



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

ESTUDIO DE EMISIONES DE CO₂ MEDIANTE UN ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON HULE MOLIDO DE NEUMÁTICO FUERA DE USO (NFU)

Katia Torres¹, Jorge Alarcón²

¹ Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México, katia2606@hotmail.com

² Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Michoacán, México, jorge.alarcon@umich.mx

Resumen

Se han estudiado las mezclas asfálticas con adición de hule molido de neumáticos fuera de uso NFU, demostrando potencial de aplicación por su comportamiento a fatiga, sin embargo, todavía están relativamente sub utilizadas. El objetivo de este trabajo es cuantificar y analizar los impactos ambientales de mezclas asfálticas con y sin adición de NFU bajo un proceso de adición semihúmedo con tecnologías RAR (*reacted and activated rubber*), para determinar la factibilidad de la introducción de alternativas distintas en los pavimentos sustentables; con base en un enfoque de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), basado en las Normas ISO 14040 y 14044; también se busca el mejoramiento en la eficiencia y el desempeño ambiental de los procesos de adición de NFU, para favorecer la economía circular.

Las mezclas asfálticas analizadas se denominan: Mezcla A, Densa PG 64-22 diseño Marshall (sin adición de NFU), mezcla B, mezcla tipo SMA 16 PMB con fibras (sin adición NFU) y las mezclas C y D son del mismo tipo que las anteriores únicamente modificadas con NFU. El alcance de los sistemas toma en cuenta todo el ACV de la carpeta asfáltica: desde la primera extracción de materias primas, su producción desde planta, la energía que se consume, traslados y disposición final del material tendido en obra 10 años después. De los cuatro sistemas evaluados se observó que las mezclas C y D obtuvieron mejor desempeño ambiental en comparación de la mezcla B y en último lugar la mezcla A. La mezcla asfáltica con menor emisión de CO₂ resulta ser la mezcla D tipo SMA con adición de NFU, gracias a la maquinaria y tecnología de alta especialización que es capaz de unificar varios procesos de producción en uno y con esto mejorar las deficiencias que se tienen en los procesos de adición de NFU.

Palabras Clave: Sustentable, Análisis de ciclo de vida, Tecnologías RAR, mezcla asfáltica.

1 Introducción

La construcción, explotación, mantenimiento y uso de la infraestructura vial son responsables de la emisión de grandes cantidades de carbono al medio ambiente, es por esto que asociaciones a nivel internacional han mostrado su interés en la necesidad de reducir las emisiones de CO₂ en la construcción de los pavimentos flexibles, manteniendo la movilidad, crecimiento económico y aceptando la necesidad de adoptar prácticas más sostenibles en todos los aspectos de su trabajo; buscando continuamente la información técnica y la orientación más reciente para ayudar a mejorar esas prácticas [1]; ya que el transporte por carretera es vital para el funcionamiento de la sociedad y, en un futuro previsible, se espera que siga siendo el modo de transporte dominante para personas y mercancías. En el XXVI Congreso de la carretera Praga 2023, se dieron a conocer los datos sobre las



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

emisiones de CO₂ procedentes de la quema de combustible por cada sector a nivel mundial, como se observa en la Figura 1 donde se expresa un 31.2% de emisiones provenientes del transporte en general y dentro de ese sector un 71.1% proveniente de las carreteras [2].

