

A new approach for integrating environmental, social and economic factors to evaluate asphalt mixtures with and without waste tires

Un nuevo enfoque para la integración de factores ambientales, sociales y económicos para evaluar mezclas asfálticas con y sin neumáticos de desecho

P. Arroyo ^{1*}, R. Herrera ^{*' **}, L. Salazar ^{*' ***}, Z. Giménez ^{*' ****}, J. Martínez ^{*}, M. Calahorra ^{*}

* Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, CHILE

** Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, CHILE

** Universidad Nacional Andrés Bello, Santiago, CHILE

** Universidad Centrocidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, VENEZUELA

Fecha de Recepción: 08/09/2018

Fecha de Aceptación: 12/11/2018

PAG 301-314

Abstract

In the context of making roads more sustainable, this study compares two asphalt mixes: one conventional, and one with end-of-life tyres (ELT), using a multi-criteria decision-making method focused on the advantages among the different alternatives called "Choosing by Advantages" (CBA). The aim is to answer whether it is appropriate to use ELT in asphalt mixtures in developing countries, and what environmental impacts its use generates in road construction. This research is based on a case study of a road construction project in Chile. The main results are as follows: 1) the use of rubber bitumen (RB) is more advantageous than the use of conventional bitumen, and 2) the cost required for the manufacture and execution of RB is 1.4 times higher than the cost of conventional mixing; however, the cost of maintenance of RB is lower. Finally, research shows that it is convenient to use ELT in asphalt mixes, as it generates social and environmental improvements, such as reducing IRI variability over time, minimizing noise and reducing greenhouse gas emissions.

Keywords: Choose by advantages (CBA), sustainable roads, asphalt mixes, Bitumen Rubber, End-of-life tyres (ELT)

Resumen

En el contexto de hacer caminos más sostenibles, este estudio compara dos mezclas de asfalto: una convencional, y otra con neumáticos fuera de uso (NFU), utilizando un método de toma de decisiones multicriterio enfocado en las ventajas entre las diferentes alternativas llamado "selección por ventajas" (Choosing by Advantages, CBA). El objetivo es responder si es conveniente utilizar NFU en mezclas asfálticas en los países en desarrollo, y qué impactos ambientales genera su uso en la construcción de carreteras. Esta investigación se basa en un estudio de caso de un proyecto de construcción de carretera en Chile. Los principales resultados son los siguientes: 1) el uso del betún caucho (BC) es más ventajoso que el uso de betún convencional, y 2) el costo requerido para la fabricación y ejecución del BC es de 1.4 veces mezcla más alto que el costo de la convencional; sin embargo, el costo de mantenimiento del BC es menor. Por último, la investigación muestra que es conveniente utilizar NFU en las mezclas del asfalto, ya que genera mejoras sociales y ambientales, tales como la reducción de variabilidad IRI en el tiempo, minimización del ruido y disminución de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Palabras clave: Elegir por ventajas (CBA), caminos sostenibles, mezclas asfálticas, Betún Caucho, Neumáticos fuera de uso (NFU)

1. Introducción

Existen varios esfuerzos para hacer caminos más sostenibles, especialmente porque este tipo de proyectos tiene un extenso ciclo de vida (Gosse y Clarens, 2013). Por ejemplo, Wangent al.(2014) ha intentado dar una solución a corto plazo para reducir la aspereza del pavimento y reducir así las emisiones de GEI and Li et al. (2007), estimuló el desarrollo sostenible de la construcción urbana con una perspectiva de ciclo de vida.

Por otro lado, reciclar los materiales en la construcción de autopistas es una alternativa viable y ecológicamente prudente (Horvath, 2004; Lee et al., 2010). Además, los neumáticos fuera de uso (NFU) pueden ser utilizados como componentes adicionales de la mezcla de asfalto de pavimentos (Feraldi et al., 2013; Fiksel et al., 2011). Esta aplicación se ha utilizado en algunos países

y ofrece (Huang et al., 2007), a priori dos beneficios importantes: constituye un nuevo uso para este material de alto impacto ambiental, y mejora algunas cualidades valiosas del pavimento, tales como reducción de volumen o mejora de comportamiento de largo plazo. (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2007).

En Chile, la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor (20.920) promulgada en mayo del año 2016 y los actuales Acuerdos de Producción Limpia generan una regulación en la gestión de los NFU y un aumento en el volumen del residuo tratado, triturado y utilizado para otros fines, por lo cual es relevante abrir nuevas vías para dar uso al material obtenido de este tratamiento.

California, por ejemplo, tiene actualmente un mandato de ley que pide el uso de cantidades cada vez

¹ Autor de correspondencia:

Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, CHILE
E-mail: parroyo@ing.puc.cl



mayores de caucho reciclado en pavimentos en los próximos años. Esta tendencia ha dado lugar a productos modificados con caucho que han tenido un buen desempeño en la reducción de la reflexión de las grietas, la mejora de la seguridad en condiciones húmedas y la reducción del ruido. También ha ayudado a resolver el grave problema de la eliminación de neumáticos de desecho (Santucci, 2009).

Actualmente las mezclas asfálticas se realizan principalmente con un gran porcentaje de áridos y asfalto, a estos dos materiales se le puede sumar como aditivo el polvo de caucho proveniente de los NFU sin modificar sus capacidades y resistencia estructural (Navarro Dupré, 2013; Royano et al., 2010). De esta manera, se conforman las dos alternativas a estudiar, (1) la mezcla asfáltica tradicional y (2) la mezcla asfáltica con polvo de caucho provenientes de los NFU.

Para poder tomar una decisión sobre si es conveniente o no utilizar los NFU como un aditivo en mezclas asfálticas, es posible utilizar una metodología de toma de decisiones que permita poner el foco en las ventajas entre las distintas alternativas. El método multicriterio que permite realizar un análisis como el indicado es el método de Selección por Ventajas (CBA), el cual se basa en la comparación de cada ventaja entre las alternativas, escogiendo la alternativa más ventajosa, a través de los siete pasos que define esta metodología de decisión multicriterio, los cuales se enuncian a continuación: identificación de alternativas, definición de factores, definición de criterios, resumen de atributos, decisión de ventajas, decisión importancia de cada ventaja y evaluación de costos (Arroyo et al., 2016; Arroyo et al., 2015b, 2015a; Arroyo et al., 2016)

Es importante mencionar que para considerar la multiplicidad de factores y criterios en la toma de decisión se tiene que tener una visión global de todo el ciclo de vida del camino, ya que diversos estudios han demostrado que es necesario un enfoque de análisis de ciclo de vida (LCCA) para proporcionar una evaluación profunda de los impactos ambientales de un producto o proceso y para reducir el riesgo de consecuencia negativa no deseadas (Santero et al., 2011). Además, se hace necesario considerar los factores que pueden tener un potencial de calentamiento global diferenciadores entre ambas alternativas (Santero y Horvath, 2009). Varios estudios han aplicado ACV a pavimentos y análisis de costos de ciclo de vida (LCCA), tales como Gschösser & Wallbaum, (2013), H. Wang, (2014). Quinn estudió especialmente los posibles impactos ambientales de benzothiazoles derivados de caucho utilizado en carreteras, concluyendo que estos componentes no son dañinos (Quinn, 2000).

Sin embargo, es necesario un enfoque más holístico para integrar aspectos ambientales, sociales y económicos de la sostenibilidad que puede lograrse utilizando un método de decisión multicriterio.

