

**EVALUACIÓN DE LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DEBIDO
A LA PRODUCCIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA FRENTE A LA
MEZCLA ASFÁLTICA CALIENTE CONVENCIONAL**

OSCAR EDUARDO REY TRIANA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA AMBIENTAL
MAESTRIA EN QUIMICA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2017

**EVALUACIÓN DE LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DEBIDO
A LA PRODUCCIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA FRENTE A LA
MEZCLA ASFÁLTICA CALIENTE CONVENCIONAL**

OSCAR EDUARDO REY TRIANA

**Trabajo de Aplicación para optar por el título de Magister en Química
Ambiental**

Directores:

ANGELA MARCELA MONTAÑO DE GONZÁLEZ, Química Ph.D.

FREYS JULIO SERRANO, Químico, M.Sc.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE QUÍMICA AMBIENTAL

MAESTRIA EN QUIMICA AMBIENTAL

BUCARAMANGA

2017

AGRADECIMIENTOS

A la doctora ANGELA MARCELA MONTAÑO y al maestro FREYS JULIO SERRANO por su paciencia y apoyo a la realización de este trabajo de aplicación.

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, al director de la maestría en Química Ambiental, el doctor HERMINSUL DE JESÚS CANO CALLE por su colaboración y disposición para con los estudiantes de posgrado.

A toda la familia CORASFALTOS por la oportunidad brindada.

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN | 15 |
| 1. OBJETIVOS..... | 18 |
| 1.1 OBJETIVO GENERAL | 18 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 18 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 19 |
| 2.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS | 19 |
| 2.1.1 Cemento asfáltico: | 19 |
| 2.1.2 Agregados pétreos:..... | 19 |
| 2.2 PRODUCCIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA..... | 20 |
| 2.3 MEZCLAS TIBIAS..... | 21 |
| 2.4 Emisiones de gases contaminantes..... | 23 |
| 2.5 NORMATIVIDAD | 23 |
| 2.6 ESTADO DEL ARTE..... | 24 |
| 2.7 DEFINICIONES | 33 |
| 3. METODOLOGÍA DEL TRABAJO DE APLICACIÓN | 40 |
| 3.1 TRABAJO DE LABORATORIO..... | 41 |
| 3.2 TRABAJO EN PLANTA | 42 |
| 3.3 CÁLCULOS..... | 44 |
| 3.4 ANÁLISIS COMPARATIVO | 44 |
| 3.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS..... | 45 |
| 3.6 CONCLUSIONES | 45 |
| 3.7 RECOMENDACIONES RESPECTIVAS | 45 |
| 4. RESULTADOS..... | 46 |
| 4.1 DEFINICIÓN DEL OBJETIVO Y EL ALCANCE | 46 |
| 4.2 ANÁLISIS DEL INVENTARIO | 49 |
| 4.3 EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL | 56 |
| 4.4 INTERPRETACIÓN | 59 |
| 4.5 PERFIL AMBIENTAL | 60 |

5. CONCLUSIONES 66
6. RECOMENDACIONES 67
ANEXOS 79

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para actividades industriales a condiciones de referencia (25°C y 760 mm Hg) con oxígeno de referencia del 11%. Resolución 909 de 2008. Tabla 1 del artículo 4..... | 24 |
| Tabla 2. Estado del arte de publicaciones de Análisis de ciclo de vida aplicado a las mezclas tibias desde 1996 a 2010..... | 27 |
| Tabla 3. Categorías de Impacto Ambiental Típicas. | 36 |
| Tabla 4. Categorías de Impacto seleccionadas. | 37 |
| Tabla 5. Propiedades de las mezclas a trabajar | 43 |
| Tabla 6. Balance de masa para el mezclador de la planta 1 mezcla caliente. | 49 |
| Tabla 7. Balance de masa para el intercambiador de calor de la planta 1 mezcla caliente | 49 |
| Tabla 8. Balance de masa para el secador de la planta 1 mezcla caliente... | 50 |
| Tabla 9. Balance de masa para el mezclador de la planta 1 mezcla tibia..... | 50 |
| Tabla 10. Balance de masa del intercambiador de calor de la planta 1 mezcla tibia | 50 |
| Tabla 11. Balance de masa del secador de la planta 1 mezcla tibia..... | 51 |
| Tabla 12. Balance de masa para el mezclador de la planta 2 mezcla caliente | 51 |
| Tabla 13. Balance de masa para el intercambiador de calor para la planta 2 mezcla caliente | 51 |
| Tabla 14. Balance de masa para el secador de la planta 2 mezcla caliente. | 52 |
| Tabla 15. Balance de masa para el mezclador de planta 2 mezcla tibia. | 52 |
| Tabla 16. Balance de masa para el intercambiador de calor de la planta 2 mezcla tibia | 52 |
| Tabla 17. Balance de masa para el secador de la planta 2 mezcla tibia. | 53 |
| Tabla 18. Consumos energéticos para los secadores: | 53 |

| | |
|---|----|
| Tabla 19. Consumos energéticos para los intercambiadores de calor:..... | 53 |
| Tabla 20. Gases medidos en planta. | 54 |
| Tabla 21. Resultados de las emisiones medidas en la planta 1..... | 56 |
| Tabla 22. Resultados de las emisiones medidas en la planta 2..... | 57 |
| Tabla 23. Consumo de combustible..... | 57 |
| Tabla 24. Consumos energéticos: | 57 |
| Tabla 25. Caracterización para la planta 1 (%). | 58 |
| Tabla 26. Caracterización para la planta 2 (%). | 58 |
| Tabla 27. Indicadores de impacto de la planta 1..... | 65 |
| Tabla 28. Indicadores de impacto de la planta 2..... | 65 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 1. | Diagrama del proceso de producción de mezcla asfáltica. | 21 |
| Figura 2. | Tipos de tecnologías de las mezclas tibias. | 22 |
| Figura 3. | Fases del Análisis de Ciclo de Vida (ISO 14040:2007) | 34 |

LISTA DE DIAGRAMAS

| | |
|--|----|
| Diagrama 1. Diagrama General del Macroproyecto. | 40 |
| Diagrama 2. Esquemático de la metodología a trabajar..... | 41 |
| Diagrama 3. Condensación del proceso (Elaborado por el autor)..... | 48 |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|---|----|
| ANEXO A. ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL LIGANTE ASFÁLTICO..... | 79 |
| ANEXO B. ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS..... | 80 |
| ANEXO C. ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS. | 81 |
| ANEXO D. EQUIPOS DE MEDIDA DE LOS CONTAMINANTES..... | 82 |
| ANEXO E. FOTOS DE LA PLANTA 1 Y LA PLANTA 2:..... | 85 |

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA REDUCCIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DEBIDO A LA PRODUCCIÓN DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA TIBIA FRENTE A LA MEZCLA ASFÁLTICA CALIENTE CONVENCIONAL*

AUTOR: REY TRIANA OSCAR EDUARDO**

PALABRAS CLAVE: Mezcla asfáltica tibia, aditivo químico, Análisis de Ciclo de Vida.

DESCRIPCIÓN:

El trabajo consistió en la evaluación de una mezcla asfáltica tibia comparada con la mezcla asfáltica caliente convencional, las dos mezclas fueron diseñadas con la metodología SUPERPAVE, además son del Tipo II, mezcla densa en caliente, de acuerdo a la clasificación de INVIAS, el nivel de tránsito es de alto módulo.

El análisis comparativo se realizó utilizando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y utilizando el software SIMAPRO 7.1 para la construcción de los perfiles ambientales y la determinación de los indicadores de las diferentes categorías de impacto potencial asociadas a las emisiones medidas.

En base a las mediciones directas, la recolección de datos de entradas y salidas en el proceso en planta y datos heurísticos, se construyeron los balances de masa y energía necesarios que fueron posteriormente ingresados al software en mención.

Para el ACV se tomó como unidad fundamental 1 tonelada de mezcla y los límites fueron de la “puerta” a la “puerta” (gate to gate), por lo que solo se tomó el proceso de producción en planta. La aditivación fue de tipo químico, se agregó un 1% de aditivo al asfalto de la mezcla tibia.

Los resultados mostraron que la mezcla asfáltica tibia reduce el impacto ambiental potencial en todas las categorías de impacto ambiental evaluadas, también es apropiada para la tecnología con la cual se cuenta en el país, no requiere la utilización de equipos adicionales. Reduce considerablemente los humos favoreciendo así la calidad de vida de los trabajadores, mostró significativa reducción en las emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs), Hidrocarburos Totales (HCTs) y Material Particulado (MP).

*Trabajo de postgrado en Maestría en Química Ambiental

**Facultad de Ciencias. Escuela de Química Ambiental. Directora: Dra. Angela Marcela Montaña Angarita. Codirector: Msc. Freys Julio Serrano.

RESUME

TITLE: EVALUATION OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT REDUCTION DUE TO THE PRODUCTION OF A WARM MIX ASPHALT AGAINST THE CONVENTIONAL HOT ASPHALT MIX *

AUTHOR: REY TRIANA OSCAR EDUARDO **

KEY WORDS: Warm Mix Asphalt, chemical additive, Life Cycle Assessment.

DESCRIPTION:

The work consisted in the evaluation of a warm asphalt mixture compared to the conventional hot asphalt mix, the two mixtures were designed with the SUPERPAVE methodology, in addition they are Type II, dense hot mix, according to the classification of INVIAS, the level Transit is of high modulus.

The comparative analysis was performed using the Life Cycle Analysis (LCA) methodology and using the SIMAPRO 7.1 software for the construction of the environmental profiles and the determination of the indicators of the different categories of potential impact associated with the measured emissions.

Based on direct measurements, data collection of inputs and outputs in the plant process and heuristics data, the necessary mass and energy balances were built and later entered into the software in question.

For the LCA, 1 ton of mixture was taken as the fundamental unit and the limits were from "gate" to "gate", so only the production process in plant was taken. The additive was of the chemical type, a 1% additive was added to the asphalt of the warm mixture.

The results showed that the warm mix asphalt reduces the potential environmental impact in all evaluated environmental impact categories, is also appropriate for the technology in the country, does not require the use of additional equipment. It reduces considerably the fumes thus favoring the quality of life of the workers, showed a significant reduction in the emissions of Volatile Organic Compounds (VOCs), Total Hydrocarbons (HCTs) and Particulate Material (PM).

*Work Master Degree in Environmental Chemistry.

**Faculty of Sciences. School of Environmental Chemistry. Director: Phd. Angela Marcela Montaña Angarita. Co-directors: Msc. Freys Julio Serrano.

INTRODUCCIÓN

Debido a la preocupación de los pueblos por el futuro del medio ambiente, se han dado una serie de tratados sobre asuntos ambientales. En 1954 se suscribió la Convención Internacional para la Prevención de la Contaminación por Petróleo en los Mares. En 1960 con la Convención de París sobre la responsabilidad de los terceros en el campo de la energía nuclear. Con la hipótesis Gaia¹, que plantea que la biosfera regula las condiciones ambientales, se obtuvieron inicios sobre la importancia del papel de la biodiversidad en el planeta; posteriormente ocurrió la creación de la organización Greenpeace en 1971, que luchó en contra de los experimentos nucleares de Estados Unidos en Alaska.

En este año se celebró también la convención Ramsar, sobre humedales de importancia internacional. Con la conferencia de Estocolmo (5 al 16 de junio de 1972) en Suecia se dio apertura al desarrollo de la política ambiental internacional; por su parte en Colombia en 1974 se firmó el Código Nacional de Recursos Naturales; en 1976 se realizó la conferencia de las Naciones Unidas en Vancouver, Canadá; en 1977 Colombia protege 19 áreas naturales; en 1987, el informe Brundtland sienta las bases del desarrollo sostenible. La historia sobre del descubrimiento científico del cambio climático inició en el siglo XIX cuando se sospechó por primera vez que hubo cambios naturales en el paleo-clima y se identificó por primera vez el efecto invernadero natural, en las décadas de los 60, 70 y 80, se recolectaron datos que demostraban un aumento rápido de la concentración de CO₂ en la atmósfera. En 1985 se dio la convención de Viena para la protección de la capa de ozono y el protocolo de Montreal en 1987 relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono. En 1988 se creó el Grupo Intergubernamental

¹ LOVELOCK, James. Las Edades de Gaia [en línea]. 2 ed. Barcelona: Tusquets, 1995. 1979. [Citado 1 abril 2017]. Disponible en <http://www.libroesoterico.com/biblioteca/varios/varios%203/190360178-las-edades-de-gaia.pdf>

sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en Inglés); en 1992 se celebró la Cumbre para la Tierra en Río de Janeiro donde se firmó la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Por su parte, en 1997 se adoptó oficialmente el protocolo de Kyoto, cuyo objetivo es reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero: dióxido de carbono, metano, óxido de nitrógeno, hidrofluorocarburos, perfluorocarbonos y hexafluoruro de azufre. El programa de Agenda XXI jugó también un papel importante en dicha cumbre, es un plan de acción exhaustivo para ser adoptado universalmente; que abarca dimensiones sociales y económicas, conservación y gestión de los recursos para el desarrollo, fortalecimiento del papel de los grupos principales y medios de ejecución.

En Colombia, la ley 99 de 1993 crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental SINA y se dictan otras disposiciones. Toda esta normatividad conlleva a una utilización responsable de los recursos naturales no renovables que permita el desarrollo sostenible de las generaciones.

El presente documento se ocupa en la realización de un estudio comparativo del impacto ambiental de tipos de mezcla asfáltica (una caliente y otra tibia), para lo cual se realizaron mediciones en planta de los contaminantes gaseosos emitidos y de los consumos energéticos y de masa utilizados para la fabricación de las mismas.

De acuerdo al reporte: Climate Change 2014: Mitigation and Climate Change del IPCC, las emisiones de CO₂ en 2010 fueron de 13,14 Giga toneladas métricas para el sector industrial a nivel mundial, este trabajo contribuye con su grano de arena para la disminución de este valor para los años siguientes y además permite vislumbrar mejores condiciones laborales para los fabricantes de mezcla asfáltica.

En este trabajo se realiza un estudio comparativo mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), norma ISO 14040/44: 2006, el tipo de mezcla es la mezcla asfáltica densa en caliente tipo II (MDC-2), en las plantas discontinua de la empresa 1 y la empresa 2, plantas ubicadas en la periferia de Bucaramanga.

Se realizó la caracterización de los materiales, el diseño de las mezclas y el trabajo en planta que consta de: Inventario de entradas y salidas con balances de masa y energía basados en el tiempo de producción utilizado para cada una de las mezclas. Posteriormente se realizó el análisis de la información para identificar y caracterizar las cargas ambientales vinculadas al proceso de producción de mezcla asfáltica.

Finalmente se obtuvieron los resultados que señalan la efectividad de la mezcla tibia en la reducción de emisiones y consumos de recursos naturales no renovables y energéticos.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un cuadro comparativo de una mezcla asfáltica tibia y una caliente mediante la metodología de análisis de ciclo de vida.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar fisicoquímica y reológicamente los ligantes asfálticos y los agregados.
- Evaluar la compactabilidad y el tiempo de mezclado para las temperaturas de compactación y mezclado adecuadas para las mezclas tibias, útiles para el diseño SUPERPAVE.
- Diseñar las mezclas tibias y calientes para la determinación del porcentaje de asfalto óptimo a partir de las propiedades volumétricas de la mezcla.
- Recolectar la data necesaria en laboratorio y en planta para la construcción del Inventario del Ciclo de Vida (ICV).
- Evaluación y caracterización de las cargas ambientales para los dos escenarios mediante el ACV.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS

Una mezcla asfáltica se constituye de agregado pétreo y asfalto (Cemento asfáltico) en proporciones definidas de acuerdo al diseño de mezcla realizado en laboratorio. El suelo a pavimentar (sub-rasante) es cubierto con capas de agregado grueso y fino que se nivelan, y posteriormente se agrega la capa de rodadura constituida por la mezcla asfáltica, la cual es compactada hasta lograr la densidad adecuada de acuerdo al diseño².

2.1.1 Cemento asfáltico: Es la fracción más pesada de la destilación del petróleo, se usa no solo para pavimentar carreteras, sino además como aglutinante para recubrir techos o como material de construcción. En la construcción de carreteras se clasifica en base a su índice de penetración, para este trabajo se utilizó un asfalto de índice de penetración 60/70. Sus propiedades más estudiadas son su viscosidad, penetración, durabilidad, adhesión, cohesión, susceptibilidad térmica, resistencia al envejecimiento y endurecimiento. En el anexo A se enlistan los ensayos de laboratorio aplicados al cemento asfáltico utilizado.

2.1.2 Agregados pétreos: El agregado constituye entre el 90 y el 95% en peso y entre el 75 y 85% en volumen, de la mayoría de las estructuras de pavimento. El comportamiento de un pavimento se ve altamente influenciado por la selección apropiada del agregado, debido a que el agregado mismo proporciona la mayoría de las características de capacidad portante. Existen rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas, las cuales se extraen ya sea de cantera o de río, para luego ser trituradas para brindarle al pavimento

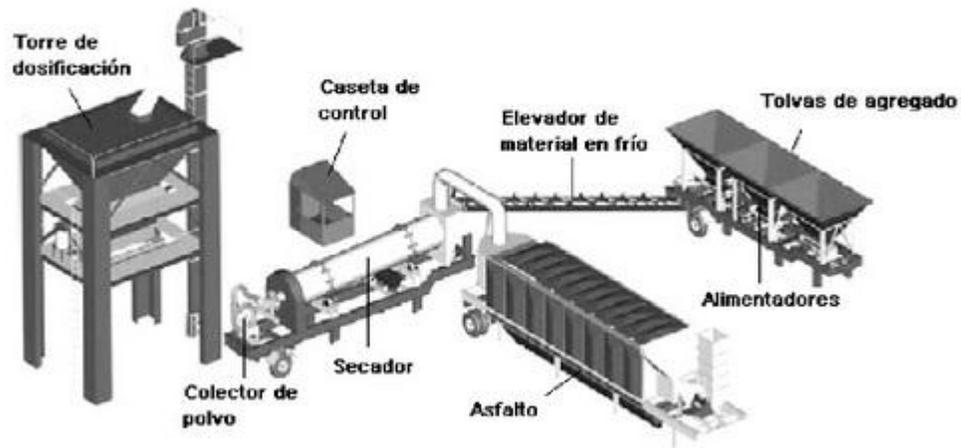
² ASPHALT INSTITUTE. Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en Caliente. MS-22 Lexington, USA.1992.

asfáltico las condiciones de fricción óptimas. En el Anexo B se presentan los ensayos de laboratorio aplicados al agregado pétreo utilizado en este trabajo de aplicación.