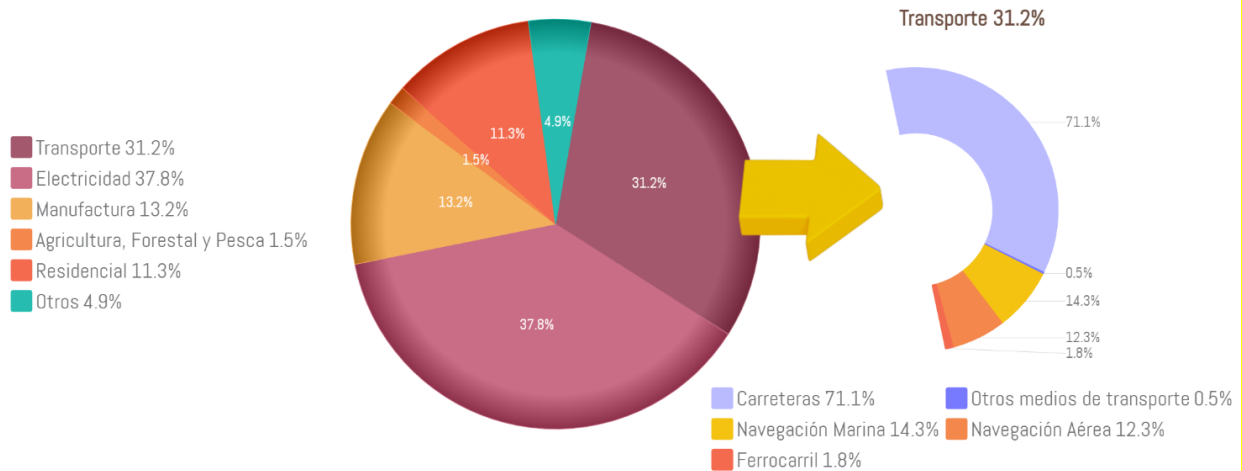


Figura 1. Emisiones de CO₂ procedentes por cada sector

El conocimiento de las consecuencias no reversibles y perjudiciales del cambio climático ha dado lugar a la aceptación mundial de la necesidad de reducir las emisiones de carbono en todos los aspectos de la vida humana, particularmente hablando del sector carretero. Se ha estudiado el comportamiento mecánico de los pavimentos flexibles con adición de nuevos materiales con propiedades más complejas. Uno de estos materiales es el hule molido de neumáticos fuera de uso NFU, el cual, ha demostrado en diversas investigaciones que tiene un alto potencial de aplicación en pavimentos por su aprobado comportamiento a fatiga y mejora en las condiciones ambientales, sin embargo, todavía está relativamente sub utilizado, de acuerdo con cifras del International Rubber Study Group.

A pesar de la atribución sustentable que aporta el uso de NFU en una mezcla asfáltica, en la actualidad sigue existiendo el cuestionamiento sobre la cantidad de emisión de CO₂ en la producción de este tipo de mezclas. Para este trabajo se seleccionó en el análisis, la Unidad Funcional que se define como la construcción de la carpeta asfáltica de un tramo de 1 km-carril de largo y 10 m de ancho, sin curvas, salidas o incorporaciones, durante un periodo de estudio de 10 años.

1.1 Justificación

Dado que un transporte eficiente es vital para el crecimiento nacional, las acciones para reducir las emisiones de carbono no deben repercutir negativamente en el desarrollo y mantenimiento de infraestructuras viarias de alta calidad es por esto y tomando en cuenta que el 31.2% de las emisiones de CO₂ a nivel mundial son producidas por el sector de transporte de acuerdo con Malléjacq [3] es de suma importancia identificar la acciones que se están llevando a cabo en la actualidad, así como nuevas opciones potenciales para avanzar hacia la neutralidad del carbono.

En la producción de mezcla asfáltica adicionando hule de llanta molido encontramos diversas técnicas de adición que han demostrado un buen comportamiento mecánico de la mezcla, sin embargo, se carece sobre la evidencia ambiental en la emisión de CO₂ que implica cada proceso [4] y es importante mencionar que, para considerar la multiplicidad de factores y criterios en la toma de decisión se debe tener una visión global de todo el ciclo de vida de la carretera, ya que estudios como el de Santero *et al.* [5], han señalado que es necesario un enfoque de análisis de ciclo de vida para



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

proporcionar una evaluación profunda de los impactos ambientales de un producto o proceso y para reducir el riesgo de consecuencias negativas no deseadas. En este sentido, Lee y Cols [6] y Wayman y Cols [7] han sustentado que, la metodología del ACV debe basarse en una comprensión de todos los procesos relacionados con el la carpeta asfáltica, incluida la extracción y procesamiento de materiales, la construcción, la operación, la preservación, la rehabilitación y la eliminación que abarcan todas las fases del ciclo de vida del pavimento.

1.2 Descripción del problema

La utilización de polvo de neumático reciclado en las mezclas asfálticas ha dejado hace años de ser una novedad, ya que en la actualidad existe gran cantidad de información, manuales y especificaciones que permiten diseñar distintos tipos de pavimentos con los diversos procesos y técnicas de adición que se han desarrollado desde los primeros inicios de estas investigaciones hace más de 20 años en España y más de medio siglo desde su comienzo en Estados Unidos.

