistema.

Es necesario definir cómo se identifican los puntos de decisión cuando existen caminos con distintos tiempos de viaje en el sistema. Cuando se conectan dos elementos de distinta jerarquía, la intersección forma parte del que tiene un menor tiempo de viaje. De acuerdo a lo anterior, se define un segmento unitario para una red de caminos como “la sección de camino entre dos intersecciones que están formadas por calles de igual o mayor velocidad libre” (Paul, 2009).

### **Jerarquización de vías y definición de segmentos unitarios**

Para establecer la jerarquía de los caminos de la red se realizaron recorridos y se precisó cuál es la vía con prioridad de paso en cada intersección. Posterior a la recolección y procesamiento de datos, se procedió a definir los segmentos unitarios para el análisis.

Con la información clasificada dentro del software DepthMapX es posible ahora determinar cuál es la calle con prioridad en cada intersección. Se selecciona cada una de las intersecciones donde un elemento tiene más jerarquía y se muestra gráficamente

donde comienza y finaliza cada segmento unitario. Este proceso se repite para cada una de las vías principales, para así poder establecer cada uno de los segmentos unitarios de la red entre puntos de decisión.

Cuando hay elementos importantes cuya geometría no permite que se dibujen en una línea recta, es necesario utilizar una sección representativa y conectar todas las calles que la intersequen como se indica en la Figura 2. Esto posibilita modelar el segmento unitario curvo como un único elemento, respetando la definición, en lugar de dividirlo en varias líneas rectas. Es importante especificar, que cada una de las otras líneas que formarían el segmento unitario curvo al aproximarlo con rectas se incluyen en el modelo para la representación gráfica, pero deben quedar desligadas del resto de la red, para evitar crear islas que distorsionen los resultados del cálculo de integración y los mapas de calor.

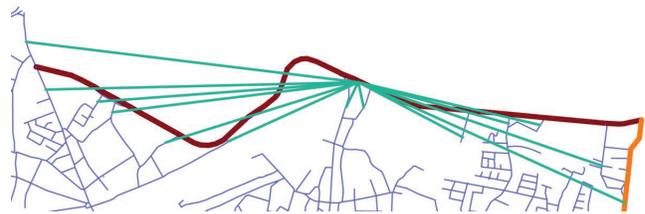


Figura 2. Conectividad para el Modelo en la ruta 219.

### **Modelación de la red**

Cuando se han establecido los segmentos unitarios, es posible modelar la red. En el caso de los elementos rectos, simplemente se dibujan de acuerdo al inicio y fin de los segmentos unitarios, pero de acuerdo a la jerarquización de vías que se establece anteriormente, existen algunos que deberían ser curvos dada la definición que se utiliza en el modelo y se representan de la forma mencionada anteriormente.

Después de definir los segmentos unitarios y de determinar el modelo, se procede a analizar las características de conectividad mediante el programa DepthMapX. Se utiliza también este software para hacer el análisis de integración de la red.

### **Análisis de segmento unitario**

Una vez que el modelo topológico de la red es completado se puede correr el algoritmo mediante DepthMapX y de esta forma se obtienen los datos y la representación visual del análisis de segmento unitario a través de los principios de sintaxis espacial. Es importante revisar que cada unión de elementos importantes en la red haya sido reconocida correctamente por el programa

y si este no fuera el caso se debe corregir para completar el algoritmo nuevamente. Con esto se obtienen los valores de integración para la red.

## DATOS

Para definir los límites del área de estudio de la ciudad, se buscó establecer la zona de interés, que en este caso es el área central de la ciudad de Cartago y sus alrededores. Después, se buscó alejar el límite de esta región de interés suficiente para al menos incluir todos los elementos de carreteras que se conecten con sus límites. Esto para evitar un efecto de borde con “consecuencias en toda la red urbana” (Ratti, 2004), que se produce al delimitar el área y significa que los segmentos unitarios cercanos al límite, o propiamente parte de este, pierden importancia al deshacerse de aquellos que se encuentran fuera del mismo. La Figura 3 muestra el área de estudio.