2.2 PRODUCCIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA

Luego de obtener la fórmula de la mezcla mediante los ensayos de laboratorio, esta fórmula es transmitida al jefe de producción de la mezcla en planta. El proceso consiste de varias etapas, en la figura 1 se esquematiza el proceso de producción. Primero los agregados pétreos son transportados desde su punto de acopio a unas tolvas discriminadas de acuerdo al tamaño de los mismos ($3/4''$, $1/2''$, etc). Posteriormente los agregados son dosificados y transportados mediante una banda hasta el tambor rotatorio secador, en donde son secados y calentados para posteriormente ser mezclados con el asfalto. La planta 1 cuenta con un filtro de mangas y dos ciclones para el manejo del material particulado, además de una chimenea, en donde se emiten los gases contaminantes (fuente fija a evaluar), la empresa 2 tiene un filtro de mangas de 144 unidades. Por su parte el asfalto es calentado mediante un intercambiador de calor de aceite mineral y posteriormente transportado mediante tuberías calentadas hasta el pesado y mezclado ulterior con el agregado pétreo y finalmente se descarga la mezcla en volquetas. En el anexo C se muestran los ensayos de laboratorio realizados a la mezcla asfáltica.

Figura 1. Diagrama del proceso de producción de mezcla asfáltica.



Fuente: RUIZ OJEDA, Martha Patricia. Evaluación del Impacto Ambiental de la producción de mezcla asfáltica en caliente (MDC-2) de la planta de Asfaltart, en Girón Santander. Tesis Magister en Ingeniería Ambiental. Bucaramanga: Universidad Industrial Santander. Escuela de Ingeniería Química. 2013.

2.3 MEZCLAS TIBIAS

Las mezclas tibias son un tipo de mezcla que se prepara a temperaturas inferiores ($105 - 115^{\circ}\text{C}$) a las temperaturas de las mezclas asfálticas calientes convencionales ($150 - 175^{\circ}\text{C}$). Esta reducción de temperatura redonda directamente en una reducción de consumo de energía (electricidad y combustible) y de emisiones gaseosas contaminantes. Los métodos de producción de mezclas tibias se pueden clasificar según la forma de obtención de la siguiente manera:

Figura 2. Tipos de tecnologías de las mezclas tibias.



Fuente: RUBIO, Maria; MARTÍNEZ, Germán; BAENA, Luis y MORENO, Fernando. Warm mix asphalt: an overview. En: Cleaner Production. 2012; No. 24, p. 76-84.

La figura 2 presenta los tipos de procedimientos para producir mezclas tibias, el primero se basa en inyección de agua y aire a alta presión con el fin de cambiar la viscosidad del asfalto, tiene el problema de que requiere tecnología adicional. El segundo consiste en cambiar la composición química del asfalto agregando ceras o aceites, lo que conlleva a una reducción de la viscosidad³. En este trabajo de aplicación solo se tomará en cuenta la aditivación química, esta no afecta la viscosidad del ligante asfáltico, es un conjunto de agentes superficiales que mejoran las propiedades de humedecimiento reduciendo la tensión entre el agregado y el ligante⁴. Estos químicos son surfactantes líquidos que actúan sobre la interface microscópica del agregado y el asfalto para reducir la fricción interna. Típicamente, los surfactantes operan a temperaturas entre los 85 a 140°C⁵.

³ LOPERA PALACIO, Hernando. Diseño y Producción de Mezclas Asfálticas Tibias, a partir de la Mezcla de Asfalto y Aceite de Palma (*Elaeis Guineensis*). Tesis Máster en Ingeniería Infraestructura y Sistemas de Transporte. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. 2011.

⁴ BANERJEE, Ambarish; DE FORTIER, Andree y PROZZI Jorge. The effect of long-term aging on the rheology of warm mix asphalt binders. En: Fuel. 2012. vol. 97, p. 603-611.

⁵ EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (EAPA). The use of warm mix asphalt. Draft EAPA - Position Paper [en línea]. Brussels. 2014. [Citado 1 abril 2017]. Disponible en <http://www.eapa.org/userfiles/2/Publications/EAPA%20paper%20-%20Warm%20Mix%20Asphalt%20-%20version%202014.pdf>

Las mezclas tibias se fabrican de tal modo que el efecto sobre las propiedades mecánicas sea mínimo⁶.

2.4 EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES

La actividad industrial de producción de mezclas asfálticas genera emisiones contaminantes provenientes de la combustión de gas natural o fuel-oil. Estas emisiones consisten en: los óxidos de nitrógeno, el dióxido de azufre, material particulado, monóxido de carbono, el dióxido de carbono, metano y compuestos orgánicos volátiles e hidrocarburos totales. De los anteriores la normatividad colombiana solo exige la medición de los tres primeros debido a que son los más abundantes en la atmósfera. De los gases mencionados, el más abundante es el dióxido de carbono, este causa efecto invernadero en concentraciones altas, el monóxido de carbono afecta el transporte de oxígeno en la sangre, los óxidos de nitrógeno causan smog fotoquímico y el bióxido de azufre por su parte causa lluvia ácida, los compuestos orgánicos volátiles se presentan en menor proporción y contribuyen a la formación de smog fotoquímico, además, son potencialmente cancerígenos. Los hidrocarburos totales tienen componentes que pueden afectar el sistema nervioso central⁷.

2.5 NORMATIVIDAD

La Organización Internacional para la Estandarización (ISO, por sus siglas en inglés) produjo series de estándares para ciclo de vida en 1997, las cuales fueron revisadas en el 2006. La ISO 14040:2006 provee una descripción de principios y marco teórico⁸; la ISO 14041:1998, especifica las necesidades y

⁶ BONAQUIST, Ramon. Mix design practices for warm mix asphalt: transportation research board. En: NCHRP, vol. 691. Washington DC. 2011.

⁷ MANAHAN, Stanley. Air and gas analysis. En: Environmental Chemistry. 7 ed. Washington: Lewis Publishers, 2011.

⁸ ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL PARA LA ESTANDARIZACIÓN. Gestión Ambiental: análisis del ciclo de vida, principios y marco de referencia. ISO 14040. Bogotá D.C.: El instituto. 2006. 29 p.

procedimientos para elaborar la definición de objetivos y el alcance del estudio⁹; la ISO 14042:2000 describe y establece una guía para la estructura general de la fase de análisis de impacto¹⁰; ISO 14043:2000 da recomendaciones para realizar la fase de interpretación¹¹; mientras que la ISO 14044:2006 delinea requerimientos y guías para el ACV¹². Para este estudio se requirió la utilización de los estándares colombianos que se muestran en la tabla 1 para emisiones gaseosas en fuente fija. A continuación se presentan los estándares de emisión para las plantas de mezcla asfáltica.

Tabla 1. Estándares de emisión admisibles de contaminantes al aire para actividades industriales a condiciones de referencia (25°C y 760 mm Hg) con oxígeno de referencia del 11%. Resolución 909 de 2008. Tabla 1 del artículo 4.

| Contaminante | Flujo del Contaminante (kg/h) | Estándares de emisión admisibles de contaminantes (mg/m ³) |
|--|-------------------------------|--|
| | | Actividades Industriales Existentes |
| Material Particulado (MP) | ≤ 0,5 | 250 |
| | > 0,5 | 150 |
| Óxidos de Nitrógeno (NO _x) | TODOS | 550 |
| Bióxido de Azufre (SO ₂) | TODOS | 550 |
| Hidrocarburos Totales (HCT) | TODOS | 50 |
| Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) | TODOS | 20 |

Fuente: COLOMBIA, MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 909 de 2008 (junio 5). Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial 47051 de julio 15 de 2008. 36 p.

2.6 ESTADO DEL ARTE

⁹ ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL PARA LA ESTANDARIZACIÓN. Gestión ambiental, análisis ciclo de vida, definición del objetivo y alcance y análisis del Inventario. ISO 14041. Bogotá D.C.: El instituto. 1998: 29 p.

¹⁰ ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL PARA LA ESTANDARIZACIÓN. Gestión medioambiental: análisis del ciclo de vida. Evaluación de impacto del ciclo de vida. ISO 14042. Bogotá D.C.: El instituto. 2000.

¹¹ ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL PARA LA ESTANDARIZACIÓN.: Gestión Medioambiental: análisis del ciclo de vida. Interpretación del ciclo de Vida. ISO 14043. Bogotá D.C.: El instituto 2000.

¹² ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL PARA LA ESTANDARIZACIÓN. Gestión ambiental, análisis de ciclo de vida, requisitos y directrices. ISO 14044. Bogotá D.C.: El instituto 2006. 55 p.

Chui y colaboradores realizaron estudios de comparación de Inventario de Ciclo de Vida para pavimentos hechos de tres diferentes materiales asfálticos reciclados y mezcla asfáltica tibia convencional¹³. Los resultados mostraron que el ACV es una herramienta muy útil con respecto a la elección de materiales reciclados para rehabilitación de pavimentos. Huang y colaboradores revisaron los modelos de ACV relevantes disponibles para la construcción y mantenimiento de pavimentos asfálticos usando los descubrimientos disponibles a la fecha, identificaron el hueco de conocimiento de la industria de carreteras y describieron el desarrollo de un modelo de ACV para mantenimiento y construcción¹⁴. Obtuvieron las siguientes ventajas de usar ACV como herramienta de análisis:

- Incluye las emisiones no relacionadas con la energía.
- Busca datos de energía o inventario sobre más agregados secundarios en el asfalto.
- Predice la esperanza de vida, y la manera de disposición, de las capas de pavimento hechas usando materiales reciclados.
- Incluye el efecto de los trabajos de mantenimiento de carreteras en el tráfico y por consiguiente, el uso de combustible y emisiones, ayudados por modelos de microestimulación¹⁵.

Butt y colaboradores estudiaron el ACV de pavimentos asfálticos en un tiempo de vida completo, sus resultados mostraron que este tipo de procesos tiene un alto consumo de recursos energéticos. Así, el uso de aditivos podría contribuir a disminuir este tipo de consumo¹⁶. Vidal y colaboradores llevaron a cabo un estudio de ACV sobre una variedad de productos asfálticos

¹³ CHIU, Chui-Te; HSU, Tseng-Hsing; YANG, Wan-Fa. Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements. En: Resources, Conservation and Recycling, 2008, vol. 52, no 3, p. 545-556.

¹⁴ HUANG, Yue; BIRD, Roger y HEIDRICH, Oliver. Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. En: Journal of Cleaner Production, 2009, vol. 17, no 2, p. 283-296.

¹⁵ *Ibid.*, p. 283.

¹⁶ BUTT, Ali Azhar; MIRZADEH, Iman; TOLLER, Susanna y BIRGISSON, Björn. Life cycle assessment framework for asphalt pavements: methods to calculate and allocate energy of binder and additives. En: International Journal of Pavement Engineering, 2014, vol. 15, no 4, p. 290-302.

incluyendo mezcla caliente, mezcla tibia, asfalto con zeolitas y mezclas de asfalto con material reciclado¹⁷. Los resultados mostraron que los impactos ambientales son considerablemente reducidos al usar material reciclado. Murat realizó un estudio de ACV para tres diferentes productos en una misma planta productora, se encontró que una reducción substancial en el porcentaje de asfalto contribuye considerablemente en el ahorro de energía¹⁸.

Por su parte aquí en Colombia en 2011 se realizó un estudio sobre la aplicación de aceite crudo de palma como aditivo para la producción de mezclas tibias resultando como una materia prima viable para este fin. En 2013 se realizó una tesis de maestría en la que se evaluaron los impactos ambientales mediante ACV aplicado a una mezcla caliente y a tres escenarios diferentes sugeridos para la reducción de dicho impacto, concluyendo que las etapas que presentan mayor impacto sobre el efecto invernadero y el calentamiento global son la etapa de calentamiento del asfalto, el pesado y el mezclado¹⁹.

¹⁷ VIDAL, Rosario; MOLINER, Enrique; MARTÍNEZ, German, RUBIO, Carmen. Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. En: Resources, Conservation and Recycling, 2013, vol. 74, p. 101-114.

¹⁸ POLAT, Murat y BEKTAŞ, Nihal. Life cycle assessment of asphalt pavement product. En: Sustainable Environment Research. 2015. Vol. 2, No. 5, p. 275-281.

¹⁹ RUIZ OJEDA, Martha Patricia. Evaluación del Impacto Ambiental de la producción de mezcla asfáltica en caliente (MDC-2) de la planta de Asfaltart, en Girón Santander. Tesis Magister en Ingeniería Ambiental. Bucaramanga: Universidad Industrial Santander. Escuela de Ingeniería Química. 2013.

Tabla 2. Estado del arte de publicaciones de Análisis de ciclo de vida aplicado a las mezclas tibias desde 1996 a 2010.

| Autor (año) | País | Método ACV | Estructuras evaluadas | | |
|--------------------------------|-----------|------------|-----------------------|-----|------|
| | | | Pavimento Asfáltico | | |
| | | | HMA | SMA | OTRA |
| Häkkinen & Mäkela (1996) | Finlandia | Proceso | | -- | |
| Horvath & Hendrickson (1998) | U.S. | Entra-Sale | -- | | |
| Roudebush (1999) | U.S. | Proceso | | -- | |
| Berthiaume and Bouchard (1999) | Canadá | Proceso | -- | | |
| Mroueh & colaboradores (2000) | | | | | |
| Stripple (2001) | Finlandia | Proceso | -- | | |
| Nisbet colaboradores (2001) | Suiza | Proceso | -- | | -- |
| Park & colaboradores (2003) | U.S. | Proceso | -- | | |
| Treloar & colaboradores (2004) | Korea | Híbrido | -- | | |
| Zapata & Gambatese (2005) | Australia | Híbrido | -- | | |
| Athena (2006) | U.S. | Proceso | -- | | |
| Chan (2007) | Canada | Proceso | -- | | |
| Muga & colaboradores (2009) | U.S. | Proceso | -- | | |
| Huang & colaboradores (2009) | U.S. | Entra-Sale | | | |
| White & colaboradores (2010) | U.K. | Proceso | -- | | |
| | U.S. | Proceso | -- | | -- |

HMA: Hot Mix Asphalt (mezcla asfáltica caliente), SMA: Stone Mastic Asphalt. Fuente: SANTERO, Nicholas J.; MASANET, Eric y HORVATH, Arpad. Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. En: Resources, Conservation and Recycling, 2011, vol. 55, no 9, p. 801-809.

En la tabla 2 se presentan los tipos de ACV usados en este tema a nivel mundial para diferentes tipos de mezcla asfáltica.

Las tecnologías de mezclas tibias son diseñadas con el fin de afectar al mínimo las propiedades mecánicas²⁰, brindan una reducción de emisiones y consumo de energía²¹, se ha estimado un ahorro energético del 30%²², las mezclas tibias son más duraderas debido a que mejoran la trabajabilidad para asegurar un buen desempeño mecánico^{23,24}.

²⁰ CAPITÃO, S. D.; PICADO, L. y MARTINHO, F. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. En: Construction and Building Materials, 2012, vol. 36, p. 1016-1024.

²¹ RUBIO, Maria; MARTÍNEZ, Germán; BAENA, Luis y MORENO, Fernando. Warm mix asphalt: an overview. En: Cleaner Production. 2012; No. 24, p. 76-84.

²² CHOWDHURY, Arif y BUTTON, Joe. A review of warm mix asphalt. Texas Transportation Institute, the Texas A & M University System, 2008.

²³BEHL, Ambika; KUMAR, Gajenda; SHARMA, Girish y JAIN, PK. Evaluation of field performance of warm-mix asphalt pavements in India. En: Procedia-social and behavioral sciences, 2013, vol. 104, p. 158-167

²⁴ CAPITÃO, Op. Cit., p. 1016.

El beneficio inmediato de las mezclas tibias es la reducción del consumo de energía en los quemadores y la disminución de los gases de efecto invernadero²⁵. De acuerdo a estudios realizados en diferentes países la reducción de polvo y gases se deriva del uso de las mezclas tibias. Varios estudios indican una reducción entre el 30 y el 50% de aerosol y de hidrocarburos aromáticos poli-cíclicos^{26,27}. Varios estudios han demostrado que la reducción de temperaturas de compactación y mezclado disminuye emisiones perjudiciales^{28,29,30}. También se ha comprobado que las mezclas tibias reducen el consumo de combustible y las emisiones de gases contaminantes³¹, lo anterior permite la ubicación de plantas de mezcla asfáltica en regiones urbanas. Se ha reportado un nivel inferior de oxidación a corto plazo debido a la reducción de temperatura, lo cual puede redundar en un incremento de la resistencia a la fatiga o falla del pavimento 32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42

²⁵ SILVA, Hugo; OLIVEIRA, Joel; FERREIRA, Claudia y PEREIRA, Paulo. Assessment of the performance of warm mix asphalts in road pavements. *En: International Journal of Pavement Research and Technology*, 2010, vol. 3, no 3, p. 119-127.

²⁶ ZAUMANIS, Martins. Warm mix asphalt investigation. Master of science thesis, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Denmark, 2010.

²⁷ EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (EAPA). The use of warm mix asphalt. Draft EAPA - Position Paper [en línea]. Brussels. 2014. [Citado 1 abril 2017]. Disponible en <http://www.eapa.org/userfiles/2/Publications/EAPA%20paper%20-%20Warm%20Mix%20Asphalt%20-%20version%202014.pdf>

²⁸ LAVORATO, Selena, et al. Asphalt mix performance testing and emissions evaluation for warm mix asphalt field project on ministry of transportation Ontario highway. En *The Fifty-sixth Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association*. 2011.

²⁹ MOTTA, Rosângela. Estudio de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo energético. Tesis Doctoral. Universida de São Paulo. 2011.

³⁰ DEL CARMEN, Maria; MORENO, Fernando; MARTÍNEZ-ECHEVARRÍA, Maria, MARTÍNEZ, German y VÁZQUEZ, Jose. Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt. *En: Journal of cleaner production*, 2013, vol. 41, p. 1-6.

³¹ GOH, Shu Wei; HASAN, Mohd y YOU, Zhanping. Performances evaluation of Cecabase® RT in warm mix asphalt technology. *En: Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2013, vol. 96, p. 2782-2790.

³² ANDERSON, Michael; BAUMGARDNER, Gaylon; MAY, Richard. y REINKE, Gerard. Engineering properties, emissions, and field performance of warm mix asphalt technologies. Interim Report, 2008, p. 9-47.

³³ GANDHI, Tejash y AMIRKHANIAN, Serji. Laboratory simulation of warm mix asphalt (WMA) binder aging characteristics. En *Airfield and Highway Pavements: Efficient Pavements Supporting Transportation's Future*. 2008. p. 195-204.