A pesar de la atribución sustentable que aporta el uso de neumático fuera de uso NFU en una mezcla asfáltica, en la actualidad sigue existiendo el cuestionamiento sobre la cantidad de emisión de CO₂ que se produce con este tipo de mezclas, tratándose de toda la variabilidad de procesos de adición de NFU en la mezcla asfáltica, ya sea por vía seca en los agregados directamente, de manera húmeda en la modificación del asfalto, semi húmeda llevando a cabo la interacción de los materiales por la despolimerización temprana del caucho a altas temperaturas (*terminal blend*) o utilizando las tecnologías RAR (*reacted and activated rubber*); esto con el fin principalmente de evaluar y comparar la opción que ofrezca resultados mínimos en las emisiones de CO₂ mediante un análisis cuantitativo y comparativo de la de cada proceso, utilizando un análisis de ciclo de vida de la mezclas asfálticas con NFU, desde la producción de los agregados, la energía que estos consumen, los procesos de producción, adición del NFU, traslados y la puesta en obra.

Por todo lo mencionado anteriormente, la presente investigación busca mostrar elementos sustentados que propicien a una economía circular en los pavimentos asfálticos con el uso de materiales reciclados, teniendo elementos que muestren alternativas con impactos ambientales positivos, como lo es utilizar productos en las mezclas asfálticas que den como resultado una menor emisión de CO₂ al ser producidas.

1.3 Hipótesis

Las mezclas asfálticas modificadas con NFU, empleando un proceso con tecnologías RAR, producen una menor emisión de CO₂ al ambiente en comparación con las técnicas de adición en seco, húmedo y semihúmedo. Además de un notable ahorro en emisión de CO₂ comparado con un proceso convencional de mezcla asfáltica en caliente sin adición.

1.4 Objetivo

Dada la importancia del cuidado ambiental en los pavimentos, el objetivo general del presente estudio se centra en analizar el efecto de emisión de CO₂ que presentan las mezclas asfálticas con adición de hule molido de neumático fuera de uso NFU, utilizando metodologías que muestren el ahorro comparativo de las emisiones de CO₂ producidas en cada tipo de tecnologías utilizadas para la adición de NFU en las mezclas asfálticas.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

2 Marco teórico

En este trabajo se mencionan tres grandes conceptos en general: las mezclas asfálticas con adición de hule molido de NFU, la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) con la que se hará el estudio y la variabilidad de procedimientos existentes para incorporar el NFU dentro de la mezcla. Estos conceptos constituyen la base sobre la cual se va a sustentar metodológicamente la investigación realizada, la subdivisión de temas en este capítulo se llevará a cabo siguiendo el orden y la estructura mostrada en la Figura 2.

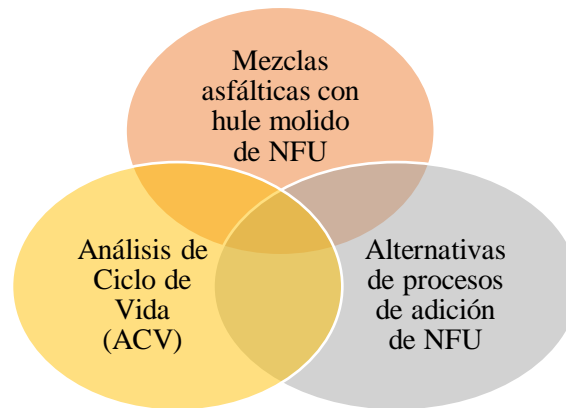


Figura 2. Estructura del marco teórico

2.1 Mezclas asfálticas con hule molido de NFU

Utilizar mezclas asfálticas modificadas con caucho en pavimentos ha incluido beneficios en diferentes frentes como el impacto ambiental mediante el uso de millones de llantas de desecho [8], e incluso reducir el ruido de los pavimentos [9]; además, incrementa la elasticidad del ligante en las mezclas asfálticas [10] ya que estos aglutinantes modificados tienen mejores propiedades de rendimiento que las de los aglutinantes base.

Los neumáticos, como se conocen para su uso automotriz, su esqueleto estructural está formado por tres componentes principales: compuesto elastómero, tela y acero; mientras que el caucho forma el revestimiento [11]. El hule o caucho que forma el cuerpo de los neumáticos, de forma natural es un material pegajoso y que puede deformarse al calentarse y hacerse frágil cuando se enfría, por lo que la razón de la deformación elástica de las llantas se debe al proceso de vulcanización.

De acuerdo con Arroyo *et al.* [12] las emisiones están directamente ligadas al consumo de energía, tanto en el transporte del material como en la producción de la mezcla asfáltica, las investigaciones mencionadas anteriormente muestran 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.