La presente investigación pretende responder a dos preguntas: (1) ¿es económicamente eficiente para utilizar neumáticos de desecho en mezclas asfálticas en los países en desarrollo? (2) ¿qué impactos sociales y ambientales se generan en la construcción de la carretera usando los neumáticos inútiles? Esta investigación utiliza un estudio de caso de un proyecto de construcción de carretera situado en Chile para responder a estas preguntas.

2. Metodología

La presente investigación se basa en un caso de estudio de un proyecto de construcción de una carretera ubicada en Chile, y presenta un enfoque novedoso para comparar una mezcla de asfalto convencional (alternativa 0) a una mezcla de asfalto de caucho (alternativa 1), haciendo uso de CBA como un método de toma de decisiones multicriterio. Este método permite incorporar los impactos ambientales y sociales de ambas alternativas y análisis de inversión y los costos de mantenimiento, que son relevantes para los contratistas y diseñadores de políticas en proyectos carreteros.

Para ello, se realizaron las siguientes actividades:

- Revisión de documentación: incluyendo artículos de revistas científicas indexadas, documentación técnica suministrada por el contratista de la obra y normatividad legal vigente respecto a la construcción de carreteras tanto en Chile, como a nivel mundial (Calahorra et al., 2016).
- Selección de caso de estudio: Una carretera de asfalto de 25 km, ubicada en la Región de Valparaíso, Chile.
- Entrevistas: Se realizaron distintas entrevistas a personas claves dentro del proceso: 1) al encargado de la planta productora de polvo de caucho, con el objeto de obtener información sobre la capacidad productiva y los impactos ambientales generados por la misma; 2) al encargado de la construcción de la carretera, para conocer las especificaciones técnicas del pavimento de la misma; y 3) a la responsable del laboratorio nacional de vialidad, ya que estuvo encargada de la realización de tramos piloto de pavimentos con caucho reciclado en Chile y además es la responsable de la investigación de esta tecnología en el Ministerio de Obras Públicas (Calahorra et al., 2016).
- Observación Directa: A través de distintas visitas en el sitio de la obra para comprender el entorno y los posibles impactos sociales y ambientales que genera su construcción (Calahorra et al., 2016).
- Análisis Ciclo de Vida (ACV) de mezcla asfáltica con y sin caucho, donde se evaluaron los impactos ambientales, sociales y económicos. (Calahorra et al., 2016).
- Aplicación de Choosing by advantages (CBA), método de selección multicriterio que permite seleccionar entre dos o más alternativas, a través de la determinación de la importancia otorgada a las diferencias entre las ventajas de las alternativas. (Arroyo, P., Tommelein, I. D., & Ballard, 2015).
- Análisis de resultados y conclusiones

3. Teoría / Cálculo

Esta sección presenta los antecedentes del estudio de caso, la teoría LCA y CBA y los cálculos pertinentes para evaluar la decisión.

3.1. Caso de Estudio

El presente caso de estudio es el análisis del pavimento diseñado para construir y operar una carretera de

25 km, ubicado en la Región de Valparaíso, Chile. Esta carretera comienza en la comuna de San Felipe y termina en la Ruta 60 CH.

La sección del camino tiene dos líneas de 3.5 m, una para cada dirección, y una sección de pavimento con una capa de asfalto superior de 5 cm de espesor, una capa intermedia de asfalto de 6 cm de grosor y una capa base de asfalto de 7 cm de espesor. El estudio se centra en el uso de NFU en la capa superior de asfalto. La capa de asfalto se puede hacer con diferentes tipos de mezclas bituminosas dependiendo de la granulometría de los agregados y la tipología de betún (asfalto). Para la determinación de la mezcla, este estudio utilizó la legislación española, a saber, el artículo 542 mezclas bituminosas de hormigón bituminoso de PG-3 BOE (BOE Gobierno de España, 2014) y el manual de usuario para el caucho de NFU en mezclas bituminosas (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2007)

Este estudio considera la introducción del caucho al asfalto por vía "húmeda", esto significa que la introducción del caucho se hace directamente en el betún, y posteriormente este asfalto se mezcla con los agregados para generar la mezcla de asfalto. Dependiendo del porcentaje de caucho que se introduce, se generan tres tipos de betún: betún caucho (BC), que tiene entre 8% y 12% caucho; betún modificado, con contenido de caucho (BMC) entre 12% y 15% y el betún modificado con caucho de alta densidad, que tiene entre 15% y 22% caucho (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2007). Para este estudio de caso, se utilizó un BC con caucho de 10%.

Este estudio compara una mezcla asfáltica convencional (alternativa 0) con una mezcla de asfalto de

caucho (BC) (alternativa 1). Alternativa 0 es una mezcla de asfalto compuesta de áridos y betún convencional. Según las recomendaciones del artículo 542 mezclas bituminosas de hormigón bituminoso de Español PG-3 BOE (BOE Gobierno de España, 2014), el concreto bituminoso es 4.5% del peso de la mezcla. Esto es utilizado en capas de rodadura.

Por otro lado, en la alternativa 1, el betún convencional es reemplazado por el betún de caucho, con la introducción del caucho por "vía húmeda" con un porcentaje del 10% del peso del betún. Además, siguiendo las recomendaciones del Manual de Uso de Cauchos de Desechos en mezclas bituminosas de España (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2007), al usar betún de caucho, es apropiado aumentar el porcentaje de betún en la mezcla bituminosa y disminuir la densidad de la mezcla en un 5%. Por lo tanto, en esta alternativa, la cantidad de betún aumenta de 4.5% a 5.2%.

3.2. Análisis de ciclo de vida (ACV)

Para realizar la evaluación de ciclo de vida de las diferentes alternativas, según la ISO 14040, primero es necesario definir el objetivo y alcance del estudio. Un kilómetro de carretera era considerado como la unidad funcional, que corresponde a un kilómetro que es de 7 metros de ancho. Este estudio considera la extracción, transporte, mezcla y construcción de la mezcla bituminosa.

Para el análisis de inventario, este estudio considera la cantidad de energía utilizada, de la extracción de material para la construcción de la carretera (Tabla 1 y 2).

Tabla 1. Alternativa 0. Energía consumida durante el ciclo de vida (análisis de inventario)

Alternativa 0					
Extracción					
	Tons		Energía (J/t)		Total en J.
Aridos	44,164.44		3,080,000,000		1.36026E+14
Betún	1,987.4		32,000,000		63,596,800,000
Transporte					
	Tons	Km	Energía (J/t-km)	journeys	Total en J.
Aridos	44,164.44	85	2.90E+07	6,309	1.56E+13
Betún	1,987.4	90	2.90E+07	284	7.41E+11
Mezcla					
	Tons		Energía (J/t)		Total en J.
Mezcla	46,151.84		39,213,000,000		1.80975E+15
Construcción					
	m ²		Energía (J/m ²)		Total en J.
	175,000		1.30E+06		2.275E+11
				Total	1.96E+15
Total por unidad funcional					7.84945E+13



Tabla 2. Alternativa 1: Energía consumida durante el ciclo de vida

Alternativa 1					
Extracción					
	Toneladas	kWh	Energía (J/t)		Total en J.
áridos	41,956.22		3,080,000,000		1.29225E+14
Betún	1,963.5		32,000,000		62,832,000,000
Caucho	217.17	95011.8			3.42042E+11
Transporte					
	Toneladas	Km	Energía (J/t-km)	Viajes	Total en J.
áridos	41,956.22	85	2.90E+07	5,994	1.48E+13
Betún	1,963.5	90	2.90E+07	281	7.32E+11
Caucho	217.17	98.3	2.90E+07	31	8.84E+10
Mezcla					
	Toneladas		Energía (J/t)		Total en J.
	44,136.89		39,213,000,000		1.73074E+15
Construcción					
	m2		Energía (J/m2)		Total en J.
	175,000		1.30E+06		2.275E+11
				Total	1.88E+15
			Total por unidad funcional		7.50477E+13