³⁴ HEARON, Amy y DIEFENDERFER, Stacey. Laboratory evaluation of warm asphalt properties and performance. En *Airfield and Highway Pavements: Efficient Pavements Supporting Transportation's Future*. 2008. p. 182-194.

³⁵ ESTAKHRI, Cindy; CAO, Rongui; ALVAREZ-LUGO, Alex y BUTTON, Joe. Production, placement, and performance evaluation of warm mix asphalt in texas. En *Material Design, Construction, Maintenance, and Testing of Pavements: Selected Papers from the 2009 GeoHunan International Conference*. 2009. p. 1-8.

³⁶ ROBJENT, Lyndon y DOSH, Wayne. Warm-mix asphalt for rural county roads. En *Cold Regions Engineering 2009: Cold Regions Impacts on Research, Design, and Construction*. 2009. p. 438-454.

Estudios han demostrado que la disminución de la rigidez de la mezcla durante su fabricación como mezcla tibia puede ayudar a un decrecimiento en la resistencia al ahuellamiento^{43,44}, la cual puede ser una desventaja a largo plazo, sin embargo aún falta mucho por estudiar al respecto del comportamiento a largo plazo de las mezclas tibias. Sin embargo, hay estudios que manifiestan que las Mezclas tibias pueden presentar propiedades iguales o mejores que las mezclas calientes⁴⁵.

El éxito de la mezcla tibia se basa en el tipo de aditivo usado y del método de manufactura⁴⁶. El hecho que se trabaje con temperaturas inferiores ayuda a la disminución del envejecimiento de la mezcla y se alcanza una densidad superior en campo^{47,48}.

La reducción de la temperatura de calentamiento de los agregados podría eventualmente resultar en *stripping*, fenómeno que consiste en mala interacción en la interface agregado asfalto provocando desmembramiento del asfalto, para remediarlo se ha sugerido agregar cal hidratada (convencional y en nano-partículas), al agregado, o aditivos *anti-stripping*

³⁷ GANDHI, Tejash; AKISETTY, Chandrakiran y AMIRKHANIAN, Serji. A comparison of warm asphalt binder aging with laboratory aging procedures. En: Journal of Testing and Evaluation, 2009, vol. 38, no 1, p. 57-64.

³⁸ RAN, Jin, et al. Research on the performances of warm asphalt and warm mix asphalt with Sasobit. En ICCTP 2010: Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable. 2010. p. 3725-3737.

³⁹ ZHAO, Wenbin; XIAO, Feipeng, AMIRKHANIAN, Serj y PUTMAN, Bradley. Characterization of rutting performance of warm additive modified asphalt mixtures. En: Construction and Building Materials, 2012, vol. 31, p. 265-272

⁴⁰ HOSSAIN, Zahid y ZAMAN, Musharraf. Behavior of selected warm mix asphalt additive modified binders and prediction of dynamic modulus of the mixes. En: Journal of Testing and Evaluation, 2012, vol. 41, no 1, p. 159-170.

⁴¹ GOH, Op cit., p. 2782-2790.

⁴² VIDAL, Rosario; MOLINER, Enrique; MARTÍNEZ, German, RUBIO, Carmen. Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. En: Resources, Conservation and Recycling, 2013, vol. 74, p. 101-114.

⁴³ ANDERSON, Op cit., p. 9.

⁴⁴ ZHAO, Op cit., 265-272.

⁴⁵ *Ibíd.*, p. 265.

⁴⁶ KVASNAK, A.; TAYLOR, A.; SIGNORE, J., y BUKHARI S. Preliminary evaluation of warm mix asphalt field demonstration: Franklin, Tennessee. NCAT Rep. 10-03, Auburn, AL: National Center for Asphalt Technology. 2010.

⁴⁷ NAZZAL, Munir; SARGAND, Shad y AL-RAWASHDEH, Abdalla. Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing rap using accelerated loading tests. En: Journal of Testing and Evaluation, 2010, vol. 39, no 3, p. 305-312.

⁴⁸ SARGAND, Shad, et al. Field evaluation of warm-mix asphalt technologies. En: Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, vol. 24, no 11, p. 1343-1349.

tales como aminas, diaminas, polímeros líquidos, cemento portland, ceniza y polvo de combustión^{49,50,51,52,53,54,55,56,57}. Ciertos científicos^{58,59} reportaron que las deficiencias encontradas en las mezclas tibias pueden ser superadas usando un buen agregado y una buena gradación lo cual genera buenas cohesión (agregado – agregado) y adhesión (asfalto – agregado). Otra estrategia para minimizar la susceptibilidad a la humedad de las mezclas tibias es las buenas prácticas de manufactura (buena compactación a alta densidad, asegurar completo secado de los agregados, y buen drenaje de la superficie a pavimentar⁶⁰.

El principal obstáculo que deben cruzar las mezclas tibias es la falta de una metodología de diseño de mezcla propia, ya que hasta el momento las mezclas se han realizado con el mismo diseño de las calientes⁶¹.

⁴⁹ BUDDHALA, Aravinda; HOSSAIN, Zahid; WASIUDDIN, N azimuddin; ZAMAN, Musharraf y EDGAR, Ao. Effects of an amine anti-stripping agent on moisture susceptibility of sasobit and aspha-min mixes by surface free energy analysis. En: Journal of Testing and Evaluation, 2011, vol. 40, no 1, p. 91-99

⁵⁰ ZHAO, Op cit., 265-272.

⁵¹ HOSSAIN, Zahid y ZAMAN, Musharraf. Behavior of selected warm mix asphalt additive modified binders and prediction of dynamic modulus of the mixes. En: Journal of Testing and Evaluation, 2012, vol. 41, no 1, p. 159-170.

⁵² KAVUSSI, Amir y HASHEMIAN, Leila. Laboratory evaluation of moisture damage and rutting potential of WMA foam mixes. En: International Journal of Pavement Engineering, 2012, vol. 13, no 5, p. 415-423.

⁵³ CHENG, Jianchuan; SHEN, Junan; XIAO, Feipeng. Moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing nanosized hydrated lime. En: Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, vol. 23, no 11, p. 1552-1559.

⁵⁴ SHIVAPRASAD, Punith V.; XIAO, Feipeng y AMIRKHANIAN, Serji N. Moisture susceptibility of polymerized stone matrix asphalt mixtures using warm mix asphalt technologies using moist aggregates. En: Journal of ASTM International, 2011, vol. 8, no 9, p. 1-14.

⁵⁵ XIAO, Feipeng; ZHAO, Wenbin., GANDHI, Tejash y AMIRKHANIAN, Serji. Influence of antistripping additives on moisture susceptibility of warm mix asphalt mixtures. En: Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, vol. 22, no 10, p. 1047-1055.

⁵⁶ XIAO, F Feipeng; PUNITH, Veeralinga; AMIRKHANIAN, Serji y THODESEN, Carl. Improved resistance of long-term aged warm-mix asphalt to moisture damage containing moist aggregates. En: Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, vol. 25, no 7, p. 913-922.

⁵⁷ DIAB, Aboelkasim; YOU, Zhanping y WANG, Hainian. Rheological evaluation of foamed WMA modified with nano hydrated lime. En: Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2013, vol. 96, p. 2858-2866.

⁵⁸ KANITPONG, Kunawee; CHAROENTHAM, Nuttaporn y LIKITLERSUANG, Suched. Investigation on the effects of gradation and aggregate type to moisture damage of warm mix asphalt modified with Sasobit. En: International Journal of Pavement Engineering, 2012, vol. 13, no 5, p. 451-458.

⁵⁹ SANGSEFIDI, Ebrahim; ZIARI, Hasan y MANSOURKHAKI, Ali. The effect of aggregate gradation on creep and moisture susceptibility performance of warm mix asphalt. En: International Journal of Pavement Engineering, 2014, vol. 15, no 2, p. 133-141.

⁶⁰ EPPS, Amy., ARAMBULA, Edith y ESTAKHRI, Cindy. Performance of WMA Technologies: Stage L–Moisture Susceptibility, Phase I. Washington DC; 2011.

⁶¹ BONAQUIST, Op. Cit., p. 1.

La disminución de la viscosidad por parte de las mezclas tibias redundará en mejor trabajabilidad^{62,63,64,65,66,67}. Otros investigadores afirman que la mejor trabajabilidad es resultado de una mejor lubricación entre el asfalto y el agregado a nivel microscópico. Esta mejora reduce la fricción interna generadas en las mezclas debido a los altos valores de esfuerzo cortante que se alcanzan durante el mezclado y la compactación^{68,69,70,71}. La reducción de las temperaturas de compactación y mezclado mejora el uso de estas mezclas para la manufactura de capas delgadas^{72,73}. Además, los aditivos permiten unas distancias de transporte superiores previas a la extensión y compactación⁷⁴ y permiten extensión y compactación en ambientes más fríos^{75,76,77,78}. En cuanto al proceso un último aspecto a señalar es que la misma tecnología que se usa para las mezclas calientes sirve para las mezclas tibias⁷⁹. Otra ventaja de las mezclas tibias es la oportunidad de fabricar mezclas calientes con caucho reciclado de

⁶² GOH, Op. Cit., p. 2782.

⁶³ VASCONCELOS, Kamilla L.; BHASIN, Amit y LITTLE, Dallas. Influence of reduced production temperatures on the adhesive properties of aggregates and laboratory performance of fine aggregate-asphalt mixtures. En: Road Materials and Pavement Design, 2010, vol. 11, no 1, p. 47-64.

⁶⁴ YAN, Jun; CAO, Yadong; ZHU, Tiantong; CAI, Ming y CAO, Zhu. Shanghai experience with warm mix asphalt. En Paving Materials and Pavement Analysis. 2010. p. 97-102

⁶⁵ MOREA, Francisco; MARCOZZI, Rosana y CASTAÑO, Gonzalo. Rheological properties of asphalt binders with chemical tensoactive additives used in warm mix asphalts (WMAs). En: Construction and Building Materials, 2012, vol. 29, p. 135-141.

⁶⁶ WANG, Chu; HAO, Peiwen; RUAN, Fang; ZHANG, Xiyan y ADHIKARI, Sanjeev. Determination of the production temperature of warm mix asphalt by workability test. Construction and Building Materials, 2013, vol. 48, p. 1165-1170.

⁶⁷ ESTAKHRI, Óp. cit., p. 1.

⁶⁸ ANDERSON, Op cit., p. 9.

⁶⁹ HANZ, Andrew; FAHEEM, Ahmed; MAHMOUD, Enad y BAHIA, Hussain. Measuring effects of warm-mix additives: Use of newly developed asphalt binder lubricity test for the dynamic shear rheometer. Transportation Research Record. En: Journal of the Transportation Research Board, 2010, no 2180, p. 85-92

⁷⁰ BAUMGARDNER, Gaylon. RevixTM—waterless technology for production of reduced temperature asphalt mixtures. In: Presentation at the 2009 Petersen Asphalt Research Conference and P3 Symposium, Laramie. 2008

⁷¹ GOH, Op. Cit., p. 2782.

⁷² TAO, Op. Cit., p. 337.

⁷³ YAN, Op cit., p. 97-102

⁷⁴ ROBJENT, Op cit., p. 438-454.

⁷⁵ GOH, Op. Cit., p. 2782

⁷⁶ MCCARTHY, Leslie, PARK, Seri y MENSCHING, D. proposed technology development of a warm mix asphalt technology evaluation program. En: NCHRP Project 20-07, Task 311, Transportation Research Board, National Academies. Washington DC; 2012.

⁷⁷ HEARON, Op. Cit p. 182-194

⁷⁸ TAO, Op. Cit p. 337.

⁷⁹ PROWELL, Brian; FRANK, Bob y OSBORNE, Linda. NCHRP 9-47A: Engineering Properties, Emissions, and Field Performance of Warm Mix Asphalt Technologies. Interim Report. vol. 2: State of the Practice. National Center for Asphalt Technology, Auburn, Alabama, 2009.

neumáticos o con otros polímeros, para lo cual es necesario disminuir las temperaturas de compactación y mezclado^{80,81,82,83,84,85,86}. El uso de esta tecnología en mezclas modificadas con caucho reciclado reduce la temperatura de compactación entre 20 y 30°C sin significativa afectación de las propiedades mecánicas^{87,88,89}. En la figura 3 se presenta el análisis cuantitativo para los últimos cinco años, se observa un incremento año tras año en la importancia de este tema, el último año no ha culminado.

Gráfico 1. Número de artículos sobre ACV aplicados a pavimentos desde 2010 (Búsqueda en Scopus con las palabras clave “life cycle assessment” & “pavement”, disponible en Junio de 2016 (Scopus, 2016)).

⁸⁰ AKISETTY, Chandra K.; LEE, Soon-Jae y AMIRKHANIAN, Serji N. Laboratory investigation of the influence of warm asphalt additives on long-term performance properties of CRM binders. En: International Journal of Pavement Engineering, 2010, vol. 11, no 2, p. 153-160.

⁸¹ AKISETTY, Chandra; LEE, Soon-Jae y AMIRKHANIAN, Serji N. Volumetric properties of warm rubberized mixes depending on compaction temperature. En Airfield and Highway Pavements: Efficient Pavements Supporting Transportation's Future. 2008. p. 205-212.

⁸² LIU, Shutang; CAO, Weidong y FANG, Jianguo. Orthogonal test research of asphalt rubber modified by warm asphalt additive. En ICCTP 2010: Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable. 2010. p. 3480-3492.

⁸³ FAKHRI, Mansour; GHANIZADEH, Ali y OMRANI, Hamed. Comparison of fatigue resistance of HMA and WMA mixtures modified by SBS. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2013, vol. 104, p. 168-177.

⁸⁴ HAJJ, Elie; SOULIMAN, Mena y CORTEZ, Edward M. Influence of warm mix additive on mechanistic, economical, and environmental attributes of a polymer-modified asphalt mixture. En: Advances in Civil Engineering Materials, 2014, vol. 3, no 1, p. 88-106.

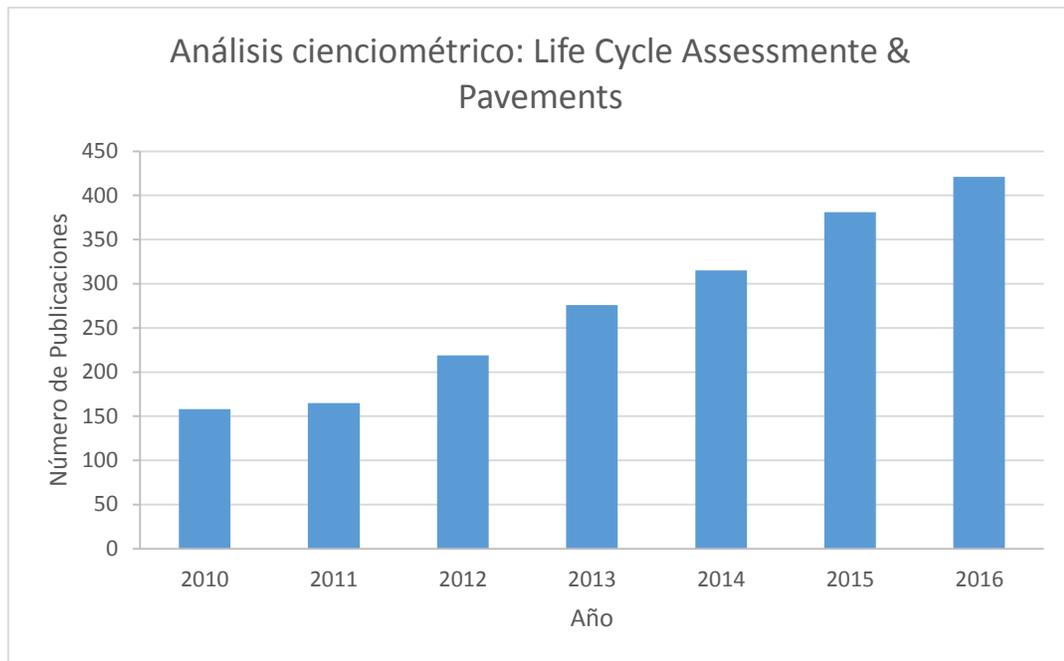
⁸⁵ SHIVAPRASAD, Op. Cit., p. 12.

⁸⁶ MOREA, Op. Cit., p. 141.

⁸⁷ HURLEY, Graham C.; PROWELL, Brian y HUNER, Mike. Evaluation of Aspha-min Zeolite® for use in Warm Mix asphalt.” National. En Center for Asphalt Technology, Auburn University. 2005.

⁸⁸ YU, Xin; WANG, Yuhong y LUO, Yilin. Effects of types and content of warm-mix additives on CRMA. En: Journal of materials in civil engineering, 2012, vol. 25, no 7, p. 939-945.

⁸⁹ YU, Xin; LENG, Zhen y WEI, Tangzhong. Investigation of the rheological modification mechanism of warm-mix additives on crumb-rubber-modified asphalt. En: Journal of materials in civil engineering, 2013, vol. 26, no 2, p. 312-319.



2.7 DEFINICIONES

Impacto Ambiental: Se dice que hay impacto ambiental cuando una acción consecuencia de un proyecto o actividad produce una alteración, favorable o desfavorable, en el medio o en alguno de los componentes del medio.

Evaluación de Impacto Ambiental: Conjunto de estudios y análisis técnicos que permiten estimar los efectos que la ejecución de un determinado proyecto puede causar sobre el medio ambiente.

Impacto positivo: Aquel admitido como tal, tanto por la comunidad técnica y científica como por la población en general, en el contexto de un análisis completo de los costos y beneficios genéricos y de las externalidades de la actuación contemplada (Ejm: generación de empleo, disponibilidad de recursos hídricos, etc.)

Impacto negativo: Aquel cuyo efecto se traduce en pérdida de valor naturalístico, estético-cultural, paisajístico, de productividad ecológica o en

aumento de los perjuicios derivados de la contaminación, de la erosión o colmatación y demás riesgos ambientales en discordancia con la estructura ecológico-geográfica, el carácter y la personalidad de una zona determinada o la incidencia social no deseada de la población del entorno (Ejm: pérdida de empleo, merma de recursos hídricos, expropiaciones de terrenos, etc.).

Análisis de Ciclo de Vida: El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta metodológica para evaluar todos los impactos ambientales potenciales⁹⁰ permite identificar oportunidades de mejora del desempeño ambiental, aporta información para la toma de decisiones, la selección de indicadores de desempeño ambiental y ayuda al marketing del producto. Trata los aspectos e impactos ambientales potenciales a lo largo del ciclo de vida de este último⁹¹.