2.2 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

En la producción de mezcla asfáltica y construcción de pavimentos flexibles, es importante dividir las fuentes de emisión de GEI considerando las emisiones por consumo de energía y por volatilización o envejecimiento. Muchos investigadores han realizado trabajos relacionados con los métodos de cálculo de emisión de CO₂ durante la construcción de pavimentos asfálticos. Algunos como Peng *et*



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

al. [13] han empleado el método convencional de Análisis de Ciclo de Vida (LCA, por las siglas en inglés de *Life Cycle Assessment*) o ACV, para realizar la división y definición de etapas, así como calcular las emisiones de CO₂ en cada una de ellas. “El ACV es una herramienta que permite evaluar los impactos ambientales de productos o servicios de una forma global porque considera todas las etapas del ciclo de vida, desde la extracción de las materias primas hasta su disposición final y todos los vectores involucrados” [14].

La Organización Internacional de la Estandarización (ISO, por sus siglas en inglés) tiene normado el ACV mediante las normas ISO 14040 y 14044 (ISO, 2006) [15]. En estas normas se establece que el ACV consta de cuatro fases (Figura 3):

1. Definición de objetivo y alcance
2. Análisis del inventario del Ciclo de Vida
3. Evaluación del impacto del Ciclo de Vida
4. Interpretación del Ciclo de Vida

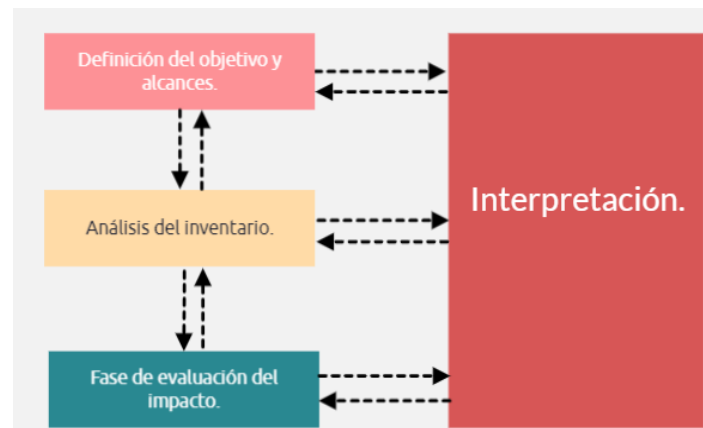


Figura 3. Estructura de un Análisis de Ciclo de Vida, adaptada de ISO 14040:2006

En la primera etapa se tienen que analizar factores como el objetivo, la función, unidad funcional, descripción y límite de los sistemas o escenarios a analizar, las metodologías de evaluación de impacto ambiental y categorías de impacto. Después, en la segunda fase se obtienen las entradas y las salidas de cada uno de los procesos desglosados en el paso anterior, ya sea de manera medida, calculada o estimada. Esta información es obtenida de artículos de investigación recientes, reportes o encuestas en el sitio de los procesos, se debe procurar siempre que los datos obtenidos sean representativos. La tercera fase consta en relacionar las entradas y salidas con los potenciales impactos ambientales causados, determinando las asociaciones que existen entre los datos del inventario y las categorías de impacto específicas. Para su correcta comparación, los impactos por categoría deben de ser multiplicados por un factor de caracterización, para formar los indicadores de ciclo de vida.

En la etapa de interpretación se concluye el procedimiento para realizar un ACV y consta en razonar la procedencia de las discrepancias de impactos entre los productos o servicios analizados y concluir; en el caso de tratarse de una comparación, qué opción genera menores impactos ambientales.

Existen tres categorías de ACV que componen la evaluación integral de impactos: Análisis de Ciclo de Vida Ambiental, Análisis de Ciclo de Vida Económico y Análisis de Ciclo de Vida Social. Para los alcances de este trabajo sólo se va a considerar el primer tipo de análisis, el cual es suficiente para sustentar la toma de decisiones de manera informada y responsable sobre el tema que se plantea.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

2.3 Alternativas de proceso de adición de NFU en las mezclas asfálticas.

Algunos estudios iniciales en la década de los cincuenta involucraron la adición de caucho natural con el objetivo de aprovechar su flexibilidad y lograr una superficie del pavimento eficiente y duradera, obteniendo resultados nulos o con poco beneficio y fue hasta la década de los sesenta que se desarrollaron estudios con caucho para mejorar estas prácticas. Tiempo después, analizando las diversas técnicas de adición de NFU que se tienen aceptadas, las más antiguas son los procesos por vía seca y húmeda, el proceso seco es donde el NFU se adiciona directamente a la mezcla en caliente siendo usado como parte del agregado fino y se adiciona primeramente con los agregados pétreos cuando estos alcanzan cierta temperatura para después colocar el asfalto. Una desventaja es que únicamente puede ser usado para mezclas asfálticas en caliente con granulometrías densas, abiertas o discontinuas por ser un proceso en el que no se modifica de manera completa el ligante.