Para la evaluación de impacto, se calcularon los efectos ambientales sobre el calentamiento global causados durante cada una de las etapas, en CO₂ eq. (para 100 años). Los siguientes resultados se obtuvieron en cada una de las alternativas:

Alternativa 0

Las emisiones de CO₂, N₂O y CH₄ para esta opción se calcularon a partir de la información contenida en el "Informe Final de Proyecto de Ingeniería Ruta 60 CH. Sector 1. La Ruta Andes 5 Norte, sección 2: desvío San Felipe - Panquehue", suministrado por la carretera empresa de diseño. Para esta alternativa, la composición de la mezcla no se modificó, es decir, no se agregó polvo de caucho. Los materiales utilizados para esta alternativa fueron áridos (44,164.44 toneladas) y betún (1.987,40 toneladas). Durante la fase de extracción y procesamiento de los materiales de construcción, se generaron 0.137 t CO₂ / t, 1.06E-07 tN₂O / t y 3.50E-08 t CH₄ / t para cada uno de los agregados y 0, 001537 t CO₂ / t, 5.80 E-08 t N₂O / t y 5.29E-07 t CH₄ / t para betún (Azhar Butt, 2014). Por lo tanto, las emisiones generadas por el total de materiales utilizados para esta alternativa fueron 411.70 t CO₂, 0.0028 t N₂O y 0.023 t CH₄.

En la fase de transporte, los materiales de construcción se trasladaron en camiones de 14 toneladas, que los llevaron de sus lugares de producción, donde estaban ubicados los proveedores, al sitio de trabajo. La distancia entre los proveedores de agregados y el sitio de trabajo fue de 85 km y de los proveedores de betún al sitio de trabajo fue de 90 km. El número de viajes necesarios para transportar los materiales fue de 3.155 para los agregados y 142 para el betún. Por lo tanto, las emisiones generadas por esta actividad utilizando la información anterior fueron 34,665.20 T CO₂, 0.76 t N₂O y 0.024 t CH₄.

Durante la fase de preparación de la mezcla de asfalto, este estudio consideró que esta actividad se llevaría a cabo en el sitio de trabajo, a través de una planta de asfalto (Six Pack Portable, Astec), considerando una emisión por tonelada de asfalto procesado de 0.019 t CO₂ / T 4.30 E-07 t N₂O / t 7.57E-07 tCH₄ / t (Azhar Butt, 2014). Las emisiones totales, considerando la cantidad total de materiales requeridos en la alternativa 0 (46,151.84 t) fueron: 894.97 t CO₂, 0.0198 t N₂O y 0.0349 t CH₄.

Durante la construcción de la carretera, las emisiones dependieron del total de metros cuadrados construidos. Dado que la carretera tiene una longitud de 25 km y un ancho de 3,5 m, los metros cuadrados de construcción total fueron

175,000 m2. Las emisiones generadas durante esta actividad en kg / m2 se consideran como 9.59E-02 kg CO2 / m2, 8.66E-04 kg N2O / m2 y 6.06E-08 kg CH4 / m2; (Wang, 2014) por lo tanto, para el área establecida, se obtuvieron 16.78 t CO2, 0.15 t N2O y 0.000011 t CH4.

Alternativa 1

Con el uso de BC, el porcentaje de agregados se reduce y el porcentaje de betún y caucho aumenta. La composición de la mezcla de asfalto está dada por: agregados: 41.956,22 t, betún: 1.963,50 t y caucho: 217,17 t. Durante la fase de extracción y procesamiento de materiales de construcción, los materiales de construcción para esta alternativa son agregados, betún y caucho (NFU). Las emisiones de caucho se calcularon a partir de la planta de trituración de neumáticos, de la siguiente manera, para agregado y betún, se consideraron los siguientes valores de emisiones generados: 0.173 t CO2 / t, 1.06E-07 t N2O / t y 3.50E-08 t CH4 / t, para el caso del agregado y 0.001537 t CO2 / t, 5.80E-08 t N2O / t y 5,29E-07 t CH4 / t para el betún (Azhar Butt, 2014). Por lo tanto, las emisiones totales generadas en esta fase fueron 404.64 t CO2, 0.00264 t N2O y 0.022 t CH4.

El caucho triturado sería suministrado por Polambiente, que es una empresa de procesos de molienda y granulación de neumáticos de desecho en Chile. Esta planta procesa 2.000 kg/h de neumáticos. El valor anual estimado es de aproximadamente 8,000 toneladas. La cantidad de caucho obtenida es del 70% al 80% del peso total del material de los neumáticos procesados (con restos de fibras especiales). El kWh requerido para el procesamiento de caucho requerido para esta alternativa es 95,010.85. Las emisiones en kg de CO2 por cada kWh producido por la red eléctrica principal

en Chile son de 0,35 kg / kWh. Con base en la información anterior, las emisiones generadas por la producción de las 217,17 toneladas de caucho para el pavimento son del orden de 44 t CO2, 0,00170 t N2O y 0,01 t CH4.

El transporte de materias primas se considera de la misma manera que en la alternativa 0. Se transportarán en camiones de 14 toneladas desde sus lugares de origen hasta el lugar de trabajo. La distancia entre la ubicación del proveedor y el sitio de trabajo fue de 85 km, 90 km y 98,3 km para el agregado de betún y caucho, respectivamente. El número de viajes requeridos para transportar el total de materiales es 2.997 para los agregados, 141 para el betún y 16 para el caucho. Por lo tanto, las emisiones generadas por esta actividad son del orden de 33,179.98 t CO2, 0.731 t N2O y 0.023 t CH4.

Durante la fase de preparación de la mezcla de asfalto, se asume que la preparación de esta mezcla se realizará en el sitio de trabajo, a través de una Planta de Asfalto, (Six Pack Portable, Astec), considerando una emisión por tonelada de material asfáltico procesado de 0, 01939 t CO2 / t, 4.30E-07 t N2O / t y 7.57E-07 t CH4 / t (Azhar Butt, 2014). Las emisiones totales, basadas en el volumen total de materiales requeridos en la alternativa 1 (44,136.89 t) son: 855,90 t CO2, 0,019 t N2O y 0.033 t CH4.

Las emisiones generadas durante la etapa de construcción se consideran las mismas que las utilizadas en la alternativa 0: t / m2 de 9.59E-02 kg CO2 / m2, 8.66E-04 kg N2O / m2 y 6.06E -08 kg CH4 / m2; (Wang, 2014) por lo tanto, las emisiones generadas en la etapa de construcción desde la superficie de la carretera considerada son 16.78 t CO2, 0.11515 t N2O y 0.000011 t CH4.