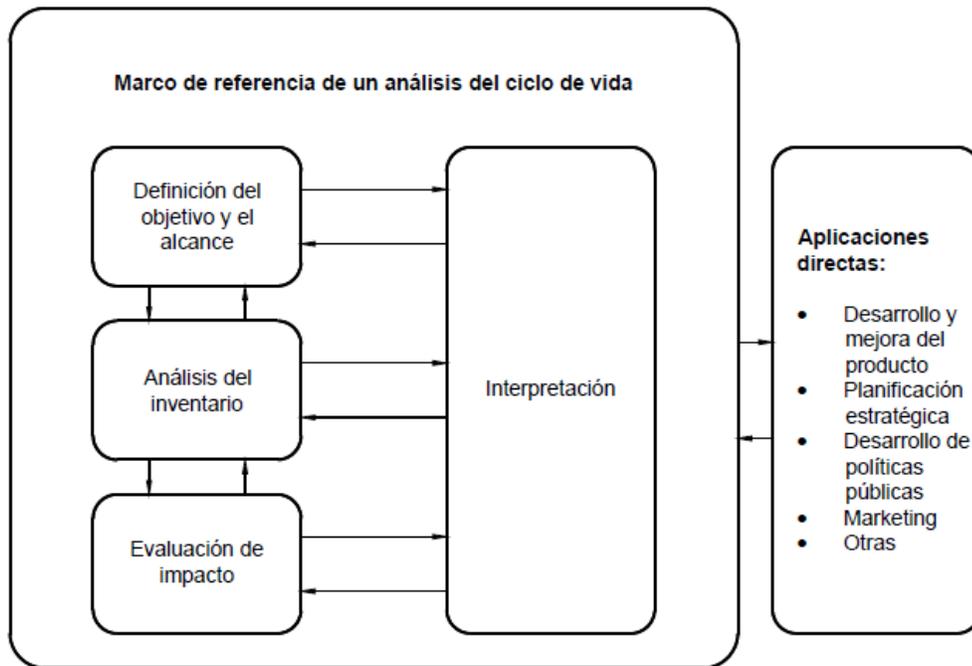
Consta de 4 fases que se esquematizan en la figura 4.

- a) La fase de definición del objetivo y el alcance: para este trabajo el objetivo es la estimación de las cargas ambientales de cada mezcla y consumos, y el alcance es a nivel de producción únicamente (de la puerta a la puerta).
- b) Análisis del Inventario: se tomaron los cálculos de las entradas y salidas del sistema para el posterior estudio de los mismos.
- c) Evaluación del Impacto Ambiental (EIA): se identificaron, predijeron e interpretaron los impactos ambientales asociados a la producción de mezcla asfáltica.
- d) Interpretación: se resumieron y discutieron los resultados de cada uno de los ACV para cada tipo de mezcla.

Figura 3. Fases del Análisis de Ciclo de Vida (ISO 14040:2007)

⁹⁰ POLAT, Op cit., p. 275-281

⁹¹ FERNÁNDEZ-VÍTORA, Vicente. Guía Metodológica Para La Evaluación Del Impacto Ambiental. 4 ed. Madrid: Mundi-Prensa Libros, 2009.



Fuente: ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL PARA LA ESTANDARIZACIÓN. Gestión Ambiental: análisis del ciclo de vida, principios y marco de referencia. ISO 14040. Bogotá D.C.: El instituto. 2006. 29 p.

En la definición del objetivo y el alcance se establecen las pautas del proyecto, el enfoque a trabajar, los límites del sistema, la unidad funcional a partir de la cual se refiere la información, las limitaciones del proyecto y se establece además la metodología de la Evaluación del Inventario de Ciclo de vida, tipos de fuentes de datos y requisitos de calidad de los datos.

En el Análisis del Inventario de Ciclo de Vida, se manifiestan los detalles para la recopilación de los datos, se muestra una descripción detallada de cada proceso, se enlistan los flujos y datos; se debe especificar los procedimientos de cálculos; validación de los datos mediante balances de masa y energía y ajuste de los límites del sistema.

Definición de objetivos y alcance: Se define el objetivo y el uso previsto del estudio, así como el alcance de acuerdo con las limitaciones del sistema,

la unidad funcional y los flujos dentro del ciclo de vida, la calidad exigida a los datos, y los parámetros tecnológicos y de evaluación.

Análisis del Inventario: Se recopilan los datos correspondientes a las entradas y salidas para todos los procesos del sistema de producto.

Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV): Es un enfoque relativo basado en una unidad funcional (ISO 14044:2006). Esta fase incluye la recopilación de los resultados de indicadores para las diferentes categorías de impacto, que juntas representan el perfil de la EICV para el sistema del producto. A manera obligatoria debe incluir:

- Selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización.
- Asignación de resultados del ICV a las categorías de impacto seleccionadas (clasificación)
- Cálculo de los resultados de indicadores de categoría.

En esta etapa el inventario es traspasado a indicadores de potenciales impactos ambientales al medio ambiente, a la salud humana y a la disponibilidad de recursos naturales. En la evaluación del impacto ambiental se usan las categorías de impacto, a continuación en la tabla 3 se destacan las más importantes y se señalan la unidad de referencia y los factores de caracterización. En la tabla 4 se presentan las categorías de impacto utilizadas en este estudio seleccionadas de acuerdo a su correspondencia con los objetivos del estudio.

Tabla 3. Categorías de Impacto Ambiental Típicas.

| Categoría de Impacto Ambiental | | Unidad de Referencia | Factor de caracterización |
|--------------------------------|---|-----------------------|---|
| Calentamiento Global | Fenómeno observado en las medidas de la temperatura que muestra en promedio un aumento en la temperatura de la atmósfera terrestre y de los océanos en las últimas décadas. | kg de CO2 Equivalente | Potencial de Calentamiento Global (PCG) |
| Consumo de | Energía consumida en la | MJ | Cantidad |

| | | | |
|-------------------------------------|---|--|---|
| recursos energéticos | obtención de las materias prima, fabricación, distribución, uso y fin de vida del elemento analizado. | | consumida |
| Reducción de la Capa de Ozono | Efectos negativos sobre la capacidad de protección frente a las radiaciones ultravioletas solares de la capa de ozono atmosférica | kg. Equivalente CFC-11 | Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono (PAO) |
| Eutrofización | Crecimiento excesivo de la población de algas originado por el enriquecimiento artificial de las aguas de ríos y embalses como consecuencia del empleo masivo de fertilizantes y detergentes que provoca un alto consumo de oxígeno del agua. | kg. Equivalente De NO ₃ | Potencial de Eutrofización (PE) |
| Acidificación | Pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua, como consecuencia del retorno a la superficie de la tierra, en forma de ácidos, de los óxidos de azufre y nitrógeno descargados a la atmósfera. | kg. Equivalente SO ₂ | Potencial de Acidificación (PA) |
| Consumo de materias primas | Consumo de materiales extraídos de la naturaleza. | Tm | Cantidad consumida |
| Formación de oxidantes fotoquímicos | Formación de los precursores que dan lugar a la contaminación fotoquímica. La luz solar incide sobre dichos precursores, provocando la formación de una serie de compuestos conocidos como oxidantes fotoquímicos (el ozono O ₃ es el más importante por su abundancia y toxicidad). | kg. Equivalente. C ₂ H ₄ | Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos (PFOF) |

Tabla 4. Categorías de Impacto seleccionadas.

| Categoría de Impacto | Unidad | Afectación |
|---------------------------------|----------------------------|-------------------|
| Toxicidad cancerígena | CTU _h | Salud Poblacional |
| Toxicidad no Cancerígena | CTU _h | Salud Poblacional |
| Inorgánicos respirables | Kg MP 2,5 _{equi.} | Salud Poblacional |
| Agotamiento de la capa de ozono | Kg CFC-11 _{equi.} | Cambio Climático |
| Orgánicos respirables | Kg NMCOV _{equi} | Salud Poblacional |
| Ecotoxicidad acuática | CTU _e | Ecosistema |
| Ecotoxicidad terrestre | CTU _e | Ecosistema |

| | | |
|-------------------------|--------------------------|------------------|
| Acidificación terrestre | Kg SO ₂ equi. | Ecosistema |
| Acidificación acuática | Kg SO ₂ equi. | Ecosistema |
| Eutroficación acuática | Kg PO ₄ P-Lim | Ecosistema |
| Calentamiento Global | Kg CO ₂ equi. | Cambio Climático |
| Energía no renovable | MJ primario | Uso de recursos |

*CTU se refiere unidades tóxicas comparativas USE_{TOX}, correspondiendo a la fracción potencialmente afectada de especies – metro cúbico – días por kilogramo para impactos de ecosistemas (CTU_e) y para casos de impactos cancerígenos y no cancerígenos para la salud humana (CTU_h).

En la evaluación se debe realizar la caracterización, la normalización, agrupación y ponderación son procesos opcionales. En este trabajo se llega hasta la caracterización.

Caracterización: Una vez que cada sustancia del ICV se ha asignado a una o más categorías de impacto ambiental, se compara su valor con respecto a la sustancia de referencia de dicha categoría.

Normalización: Se convierten los resultados de la caracterización a unidades globales neutras, dividiendo cada uno por un factor de normalización. A través de estos factores se representa el grado de contribución de cada categoría sobre el problema ambiental local.

Agrupación: Se clasifican las categorías de impacto en otros grupos que engloben categorías de impacto con efectos similares.

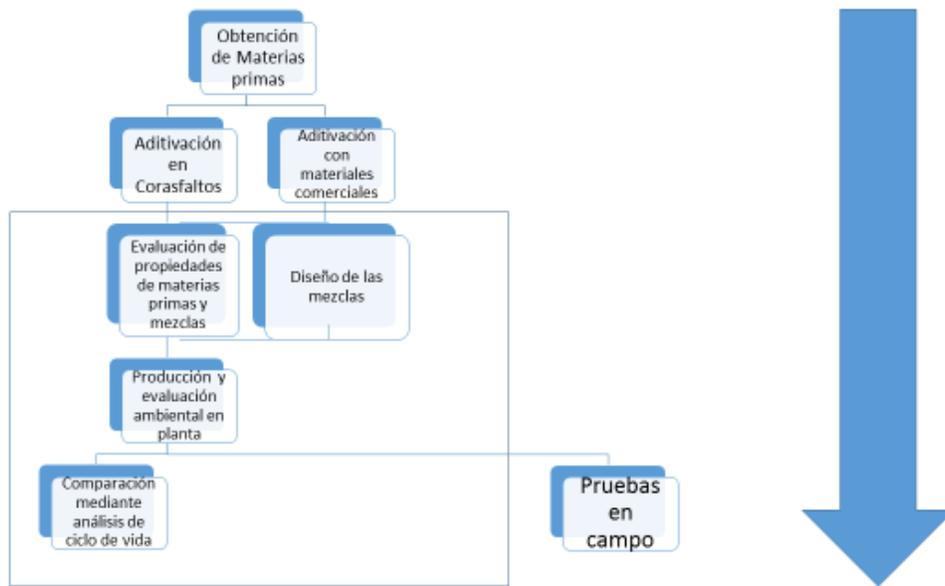
Ponderación: Se convierten los resultados de los valores a una unidad común y sumable (en el caso que la metodología incluya una normalización, a partir de los valores normalizados), multiplicándolos por su valor de ponderación. Posteriormente se suman todos ellos para obtener una puntuación única total del impacto ambiental del sistema.

Interpretación del Ciclo de Vida: Se realiza un análisis de los resultados y se concluye. Comprende varios elementos:

- Identificación de los asuntos significativos basados en los resultados de las fases ICV y la EICV.
- Evaluación que considera las verificaciones de los análisis integridad, sensibilidad y coherencia.
- Conclusiones, limitaciones y recomendaciones.

3. METODOLOGÍA DEL TRABAJO DE APLICACIÓN

Diagrama 1. Diagrama General del Macroproyecto.

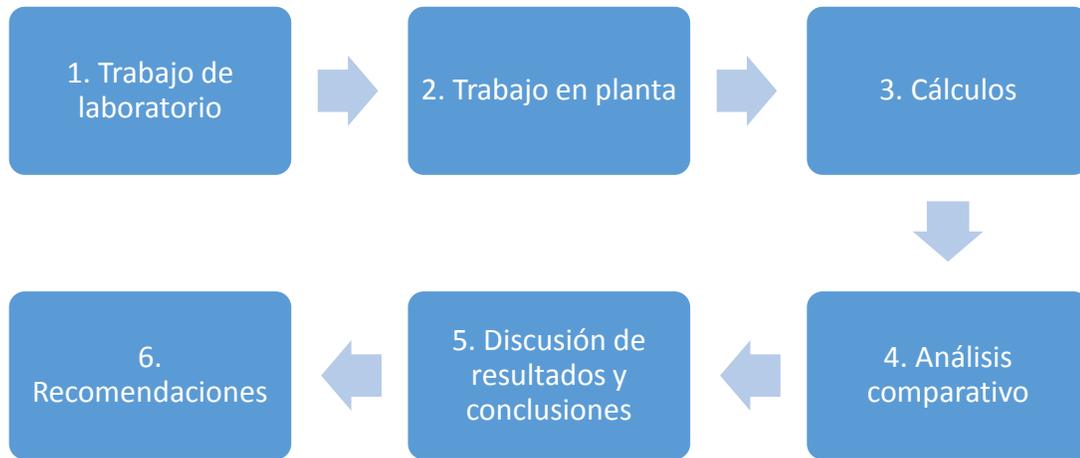


Fuente: el autor.

En el diagrama 1, se muestra el total de actividades realizadas en el macroproyecto y se enmarcan aquellas que están directamente relacionadas o involucradas en el trabajo a realizar. La extracción y el transporte de los materiales hasta la planta no se involucran en este trabajo, únicamente se tienen en cuenta, el trabajo de evaluación de los materiales y el diseño de las mezclas, con el posterior trabajo en planta hasta la salida de la mezcla en las volquetas, las pruebas en campo de la carretera en marcha, se dejan para un trabajo posterior.

A continuación se presenta un cuadro esquemático con la metodología usada:

Diagrama 2. Esquemático de la metodología a trabajar



3.1 TRABAJO DE LABORATORIO

Se evaluaron los materiales a trabajar (asfalto y agregado). Posteriormente se realizó el diseño SUPERPAVE para cada mezcla asfáltica aditivada y para la mezcla hecha con asfalto original, esto con el fin de obtener la fórmula (% asfalto óptimo y mejor distribución de agregados) para cada tipo de mezcla, esta información se entrega al Jefe de planta quién ordena la ejecución o elaboración de las mezclas en la misma. En los anexos A, B y C se muestran los ensayos realizados en laboratorio.

Para la evaluación de las mezclas según el trabajo de laboratorio se realizó el siguiente procedimiento:

- Evaluación de las propiedades de los materiales (asfalto y agregado). Para el asfalto son: durabilidad, adhesión y cohesión, susceptibilidad a la temperatura, endurecimiento y envejecimiento. Para el agregado son: Graduación y tamaño máximo de partícula, limpieza, dureza,

forma de la partícula, textura de la superficie, capacidad de absorción, afinidad con el asfalto, peso específico.

- Cumplidos los requisitos de INVIAS, se procedió a la fabricación de especímenes de mezcla bituminosa utilizando el método SUPERPAVE.
- Finalmente, se realizaron las pruebas para la mezcla elaborada: Densidad de la mezcla, vacíos de aire, vacíos del agregado mineral, contenido de asfalto. Además, las pruebas mecánicas: Módulo dinámico (mide la rigidez de la mezcla), fatiga (mide la resistencia a la fatiga de la mezcla), RLA (mide la deformación permanente de la briqueta). Los ensayos anteriores se realizaron en el Nottingham Asphalt Tester, un equipo especializado para ensayar briquetas cilíndricas y prismáticas en laboratorio. Las briquetas se someten a pulsos de carga periódicos y se mide la deformación en el caso del módulo dinámico y RLA, para la fatiga se miden el número de pulsos hasta la rotura del espécimen.
- Con la información recopilada se procedió a la elección del mejor aditivo.

3.2 TRABAJO EN PLANTA

Se realizó muestreo isocinético que consiste en la extracción de muestras a velocidad constante del bulk o corriente gaseosa (Método 1 U.S. EPA)]. La determinación de los gases CO₂, NO_x, SO₂ y material particulado según los métodos de la EPA, se realizó en un punto de la chimenea preestablecido.

CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES Y EQUIPOS (Serrano, 2015):

Las propiedades que deben tener las mezclas se resumen en la Tabla 5:

Tabla 5. Propiedades de las mezclas a trabajar

| | Mezcla Caliente | Mezcla Tibia |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Temperatura de compactación | 134°C | 106°C |
| Temperatura de mezcla | 150°C | 115°C |
| Porcentaje de asfalto | 5% p/p | 5,2% |
| Porcentaje de agregado | 95% p/p | 94,8% |
| Gravedad específica bulk | 2,354 g/cm ³ | 2,365 g/cm ³ |
| Porcentaje de aditivo | 0% | 1% |

Equipos: para la toma de la muestra se utilizó un equipo de muestreo isocinético marca Clean Air Express modelo M-5 Meter, una sonda Clean Air Express de 4 pies de longitud en acero inoxidable. La muestra de gas para la determinación de O₂ y CO₂, se realizó con un equipo medidor de gases de combustión Fyrite marca Bacharach. El análisis de los VOC y HCT se realizó utilizando un cromatógrafo de gases Agilent Technologies series GC 7890B, con detector de ionización en llama (FID), columna CP-Sil8CB, 30 m; 0,53 mm acoplado a un sistema headspace HHSS 7697 series.

Para el estudio, la población de datos a medir es:

- ✓ Material Particulado (PST).
- ✓ Concentración de CO₂
- ✓ Concentración de CO.
- ✓ Concentración de NO_x
- ✓ Concentración de SO₂
- ✓ Hidrocarburos Totales
- ✓ Compuestos Orgánicos Volátiles
- ✓ Energía eléctrica
- ✓ Consumos máxicos de combustibles (Gas natural y Diesel)
- ✓ Producción de mezcla asfáltica densa en caliente tipo II.
- ✓ Entradas de materia prima como agregado y asfalto.
- ✓ Entradas de combustible como gas natural y diésel.

Paralelo al trabajo de medición directa, se requiere la realización del ICV (Inventario de Ciclo de Vida) de todas y cada una de las entradas que corresponden al proceso de producción de mezcla asfáltica, para ello se utilizó las siguientes etapas:

- I. Diagrama del proceso (cualitativo: diagrama de bloques).
- II. Formulación de principales hipótesis y limitaciones.
- III. Balance de materia (kg/mes) y balance de energía (MJ/mes).
- IV. Determinación de la descripción cuantitativa del proceso (elaboración o selección de eco-indicadores y utilización del método de análisis correcto).