Desde hace más de 20 años se han estudiado y creado distintos procesos de adición de NFU en las mezclas asfálticas, iniciando con la vía seca, incorporando el caucho en partículas pequeñas de granulometría similar a la de los agregados y mezclándolos con estos mismos para después añadir el asfalto y seguir con el proceso de producción de la mezcla, sin embargo trabajando en el principal problema con el caucho del neumático que se tiene en este proceso, su estructura molecular de su composición o vulcanización forma cadenas carbono-azufre de gran resistencia y con gran dificultad para poder romperlas, seguido de esto se obtuvo un proceso por vía húmeda, el cual se basa en llevar el asfalto a altas temperaturas (por encima de 170 °C) permitiendo la disolución parcial de estas partículas de polvo de neumático llevando a cabo un proceso conocido en la industria como “digestión”, consiguiendo unir el polvo de neumático mediante un enlace químico con el asfalto. Ya con el paso del tiempo e investigaciones más recientes, bajo la necesidad de mejorar los procesos de adición de NFU llevo a los investigadores a una opción con un proceso semi húmedo o lo que nombraron tecnologías RAR, que por sus siglas en inglés se refiere a un aditivo potenciador elástico del asfalto, logrando que se pueda agregar fácilmente el polvo de neumático en la fabricación de mezcla asfáltica en caliente, facilitando su transporte, almacenamiento e incorporación dentro de la mezcla [10].

En el proceso húmedo, el caucho actúa modificando el ligante, como desventaja también relacionada al tiempo es que este proceso requiere un equipo adicional en planta para el mezclado y almacenamiento, mayor energía para calentar la mezcla a mayores temperaturas con tiempos de reacción prolongados. La proporción de NFU depende del ligante, por su peso y contenido total de la mezcla, cuando estos son mezclados, el NFU reacciona de manera que se hincha y ablanda por la misma absorción de aceites aromáticos. El grado de modificación del asfalto depende de factores como el tamaño y textura que tenga el NFU triturado y pulverizado, la proporción, tipo de cemento asfáltico, tiempo y temperatura de mezclado y el uso de aditivos, entre otros.

El proceso húmedo se llevó a cabo para estudiar la variación en las propiedades del cemento asfáltico al ser mezclado con las partículas de caucho y su comportamiento en las mezclas asfálticas. Este proceso se realizó siguiendo las especificaciones típicas del departamento de Transporte de California en Estados Unidos CALTRANS [16] y de acuerdo con esa investigación la viscosidad Brookfield a 163 °C del asfalto ya modificado debe de encontrarse entre los 1500 y 3000 cPs, buscando menores tiempos de reacción y temperaturas de mezclado.

3 Desarrollo y análisis de ciclo de vida de las mezclas asfálticas

La primera fase en el ACV corresponde en realizar un inventario, para esto fue necesario elaborar un diagrama de flujo general de las etapas del proceso en estudio (Figura 4) y siendo este mismo adaptado



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

en cada uno de los sistemas y con las dos metodologías que manejan los distintos softwares utilizados en este trabajo, en esta fase se identifican y cuantifican todas las entradas de material, energía y recursos, las salidas y el desperdicio final.



Figura 4. Diagrama de flujo para inventario del ACV

Para apoyar la fase de Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida (EICV) es de mucha ayuda recurrir a software especializado, por lo cual se deben analizar distintas herramientas computacionales que sirven en la modelación de los resultados de ciclo de vida e incluyen bases de datos que ayudan a llenar carencias de información que se presentan en el Inventario de Ciclo de Vida (ICV) [14], en este trabajo se definió trabajar con 2 softwares distintos y comparar el análisis entre ellos.

3.1 Metodología con software UmbertoLCA+

Es un software creado en 1998 por el Instituto de Informática Ambiental de Hamburg (IFU Hamburg) Figura 5, se seleccionó este software ya que es una de las soluciones líder para ACV, recomendado por expertos de la industria, consultoría, investigación y educación, es una herramienta capaz de integrar datos del inventario desde Excel de forma sencilla, así como sincronizar y actualizar automáticamente al editarlo, las bases de datos utilizadas en el ACV fueron integradas de Ecoinvent y GaBi.