La comparación de los resultados obtenidos en las dos alternativas se muestra en la Tabla 3:

Tabla 3. Emisiones de comparación para ambas alternativas (evaluación de impacto)

FASES	ALTERNATIVA 0			ALTERNATIVA 1		
	CO2	N2O	CH4	CO2	N2O	CH4
Extracción	411.70	0.0028	0.0234	448.64	0.004	0.032
Transporte	34,665.21	0.76	0.0241	33,179.98	0.731	0.023
Mezcla	894.98	0.0198	0.0349	855.90	0.019	0.033
Construcción	16.78	0.152	0.000011	16.78	0.152	1.06E-05
TOTAL	35,988.67	0.94	0.082	34,501.30	0.906	0.089
CO₂ equivalentes	35,988.67	280.12	2.05	34,501.30	269.988	2.225
Total CO₂ eq.	36,270.84			34,773.51		
CO₂ eq./Km	1450.8			1390.9		



Para la interpretación, este estudio puede afirmar que con base en los datos presentados en la Tabla 3, la reducción del porcentaje de generación de CO₂ es 4.13% de la alternativa 1 en comparación con la alternativa 0; para N₂O la reducción es 3.41% de la alternativa 1 en comparación con la alternativa 0. Esto está considerando la extracción, transporte, mezcla y construcción de cada una de las alternativas de asfalto.

En conclusión, las emisiones de la alternativa 1 muestran una reducción del 4% en comparación con la alternativa 0. Por otro lado, las relaciones de emisiones por kilómetro obtenidas para cada una de las alternativas son las siguientes: alternativa 0: 1,450.83 t CO₂eq / km, y alternativa 1: 1.390,94 t CO₂eq / km. La Figura 1 muestra la eq de CO₂ emisiones por alternativa. La diferencia no es muy grande, debido a que las emisiones de transporte son similares en ambas alternativas en el contexto de este estudio.

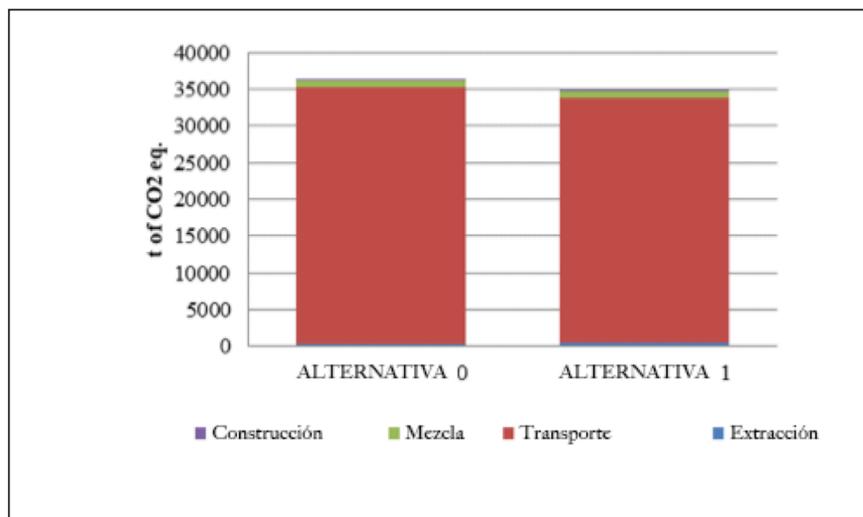


Figura 1. Toneladas de emisiones de GEI de las alternativas

3.3. Elegir por ventajas (CBA)

Al decidir qué alternativa es más sostenible que otra (selección de materiales, considerando los resultados ambientales, sociales y económicos) en la industria de la Arquitectura, Ingeniería y Construcción (AEC), las partes interesadas deben seleccionar un método para su proceso de toma de decisiones (Arroyo et al., 2015a).

CBA es un sistema para tomar decisiones utilizando

un vocabulario bien definido para garantizar la claridad y la transparencia en el proceso de toma de decisiones. De acuerdo con este sistema, es importante identificar qué factores revelan diferencias significativas entre las alternativas, no qué factor será importante en la decisión. Para describir cómo utilizar el CBA para seleccionar una alternativa sostenible dentro de la industria de AEC, se utilizan los términos del libro de Suhr, (1999)(Tabla 4).

Tabla 4. Método CBA. Definiciones. Fuente: (Suhr, 1999)

Términos	Definiciones
Alternativas	Dos o más métodos de construcción, materiales, diseño de edificios o sistemas de construcción, de los cuales se debe elegir uno.
Atributos	Una característica, calidad o consecuencia de una alternativa (métodos de construcción, materiales, etc.).
Ventajas	Un beneficio, ganancia, mejora o mejora. Específicamente, una ventaja es una diferencia beneficiosa entre los atributos de dos alternativas.
Factores	Un elemento, parte o componente de una decisión. Para evaluar los factores de sostenibilidad deberían representar aspectos económicos, sociales y ambientales. Es importante notar que CBA considera el dinero por separado de otros factores.
Criterios	Una regla de decisión, o una guía, por lo general. Un criterio "obligatorio" que representa las condiciones que debe cumplir cada alternativa, o un criterio de "deseo", que representa las preferencias de uno o varios responsables de la toma de decisiones.

El método CBA ha demostrado ser más transparente y consistente que otros métodos, como el Analytical Hierarchy Process, o AHP (Arroyo et al., 2015a). Además, CBA es simple y práctico de usar en decisiones grupales, lo que permite un consenso más rápido y una menor frustración entre miembros del equipo que ponderan la calificación y el cálculo o el método de suma ponderada (Arroyo et al., 2015b; Arroyo et al., 2016).

En CBA, el proceso de ponderación se basa únicamente en las ventajas, no en criterios, atributos u otros tipos de datos. Además, el CBA pospone el juicio de valor sobre las alternativas tanto como sea posible. La aplicación del método CBA se describe de la siguiente manera:

3.3.1 Identificación de Alternativas

Alternativa 0: Mezcla de asfalto con betún tradicional (BT)

Alternativa 1: Mezcla de asfalto con betún de caucho (BC)

3.3.2 Identificación de Factores

Los autores identificaron los factores que causaron las diferencias entre las dos alternativas, clasificándolas en las siguientes áreas:

Técnicos

- Necesidad de mantenimiento: En cuanto a la determinación o predicción del daño que el pavimento podría sufrir durante el tiempo y la durabilidad del material (fisuras, grietas, etc.) (Reger, Madanat, & Horvath, 2014). Se presenta un marco para incluir la reducción de emisiones de GEI en la política de repavimentación de pavimentos. Se mide en porcentaje de deterioro al final de los 10 años de servicio. El factor cuantitativo se obtuvo del estudio "Donde el caucho se encuentra con el caucho: 12 años de éxito duradero" (Way, 2003).
- Conocimiento y experiencia del proceso de producción: esto se refiere al conocimiento basado en la experiencia con el proceso de producción (mezclar el diseño adecuado, ventajas, manejo de las desventajas de la alternativa, estabilidad de la mezcla, comportamiento de la mezcla, tiempos de espera, si requiere entrenamiento, transporte adecuado, etc.). El factor cualitativo se obtuvo a través de entrevistas con el Laboratorio Nacional de Caminos y la empresa Polambiente.
- Sensibilidad térmica: Esto se refiere al comportamiento del pavimento con respecto a la temperatura. La temperatura es considerada como uno de los agentes ambientales que influyen directamente en el comportamiento de los pavimentos, modificando su rigidez, debido a las características termoplásticas del material que constituye las capas asfálticas de los pavimentos flexibles. A medida que la temperatura aumenta, las capas del pavimento de asfalto se vuelven menos rígidas, y cuando disminuye la rigidez de estas capas aumenta (Roberts, Offler, & Fanning, 2004). En este caso, se utilizó el valor del punto de ablandamiento, que representa la temperatura a la que el asfalto comienza a volverse inestable (suave, líquido). El factor cuantitativo se obtuvo a partir de

un documento de compilación elaborado por CEPSA y la Universidad Politécnica de Cataluña (CEPSA & Universidad Politécnica de Cataluña, 2013).