3.3 CÁLCULOS

Se realizaron los balances de masa y energía para obtener los valores de cada sustancia involucrada por unidad de masa de mezcla asfáltica. Se calculó la estequiometría de la combustión en este punto y el calor requerido para la misma.

Se determinó el valor del número de los flujos del sistema con establecimiento previo de la base de cálculo.

3.4 ANÁLISIS COMPARATIVO

Se procedió a la comparación de cada uno de los escenarios con los estándares. El impacto ambiental se evaluó mediante la comparación de los dos escenarios: mezclas tibias y calientes, mediante la metodología de análisis de ciclo de vida con el software Simapro 7.1. Las mezclas a trabajar se pueden caracterizar como MEZCLA ADITIVADA y MEZCLA CALIENTE ORIGINAL.

3.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se compararon los escenarios (el de referencia y las posibles mejoras propuestas). Se interpretan los resultados teniendo en cuenta las contribuciones de las etapas en las categorías ambientales y el análisis de mejoras basado en los escenarios propuestos para la mitigación del impacto de las contribuciones.

3.6 CONCLUSIONES

Se concluye sobre la posible utilización de las mezclas tibias para la construcción de carreteras en Colombia y el impacto que las mismas producen durante su fabricación en el medio ambiente.

3.7 RECOMENDACIONES RESPECTIVAS

En base a la discusión de los resultados se sugieren posibles ampliaciones del ACV, aspectos por mejorar, toma de decisiones y por último relación de las mezclas tibias con otras tecnologías o procedimientos como el reciclado de mezcla asfáltica.

4. RESULTADOS

4.1 DEFINICIÓN DEL OBJETIVO Y EL ALCANCE

Objetivo: Evaluar mediante la metodología de Ciclo de vida el impacto ambiental de una mezcla tibia frente a una mezcla asfáltica caliente convencional.

En este trabajo se busca medir los beneficios de usar una mezcla asfáltica tibia. La denominación “tibia” se refiere a que su temperatura de compactación y mezclado (105 y 115°C, respectivamente) es inferior a las temperaturas normalmente usadas (135 y 150°C). Esta disminución de la temperatura repercute en un menor consumo de combustible (gas natural y ACPM) y menor cantidad de emisiones de gases contaminantes. Dicho cambio de temperatura se logra mediante la inserción de un aditivo de tipo químico en la mezcla, el cual permite alcanzar el punto de trabajabilidad adecuado para la mezcla del agregado con el asfalto a una temperatura inferior.

Alcance: El estudio se limita al análisis de las emisiones gaseosas y el consumo de combustible y energía calorífica utilizada.

Para la realización del estudio se fijaron los límites de la puerta a la puerta (gate to gate), es decir solamente se tuvieron en cuenta para el ACV las etapas del proceso de producción de mezcla asfáltica descrito anteriormente. El límite temporal está sujeto al periodo de tiempo de producción de la mezcla, es decir, cierto número de horas. La unidad funcional para el análisis fue de 1 tonelada de mezcla asfáltica.

Sistema del producto bajo estudio: Las etapas del proceso a estudiar son las siguientes:

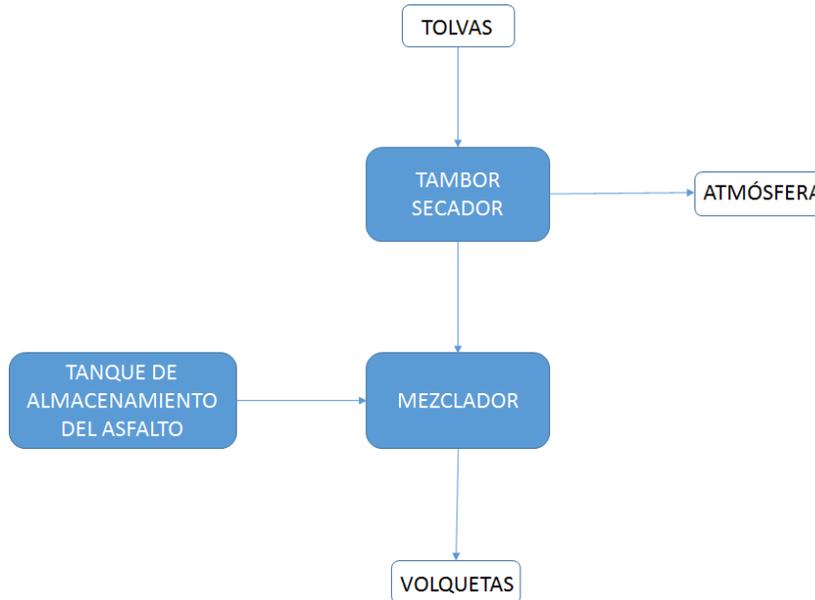
1. El mezclador: En el cual ocurre la mezcla del asfalto precalentado con el agregado de acuerdo a la fórmula de trabajo emitida por el laboratorio. Consta de dos ejes gemelos provistos de paletas que giran en sentido contrario.
2. El secador: Que consta de un tambor rotatorio inclinado que gira sobre su eje axial, en su interior posee aletas que arrastran los agregados y los exponen a la llama para eliminar la humedad y elevar su temperatura hasta la temperatura de mezclado.
3. Sistema de calentamiento del asfalto: De acuerdo a la tecnología de la planta asfáltica el diseño puede cambiar, sin embargo, consta principalmente de un intercambiador de calor que eleva la temperatura del asfalto para que pueda fluir por la tubería y posteriormente ser mezclado.

Función y unidad funcional del sistema: La función de estudio es la fabricación de mezcla asfáltica MDC-II utilizada como capa de rodadura en carretera, el estudio se realizó en dos plantas productoras de mezcla asfáltica con variaciones en la tecnología usada en ellas y con velocidades de producción diferentes.

La unidad funcional es una tonelada de mezcla asfáltica, ya sea tibia o caliente.

Límites geográficos y temporales del sistema: Las dos plantas se encuentran ubicadas en regiones periféricas, una en la periferia del municipio de Girón y la otra en la periferia del municipio de Bucaramanga. El tiempo gastado en los análisis corresponde al tiempo de producción.

Diagrama 3. Condensación del proceso (Elaborado por el autor)



Las fuentes fijas a evaluar en las dos plantas asfálticas reciben los gases provenientes de los tambores rotatorios secadores. No se midieron las emisiones provenientes de los intercambiadores de calor que mantienen caliente al asfalto tanto en el tanque como en la tubería que lo transportó debido a que no estaban conectados con la chimenea donde se tomaron las mediciones. Para estas últimas, se realizó el balance de masa y energía únicamente. Para las chimeneas que si fueron evaluadas se tomó la medición directa de los contaminantes de acuerdo al protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial).

La medición de HCT y COV se realizó por monitoreo en diferentes puntos de ambas plantas.

La planta número 1 funciona con gas natural y la planta número 2 lo hace con ACPM, en ambas se tomó la medición directa de los consumos de combustible.

4.2 ANÁLISIS DEL INVENTARIO

Para el inventario se obtuvieron las entradas y salidas de las diferentes etapas del proceso, se realizaron los balances de masa y energía requeridos para el análisis. Se presentan los balances de masa por componentes, para el secador y el intercambiador ocurrió combustión completa como lo manifiestan los gases medidos con el analizador de gases de combustión FYRITE marca Bacharach, también se presentan los balances en el mezclador y los consumos de energía térmica para las dos operaciones de combustión. Los balances de masa se basan en el muestreo isocinético y las composiciones de los gases medidos.

Tabla 6. Balance de masa para el mezclador de la planta 1 mezcla caliente.

| Balance de masa | | |
|-----------------|--------|--------|
| | Entra | Sale |
| Asfalto | 17360 | |
| Agregado | 329840 | |
| Mezcla | | 347200 |

Tabla 7. Balance de masa para el intercambiador de calor de la planta 1 mezcla caliente

| | Entra | Reacciona | Produce | Sale |
|-------------|------------|-----------|-----------|------------|
| | Masa kg | Masa kg | Masa kg | Masa kg |
| Oxígeno | 16371,5357 | 9095,2976 | 0 | 7276,23808 |
| CO2 | 0 | 0 | 6253,0171 | 6253,0171 |
| Nitrógeno | 61588,158 | 0 | 0 | 61588,158 |
| Gas Natural | 2273,8244 | 2273,8244 | 0 | 0 |
| Agua | 0 | 0 | 5116,1049 | 5116,1049 |
| Agregado | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Totales | 80233,5181 | 11369,122 | 11369,122 | 80233,5181 |

Tabla 8. Balance de masa para el secador de la planta 1 mezcla caliente

| | Entra | Reacciona | Produce | Sale |
|-------------|------------|------------|------------|------------|
| | Masa kg | Masa kg | Masa kg | Masa kg |
| Oxígeno | 22588,7124 | 9110,6028 | 0 | 13478,1096 |
| CO2 | 0 | 0 | 6177,4669 | 6177,4669 |
| Nitrógeno | 62901,5556 | 3,71081104 | 0 | 62897,8448 |
| CO | 0 | 0 | 69,44 | 69,44 |
| Gas Natural | 2286,0316 | 2286,0316 | 0 | 0 |
| Agua | 0 | 0 | 5143,5711 | 5143,5711 |
| Agregado | 329840 | 0 | 0 | 329840 |
| NO | 0 | 3,38023979 | 7,95173794 | 4,57149815 |
| NO2 | 0 | 0 | 5,18303434 | 5,18303434 |
| SO2 | 0 | 0 | 0,22534932 | 0,22534932 |
| S | 0,11267466 | 0,11267466 | 0 | 0 |
| MP | 6,27973436 | 0 | 0 | 6,27973436 |
| Totales | 417622,692 | 11403,8381 | 11403,8381 | 417622,692 |

Tabla 9. Balance de masa para el mezclador de la planta 1 mezcla tibia.

| Balance de masa | | |
|-----------------|----------|---------|
| | Entra kg | Sale kg |
| Asfalto | 15865,2 | |
| Agregado | 289234,8 | |
| Mezcla | | 305100 |

Tabla 10. Balance de masa del intercambiador de calor de la planta 1 mezcla tibia

| | Entra | Reacciona | Produce | Sale |
|-------------|------------|------------|------------|------------|
| | Masa kg | Masa kg | Masa kg | Masa kg |
| Oxígeno | 8916,3416 | 4953,52311 | 0 | 3962,81849 |
| CO2 | 0 | 0 | 3405,54714 | 3405,54714 |
| Nitrógeno | 33542,4279 | 0 | 0 | 33542,4279 |
| Gas Natural | 1238,38078 | 1238,38078 | 0 | 0 |
| Agua | 0 | 0 | 2786,35675 | 2786,35675 |
| Agregado | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Totales | 43697,1503 | 6191,90389 | 6191,90389 | 43697,1503 |

Tabla 11. Balance de masa del secador de la planta 1 mezcla tibia.

| | Entra | Reacciona | Produce | Sale |
|-------------|------------|------------|------------|------------|
| | Masa kg | Masa kg | Masa kg | Masa kg |
| Oxígeno | 17765,3489 | 7171,71862 | 0 | 10593,6303 |
| CO2 | 0 | 0 | 4855,41389 | 4855,41389 |
| Nitrógeno | 49439,9251 | 2,98366164 | 0 | 49436,9414 |
| CO | 0 | 0 | 61,02 | 61,02 |
| Gas Natural | 1800,47362 | 1800,47362 | 0 | 0 |
| Agua | 0 | 0 | 4051,06565 | 4051,06565 |
| Agregado | 289.235 | 0 | 0 | 289234,8 |
| NO | 0 | 2,23361517 | 6,39356066 | 4,15994549 |
| NO2 | 0 | 0 | 3,42487659 | 3,42487659 |
| SO2 | 0 | 0 | 0,18308661 | 0,18308661 |
| S | 0,0915433 | 0,0915433 | 0 | 0 |
| MP | 2,47473197 | 0 | 0 | 2,47473197 |
| Totales | 358243,114 | 8977,50106 | 8977,50106 | 358243,114 |

Tabla 12. Balance de masa para el mezclador de la planta 2 mezcla caliente

| | Balance de masa | |
|----------|-----------------|--------|
| | Entra | Sale |
| Asfalto | 12123,1 | |
| Agregado | 230338,9 | |
| Mezcla | | 242462 |

Tabla 13. Balance de masa para el intercambiador de calor para la planta 2 mezcla caliente

| | Entra | Reacciona | Produce | Sale |
|-----------|------------|------------|------------|------------|
| | Masa kg | Masa kg | Masa kg | Masa kg |
| Oxígeno | 596,312047 | 331,284471 | 0 | 265,027576 |
| CO2 | 0 | 0 | 298,441614 | 298,441614 |
| Nitrógeno | 2243,26913 | 0 | 0 | 2243,26913 |
| ACPM | 95,6726704 | 95,6726704 | 0 | 0 |
| Agua | 0 | 0 | 128,515527 | 128,515527 |
| Agregado | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Totales | 2935,25385 | 426,957141 | 426,957141 | 2935,25385 |

Tabla 14. Balance de masa para el secador de la planta 2 mezcla caliente.

| | Entra | Reacciona | Produce | Sale |
|-----------|------------|------------|------------|------------|
| | Masa kg | Masa kg | Masa kg | Masa kg |
| Oxígeno | 15418,2012 | 3228,37601 | 0 | 12189,8252 |
| CO2 | 0 | 0 | 2793,5016 | 2793,5016 |
| Nitrógeno | 46831,8042 | 19,4894215 | 0 | 46812,3147 |
| CO | 0 | 0 | 48,4924 | 48,4924 |
| ACPM | 923,95771 | 923,95771 | 0 | 0 |
| Agua | 0 | 0 | 1271,80061 | 1271,80061 |
| Agregado | 230338,9 | 0 | 0 | 230338,9 |
| NO | 0 | 17,8279998 | 41,763046 | 23,9350462 |
| NO2 | 0 | 0 | 27,3362663 | 27,3362663 |
| SO2 | 0 | 0 | 13,5144261 | 13,5144261 |
| S | 6,75721304 | 6,75721304 | 0 | 0 |
| MP | 76,738186 | 0 | 0 | 76,738186 |
| Totales | 293596,358 | 4196,40835 | 4196,40835 | 293596,358 |

Tabla 15. Balance de masa para el mezclador de planta 2 mezcla tibia.

| | Balance de masa | |
|----------|-----------------|---------|
| | Entra kg | Sale kg |
| Asfalto | 17217,2 | |
| Agregado | 313882,8 | |
| Mezcla | | 331100 |

Tabla 16. Balance de masa para el intercambiador de calor de la planta 2 mezcla tibia

| | Entra | Reacciona | Produce | Sale |
|-----------|------------|------------|------------|------------|
| | Masa kg | Masa kg | Masa kg | Masa kg |
| Oxígeno | 121,936728 | 67,7426267 | 0 | 54,1941014 |
| CO2 | 0 | 0 | 61,0267629 | 61,0267629 |
| Nitrógeno | 458,714358 | 0 | 0 | 458,714358 |
| ACPM | 19,5636034 | 19,5636034 | 0 | 0 |
| Agua | 0 | 0 | 26,2794673 | 26,2794673 |
| Agregado | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Totales | 600,21469 | 87,3062301 | 87,3062301 | 600,21469 |

Tabla 17. Balance de masa para el secador de la planta 2 mezcla tibia.

| | Entra | Reacciona | Produce | Sale |
|-----------|------------|------------|------------|------------|
| | Masa kg | Masa kg | Masa kg | Masa kg |
| Oxígeno | 16226,7003 | 2896,51426 | 0 | 13330,1861 |
| CO2 | 0 | 0 | 2476,89268 | 2476,89268 |
| Nitrógeno | 49828,571 | 20,5108045 | 0 | 49808,0602 |
| CO | 0 | 0 | 66,22 | 66,22 |
| ACPM | 830,988554 | 830,988554 | 0 | 0 |
| Agua | 0 | 0 | 1143,8313 | 1143,8313 |
| Agregado | 313882,8 | 0 | 0 | 313882,8 |
| NO | 0 | 18,7623126 | 43,9517238 | 25,1894113 |
| NO2 | 0 | 0 | 28,7688793 | 28,7688793 |
| SO2 | 0 | 0 | 14,2226772 | 14,2226772 |
| S | 7,11133861 | 7,11133861 | 0 | 0 |
| MP | 80,7598076 | 0 | 0 | 80,7598076 |
| Totales | 380856,931 | 3773,88727 | 3773,88727 | 380856,931 |

En cuanto a la parte energética se calcularon los consumos de energía térmica de los secadores e intercambiadores de cada planta para cada escenario:

Tabla 18. Consumos energéticos para los secadores:

| Equipo: Secador | Energía consumida (kJ) |
|--------------------------|------------------------|
| Planta 1 mezcla caliente | 33038410,41 |
| Planta 1 mezcla tibia | 15967376,55 |
| Planta 2 mezcla caliente | 23071886,7 |
| Planta 2 mezcla tibia | 22681756,2 |

Tabla 19. Consumos energéticos para los intercambiadores de calor:

| Equipo: Intercambiador de calor | Energía consumida (kJ) |
|---------------------------------|------------------------|
| Planta 1 mezcla caliente | 1734190,396 |
| Planta 1 mezcla tibia | 1046527,869 |
| Planta 2 mezcla caliente | 1489877 |
| Planta 2 mezcla tibia | 1589555,78 |

En la siguiente tabla se presenta la lista de los gases medidos y el punto de emisión:

Tabla 20. Gases medidos en planta.

| Contaminante | Fuente |
|-----------------|-----------|
| CO ₂ | Chimenea |
| NO _x | Chimenea |
| SO ₂ | Chimenea |
| TSP | Chimenea |
| HCT | Mezclador |
| COV | Mezclador |

Principales hipótesis y limitaciones: Para los procesos de combustión de los secadores se asumió combustión incompleta y el valor de CO se obtuvo por factores de emisión.

Las limitaciones del estudio se basan en que se tuvieron en cuenta solo las principales partes del proceso ya que en una de las plantas no se contaba con la suficiente data de todas las partes, se utilizaron las partes señaladas con el fin de brindar uniformidad a los análisis.