Iniciando con el inventario, se estableció un modelo del proceso con todas las conexiones entre las diferentes etapas, las entradas, salidas, subproductos y residuos (Figura 5). Partiendo de que las mezclas analizadas son producidas en una planta de producción de mezcla asfáltica los flujos de materiales incluyeron el consumo de energía eléctrica, diésel o combustible para la maquinaria, gas natural, materias primas como agregados, cemento asfáltico y los aditivos correspondientes a cada tipo de mezcla y flujos de salida como la mezcla asfáltica, las emisiones a la atmosfera y los desperdicios.



**Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.**

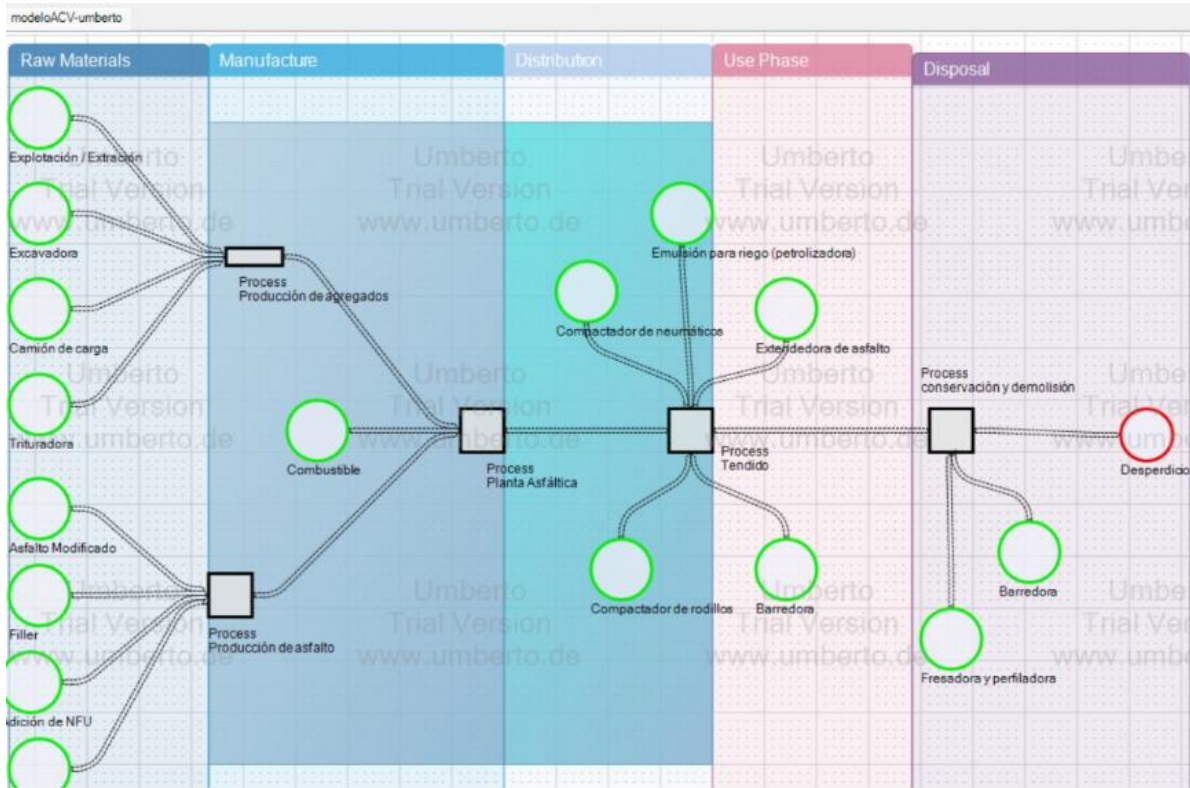


Figura 5. Diagrama de flujo con las principales fases de cada proceso en Software UMBERTO.

Finalmente obteniendo los resultados ambientales en unidad de kg CO₂ eq de cada una de las 4 mezclas asfálticas analizadas por tonelada tenemos:

Tabla 1. Resultados ACV con software UMBERTO.