Social

- La variabilidad del IRI (índice de regularidad internacional) se define como una única escala de valores para la medición de la regularidad superficial de las carreteras, que puede ser utilizada por la gran mayoría de las máquinas de auscultación que existen en la actualidad. Este índice simula la respuesta de un vehículo cuando se conduce en una carretera a 80 km / h y, por lo tanto, nos permite considerar factores como la seguridad, la comodidad y el costo de uso (Sánchez & de Solminihac, 1989). Se mide en mm/m durante un período de tiempo determinado. El factor cuantitativo se evaluó en el análisis del ciclo de vida.
- Ruido: Esto se refiere al ruido (medido en decibelios) de los vehículos que transitan por los pavimentos. Esta medición incluye el propio ruido del vehículo. Se considera social, ya que puede afectar a las personas que viven en casas ubicadas cerca de la carretera. El factor cuantitativo se evaluó en el análisis del ciclo de vida con información recolectada en el Manual de empleo de desechos de llantas de caucho en mezclas bituminosas (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, 2007).
- Riesgo para la salud de los trabajadores: durante la producción de la mezcla de asfalto, en ambas alternativas, se produce la emisión de material particulado y componentes tóxicos; El factor cuantitativo no indica diferencias significativas entre las mediciones realizadas en la producción de mezcla de asfalto convencional y la medición de mezclas con la adición de caucho (Department of Transportation, 2011).
- Inflamabilidad: Esto se refiere al punto de temperatura en el cual la mezcla puede incendiarse. Se mide en grados Celsius o grados Fahrenheit. El factor cuantitativo se obtuvo a partir de un documento de compilación elaborado por CEPSA y la Universidad Politécnica de Cataluña (CEPSA & Universidad Politécnica de Cataluña, 2013).

Ambiental

- Las emisiones de CO₂, N₂O y CH₄: se refieren a las estimaciones de CO₂, N₂O y CH₄ de la extracción de materias primas (agregados, betún), el procesamiento de los NFU y la obtención del caucho, el transporte de las materias primas a la planta mezcladora para asfalto, y la fabricación de mezcla de asfalto. El factor cuantitativo se evaluó en la evaluación del ciclo de vida y se midió en emisiones de CO₂ equivalentes.
- Deconstrucción (potencial de reciclaje de materiales) (cualitativo): según se registra en el documento Guía estándar de asfalto y caucho, las mezclas de caucho se pueden reciclar siguiendo los mismos métodos y procedimientos que las mezclas



convencionales (Kaloush & Biligiri, 2011). Debido a lo anterior, las mezclas de ambas alternativas tienen un alto potencial de reciclaje.

- Porcentaje de inclusión de material reciclado (cuantitativo): se refiere a la cantidad de material reutilizado en el diseño original de la mezcla. El fresado y la reutilización del conglomerado de asfalto o la incorporación de caucho de los NFU comprenden un uso menor de betún o agregados, y por lo tanto una menor extracción de recursos.

3.3.3 Definición de Criterios

A continuación, los autores definieron los criterios que ayudan a diferenciar cada factor entre las alternativas. Como se especifica anteriormente, algunos atributos son cuantitativos y otros cualitativos.

Factores / Criterios / Argumentos:

- Requisito de mantenimiento / Menor porcentaje es mejor / Se requiere minimizar el mantenimiento de la carretera, ya que es un proceso que implica tiempo y costos, y debe considerarse para evitar el deterioro de la carretera
- Conocimiento y experiencia del proceso de producción / Mayor experiencia y conocimiento es mejor / Se busca conocimiento y experiencia en el proceso de producción del camino, para evitar errores durante su desarrollo.
- Susceptibilidad térmica (punto de reblandecimiento)/ Una temperatura más alta es mejor / Se requieren alternativas para permitir que haya más temperatura antes de que el asfalto comience a volverse inestable en su funcionamiento y para evitar una falla temprana en esta operación.
- Variabilidad de IRI / Menos variación es mejor / Las alternativas deben tener menos variación en IRI durante la operación de la carretera, para tener

mayor seguridad y comodidad para los usuarios de la carretera.

- Ruido / Menos decibeles es mejor / Se requiere que las alternativas en su fase de operación minimicen el ruido del tráfico vehicular, a fin de minimizar el impacto en las personas ubicadas cerca de la carretera.
- Riesgo para la salud de los trabajadores / Menos riesgo es mejor / Esto busca minimizar los riesgos para la salud de los trabajadores, ya que están expuestos a material particulado durante el proceso de fabricación, lo que puede causar problemas respiratorios y enfermedades ocupacionales.
- Inflamabilidad / Una temperatura más alta es mejor / Las alternativas deben tener una temperatura más alta en el proceso de fabricación de la mezcla, para minimizar el riesgo de incendio.
- Emisiones de CO₂ / Menos emisiones es mejor / Se insta a las alternativas a lo largo de su ciclo de vida a emitir la menor cantidad de emisiones de CO₂ equivalentes para minimizar el efecto de esta actividad en el calentamiento global.
- Desconstrucción / Un mayor potencial para el reciclaje es mejor / Se requiere que las alternativas, al final de su vida útil, puedan reciclarse para evitar el desperdicio.
- Porcentaje de material reciclado / Mayor porcentaje de materiales reciclados es mejor / Esto se refiere a la cantidad de material reciclado en la mezcla inicial.

3.3.4 Resumen de los atributos de cada alternativa

La tabla 5 presenta un resumen de los atributos para cada alternativa, de acuerdo con la definición de criterios hecha en el punto anterior y el análisis realizado por los investigadores.

Tabla 5. Resumen de los atributos por cada alternativa

Factores	Mezcla de asfalto con BT	Mezclas asfálticas con BC
Necesidad de mantenimiento	Att: 9%	Att: 4%
Conocimiento/experiencia del proceso de producción	Att: mayor conocimiento y experiencia	Att: menor conocimiento y experiencia
Susceptibilidad térmica	Att: 46-54° C	Att: ≥ 53° C
Variabilidad IRI	Att: 0.9 mm/km	Att: 0.2 mm/km
Ruido	Att: 51.14 decibelios en el día y 40.28 decibeles por la noche.	Att: 47.64 decibelios en el día y 36.78 decibeles por la noche.
Riesgo de salud ocupacional (toxicidad)	Att: Alto riesgo para la salud	Att: Alto riesgo para la salud
Inflamabilidad	Att: ≥ 235 ° C	Att: ≥ 235 ° C
Emisiones de CO₂ equivalentes (t / Km)	Att: 1450.83	Att:1390.94
Demolición	Att: Alto potencial de reciclaje	Att: Alto potencial de reciclaje
Porcentaje de inclusión de material reciclado	Att: 0%	Att: 0.5%

3.3.5 Ventajas de cada decisión alternativa

En la Tabla 6, se observan las ventajas de ambas alternativas para cada factor. Es importante señalar que, para cada factor, habrá al menos una alternativa que no tiene ventaja, es decir, la que tiene el atributo menos preferido, en

lo que respecta a dicho criterio (celdas con guion). En el caso que en ambas alternativas un factor no tenga ventajas, será eliminado del análisis posterior, ya que no ayuda a identificar diferencias entre ambas alternativas.