## Conteos Vehiculares

La información de conteos vehiculares se obtuvo del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, la Dirección General de Ingeniería de Tránsito, el Ministerio de Obras Públicas y Transportes y otros trabajos de investigación previos. Como las fuentes de conteos vehiculares presentaron diferentes años de medición se proyectaron los volúmenes con un factor de crecimiento de 4 % anual, cuando fue necesario. La tasa utilizada es la recomendada por el Plan Nacional de Transportes 2011 – 2035 elaborado por la empresa INECO para el Ministerio de Obras Públicas y Transportes en su Anexo 2 “Resultados por tramos” (MOPT, 2011).

Posteriormente, se procesaron los datos de su ubicación para poder relacionarlos con los valores de integración de los elementos. El Cuadro 1 presenta un resumen de los datos de conteos utilizados. Para los valores diarios estimados para 2016, el promedio de

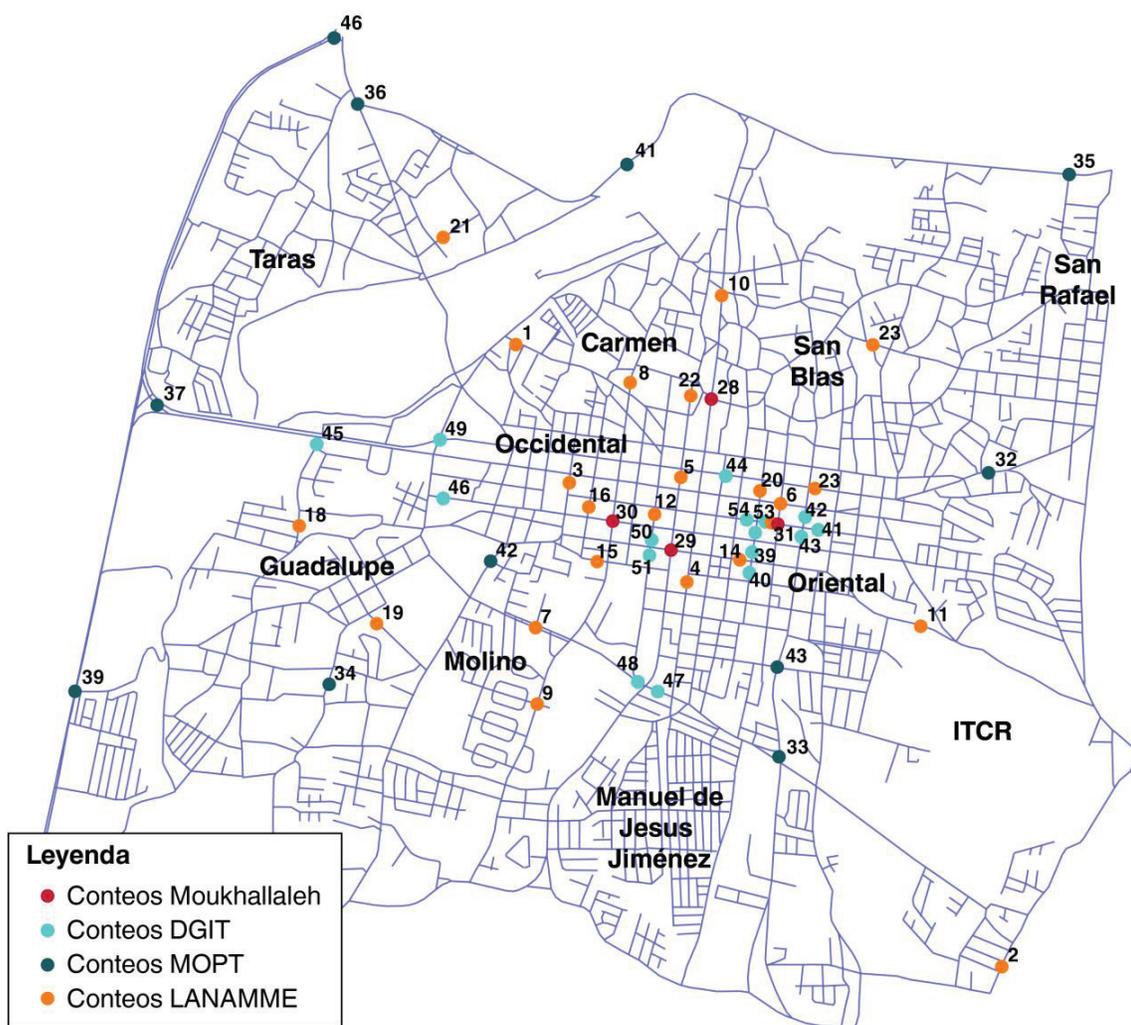


Figura 3. Ciudad de Cartago – Conteos en el área de estudio.

Fuente: Atlas ITCR 2014. Modificado por el autor.

vehículos en cada conteo es 8 435, el valor máximo 20 870 y el mínimo es 2 456.

Cuadro 1. Cantidad de Conteos – Excluyendo Bordes.

Fuente	Año	Conteos
LANAMME	2009	16
LANAMME	2010	6
C. Moukhallaleh	2014	4
MOPT	2013	4
DGIT	2016	8
DGIT	2010	5
DGIT	2009	3

## RESULTADOS

El trabajo realizado se basó en el “Análisis de Segmento Unitario” (Paul, 2009) donde se establece una jerarquía para las calles de la ciudad. Se definió cuál era la vía prioritaria en las intersecciones. Además, se estableció una forma de representar los segmentos unitarios curvos utilizando una sección representativa, esto debido a la limitación del software para sólo reconocer líneas rectas. También, se utilizó una variable categórica para mejorar la estimación del modelo estadístico.