Descripción cualitativa: La mezcla asfáltica es producida mediante un proceso batch o por lotes, el agregado pétreo es almacenado por tamaños luego de proceder de la cantera y almacenado en pilas, por lo general bajo techo para evitar que se moje por la lluvia. Posteriormente el agregado es vertido mediante cargadores en las tolvas discriminadas por tamaños (1/2", 3/4" y 1/4"), luego el agregado es transportado por bandas transportadoras hasta el secador. Este secador está dotado de un exhaustor que transporta los vapores producidos controlando el tránsito de gas y de aire. Para alcanzar la máxima eficiencia en la combustión se utiliza un turboventilador que introduce aire en exceso. La planta 1 (en el anexo A5 se muestran fotos de las plantas) cuenta con un sistema colector de finos que consta de una unidad de ciclones y filtro de mangas que a su vez cuenta con un compresor en la impulsión del aire, los polvos finos retenidos son transportados mediante un tornillo sin fin al elevador de cangilones que dirigen los agregados pétreos. La planta 2 cuenta con un filtro de mangas de 144

unidades, no tiene elevador de cangilones, el mezclador queda a un nivel inferior del secador, los agregados son transportados mediante una banda transportadora. Esta planta tiene una capacidad inferior a la 1 ya que produce menos cantidad de mezcla por lote producido.

El asfalto es calentado mediante un intercambiador de calor que hace fluir aceite mineral con el fin de calentar el asfalto del tanque de almacenamiento y las tuberías que lo transporta hasta el mezclador.

Finalmente en el mezclador los agregados y el asfalto son pesados y mezclados para luego ser vertida la mezcla en la volqueta por lotes.

La temperatura de mezclado de la mezcla caliente es de 150°C y la temperatura de mezclado para la mezcla tibia es de 115°C.

Las principales fuentes de emisión son el secador, el mezclador y el intercambiador de calor. De acuerdo a Stotko⁹² el proceso de secado del agregado es responsable del 60% del total del consumo de energía de la planta.

Descripción cuantitativa: Con la identificación de las corrientes de entrada y de salida se determina la cantidad de materia en kilogramos y la energía en kilojulios.

Vinculación de los datos a la unidad funcional: La unidad funcional asignada es de 1 tonelada de mezcla tanto caliente como tibia. Se determinaron las entradas y salidas para los dos tipos de mezcla producida en las dos diferentes plantas de mezcla asfáltica, para las dos plantas se utilizó la misma unidad funcional.

⁹² STOTKO, Oliver. Energy and related carbon emission reduction technologies for hot mix asphalt plants. En Proceedings of the 10 th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa e CAPSA. Winterton, South Africa. 2011. p. 150.

Etapas excluidas del sistema: se excluye la extracción de los agregados en el río o en la cantera, la obtención del asfalto en la refinería, los análisis de la carretera en campo y la evaluación del desempeño de la mezcla a largo plazo se dejan para un estudio posterior, las etapas de transporte de los materiales también quedan excluidas.

4.3 EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL

El software usado para el análisis es el SIMAPRO con la metodología IMPACT 2002⁺, combinación del método CML y EDIP (restringen modelos cuantitativos de etapas relativamente tempranas de la cadena causa-efecto para limitar las incertidumbres y los resultados del grupo de ICV en las llamadas categorías de punto medio, de acuerdo a los temas) y los métodos orientados hacia los daños como Eco-indicador 99 o EPS. Tratan de modelar la cadena de causa y efecto hasta el punto final o daños, a veces con grandes incertidumbres), creada por el instituto de tecnología federal suizo de Lausanne (EPFL, por sus siglas en francés).

Los resultados de la medición directa de los gases para la planta 1 se resumen en la Tabla 21:

Tabla 21. Resultados de las emisiones medidas en la planta 1.

| Gas | Mezcla Caliente | Cumple | Mezcla Tibia | Cumple |
|-----------------|-------------------------|--------|-------------------------|--------|
| NO _x | 51,73 mg/m ³ | Si | 61,12 mg/m ³ | Si |
| | 58,65 mg/m ³ | Si | 50,32 mg/m ³ | Si |
| SO ₂ | 2,55 mg/m ³ | Si | 2,69 mg/m ³ | Si |
| PST | 71,06 mg/m ³ | Si | 36,36 mg/m ³ | Si |
| COV | 8023 µg/m ³ | Si | 2929 µg/m ³ | Si |
| HCT | 6116 µg/m ³ | Si | 825 µg/m ³ | Si |
| CO ₂ | 140,66 g/m ³ | -- | 121,37 g/m ³ | -- |
| CO | 0,786 g/m ³ | -- | 0,896 g/m ³ | -- |

Se aprecia que los valores reportados cumplen con la normatividad ambiental actual del país, se observa una reducción del material particulado,

los compuestos orgánicos volátiles y los hidrocarburos totales de la mezcla tibia comparados con la mezcla caliente.

Los resultados de la medición directa de los gases para la planta 2 se muestran en la Tabla 9:

Tabla 22. Resultados de las emisiones medidas en la planta 2.

| Gas | Mezcla Caliente | Cumple | Mezcla Tibia | Cumple |
|-----------------|---------------------------|--------|---------------------------|--------|
| NO _x | 365,16 mg/m ³ | Si | 381,11 mg/m ³ | Si |
| | 417,05 mg/m ³ | Si | 469,60 mg/m ³ | Si |
| SO ₂ | 206,18 mg/m ³ | Si | 164,73 mg/m ³ | Si |
| PST | 1170,74 mg/m ³ | No | 1335,07 mg/m ³ | No |
| COV | 2125,83 µg/m ³ | Si | 1116,13 µg/m ³ | Si |
| HCT | 818,26 µg/m ³ | Si | 514,87 µg/m ³ | Si |
| CO ₂ | 42,63 g/m ³ | -- | 35,91 g/m ³ | -- |
| CO | 0,74 g/m ³ | -- | 0,96 g/m ³ | -- |

En este caso se aprecia el mismo comportamiento que en la mezcla 1 con la única diferencia que el material particulado no cumple con el estándar.

Tabla 23. Consumo de combustible

| | Caliente | Tibia | Ahorro |
|------------------------|--|--|--------|
| Planta 1 (Gas natural) | 47,28 m ³ / m ³ mezcla | 35,91 m ³ / m ³ mezcla | 24% |
| Planta 2 (Diesel) | 3,821 gal/m ³ mezcla | 2,2 gal/m ³ mezcla | 42% |

Tabla 24. Consumos energéticos:

| | Caliente kJ/m ³ mezcla | Tibia kJ/m ³ mezcla |
|----------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Planta 1 | 236548,30 | 131890,73 |
| Planta 2 | 238463,73 | 173366,51 |

Identificación y selección de las categorías de impacto: Las categorías de impacto a utilizar son: Calentamiento global, consumo de recursos energéticos, reducción de la capa de ozono, acidificación, consumo de materias primas y formación de oxidantes fotoquímicos. Se utilizarán las categorías de impacto a término medio, debido a que estas se acercan más a la intervención ambiental, que es lo que se requiere para el análisis comparativo del presente estudio.

Caracterización: Con la selección de las categorías de impacto y los datos del inventario del ciclo de vida se procedió a realizar la caracterización que se presenta en las siguientes tablas. Las categorías de impacto son escogidas de acuerdo al tipo de impacto realizado por el proceso objeto de estudio, el impacto porcentual fue calculado mediante la utilización del software SIMAPRO 7.1 introduciendo la información resultante de los balances.

Tabla 25. Caracterización para la planta 1 (%).

| Categoría de Impacto | Mezclado | | Secado | | Calentamiento Asfalto | |
|--------------------------|----------|---------|----------|-------|-----------------------|-------|
| | Caliente | Tibia | Caliente | Tibia | Caliente | Tibia |
| Toxicidad cancerígena | 0 | 0 | 75,1 | 73,4 | 24,9 | 26,6 |
| Toxicidad no cancerígena | 0 | 0 | 56,6 | 60 | 43,4 | 40 |
| Inorgánicos respirables | 0 | 0 | 84,5 | 84,6 | 15,5 | 15,4 |
| Agotamiento capa O3 | 0 | 0 | 56 | 59,7 | 44 | 40,3 |
| Orgánicos respirables | 0,171 | 0,00927 | 57 | 60,3 | 43 | 39,7 |
| Ecotoxicidad acuática | 0 | 0 | 56 | 59,7 | 44 | 40,3 |
| Ecotoxicidad terrestre | 0 | 0 | 56,1 | 59,7 | 43,9 | 40,3 |
| Acidificación terrestre | 0 | 0 | 84,9 | 87 | 15,1 | 13 |
| Acidificación acuática | 0 | 0 | 74,1 | 77,2 | 25,9 | 22,8 |
| Eutrofización acuática | 0 | 0 | 56 | 59,7 | 44 | 40,3 |
| Calentamiento global | 0 | 0 | 55,7 | 59,5 | 44,3 | 40,5 |
| Energía no renovable | 0 | 0 | 55,5 | 59,3 | 44,5 | 40,7 |

Tabla 26. Caracterización para la planta 2 (%).

| Categoría de Impacto | Mezclado | | Secado | | Calentamiento Asfalto | |
|--------------------------|----------|----------|----------|-------|-----------------------|-------|
| | Caliente | Tibia | Caliente | Tibia | Caliente | Tibia |
| Toxicidad cancerígena | 0 | 0 | 91,8 | 95 | 8,23 | 4,99 |
| Toxicidad no cancerígena | 0 | 0 | 91,9 | 94 | 8,15 | 6,02 |
| Inorgánicos respirables | 0 | 0 | 99,7 | 98,5 | 0,261 | 1,49 |
| Agotamiento capa O3 | 0 | 0 | 91,8 | 93,9 | 8,23 | 6,13 |
| Orgánicos respirables | 5,26E-04 | 9,26E-04 | 92,5 | 88,7 | 7,46 | 11,3 |
| Ecotoxicidad acuática | 0 | 0 | 91,8 | 97 | 8,22 | 2,96 |
| Ecotoxicidad terrestre | 0 | 0 | 91,9 | 94,2 | 8,14 | 5,78 |
| Acidificación terrestre | 0 | 0 | 97,3 | 96,3 | 2,65 | 3,74 |
| Acidificación acuática | 0 | 0 | 97,4 | 96,9 | 2,57 | 3,11 |
| Eutrofización acuática | 0 | 0 | 91,8 | 95,1 | 8,23 | 4,86 |
| Calentamiento global | 0 | 0 | 91,8 | 95,5 | 8,23 | 4,54 |
| Energía no renovable | 0 | 0 | 91,7 | 96,1 | 8,33 | 29,5 |

4.4 INTERPRETACIÓN

Adicionalmente a la construcción del ACV para la mezcla tibia y la mezcla caliente se realiza la comparación de los dos escenarios para los dos tipos de mezclas en dos plantas productoras de mezcla diferentes. Los resultados de este trabajo repercuten en la toma de decisiones por parte de las empresas productoras de mezcla asfáltica sobre la eventual fabricación de mezclas tibias para la construcción de carreteras en Colombia.

La planta 1 presenta menor variabilidad en el porcentaje correspondiente a cada categoría, esto induce a que la afectación de cada proceso mostrado influye de manera equivalente sobre el medio ambiente, excepto en las para las categorías de acidificación terrestre, inorgánicos respirables y cancerígenos, en las cuales la etapa contribuye más de manera significativa. Este perfil ambiental se presenta de manera semejante en la correspondiente mezcla tibia.

El secado es la etapa más contaminante para ambos perfiles de la planta 1.

La planta 2 presenta variabilidad escasa entre categorías al igual que lo ocurrido en la planta 1, el secado continua siendo la etapa más contaminante, debido a que esta planta tiene una tecnología diferente y además presenta un problema de emisiones en el secado ya que no cumple con lo estipulado en la norma colombiana 909 de 2008 para material particulado, por esta razón en los perfiles ambientales de las mezclas de dicha planta, el secado tiene un porcentaje tan alto.

Los óxidos de nitrógeno presentan una tendencia algo superior para las mezclas tibias, este hecho puede deberse a que para la aplicación de esta tecnología fue necesario cambiar la velocidad de producción, lo cual pudo afectar ligeramente las composiciones de los gases.

Por su parte los HCT y COV, a pesar de contribuir muy poco en el perfil ambiental, es importante resaltar la gran reducción que se logró de estas emisiones por medio de la utilización del aditivo químico de las mezclas tibias.

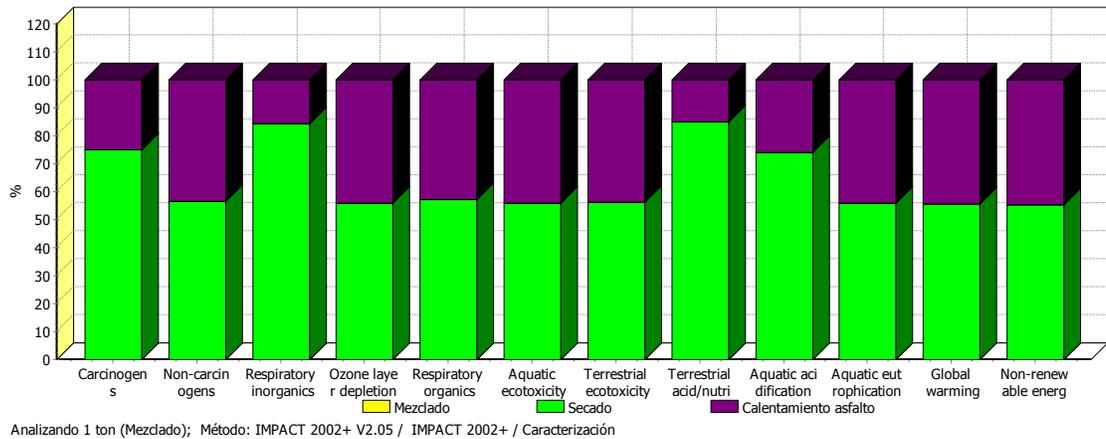
En cuanto a la comparación de escenarios, para la planta 1 se aprecia una reducción del impacto hasta cerca de un 30% para todas las categorías de impacto mediante el uso de la mezcla tibia. Para la mezcla 2 la reducción es mucho más notoria comparada con la planta 1, en la mayoría de las categorías la reducción estuvo por encima del 50%.

En la planta 2 se presenta una reducción del impacto más variable debido a que los valores del inventario contribuyen de manera distinta en cada categoría.

4.5 PERFIL AMBIENTAL

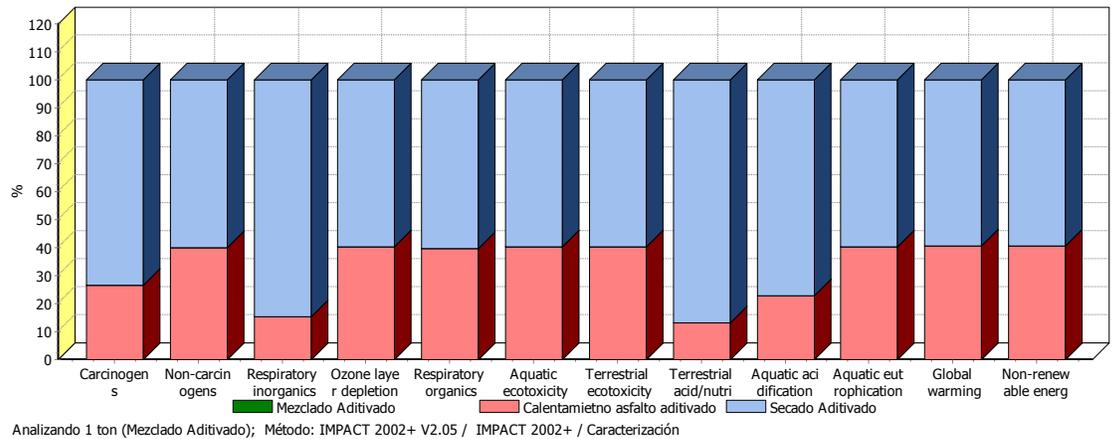
En los gráficos 2 al 5, se muestra el perfil ambiental para cada una de las mezclas para cada planta. Se muestra el impacto porcentual para cada categoría de impacto discriminado en cada uno de los subprocesos del proceso global, en este caso mezclador, secador e intercambiador de calor.

Grafico 2. Caracterización de la mezcla caliente de la planta 1.



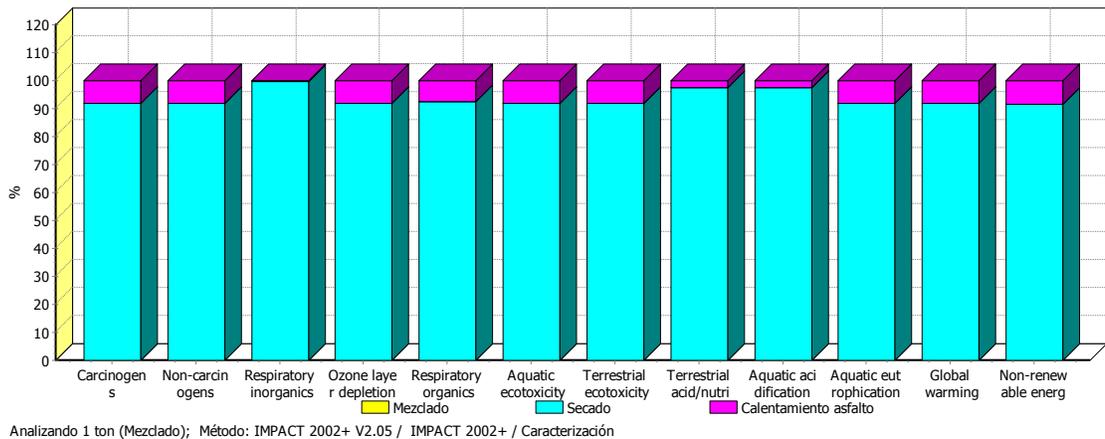
En la gráfica se aprecia la preponderancia de la etapa de secado sobre la etapa de calentamiento del asfalto, esto es de acuerdo al enfoque utilizado en este estudio. La etapa de secado se representa en color verde, la etapa de calentamiento del asfalto se representa con violeta oscuro y la etapa de mezclado con amarillo. La etapa de mezclado no influye considerablemente en las categorías de impacto debido a sus emisiones son pequeñas comparadas con los otros dos procesos, sin embargo, es importante señalar que mediante la utilización de la mezcla tibia se reducen considerablemente las emisiones de COV y HCT. Lo anterior se puede observar en las tablas 25 y 26.

Grafico 3. Caracterización de la mezcla tibia de la planta 1.