Escenario	GWP (kg CO ₂ eq)
A) Densa PG 64-22 diseño Marshall, densidad media de 2,33 tn/m ³ (sin adición de NFU)	241.08
B) Mezcla tipo SMA 16 PMB con fibras, densidad media de 2,33 tn/m ³ (sin adición NFU)	254.11
C) Densa PG 64-22 diseño Marshall, densidad media de 2,33 tn/m ³ (con adición de NFU)	211.67
D) Mezcla tipo SMA 11, densidad media de 2,33 tn/m ³ (con adición NFU)	202.89



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

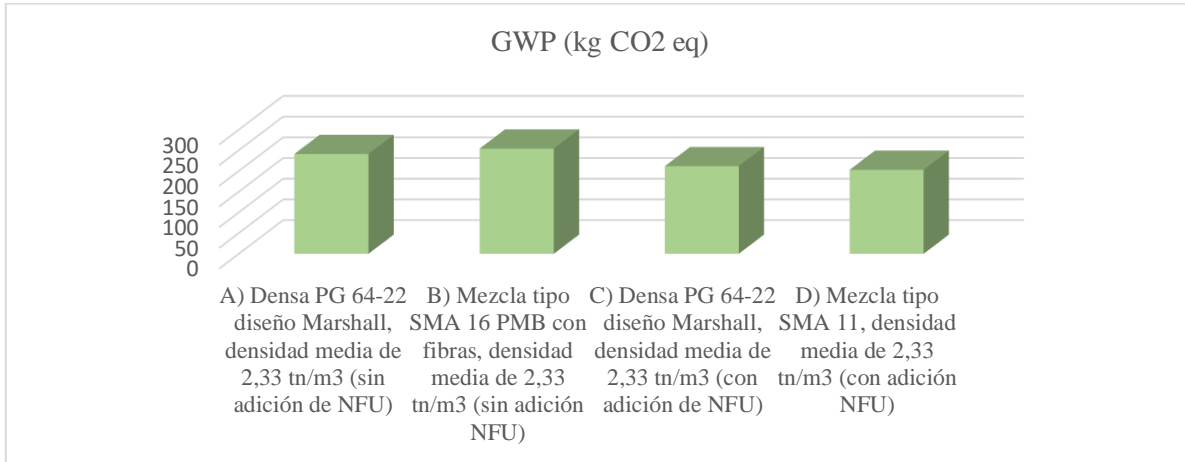


Figura 6. Análisis comparativo de los Resultados ACV.

3.2 Metodología con software SEVE

Dentro del ACV se proyectan en la etapa de inventario todas las entradas y salidas con apoyo del software SEVE eco - comparador, validado por la Administración francesa como eco-comparador de soluciones constructivas para carreteras y definido por las normas UNE EN ISO 14040 y UNE EN ISO 14044, la lista de indicadores medioambientales está tomada de la norma UNE EN 15 804. El software SEVE está asociado a una base de datos de materiales, equipos, productos y a una base de datos de fórmulas específicas de cada planta de producción. Así, SEVE puede calcular los indicadores ambientales de los proyectos en función del costo ambiental específico de los recursos presentes en esa base de datos, calculando en función de criterios para el caso de las mezclas asfálticas:

- i) Distancia y tipo de transporte de las materias primas a la planta o a la obra o de residuos desde la obra a su lugar de depósito.
- ii) Cantidades empleadas.
- iii) Temperatura de producción del aglomerado.
- iv) Tipo de combustible utilizado en la planta.
- v) Humedad de las materias primas.
- vi) Contenido de asfalto en el asfalto recuperado RAP.
- vii) Tiempo de uso de la maquinaria en la obra.