## Integración

La integración se puede considerar como una medida de qué tan accesible es un elemento de una red con respecto al resto de las partes de esa misma red, en el caso de este trabajo este elemento es un segmento unitario como se definió anteriormente. Para el modelo se tiene que el valor promedio de integración de los segmentos unitarios es 1,04. La moda es 0,85 y la mediana es 1,01. El valor mínimo es 0,62 y se ubica en el sector de Taras.

El valor máximo es 1,65 y se encuentra en la Calle 14 al costado este de la Parroquia María Auxiliadora. Este es un elemento donde convergen la Ruta Nacional 10, la Vía 236. Además, está conectado con la Avenida 2 que recibe gran parte del tránsito proveniente del este de la ciudad y con las avenidas Central y Avenida 4 que son por donde se mueve mucho del tráfico en dirección Oeste-Este. También, este segmento unitario se encuentra a dos niveles de profundidad de la Avenida 1, que es la principal salida hacia San José.

Hay 184 elementos en la red con una integración de 1 y corresponden a 25,92 kilómetros de carretera, esto representa un 11,14% del total de kilómetros en la red. Los segmentos unitarios con integración menor a 0,75 suman 7,54 kilómetros del área de estudio. Los elementos con una integración bastante alta, mayor a 1,50 consisten el 7,54 % de la red con 17,54 km.

Las zonas menos integradas de la ciudad de Cartago son áreas destinadas principalmente a la vivienda en Taras y Barrio Fátima al noroeste y Barrio López al noreste, también el sector de San Blas en menor medida. La Figura 4 muestra los elementos de baja integración en calles residenciales alejadas del centro. Eso indica que son las calles y los sectores menos accesibles desde otros puntos de la red.