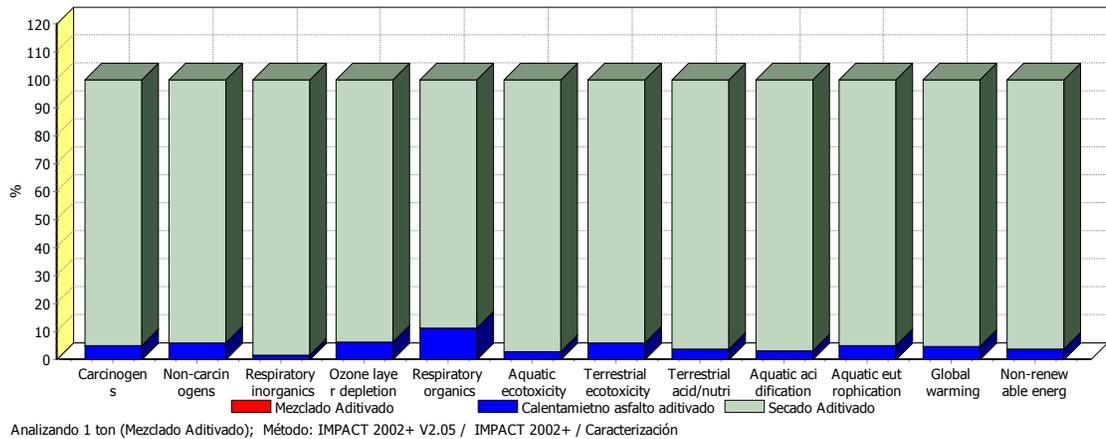
De acuerdo al gráfico 3, para la mezcla tibia de la planta 1 el efecto de la etapa de secado es mayor que el efecto de etapa de calentamiento del asfalto, esto se debe a la reducción de la temperatura que afecta más directamente a esta última.

Grafico 4. Caracterización de la mezcla caliente en la planta 2.



En el gráfico 4, en la planta dos el efecto de la etapa de secado es mucho mayor, esto se debe principalmente a que esta planta no cumple con el estándar de material particulado como se aprecia en la tabla 10, por esta razón esta etapa es la más contaminante.

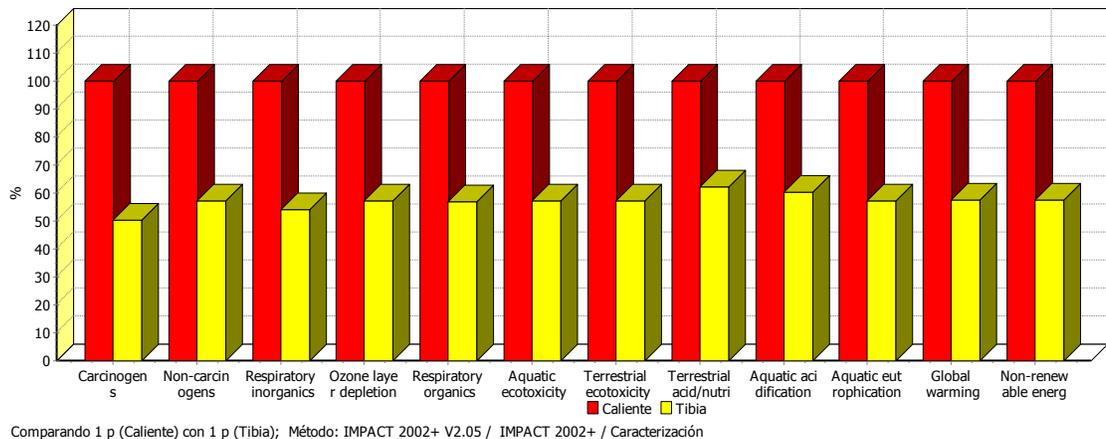
Grafico 5. Caracterización de la mezcla tibia en la planta 2.



De acuerdo al gráfico 5, para la mezcla tibia de la planta 2 el efecto del secado es menor, esto se debe a la reducción de la contaminación debido a la utilización de la mezcla tibia que influye considerablemente en la etapa de secado.

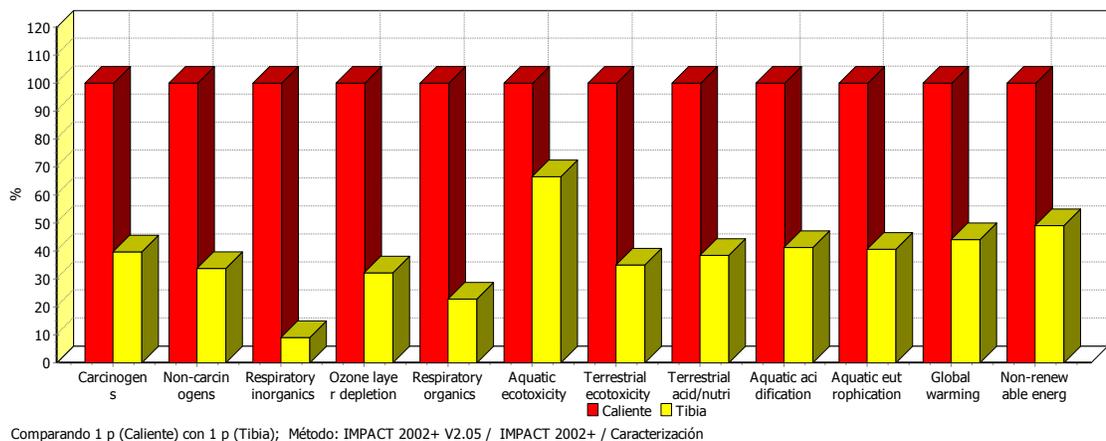
En los gráficos 6 y 7 se presenta la comparación de escenarios para las dos plantas productoras de mezcla asfáltica, se muestra en rojo la caracterización de la mezcla caliente y la de la tibia en amarillo.

Grafico 6. Comparación de escenarios para la planta 1.



En esta figura se aprecia la reducción del efecto sobre cada categoría de impacto ambiental, se aprecia que no hay mucha variación de los porcentajes para cada categoría lo que significa que la reducción de la contaminación ocurre de manera holística para la tecnología utilizada en esta planta.

Grafico 7. Comparación de escenarios para la planta 2.



En el gráfico 7, para la planta 2 hay variación considerable entre los porcentajes de cada categoría debido a la diferencia en la tecnología y al tipo de combustible utilizados. Todas las concentraciones de los gases estudiados y la cantidad de combustible utilizado tienen una incidencia diferente sobre cada categoría de impacto ambiental, se destaca fuertemente que el nivel de reducción se aprecia más en la planta dos que en la planta uno en la cual la reducción del impacto fue menor. Lo anterior debido a que la planta 1 tiene un proceso más estandarizado ya que es controlado por computadora y realiza análisis de emisiones periódicamente, la planta dos no llevaba un control estricto de sus emisiones.

A continuación se presentan los valores de cada categoría de impacto para las mezclas de la planta 1 y 2 respectivamente:

Tabla 27. Indicadores de impacto de la planta 1

| Categoría de Impacto | Unidad | Caliente | Tibia |
|---------------------------|--|----------|----------|
| Cancerígeno | Kg C ₂ H ₃ Cl eq | 96,2 | 48,4 |
| No cancerígeno | Kg C ₂ H ₃ Cl eq | 13,5 | 7,72 |
| Inorgánicos respirables | Kg MP 2.5 eq | 7,46 | 4,04 |
| Agotamiento capa de ozono | Kg CFC-11 eq | 0,000274 | 0,000157 |
| Orgánicos respirables | Kg C ₂ H ₄ eq | 4,19 | 2,38 |
| Ecotoxicidad acuática | Kg TEG agua | 1700000 | 976000 |
| Ecotoxicidad terrestre | Kg TEG suelo | 4810 | 2750 |
| Acidificación terrestre | Kg SO ₂ eq | 185 | 115 |
| Acidificación acuática | Kg SO ₂ eq | 38,9 | 23,5 |
| Eutroficación acuática | Kg PO ₄ P-lim | 0,0275 | 0,0157 |
| Calentamiento global | Kg CO ₂ eq | 32500 | 18600 |
| Energía no renovable | MJ primario | 597000 | 343000 |

Tabla 28. Indicadores de impacto de la planta 2.

| Categoría de Impacto | Unidad | Caliente | Tibia |
|---------------------------|--|----------|---------|
| Cancerígeno | Kg C ₂ H ₃ Cl eq | 373 | 184 |
| No cancerígeno | Kg C ₂ H ₃ Cl eq | 36,8 | 12,4 |
| Inorgánicos respirables | Kg MP 2.5 eq | 383 | 35,2 |
| Agotamiento capa de ozono | Kg CFC-11 eq | 0,014 | 0,00451 |
| Orgánicos respirables | Kg C ₂ H ₄ eq | 36,2 | 8,26 |
| Ecotoxicidad acuática | Kg TEG agua | 344000 | 229000 |
| Ecotoxicidad terrestre | Kg TEG suelo | 9370 | 3270 |
| Acidificación terrestre | Kg SO ₂ eq | 1450 | 560 |
| Acidificación acuática | Kg SO ₂ eq | 235 | 96,8 |
| Eutroficación acuática | Kg PO ₄ P-lim | 0,0222 | 0,00901 |
| Calentamiento global | Kg CO ₂ eq | 16000 | 7050 |
| Energía no renovable | MJ primario | 241000 | 118000 |

TEG:Trietilenglicol; C₂H₃Cl: cloroetileno; C₂H₄: etileno; eq: equivalente.

Por ejemplo: para la planta 1 la cantidad de kilogramos equivalentes para la categoría de calentamiento global fue de **32428,571** y para la mezcla tibia fue de **21215,06**.

5. CONCLUSIONES

El aditivo químico usado para el estudio reduce el impacto ambiental potencial de manera satisfactoria. En la planta 1 se obtuvo en promedio la reducción del impacto ambiental potencial de 43% y en la planta 2 se obtuvo una reducción del impacto ambiental potencial del 61%.

La reducción en la temperatura de 35°C influyó considerablemente en la emisión de gases contaminantes tales como HCT y COV que son perjudiciales para el desempeño laboral. En la planta 1 la reducción de COV fue de 36,5% y de HCT de 13,5. En la planta 2 la reducción de COV fue de 52,5% y de HCT de 63%.

Se obtuvo un ahorro de combustible de 24% para la planta 1 y de 43% para la planta 2. Esto puede traer grandes beneficios para las empresas productoras de mezcla asfáltica y junto con la reducción de gases una excelente alternativa para este gremio.

La tecnología con la que se cuenta en Colombia es apropiada para la aplicación de las mezclas tibias, solo se requerirá el establecimiento de procedimientos adecuados.

La operación de secado es la fuente fija principal de contaminación en una planta de mezcla asfáltica convencional. Para la planta 1 superó a las demás etapas en todas las categorías de impacto como lo demuestran las tablas 25 y los gráficos 2 y 3, por su parte la planta 2 presenta un comportamiento semejante como lo muestra la tabla 26 y los gráficos 4 y 5.

6. RECOMENDACIONES

A las plantas de mezcla asfáltica se les recomienda la utilización del aditivo de acuerdo a los datos y observaciones del reporte técnico R-G-13 051 de los laboratorios de CORASFALTOS.

Se recomienda ampliar los estudios con la implementación de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement, por sus siglas en inglés) debido a la extensa literatura que hay sobre las posibilidades de fabricar mezclas tibias con material reciclado.

Se recomienda para las plantas que decidan operar con mezclas tibias la realización de procedimientos de operación adecuados para cumplir con la adaptabilidad y estandarización del proceso.

Igualmente se recomienda la culminación del estudio a largo plazo de las mezclas asfálticas producidas mediante la toma de muestras testigo en carretera para analizar el comportamiento real de su desempeño mecánico.

Se recomienda analizar el efecto de la producción del aditivo con el fin de verificar que el ahorro energético sea más plausible.

BIBLIOGRAFÍA

AKISETTY, Chandra; LEE, Soon-Jae y AMIRKHANIAN, Serji. Effects of compaction temperature on volumetric properties of rubberized mixes containing warm-mix additives. En: Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, vol. 21, no 8, p. 409-415.

ANDERSON, Michael; BAUMGARDNER, Gaylon; MAY, Richard. y REINKE, Gerard. Engineering properties, emissions, and field performance of warm mix asphalt technologies. Interim Report, 2008, p. 9-47.

ARABANI, Mahyar; ROSHANI, Hossein y HAMED, Hossein. Estimating moisture sensitivity of warm mix asphalt modified with zycosoil as an antistripping agent using surface free energy method. En: Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, vol. 24, no 7, p. 889-897.

ASPHALT INSTITUTE. Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en Caliente. MS-22 Lexington, USA.1992. 275 p.

BANERJEE, Ambarish; DE FORTIER, Andree y PROZZI Jorge. The effect of long-term aging on the rheology of warm mix asphalt binders. En: Fuel. 2012. vol. 97, p. 603-611.

BAUMGARDNER, Gaylon. Revix™–waterless technology for production of reduced temperature asphalt mixtures. In: Presentation at the 2009 Petersen Asphalt Research Conference and P3 Symposium, Laramie. 2008.

BEHL, Ambika; KUMAR, Gajenda; SHARMA, Girish y JAIN, PK. Evaluation of field performance of warm-mix asphalt pavements in India. En: Procedia-social and behavioral sciences, 2013, vol. 104, p. 158-167.

BONAQUIST, Ramon. Mix design practices for warm mix asphalt: transportation research board. En: NCHRP, vol. 691. Washington DC. 2011.

BUDDHALA, Aravinda; HOSSAIN, Zahid; WASIUDDIN, N. azimuddin; ZAMAN, Musharraf y EDGAR, Ao. Effects of an amine anti-stripping agent on moisture susceptibility of sasobit and aspha-min mixes by surface free energy analysis. En: Journal of Testing and Evaluation, 2011, vol. 40, no 1, p. 91-99

BUTT, Ali Azhar; MIRZADEH, Iman; TOLLER, Susanna y BIRGISSON, Björn. Life cycle assessment framework for asphalt pavements: methods to calculate and allocate energy of binder and additives. En: International Journal of Pavement Engineering, 2014, vol. 15, no 4, p. 290-302.

CAPITÃO, S. D.; PICADO, L. y MARTINHO, F. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. En: Construction and Building Materials, 2012, vol. 36, p. 1016-1024.

CHENG, Jianchuan; SHEN, Junan; XIAO, Feipeng. Moisture susceptibility of warm-mix asphalt mixtures containing nanosized hydrated lime. En: Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, vol. 23, no 11, p. 1552-1559.

CHIU, Chui-Te; HSU, Tseng-Hsing; YANG, Wan-Fa. Life cycle assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements. En: Resources, Conservation and Recycling, 2008, vol. 52, no 3, p. 545-556.

CHOWDHURY, Arif y BUTTON, Joe. A review of warm mix asphalt. Texas Transportation Institute, the Texas A & M University System, 2008.

COLOMBIA, MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Resolución 909 de 2008 (junio 5). Por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial 47051 de julio 15 de 2008. 36 p.

D'ANGELO, John, et al. Warm-Mix Asphalt: European Practice. 2008.

DEL CARMEN, Maria; MORENO, Fernando; MARTÍNEZ-ECHEVARRÍA, Maria, MARTÍNEZ, German y VÁZQUEZ, Jose. Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt. En: Journal of cleaner production, 2013, vol. 41, p. 1-6.

DIAB, Aboelkasim; YOU, Zhanping y WANG, Hainian. Rheological evaluation of foamed WMA modified with nano hydrated lime. En: Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2013, vol. 96, p. 2858-2866.

DINIS-ALMEIDA, Marisa y AFONSO, Márcia. Warm mix recycled asphalt—a sustainable solution. En: Journal of Cleaner Production, 2015, vol. 107, p. 310-316.

EPPS, Amy., ARAMBULA, Edith y ESTAKHRI, Cindy. Performance of WMA Technologies: Stage L–Moisture Susceptibility, Phase I. Washington DC; 2011.

ESTAKHRI, Cindy; CAO, Rongui; ALVAREZ-LUGO, Alex y BUTTON, Joe. Production, placement, and performance evaluation of warm mix asphalt in texas. En Material Design, Construction, Maintenance, and Testing of Pavements: Selected Papers from the 2009 GeoHunan International Conference. 2009. p. 1-8.

EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (EAPA). The use of warm mix asphalt. Draft EAPA - Position Paper [en línea]. Brussels. 2014. [Citado 1 abril 2017]. Disponible en <http://www.eapa.org/userfiles/2/Publications/EAPA%20paper%20-%20Warm%20Mix%20Asphalt%20-%20version%202014.pdf>

FAKHRI, Mansour; GHANIZADEH, Ali y OMRANI, Hamed. Comparison of fatigue resistance of HMA and WMA mixtures modified by SBS. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2013, vol. 104, p. 168-177.

FERNÁNDEZ-VÍTORA, Vicente. Guía Metodológica Para La Evaluación Del Impacto Ambiental. 4 ed. Madrid: Mundi-Prensa Libros, 2009.

GANDHI, Tejash y AMIRKHANIAN, Serji. Laboratory simulation of warm mix asphalt (WMA) binder aging characteristics. En Airfield and Highway Pavements: Efficient Pavements Supporting Transportation's Future. 2008. p. 195-204.

GANDHI, Tejash y AKISETTY, Chandrakiran y AMIRKHANIAN, Serji. A comparison of warm asphalt binder aging with laboratory aging procedures. En: Journal of Testing and Evaluation, 2009, vol. 38, no 1, p. 57-64.

GOH, Shu Wei y YOU, Zhanping. Resilient modulus and dynamic modulus of warm mix asphalt. En GeoCongress 2008: Geosustainability and Geohazard Mitigation. 2008. p. 1000-1007.

GOH, Shu Wei; HASAN, Mohd y YOU, Zhanping. Performances evaluation of Cecabase® RT in warm mix asphalt technology. En: Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2013, vol. 96, p. 2782-2790.

HAIJ, Elie; SOULIMAN, Mena y CORTEZ, Edward M. Influence of warm mix additive on mechanistic, economical, and environmental attributes of a polymer-modified asphalt mixture. En: Advances in Civil Engineering Materials, 2014, vol. 3, no 1, p. 88-106.

HANZ, Andrew; FAHEEM, Ahmed; MAHMOUD, Enad y BAHIA, Hussain. Measuring effects of warm-mix additives: Use of newly developed asphalt binder lubricity test for the dynamic shear rheometer. Transportation Research Record. En: Journal of the Transportation Research Board, 2010, no 2180, p. 85-92.

HEARON, Amy y DIEFENDERFER, Stacey. Laboratory evaluation of warm asphalt properties and performance. En Airfield and Highway Pavements: Efficient Pavements Supporting Transportation's Future. 2008. p. 182-194.

HOSSAIN, Zahid y ZAMAN, Musharraf. Behavior of selected warm mix asphalt additive modified binders and prediction of dynamic modulus of the mixes. En: Journal of Testing and Evaluation, 2012, vol. 41, no 1, p. 159-170.

HUANG, Yue; BIRD, Roger y HEIDRICH, Oliver. Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. En: Journal of Cleaner Production, 2009, vol. 17, no 2, p. 283-296.