Tabla 6. Ventajas por alternativa

Factores	Mezcla de asfalto con BT	Mezclas asfálticas con BC
Necesidad de mantenimiento	--	5% Menos de deterioro
Conocimiento y experiencia del proceso de producción	Conocimientos y experiencia	--
Susceptibilidad térmica	--	7 ° C más resistente a la temperatura
Variabilidad IRI	--	0.7 mm/km menos variable
Ruido	--	3.5 db menos tanto de día como de noche
Riesgo de salud ocupacional (toxicidad)	--	--
Inflamabilidad	--	--
Emisiones de CO2 equivalentes (t / Km)	--	59.89 t menos de CO2 eq. por cada Km.
Demolición	--	--
Porcentaje de inclusión de material reciclado	--	0.5% más material reciclado

La decisión no se basa en qué factor es más importante sino en las ventajas que surgen con las dos alternativas.

3.3.6 Importancia de cada decisión de ventaja

Para determinar la importancia de cada ventaja, es fundamental contar con la colaboración de un equipo, en este caso los autores del documento, quienes a través de un grupo de discusión analizaron las ventajas y decidieron la importancia de cada ventaja, seleccionando la importancia de las ventajas escribiéndolos en notas adhesivas y usando una pizarra, para permitir la modificación de su orden de importancia en una escala de 0 a 100. Durante el proceso, se estimó que la ventaja más importante era "un 5% menos de deterioro", asociado con la necesidad de mantenimiento, ya que esto implica tiempo y costos, un factor crucial a la hora de decidir entre alternativas. Por esta razón, se le asignaron 100 puntos. Luego, la alternativa con "más experiencia y conocimiento" en el proceso de fabricación de la mezcla fue evaluada con 95 puntos, ya que busca minimizar los errores en el proceso.

Luego, la alternativa con la ventaja "7 ° C más resistente a la susceptibilidad térmica", se evaluó con 70 puntos porque es conveniente evitar fallas tempranas en la carretera, debido a la inestabilidad del asfalto en su operación. Damos 55 puntos a la alternativa con la ventaja "0.7 mm / km menos variación de IRI", para garantizar mayor seguridad y comodidad para los usuarios de la carretera.

Evaluamos con 40 puntos la alternativa que tenía "3,5 dB menos tanto de día como de noche", por lo que, durante la fase de operación de la carretera, las personas ubicadas en los alrededores tendrían menos efectos negativos debido a la emisión excesiva de ruido. Finalmente, la ventaja asociada con la diferencia en la cantidad de material reciclado se evaluó con 15 puntos, ya que es solo del 0.5% y con 10 puntos, la alternativa de emitir 59.89 t menos CO2 eq./km.

En la Figura 2, se muestra el resumen de la escala de importancia de cada ventaja. Esta escala representa una evaluación subjetiva de la relevancia de las ventajas relativas a la ventaja más importante, que es "un 5% menos de deterioro" de la alternativa 1 frente a la alternativa 0.



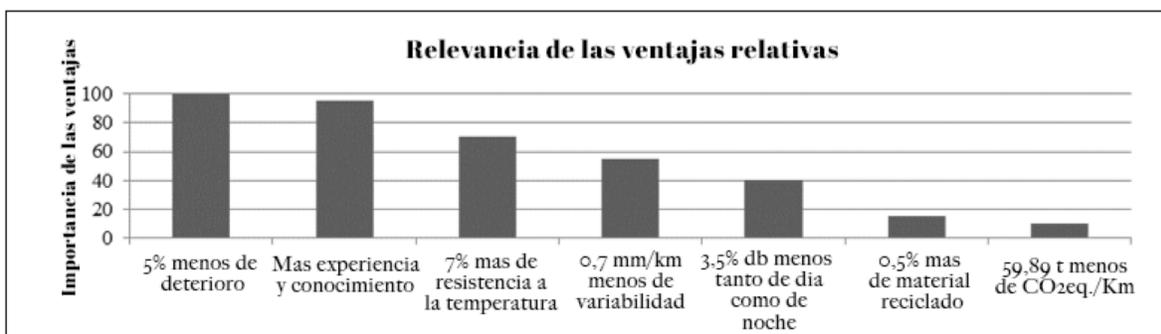


Figura 2. Ventajas. Escala de importancia

El resumen del método CBA se puede ver en la Tabla 7 a continuación:

Tabla 7. Método CBA. Resumen

Factores (Criterios)	Mezcla de asfalto con BT	Imp	Mezcla de asfalto con BC	Imp
Necesidad de mantenimiento (<i>menor porcentaje es mejor</i>)	Att: 9%		Att: 4%	
	--	0	Vtj: 5% menos porcentaje	100
Conocimiento y experiencia con el proceso de producción (<i>más alto es mejor</i>)	Att: mayor experiencia y conocimiento		Att: menor experiencia y conocimiento	
	Vtj: más experiencia y conocimiento	95	--	0
Susceptibilidad térmica (<i>una temperatura más alta es mejor</i>)	Att: 46-54°C		Att: ≥ 53°C	
	--	0	Vtj: 7°C más resistente a la temperatura	70
IRI Variability (<i>menor es mejor</i>)	Att: 0.9 mm/km		Att: 0.2 mm/km	
	--	0	Vtj: 0.7 mm/km menos variabilidad	55
Ruido (<i>menos decibeles es mejor</i>)	Att: 51.14 db during day and 40.28 db at night		Att: 47.64 db durante el día y 36.78 db en la noche	
	--	0	Vtj: 3.5 db menos tanto de día como de noche	40
Emisiones de CO2 equivalentes (<i>menos es mejor</i>)	Att: 1450.83 t CO ₂ /km		Att: 1390.94 t CO ₂ /km	
	--	0	Vtj: 59.89 t menos CO₂/km.	10
Porcentaje de inclusión de material reciclado (<i>más es mejor</i>)	0%		0.5% (Caucho)	
	--	0	Vtj: 0.5%	15
Importancia total		95		290

3.3.7 Evaluación de costos

Después de determinar las ventajas de las alternativas, los investigadores procedieron a calcular los costos de cada uno para la decisión. Se estimaron los costos iniciales y de mantenimiento para este caso.

Para los costos iniciales, se utilizaron los datos

medidos en USD (Caltrans. State of California Department of Transportation, 2003). La Tabla 8 muestra el costo por tonelada de la mezcla convencional, en nuestro caso, la alternativa 0; y el costo por tonelada de la mezcla RAC-G (concreto asfáltico de caucho) correspondiente al betún de caucho o la alternativa 1, en el presente estudio.

Tabla 8. Relación de primer costo. Mezcla de asfalto tradicional y betún-caucho. Fuente: Caltrans. State of California Department of Transportation Services (2003)

	Hot Mix	Chip Seal
	\$/ton	\$/m
Convencional	33-38	1.20-1.50
Polímero modificado	38-44	1.50-1.80
RAC-G	49-55	3.00-3.60

En general, las mezclas calientes de RAC-G cuestan aproximadamente \$ 16 / t más que las mezclas convencionales, aunque esto puede variar con el tamaño del trabajo, la movilización y la ejecución del caucho asfáltico y los costos del equipo de producción de ligantes. A los

proyectos grandes se les puede permitir una reducción en el costo unitario porque los costos de movilización se pueden distribuir a través de un mayor tonelaje de RAC. La Tabla 9 muestra el costo inicial para ambas alternativas.

Tabla 9. Costo Inicial. Mezcla de asfalto tradicional y Betún Caucho.

Alternativa 0		Alternativa 1	
	Tons		tons
Aridos	44.164.44	Aridos	41.956.22
Betún	1.987.4	Betún	1.963.5
		Caucho	217.17
Total	46151.84	Total	44136.89
Costo promedio en USD	1,638,390.32	Costo promedio en USD	2,295,118.28

En la Figura 3, la relación de las ventajas y el costo inicial se muestran en el eje de abscisas y ordenadas, respectivamente. Se ilustra que el uso del betún de caucho

presenta mayores ventajas que el tradicional, pero también tiene costos iniciales más elevados.