Los elementos con altos niveles de integración se encuentran en las avenidas del centro de la ciudad, principalmente en el sector oeste después de cruzar la Calle 2 (C 2), también es importante la diagonal que conecta el centro con el sector de Taras y el Boulevard El Molino al sur del casco central. La región con calles más integradas está principalmente en

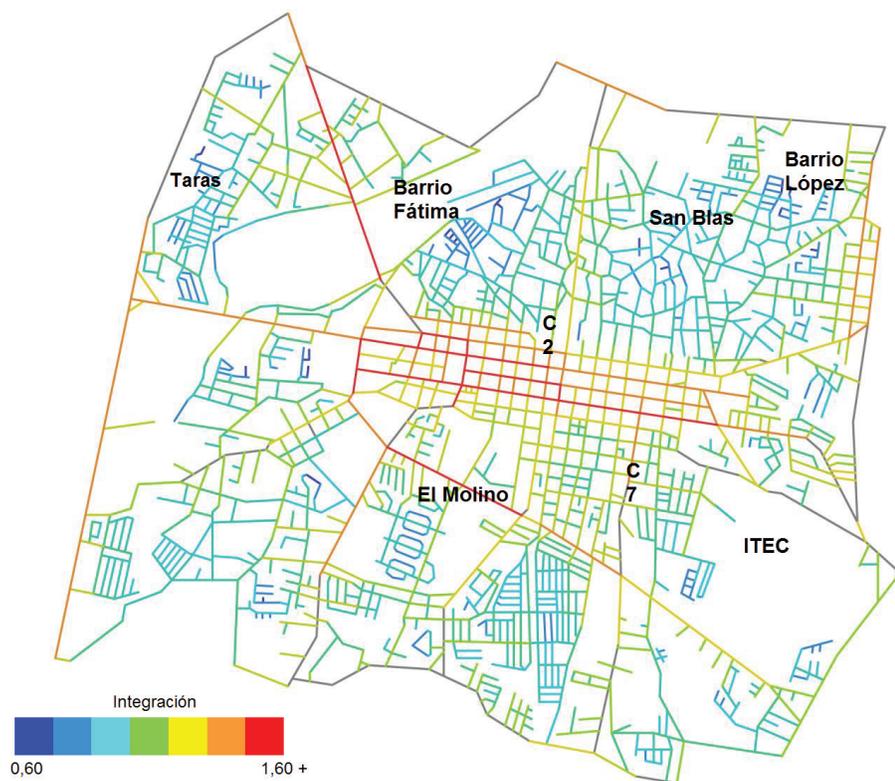


Figura 4. Resultados integración Modelo

el Distrito Occidental. Las avenidas son importantes en el centro de la ciudad y es de esperar que ahí transiten la mayor cantidad de vehículos.

Una integración también alta pero en menor medida se da, de acuerdo al modelo, en San Rafael de Oreamuno, en las avenidas del centro al Este de la Calle 2 y en la Calle 7 (C 7). También en las calles que salen de la ciudad como la Ruta 10 tanto al este como al oeste del casco central y la vía que se conecta con El Tejar de El Guarco.

En general el modelo indica que el sector sur del área de estudio está más integrado que el norte. Esto puede tener la influencia de los caminos que conectan la ciudad con los distritos de Aguacaliente, Dulce Nombre, Guadalupe y El Tejar de El Guarco.

Los datos de los bordes no se tomaron en cuenta para establecer la correlación entre el volumen de tránsito y la integración de las calles dentro del sistema porque “el análisis de segmento unitario no es totalmente libre del efecto de borde” (Paul, 2009). El efecto

de borde se presenta al delimitar el área de estudio, porque haciendo esto se elimina la continuidad de la red de caminos fuera de la región analizada.

La Figura 5 muestra el volumen vehicular que pasa por un segmento unitario en función de la integración correspondiente al elemento dentro de la red. El coeficiente de correlación entre las variables es de 0,68. El coeficiente de determinación para un ajuste exponencial es de 0,53.

Además, se realizó una regresión múltiple al agregar una segunda variable independiente. Esta se establece como una variable categórica con valor de 1 para las calles Norte-Sur que tienen una sola dirección de tránsito y se denomina “Calles”. Se obtuvo la siguiente ecuación para el modelo:

$$\text{Volumen Vehicular} = e^{(5,947+2,354 \cdot \text{Integración}-0,339 \cdot \text{Calle})} \quad (6)$$

El Cuadro 2 muestra el resumen de la estimación de parámetros para el modelo. Se puede ver que tanto la variable Integración como la variable Calle son significativas estadísticamente.