HURLEY, Graham C.; PROWELL, Brian y HUNER, Mike. Evaluation of Aspha-min Zeolite® for use in Warm Mix asphalt.” National. En Center for Asphalt Technology, Auburn University. 2005.

KANITPONG, Kunnawee; CHAROENTHAM, Nuttaporn y LIKITLERSUANG, Suched. Investigation on the effects of gradation and aggregate type to moisture damage of warm mix asphalt modified with Sasobit. En: International Journal of Pavement Engineering, 2012, vol. 13, no 5, p. 451-458.

KAVUSSI, Amir y HASHEMIAN, Leila. Laboratory evaluation of moisture damage and rutting potential of WMA foam mixes. En: International Journal of Pavement Engineering, 2012, vol. 13, no 5, p. 415-423.

KAVUSSI, Amir, et al. Moisture susceptibility of warm mix asphalt: a statistical analysis of the laboratory testing results. En: Construction and Building Materials, 2014, vol. 52, p. 511-517.

KVASNAK, A.; TAYLOR, A.; SIGNORE, J., y BUKHARI S. Preliminary evaluation of warm mix asphalt field demonstration: Franklin, Tennessee. NCAT Rep. 10-03, Auburn, AL: National Center for Asphalt Technology. 2010.

LAVORATO, Selena, et al. Asphalt mix performance testing and emissions evaluation for warm mix asphalt field project on ministry of transportation Ontario highway. En The Fifty-sixth Annual Conference of the Canadian Technical Asphalt Association. 2011.

LIU, Shutang; CAO, Weidong y FANG, Jianguo. Orthogonal test research of asphalt rubber modified by warm asphalt additive. En ICCTP 2010: Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable. 2010. p. 3480-3492.

LOPERA PALACIO, Hernando. Diseño y producción de mezclas asfálticas tibias, a partir de la mezcla de asfalto y aceite de palma (*Elaeis Guineensis*). Tesis Máster en Ingeniería Infraestructura y Sistemas de Transporte. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. 2011.

LOVELOCK, James. Las Edades de Gaia [en línea]. 2 ed. Barcelona: Tusquets, 1995. 1979. 266 p. [Citado 1 abril 2017]. Disponible en <http://www.libroesoterico.com/biblioteca/varios/varios%203/190360178-las-edades-de-gaia.pdf>

MANAHAN, Stanley. Air and gas analysis. En: Environmental Chemistry. 7 ed. Washington: Lewis Publishers, 2011.

MCCARTHY, Leslie, PARK, Seri y MENSCHING, David. proposed technology development of a warm mix asphalt technology evaluation program. En: NCHRP Project 20-07, Task 311, Transportation Research Board, National Academies. Washington DC; 2012.

MOREA, Francisco; MARCOZZI, Rosana y CASTAÑO, Gonzalo. Rheological properties of asphalt binders with chemical tensoactive additives used in warm mix asphalts (WMAs). En: Construction and Building Materials, 2012, vol. 29, p. 135-141.

MOTTA, Rosângela. Estudio de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo energético. Tesis Doctoral. Universida de São Paulo. 2011.

NAZZAL, Munir; SARGAND, Shad y AL-RAWASHDEH, Abdalla. Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing rap using accelerated loading tests. En: Journal of Testing and Evaluation, 2010, vol. 39, no 3, p. 305-312.

ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL PARA LA ESTANDARIZACIÓN. Gestión Ambiental: análisis del ciclo de vida, principios y marco de referencia. ISO 14040. Bogotá D.C.: El instituto. 2006. 29 p.

_____. Gestión ambiental, análisis ciclo de vida, definición del objetivo y alcance y análisis del Inventario. ISO 14041. Bogotá D.C.: El instituto. 2000: 29 p.

_____. Gestión ambiental, análisis de ciclo de vida, requisitos y directrices. ISO 14044. Bogotá D.C.: El instituto 2006. 55 p.

_____. Gestión medioambiental: análisis del ciclo de vida. Evaluación de impacto del ciclo de vida. ISO 14042. Bogotá D.C.: El instituto. 2001.

_____. Gestión Medioambiental: análisis del ciclo de vida. Interpretación del ciclo de Vida. ISO 14043. Bogotá D.C.: El instituto 2001.

POLAT, Murat y BEKTAŞ, Nihal. Life cycle assessment of asphalt pavement product. En: Sustainable Environment Research. 2015. Vol. 2, No. 5, p. 275-281.

PROWELL, Brian; FRANK, Bob y OSBORNE, Linda. NCHRP 9-47A: Engineering Properties, Emissions, and Field Performance of Warm Mix Asphalt Technologies. Interim Report. vol. 2: State of the Practice. National Center for Asphalt Technology, Auburn, Alabama, 2009.

RAN, Jin, et al. Research on the performances of warm asphalt and warm mix asphalt with Sasobit. En ICCTP 2010: Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable. 2010. p. 3725-3737.

ROBJENT, Lyndon y DOSH, Wayne. Warm-mix asphalt for rural county roads. En Cold Regions Engineering 2009: Cold Regions Impacts on Research, Design, and Construction. 2009. p. 438-454.

ROMIER, Alain; AUDEON, Maurice; DAVID, Jac; MARTINEAU, Yves y OLARD, Francois. Low-energy asphalt with performance of hot-mix asphalt. Transportation Research Record. En: Journal of the Transportation Research Board, 2006, no 1962, p. 101-112.

ROSSI, Damiano, et al. Internal structure of bitumen/polymer/wax ternary mixtures for warm mix asphalts. En: Journal of Applied Polymer Science, 2013, vol. 129, no 6, p. 3341-3354.

RUBIO, Maria; MARTÍNEZ, Germán; BAENA, Luis y MORENO, Fernando. Warm mix asphalt: an overview. En: Cleaner Production. 2012; no. 24, p. 76-84.

RUIZ OJEDA, Martha Patricia. Evaluación del Impacto Ambiental de la producción de mezcla asfáltica en caliente (MDC-2) de la planta de Asfaltart, en Girón Santander. Tesis Magister en Ingeniería Ambiental. Bucaramanga: Universidad Industrial Santander. Escuela de Ingeniería Química. 2013.

SANGSEFIDI, Ebrahim; ZIARI, Hasan y MANSOURKHAKI, Ali. The effect of aggregate gradation on creep and moisture susceptibility performance of warm mix asphalt. En: International Journal of Pavement Engineering, 2014, vol. 15, no 2, p. 133-141.

SANTERO, Nicholas J.; MASANET, Eric y HORVATH, Arpad. Life-cycle assessment of pavements. Part I: Critical review. En: Resources, Conservation and Recycling, 2011, vol. 55, no 9, p. 801-809.

SARGAND, Shad, et al. Field evaluation of warm-mix asphalt technologies. En: Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, vol. 24, no 11, p. 1343-1349.

SHIVAPRASAD, Punith V.; XIAO, Feipeng y AMIRKHANIAN, Serji N. Moisture susceptibility of polymerized stone matrix asphalt mixtures using warm mix asphalt technologies using moist aggregates. En: Journal of ASTM International, 2011, vol. 8, no 9, p. 1-14.

SHIVAPRASAD, Punith Veeralinga; XIAO, Feipeng y AMIRKHANIAN, Serji. Moisture and rutting resistances of foamed asphalt mixtures containing recycled coal ash or shingles with moist aggregates. En: Journal of ASTM International, 2011, vol. 9, no 2, p. 1-11.

SILVA, Hugo; OLIVEIRA, Joel; FERREIRA, Claudia y PEREIRA, Paulo. Assessment of the performance of warm mix asphalts in road pavements. En: International Journal of Pavement Research and Technology, 2010, vol. 3, no 3, p. 119-127.

STOTKO, Oliver. Energy and related carbon emission reduction technologies for hot mix asphalt plants. En Proceedings of the 10 th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa e CAPSA. Winterton, South Africa. 2011. p. 150.

TAO, Zhosui; HUANG, Wenyan, DU; Quenqulin y YAN Jinhai. Warm mix asphalt technology applied at low air temperature in China. En: Road Materials and Pavement Design, 2009, vol. 10, no sup1, p. 337-347.

VASCONCELOS, Kamilla L.; BHASIN, Amit y LITTLE, Dallas. Influence of reduced production temperatures on the adhesive properties of aggregates and laboratory performance of fine aggregate-asphalt mixtures. En: Road Materials and Pavement Design, 2010, vol. 11, no 1, p. 47-64.

VIDAL, Rosario; MOLINER, Enrique; MARTÍNEZ, German, RUBIO, Carmen. Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. En: Resources, Conservation and Recycling, 2013, vol. 74, p. 101-114.

WANG, Chu; HAO, Peiwen; RUAN, Fang; ZHANG, Xiyan y ADHIKARI, Sanjeev. Determination of the production temperature of warm mix asphalt by workability test. Construction and Building Materials, 2013, vol. 48, p. 1165-1170.

WANG, Quan. The application of warm crumb rubber modified asphalt mixture. J. Highway Transp. Res. Dev, 2011, vol. 3, p. 93-94.

WU, Chaofan y ZENG, Menglan. Effects of additives for warm mix asphalt on performance grades of asphalt binders. En: Journal of Testing and Evaluation, 2012, vol. 40, no 2, p. 265-272.

XIAO, Feipeng; PUNITH, Veeralinga; AMIRKHANIAN, Serji y THODESEN, Carl. Improved resistance of long-term aged warm-mix asphalt to moisture damage containing moist aggregates. En: Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, vol. 25, no 7, p. 913-922.

XIAO, Feipeng; ZHAO, Wenbin., GANDHI, Tejash y AMIRKHANIAN, Serji. Influence of antistripping additives on moisture susceptibility of warm mix asphalt mixtures. En: Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, vol. 22, no 10, p. 1047-1055.

YAN, Jun; CAO, Yadong; ZHU, Tiantong; CAI, Ming y CAO, Zhu. Shanghai experience with warm mix asphalt. En Paving Materials and Pavement Analysis. 2010. p. 97-102

YOU, Zhan-Ping y GOH, Shu-Wei. Laboratory evaluation of warm mix asphalt: a preliminary study. En: International Journal of Pavement Research and Technology, 2008, vol. 1, no 1, p. 34-40.

YU, Xin; LENG, Zhen y WEI, Tangzhong. Investigation of the rheological modification mechanism of warm-mix additives on crumb-rubber-modified asphalt. En: Journal of materials in civil engineering, 2013, vol. 26, no 2, p. 312-319.

YU, Xin; WANG, Yuhong y LUO, Yilin. Effects of types and content of warm-mix additives on CRMA. En: Journal of materials in civil engineering, 2012, vol. 25, no 7, p. 939-945.

ZAUMANIS, Martins. Warm mix asphalt investigation. Master of science thesis, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Denmark, 2010.

ZHAO, Wenbin; XIAO, Feipeng, AMIRKHANIAN, Serj y PUTMAN, Bradley. Characterization of rutting performance of warm additive modified asphalt mixtures. En: Construction and Building Materials, 2012, vol. 31, p. 265-272.

ANEXOS

ANEXO A. ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL LIGANTE ASFÁLTICO.

| ENSAYO | NORMA | EQUIPO |
|---|--|---|
| PENETRACIÓN DEL LIGANTE ASFÁLTICO | INV-E 706-07 | Penetrómetro Eléctrico HUMBOLDT H-1240 |
| CONTENIDO DE CERAS | Procedimiento interno | Equipo de cristalización y recuperación de solvente |
| PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE LIGANTES ASFÁLTICOS | INV E 712-07 | Equipo para punto de ablandamiento: Anillo y bola |
| DUCTILIDAD DEL LIGANTE | INV E 702-07 | Ductilímetro CONTROLS |
| SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO | INV E 713-07 | Crisol G |
| AGUA EN LOS MATERIALES ASFÁLTICOS POR DESTILACIÓN | INV E 704-07 | Rotoevaporador |
| PUNTO DE INFLAMACIÓN O CHISPA | INV E 709-07 | Copa abierta Cleveland SC 355 |
| VISCOSIDAD BROOKFIELD | ASTM D 92 | |
| ENVEJECIMIENTO RTFOT | INV E 717-07 ASTM D 4402 INV E 720-07 ASTM D 2872 | Viscosímetro BROOKFIELD RVDV – III + Horno con medidor de flujo y sistema de enfriamiento. |
| GRAVEDAD ESPECÍFICA CON PICNÓMETRO | INV E 707-07 | Picnómetro Hubbard |
| COMPOSICIÓN QUÍMICA SARA | ASTM D 70 | |
| | PIE – SL – 001 | IATROSCAN – TLC / FID Analizador MK – G |
| ENSAYO ENVEJECIMIENTO PAV | NORMA INV E 751-07 ASTM D 6521 | EQUIPO Horno PAV con Cámara de envejecimiento (autoclave) |
| DENSIDAD DE CARGA | PTE-SL-033 | Analizador de carga electrocinético modelo ECA 2100 |
| DSR | AASHTO TP5, NTC 5340 | Dynamic Shear Rheometer – AR 200 ex TA INSTRUMENTS |
| RECUPERACIÓN ELÁSTICA POR TORSIÓN | INV E – 727 | Aparato de Torsión |
| VISCOSIDAD DINÁMICA DE ASFALTOS | INV E – 716 ASTM D 2171 | Viscosímetro CANNONCT - 500 |
| VISCOSIDAD CINEMÁTICA DE LOS ASFALTOS | INV E – 715 ASTM D 2170 | Viscosímetro CANNONCT - 1000 |
| CONTENIDO DE CERAS PRUEBA DE RECUPERACIÓN DE FLUENCIA A ESFUERZO MÚLTIPLE | ASTM D7405-10 ^a | Equipo de filtración Filter Ware Rheómetro de corte dinámico (DSR) AR 2000 |

ANEXO B. ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS.

| ENSAYO | NORMA | EQUIPO |
|---|---|--|
| GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO MINERAL | INV-E 213-07 ASTM C 136-04 | Serie de tamices Pinzuar Tamizador Test Sieve Shaker - Octagón 200 |
| ÍNDICE DE APLANAMIENTO DE LOS AGREGADOS | INV E-230 | Equipo para índice de alargamiento y aplanamiento R&R int. |
| PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS DE LOS AGREGADOS | INV E-227 | Inspección visual |
| PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO Y FINO | INV E-223 | Balanza OHAUS |
| PESO ESPECÍFICO DE LOS SUELOS Y DEL LLENANTE MINERAL | INV E – 128 | Balanza OHAUS |
| ENSAYO | NORMA | EQUIPO |
| RESISTENCIA AL DESGASTE POR MEDIO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES | INV E – 218 | Máquina de los Ángeles Tamiequipos limitada |
| RESISTENCIA AL DESGASTE | Norma INV E 238-07 e INV E 218-07 | Máquina de los Ángeles Tamiequipos limitada |
| RESISTENCIA AL DESGASTE MICRO DEVAL | INV E-238 | MD – 2000, Micro Deval GIISON company, INC |
| ANGULARIDAD DEL AGREGADO FINO | INV-E-239 | Cilindro de cobre, embudo y soporte |
| EQUIVALENTE DE ARENA DE AGREGADOS FINOS Y SUELOS | INV E-133 | Equipo para equivalente de arena |
| ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN Y EMISIÓN ATÓMICA | Implementación propia del laboratorio Externo | Espectrómetro de Absorción Atómica marca Perkin Elmer 3110. |
| FLUORESCENCIA DE RAYOS X | Implementación propia del laboratorio Externo | Espectrómetro De Fluorescencia De Rayos X, Magixpro PW-2440 Philips |
| DIFRACCIÓN DE RAYOS X | Implementación propia del laboratorio Externo | Difractómetro De Rayos X Marca Philips Modelo PW1830 |
| ANÁLISIS PETROGRÁFICO DE AGREGADOS | ASTM C-295 | estéreo microscopio Optiks XTL |
| CONTENIDO DE IMPUREZAS | INV-E 237-07 | Horno binder WTB |
| CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA | INV-E 212-07 | Botellas de vidrio incoloras y de colores. |
| SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD | INV-E 725-07 | Prensa Marshall PS27 |

**ANEXO C. ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LA CARACTERIZACIÓN
DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.**

| ENSAYO | NORMA | EQUIPO |
|---|---|--|
| MÓDULOS DINÁMICOS | UNE –EN 12697 – 26 = 2006 | Nottingham Asphalt Tester HY10 |
| LEY DE FATIGA EN PROBETAS CILÍNDRICAS | UNE – EN 12697 – 24 = 2013 | Nottingham Asphalt Tester HY10 |
| LEY DE FATIGA EN VIGAS | UNE – EN 12697 – 24 = 2013 | Nottingham Asphalt Tester HY10 |
| DEFORMACIÓN PERMANENTE | UNE – EN 12697 – 24 = 2013 | Nottingham Asphalt Tester HY10 |
| WTT DEFORMACIÓN PLÁSTICA | INV E- 756 – 07 | Wheel Tracker Tester CRT 1011647 |
| FABRICACIÓN DE BRIQUETAS EN EL COMPACTADOR GIRATORIO | UNE – EN 12697 – 31 = 2008 | Compactador Giratorio AFGC 125X |
| ADHERENCIA EN BANDEJA | INV E 740 - 07 | Bandeja metálica |
| ENSAYO | NORMA | EQUIPO |
| ADHESIVIDAD DE LOS LIGANTES ASFÁLTICOS | INV E 774 – 07 | Conjunto de balones de vidrio con fondo redondo |
| ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL | INV E 748 – 07 | Prensa Marshall PS27 |
| DISEÑO SUPERPAVE | En el país no se ha establecido como Norma | Compactador Giratorio AFGC 125X |
| DENSIDAD BULK | INV E 733 – 07 | Balanza OHAUS |
| GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA TEÓRICA | INV E 735 – 07 | Balanza OHAUS y Erlenmeyer de 2000 mL |

ANEXO D. EQUIPOS DE MEDIDA DE LOS CONTAMINANTES

Figura 1. Equipo de muestreo Isocinético marca CLEAN AIR EXPRESS modelo M-5 Meter



Figura 2. Tren de muestreo de material particulado



Figura 3. Tren de Muestreo del Bióxido de Azufre



Figura 4. Tren de muestreo de los óxidos de Nitrógeno



Figura 5. Toma de CO₂ y O₂

ANEXO E. FOTOS DE LA PLANTA 1 Y LA PLANTA 2:



Figura 1. Entrada del secador rotatorio de la planta 1



Figura 2 Tanques de calentamiento del asfalto, mezclador y chimenea de la planta 1.



Figura 3. Tambor secador rotatorio y mezclador de la planta 2.



Figura 4. Chimenea y tanques de calentamiento del asfalto