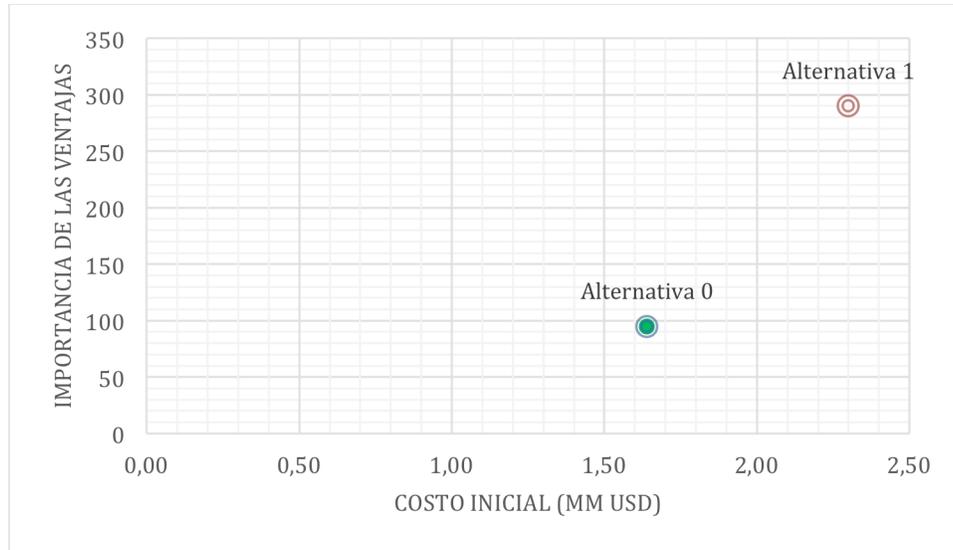


Figura 3. Costo inicial e importancia de las ventajas, ambas alternativas

Los costos de mantenimiento se asumieron como un porcentaje, de acuerdo con Jung et al. (2002). El costo total del ciclo de vida, que incluye el costo inicial y el costo de mantenimiento, para la alternativa de betún-caucho fue aproximadamente el 58% del costo de la alternativa tradicional de betún en un período de 25 años.

Finalmente, en la Figura 4, es posible observar, en el eje de abscisas, la puntuación total de la importancia de las ventajas para cada alternativa y en el eje de ordenadas el

porcentaje del costo del ciclo de vida. Se señala que la alternativa más conveniente es el betún de caucho (alternativa 1), ya que presenta puntajes más altos y costos de ciclo de vida más bajos. Por lo tanto, se debe elegir la alternativa 1. Este análisis no considera el costo del usuario y la diferencia entre los servicios proporcionados por las dos alternativas. Sin embargo, según Jung et al. (2002), la alternativa 1 debería tener un costo de usuario menor que la alternativa 0.



Figura 4. Costo del ciclo de vida Vs. Importancia de las ventajas

4. Resultados y Discusión

El desarrollo de los pasos que constituyen el método de elección por ventajas nos ha permitido obtener los siguientes resultados con respecto a la decisión sobre qué betún usar en una mezcla de asfalto para colocarlo en una capa superior de pavimento:

- 1) El uso de betún de caucho (alternativa 1) es más ventajoso que el uso de betún convencional (alternativa 0).
- 2) El costo requerido para la fabricación y la ejecución de la mezcla de caucho y betún (alternativa 1) es 1,4 veces mayor que el costo de invertir en la mezcla convencional. El costo del ciclo de vida, incluido el mantenimiento durante la operación de la carretera en 25 años, en el caso del pavimento construido con betún de caucho (alternativa 1), supone una reducción del 58% con respecto al costo del ciclo de un pavimento hecho con mezcla tradicional (alternativa 0) Estos costos no son generalizables y deben estudiarse caso por caso.

Es importante señalar que la obtención de la alternativa más ventajosa se basa en:

Una serie de factores técnicos, sociales y ambientales, seleccionados por los autores como los más relevantes para establecer la comparación. El uso de estos factores en el presente estudio no implica que siempre sean los mismos para este tipo de análisis; su definición debe ser establecida, en cada caso, por los tomadores de decisiones de acuerdo con el objetivo final para el cual se seleccionan las alternativas.

Atributos asociados con estos factores Estos atributos, para el presente caso, se han calculado sobre la base de datos reales y datos obtenidos de estudios relacionados. Para repetir este análisis, los autores recomiendan obtener atributos cuantitativos y cualitativos del mayor para cada una de las alternativas analizadas.

El puntaje asociado con la ventaja de cada alternativa debe obtenerse de la comparación de atributos con base en criterios establecidos. Tanto el criterio para comparar atributos como el puntaje dado a las ventajas obtenidas se determinan en la opinión del equipo responsable de la selección de alternativas. Un mayor conocimiento de los miembros del equipo sobre los atributos de las alternativas y los objetivos finales de la selección dará como resultado una mejor selección. Por otro lado, y habiendo determinado qué alternativa es la más ventajosa, la diferencia de costo, tanto en el costo inicial (costo requerido para la fabricación y ejecución) como de mantenimiento, le permitirá al tomador de decisiones final tomar la alternativa que mejor se adapte a los recursos disponibles. (Siempre se debe recordar que características son mejores alternativas en comparación con otras, independientemente del costo.

5. Conclusiones

Al comienzo del estudio, se plantearon las siguientes preguntas:

(1) ¿Es eficiente económicamente usar llantas de desecho en mezclas asfálticas en países en desarrollo? y (2) ¿Qué impactos ambientales y sociales se generan en la construcción de carreteras utilizando llantas de desecho?

En relación con la primera pregunta y a la luz de los resultados, recomendamos el uso de neumáticos de desecho en mezclas de asfalto por tres razones fundamentales. En primer lugar, el uso de caucho a partir de neumáticos de desecho en mezclas de asfalto permite una salida para un residuo de alto impacto y crecimiento continuo en los países desarrollados.

En segundo lugar, el uso de caucho en mezclas asfálticas mejora, entre otros factores, el mantenimiento de las carreteras, es decir, las características de mantenimiento se mantendrán durante más tiempo, lo que minimiza la inversión de recursos en reparaciones. Esto hace que la carretera, un producto que los usuarios perciben como un producto de alta calidad y valor, contribuya a la tendencia de generar valor que es una tendencia creciente en los países desarrollados.

En tercer lugar, considerando que la fabricación y ejecución de mezclas de asfalto son más costosas que las mezclas convencionales, los países en desarrollo con los mayores recursos deben tomar la iniciativa en estos procesos y lograr una optimización a lo largo del tiempo para que puedan ser aplicados por cualquier administración.

En relación con la segunda pregunta y como resultado de nuestro análisis, la mezcla con betún de caucho genera mejoras sustanciales en las áreas social y ambiental.

En el área social, la mejora se refleja en 1) la variabilidad del IRI que disminuye con el tiempo, lo que se traduce en una mayor comodidad y seguridad para los conductores; y 2) una minimización del ruido generado por los vehículos al conducir a lo largo de la ruta que puede ser una fuente de inconvenientes para las personas cuya ubicación se encuentra cerca de la carretera.

Ambientalmente, durante el ciclo de vida de la mezcla de asfalto hecha con betún de caucho, se logra una ligera reducción en la emisión de GEI; debido principalmente a la disminución en los volúmenes de materias primas utilizadas.