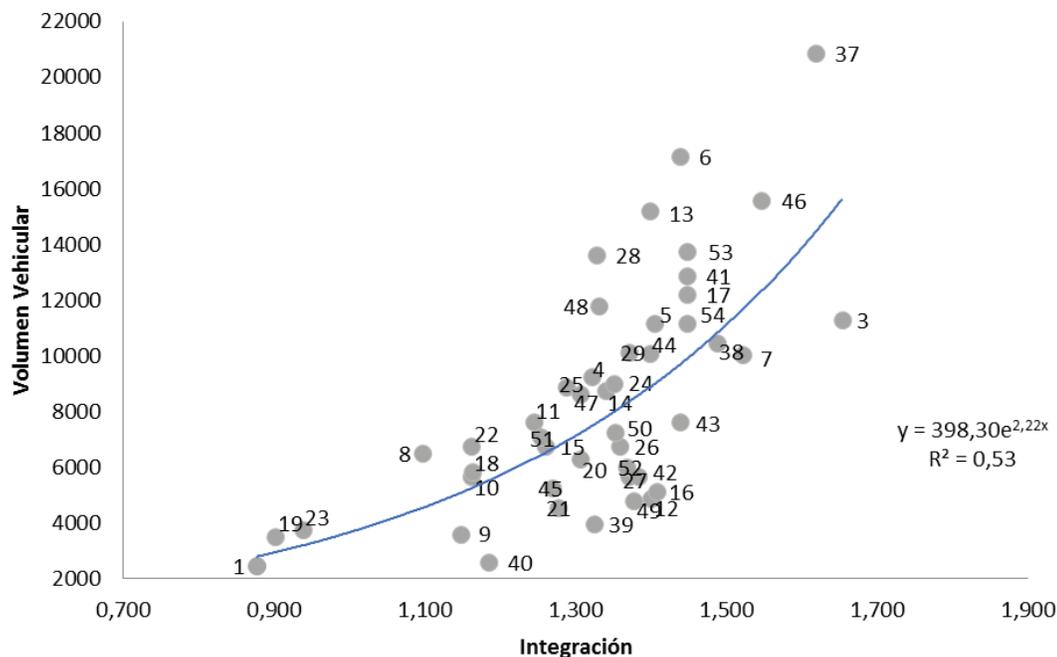


Figura 5. Gráfico del volumen vehicular en función de la integración.

Cuadro 2. Características del Modelo Final

Término	Estimación	Error estándar	Razón t	Prob >  t	Características del Modelo	
Constante del modelo	5,947	0,382	15,56	<,0001	R <sup>2</sup>	0,64
Integración	2,354	0,295	7,98	<,0001	R <sup>2</sup> ajustado	0,62
Calle	-0,339	0,097	-3,48	0,0013	Raíz del error cuadrático medio	0,303

## Análisis de Resultados

Es claro que existe una correlación entre los valores de integración y el volumen vehicular al elaborar el análisis de segmento unitario para el área de estudio. En el Cuadro 3 se presentan los resultados de la correlación entre integración y tráfico vehicular obtenidos por distintos autores, donde se observa que los coeficientes de determinación están entre 0,29 y 0,82.

Al comparar el  $R^2$  de 0,53 obtenido en este trabajo para la regresión con exponencial de una variable, se puede ver que está entre los valores que se han conseguido en estudios internacionales, tal como se muestra en el Cuadro 3, que utilizan conceptos de sintaxis espacial para estudiar el tráfico vehicular.