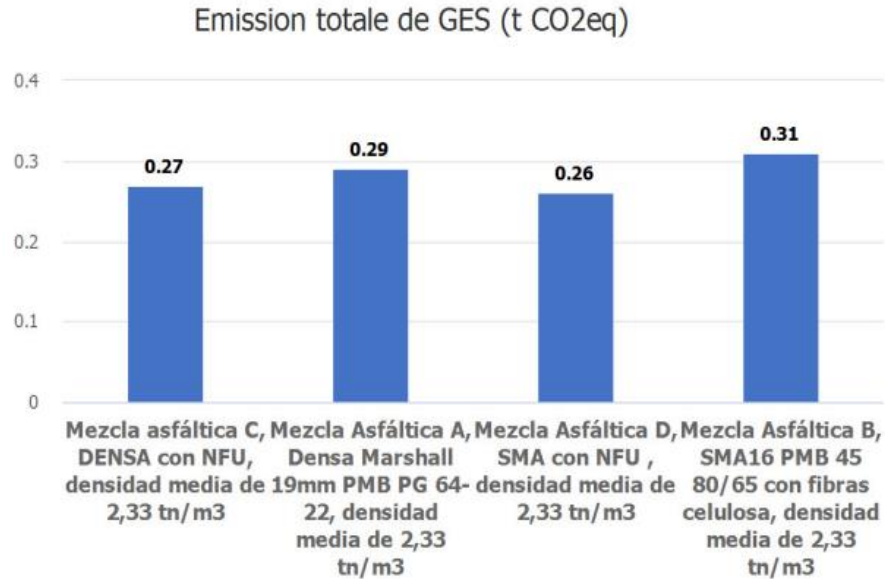


Figura 7. Etapas del proceso de análisis SEVE (SEVE TP, 2024)



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

Realizando el modelo y estudio se obtuvieron los siguientes resultados en las cuatro mezclas analizadas:



4 Resultados

La aplicación del AVC requiere de una adaptación específica para cada escenario que se quiera estudiar, así como base de datos y softwares confiables y validados, para el caso de mezclas asfálticas el análisis debe basarse en la determinación de un eco indicador que permita comparara desde un punto de vista ambiental las distintas opciones de composición de la mezcla, desde fabricación hasta puesta en obra, se consideró como mas apropiado el kg de CO₂ equivalente producido (que incluye todas las emisiones) por tonelada de mezcla asfáltica fabricada y colocada.

El objetivo de haber desarrollado la presente metodología de ACV es la de su aplicación al empleo de la adición de NFU en las mezclas asfálticas, a manera de conclusiones podemos ver que en el análisis comparativo y utilizando dos softwares distintos se obtuvieron resultados similares, donde se aprecia que la mezcla D y C (con adición) muestran mejor desempeño ambiental, esto gracias a la maquinaria y tecnología de alta especialización que es capaz de unificar varios procesos de producción en uno y con esto mejorar los impactos negativos ambientales que se pueden tener en la producción de mezclas asfálticas.

5 Referencias

[1] Federal Highway Administration (2022). FHWA-HIF-15-002 US Department of Transportation. Towards Sustainable Pavements Systems: A Reference Document.

[2] Lamb M. (2023). PIARC Report on carbon neutrality in the road sector. Special session on carbon neutrality. XXVII World Road Congress Prague 2023.

[3] Malléjacq P. (2023). PIARC Sesión de conclusiones. Special session on carbon neutrality. XXVII World Road Congress Prague 2023.



Asociación Mexicana
del Asfalto, A. C.

- [4] Sampedro A. (2019). Determinación de la huella de carbono de las mezclas asfálticas en caliente y sus técnicas sostenibles. Madrid, España. Trabajo de investigación. VII Edición, VII premio JAFAC.
- [5] 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>
- [6] 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>
- [7] Wayman, M., Andersson-Sköld, Y., Bergman, R., Huang, Y., Parry, T., Raaberg, J., Enell, A., 2012. *Life Cycle Assessment of Reclaimed Asphalt*.
- [8] Bahia, H. U., y Davies, R. (1995). *Factors controlling the effect of crumb rubber on critical properties of asphalt binders (with discussion). Journal of the Association of Asphalt paving Technologists*, 64.
- [9] Zalman, L., y Spacek, P. (2012). *Hot mix asphalt rubber material. Asphalt Rubber*.
- [10] Sousa J., Vorobiev A., Geoffrey M., Ishai I., (2013). *Reacted and Activated Rubber, Elastomeric Asphalt Extender. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Vol 2371, Numero 1.* <https://doi.org/10.3141/2371-04>.
- [11] Rahman, M. (2004). *Characterisation of dry process crumb rubber modified asphalt mixtures. University of Nottingham: (Doctoral dissertation)*.
- [12] 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>
- [13] Peng, B., Tong, X., Cao, S., Li, W., and Xu, G. (2020). *Carbon Emission Calculation Method and Low-Carbon Technology for Use in Expressway Construction*. April.China Recuperado de <http://www.mdpi.com/journal/sustainability>,
- [14] Güereca, L. P., Juárez-López, C. R., & Ossa-López, A. (2014, October). Evaluación comparativa de los impactos ambientales de dos tipos de pavimentos. 104, 18–20.
- [15] ISO. (2006). *ISO 14040-Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework. International Organization for Standardization*, 3, 20. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.01.007>
- [16] Caltrans. *State of California Department of Transportation. (2003), Asphalt Rubber Usage Guide. Division of Engineering Services, Sacramento.*