Finalmente, CBA es un método de toma de decisiones multicriterio fácil de usar que permite integrar perspectivas sociales, ambientales y económicas en la construcción de carreteras. La metodología puede ampliarse para elegir materiales, métodos constructivos y otras aplicaciones en la industria de AEC.

6. Agradecimientos

Los estudios de postgrado de Luis Arturo Salazar, Zulay Giménez y Rodrigo Herrera son financiados por el Gobierno de Chile, CONICYT-PCHA / Doctorado Nacional / 2016-21160819; 2016-21160571 y 2018-21180884 respectivamente. Los estudios de posgrado de Jhonattan Martínez son financiados por la Vicerrectoría de Investigación de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Además, Paz Arroyo cuenta con el respaldo del Centro para el Desarrollo Urbano Sostenible, CEDEUS (FONDAP N° 15110020).



7. Referencias

- Arroyo P., Tommelein I. D. & Ballard, G. (2015), Comparing AHP and CBA as Decision Methods to Resolve the Choosing Problem in Detailed Design. *Journal of Construction Engineering and Management*, 14(1), 04014063. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000915](http://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000915)
- Arroyo P., Fuenzalida C., Albert A. & Hallowell M. R. (2016), Collaborating in decision making of sustainable building design: An experimental study comparing CBA and WRC methods. *Energy and Buildings*, 128, 132–142. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.05.079>
- Arroyo P., Tommelein I. D. & Ballard G. (2015a), Comparing AHP and CBA as Decision Methods to Resolve the Choosing Problem in Detailed Design. *Journal of Construction Engineering and Management*, 14(1), 04014063. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000915](http://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000915)
- Arroyo P., Tommelein I. D. & Ballard G. (2015b), Selecting Globally Sustainable Materials: A Case Study Using Choosing by Advantages. *Journal of Construction Engineering and Management-ASCE*, 142(2), 1–10. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001041](http://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001041).
- Arroyo P., Tommelein I. D., Ballard G. & Rumsey P. (2016), Choosing by advantages: A case study for selecting an HVAC system for a net zero energy museum. *Energy and Buildings*, 111, 26–36. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.023>
- Azhar Butt A. (2014), Life Cycle Assessment of Asphalt Roads. KTH Royal Institute of Technology.
- BOE Gobierno de España. (2014), Artículo 542 Mezclas bituminosas tipo hormigón bituminoso.
- Calahorra M., Giménez Z., Herrera R. F., Martínez J. & Salazar L. A. (2016), Análisis de ciclo de vida de mezcla asfáltica con/sin caucho: estudio de caso. In *Encuentro Latinoamericano de Economía y Gestión de la Construcción (VII Elagec)*. (pp. 1–10). Bogotá.
- Caltrans. State of California Department of Transportation. (2003), Asphalt Rubber Usage Guide. Division of Engineering Services, Sacramento, 94612–95819.
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. (2007), Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas, 96.
- CEPSA & Universidad Politécnica de Cataluña. (2013), Vademécum.
- Department of Transportation. (2011). Department of County of Sacramento, 2013(January), 1–76. <http://doi.org/10.1525/sp.2007.54.1.23>.
- Feraldi R., Cashman S., Huff M. & Raahauge L. (2013), Comparative LCA of treatment options for US scrap tires: material recycling and tire-derived fuel combustion. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(3), 613–625. <http://doi.org/10.1007/s11367-012-0514-8>
- Fiksel J., Bakshi B. R., Baral A., Guerra E. & DeQuervain B. (2011), Comparative life cycle assessment of beneficial applications for scrap tires. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13(1), 19–35. <http://doi.org/10.1007/s10098-010-0289-1>
- Gosse C. A. & Clarens A. F. (2013), Quantifying the total cost of infrastructure to enable environmentally preferable decisions: the case of urban roadway design. *Environmental Research Letters*, 8(1), 15028.
- Gschösser F. & Wallbaum H. (2013), Life Cycle Assessment of Representative Swiss Road Pavements for National Roads with an Accompanying Life Cycle Cost Analysis. *Environmental Science & Technology*, 47(15), 8453–8461. <http://doi.org/10.1021/es400309e>
- Horvath A. (2004), A life-cycle analysis model and decision-support tool for selecting recycled versus virgin materials for highway applications. Final Report for RMRC Research Project, 23, 35.
- Huang Y., Bird R. N. & Heidrich O. (2007), A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(1), 58–73. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.02.002>
- Jung J.-S., Kaloush K. E. & Way G. (2002), Life Cycle Cost Analysis: Conventional Versus Asphalt-Rubber Pavements. Rubber Pavements Association.
- Kaloush K. E. & Biligiri K. P. (2011), Asphalt-Rubber Standard Practice Guide.
- Lee J., Edil T., Tinjum J. & Benson C. (2010), Quantitative Assessment of Environmental and Economic Benefits of Recycled Materials in Highway Construction. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2158, 138–142. <http://doi.org/10.3141/2158-17>
- Li, K. Zhang P., Crittenden J. C., Guhathakurta S., Chen Y., Fernando H., Torrens P. M. (2007), Development of a Framework for Quantifying the Environmental Impacts of Urban Development and Construction Practices. *Environmental Science & Technology*, 41(14), 5130–5136. <http://doi.org/10.1021/es062481d>
- Navarro Dupré N. (2013), Confección y Seguimiento de tramos de prueba de mezclas asfálticas con incorporación de polvo de caucho nacional de Neumáticos Fuera de Uso (NFU) mediante vía seca. Universidad de Chile.
- Quinn J. G. (1997), Environmental Chemistry of Benzothiazoles Derived from Rubber. *Environ. Sci. Technol.*, 31, 10, 2847–2853.
- Reger D., Madanat S. & Horvath A. (2014), Economically and environmentally informed policy for road resurfacing: tradeoffs between costs and greenhouse gas emissions. *Environmental Research Letters*, 9(10), 104020. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/104020>.
- Roberts J., Offler R. & Fanning M. (2004), Upper Carboniferous to Lower Permian volcanic successions of the Carroll–Nandewar region, northern Tamworth Belt, southern New England Orogen, Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 51(2), 205–232.
- Royano V., Valls S., Barra M. & Vázquez E. (2010), Estudio de hormigones con adición de polvo de neumático Fuera De Uso (NFU). In *Jornada de Recerca i Innovació a l'Escola de Camins*. Barcelona.
- Sánchez I. & de Solminihac, H. (1989), El IRI: un indicador de la regularidad superficial. *Revista de Ingeniería de Construcción*, (6), 1–16.
- Santero N. J., & Horvath, A. (2009). Global warming potential of pavements. *Environmental Research Letters*, 4(3), 34011.
- Santero N. J., Masanet E. & Horvath A. (2011), Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(9–10), 801–809. <http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.010>
- Santucci L. (2009), Rubber Roads: Waste Tires Find a Home. *Technology Transfer Program*. The University of California Pavement Research Center, UC Berkeley, 1(2), 1–12.
- Suhr J. (1999), The choosing by advantages decisionmaking system. Westport: Greenwood Publishing Group.
- Wang H. (2014), Life Cycle Assessment of Asphalt Pavement Maintenance. University of New Jersey.
- Wang T., Harvey J. & Kendall A. (2014), Reducing greenhouse gas emissions through strategic management of highway pavement roughness. *Environmental Research Letters*, 9(3), 34007.
- Way G. (2003), OFGC Meets CRM: where the rubber meets the rubber: 12 years of durable success. *Asphalt Rubber*, 49–63.