En el caso de este estudio realizado sobre la configuración espacial de la ciudad de Cartago, una observación de por qué no se alcanza una mayor correlación puede estar relacionada con lo contemplado en “Combined impacts of configurational and compositional properties of street network on vehicular flow” (Zhuang y Song, 2015), donde estudiaron ciudades chinas y concluyen que las correlaciones tienden a disminuir cuando hay gran presencia de calles con dirección en un solo sentido, como es el caso del área de estudio.

Para verificar la influencia de los elementos con solamente una vía de tránsito se decidió incorporar dicha variable en el modelo. Esta consideración puede no ser suficiente para el área de estudio, además se debe considerar si los segmentos unitarios son Calles o Avenidas, ya que es claro que, dentro de la jerarquía de elementos del centro de la ciudad, las segundas tienen prioridad y tienen un funcionamiento distinto a las primeras.

Al incorporar en un modelo de regresión múltiple las variables calles y avenidas en una sola dirección el coeficiente para las primeras resultó estadísticamente significativo mientras el de las avenidas no, por lo que fue removida del modelo final mostrado en el Cuadro 2. El modelo demuestra que para la ciudad de Cartago, al considerar únicamente la variable “Integración” se sobrestima el volumen vehicular de calles con orientación norte-sur y sólo una dirección en un 29%. Es importante recalcar que al agregar una nueva variable categórica para estas Calles, la estimación del modelo mejora notablemente con un  $R^2$  de 0,64 y la mejora es estadísticamente significativa ( $F = 13,14$ ,  $F_{0,05,2,43} = 4,06$ ).

El análisis de segmento unitario puede ayudar a identificar la importancia de elementos de la red para viajes locales, al establecer un área se limita la continuidad de la red de carreteras existente dentro de ella y no sería posible que considere la influencia de elementos encontrados fuera de esta. Estos viajes no podrían formar parte del modelo porque no comienzan ni terminan en la ciudad de Cartago. Cabe preguntarse si una ampliación del área de estudio donde se incluya mayor parte de El Tejar, Aguacaliente, Dulce Nombre y San Rafael de Oreamuno podría mejorar la correlación o tal vez resaltar otros elementos e intersecciones importantes en la red.

Durante la elaboración del trabajo se consideró un segundo modelo, en el cual los segmentos unitarios curvos fueron caracterizados con varias líneas rectas en lugar de una sección representativa de todo el elemento. Ese modelo resultó en una correlación considerablemente menor con un coeficiente de determinación  $R^2$  de 0,36 para un ajuste exponencial, razón por la cual fue descartado.

Cuadro 3. Correlaciones Tráfico Vehicular – Integración

Autor	Año	Localidad	r	R <sup>2</sup>	Ecuación
Karimi et al.	2003	Isfahan, Irán	0,78	0,61	
Dawson	2003	Arviat, Canada	0,74	0,55	No disponible
Peponis et al.	1997	Downtown, Atlanta, Estados Unidos	0,58	0,34	No disponible
Peponis et al.	1997	Buchhead, Atlanta, Estados Unidos	0,54	0,29	No disponible
Paul	2009	Lubbock, Texas, Estados Unidos	0,79	0,63	
Zhuang et al.	2015	Wujiaochang, China	0,81	0,66	No disponible
Zhuang et al.	2015	Shangchenglu, China	0,72	0,52	No disponible
Zhuang et al.	2015	Xujiahui, China	0,71	0,50	No disponible
Zhuang et al.	2015	Jingansi, China	0,70	0,48	No disponible
Zhuang et al.	2015	Xintiandi, China	0,63	0,40	No disponible
Patterson	2016	Cardiff, Reino Unido	0,82	0,69	No disponible
Patterson	2016	Leicester, Reino Unido	0,61	0,39	No disponible
Patterson	2016	Leeds, Reino Unido	0,44	0,50	No disponible
Patterson	2016	Neath Port Talbot County Borough Council	0,70	0,82	No disponible

Fuentes: Dawson, 2003; Karimi, 2003; Paul, 2009; Peponis, Ross y Rashid, 1997; Zhuang y Song, 2015; Paterson, 2016.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis de segmento unitario permitió encontrar información sobre las características de movimiento dentro de una red urbana, dado que encontró una correlación entre la integración de un elemento dentro de la red y el volumen de tránsito vehicular para el caso de estudio.

Al considerar los bajos requerimientos de datos del método; la geometría de la red urbana y la jerarquización de las vías en cada intersección, se puede considerar que es una opción rápida y económica para estudiar ciudades. Ésto sin tener que recurrir a la recolección de datos de Origen-Destino (encuestas de viajes) ni las velocidades de operación en las carreteras mediante vehículo flotante, que son estudios caros y complejos. Es un modelo que sólo puede considerar condiciones locales, lo que significa que desde su concepto es más impreciso, pero sí es viable para analizar y comparar características dentro de la red de una ciudad.

Se logró mejorar el modelo al agregar una variable categórica para las Calles de una vía del centro, diferenciándolas de las Avenidas y de los elementos de doble vía. Esto porque existe un comportamiento distinto donde estas calles tienen altos valores de integración, pero relativamente bajo tránsito. Incluir esta variable no significó mayor diferencia a la hora de recolectar los datos ni de procesarlos, manteniendo los beneficios del modelo en lo referente a tiempo y costo.

El método funcionó para encontrar intersecciones importantes, al comparar las características de integración entre los elementos que las conforman. Además, para identificarlas al hacer modificaciones en la red y se logró determinar cuáles elementos aumentan o disminuyen su importancia ante cambios físicos propuestos.

Es necesario establecer un área de estudio lo suficientemente grande para minimizar el efecto de borde en la región de interés, se recomienda considerar en futuros estudios sobre la ciudad de Cartago la influencia e importancia del distrito de El Tejar de El Guarco y San Rafael de Oreamuno en los viajes locales, además de Aguacaliente y Dulce Nombre de Cartago.

En general, el método de Análisis de Segmento Unitario utilizando principios de sintaxis espacial puede ser una herramienta útil para conocer características de la red y sugerir puntos de interés en las condiciones actuales o durante etapas tempranas de un proyecto a desarrollar, siempre tomando en cuenta que no es una herramienta definitiva que va a sustituir otros estudios más completos, pero sí como una opción económica y rápida de evaluación que puede servir de guía para justificar políticas y estudios más detallados.

Debido a la eficacia del método para predecir los volúmenes de tránsito se recomienda probar el modelo de sintaxis espacial en otras ciudades del país y posiblemente para otros modos, particularmente pensando en movilidad activa.

## REFERENCIAS

1. Anderson, T. (2005). Spatial variations in road collision propensities in London. [Versión electrónica]. *CASA Working Paper Series* (96).
2. Goncalves Barros, A., Marques da Silva, P. y Borges de Holanda, F. (2007). Exploratory study of space syntax as traffic assignment tool. *Actas del 6to congreso internacional de sintaxis espacial*, Turquía.
3. Batty, M., Besussi, E. y Chin, N. (2003). Traffic, urban growth and urban sprawl. [Versión electrónica]. *CASA Working Paper Series* (70).
4. Carpio – Pinedo, J. (2014) Urban bus demand forecast at stop level: Space syntax and other built environment factors. Evidence from Madrid [Versión electrónica]. *Procedia – Social and Behavioral Sciences* (160), 205-214.
5. Dawson, P. (2003). Analysing the effects of spatial configuration on human movement and social interaction in Canadian Arctic communities. *Actas del 4to congreso Internacional de sintaxis espacial*. Londres.
6. Hillier, B. y Hanson, J. (1984). *The social logic of space*, Cambridge University Press, New York.
7. Hillier, B. y Iida, S. (2005) Network effects and psychological effects: a theory of urban movement. *Actas del 5to congreso internacional de sintaxis espacial*. Holanda.
8. Jayashinghe, A., Sano, K. y Nishiuchi, H. (2015) Explaining traffic flow patterns using centrality measures [Versión electrónica]. *International journal for traffic and transport engineering* 5(2), 134-149.
9. Karimi, K. and Mohamed, N. (2003). The tale of two cities: the dynamics of the city Isfahan in the past and present. *Actas del 4to congreso internacional de sintaxis espacial*. Londres, Inglaterra.
10. Kim, D. y Batty, M. (2011). Modeling urban growth: an agent based microeconomic approach to urban dynamics and spatial policy simulation. [Versión electrónica]. *CASA Working Paper Series* (165).
11. Kishimoto, T., Kawasaki, S., Nagata, N. y Tanaka, R. (2007). Optimal location of routes and stops of public transportation. *Actas del 6to congreso internacional de sintaxis espacial*. Turquía.

12. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME). (2012). Evaluación de la Red Vial Cantonal de Cartago: Tramos Homogéneos. San José: LANAMME.
13. Major, M. (2015). The hidden corruption of American regular grids: Why space Syntax doesn't work in the United States, when it looks like it should. *Actas del 10mo simposio internacional de sintaxis espacial*. Londres, Inglaterra.
14. Mainieri, C. y Rigatti, D. (2007). Ring roads in greater Porto Alegre: would it be an effective solution?. *Actas del 6to congreso internacional de sintaxis espacial*, Turquía.
15. Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). (2011). Plan Nacional de Transportes de Costa Rica 2011 – 2035 Anexo 2: Resultados por Tramos. San José: MOPT.
16. Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT). (2013). Anuario de Información de Tránsito 2013. San José: MOPT.
17. Moukhallaleh, C. (2015). Análisis de emisiones de gases por fuentes móviles en las ciudades de Alajuela, Cartago y Heredia. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, Costa Rica.
18. Patterson, J. (2016) Traffic modeling in cities – validation of space syntax at an urban scale [Versión electrónica]. *Indoor and built environment*(25), 1163-1178.
19. Paul, A. (2009) An integrated approach to modeling vehicular movement networks: trip assignment and space syntax. Proyecto de graduación para optar por el grado de Doctorado, Texas Tech University, Texas, Estados Unidos.
20. Paul, A. (2011) Axial Analysis: a syntactic approach to movement network modeling [Versión electrónica]. *Institute of Town Planners, India Journal* 8(1), 29-40.
21. Paul, A. (2012) Unit segment Analysis: A space syntax approach to capturing vehicular travel behavior emulating configurational properties of roadway structures [Versión electrónica]. *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 12(3), 275-290.
22. Penn, A., Hillier, B., Banister, D. and Xu, J. (1998). Configurational modeling of urban movement networks. *Environment and Planning B: Planning & Design* 25, pp.59-84.
23. Pereira, R., de Holanda, F., Medeiros, V. y Barros, A. (2012). The use of space syntax in urban transport analysis: limits and potentials. *Actas del 8vo congreso internacional de sintaxis espacial*, Chile.
24. Peponis, J., Ross, C. y Rashid, M. (1997). The structure of urban space, movement and
25. co-presence: the case of Atlanta [Versión electrónica]. *Geoforum* 28(3-4), 341-358.
26. Raford, N. (2003). Looking both ways: Space syntax for pedestrian exposure forecasting and collision risk analysis. *Actas del 4to congreso internacional de sintaxis espacial*. Londres, Inglaterra.
27. Ratti, C. (2004). "Space syntax: some inconsistencies." [Versión electrónica]. *Environment and Planning B: Planning and Design* (31), 487-499.
28. Van Nes, A. (2001). Road building and urban change: A morphological and configurative explanation of how ring roads change the pattern of distribution of shops in city and town centres. *Actas del 3er simposio internacional de sintaxis espacial*. Atlanta, Estados Unidos.
29. Zhuang, Y. y Song, X. (2015). Combined impacts of configurational and compositional properties of street network on vehicular flow. *Actas del 10mo simposio internacional de sintaxis espacial*. Londres, Inglaterra.









UCR

---