

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LA PRODUCCION DE MEZCLA
ASFÁLTICA EN CALIENTE (MDC-2) DE LA PLANTA DE ASFALTART, EN
GIRON - SANTANDER**

MARTHA PATRICIA RUIZ OJEDA

**Trabajo de aplicación para optar el título de
Magister en Ingeniería ambiental**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2013

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LA PRODUCCION DE MEZCLA
ASFÁLTICA EN CALIENTE (MDC-2), DE LA PLANTA DE ASFALTART, EN
GIRON - SANTANDER**

MARTHA PATRICIA RUIZ OJEDA

**Trabajo de aplicación para optar el título de
Magister en Ingeniería ambiental**

Directora

MARIA PAOLA MARADEI GARCIA

Ingeniera Química, Ph.D.

Co-Director

ISRAEL HERRERA OROZCO

Ingeniero Químico, Ph.D.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIA

A mi amado esposo y amorcito, Leonardo Manzano Paredes y a mi hermosa bebe, mi hija Emma Sofía Manzano Ruíz, son mis amores, el sentido de mi vida, mi felicidad y complemento...

A mis padres, Humberto Ruíz García y Martha Cecilia Ojeda de Ruíz, por su amor incondicional, la paciencia y el apoyo...

A Dios, por las oportunidades y los regalos que he recibido en estas tres décadas vividas...

AGRADECIMIENTOS

A la Doctora MARÍA PAOLA MARADEI y al Doctor ISRAEL HERRERA, por la excelente labor profesional y personal, que realizaron en la dirección y co-dirección en el desarrollo de este proyecto.

A la Ingeniera Química LEIDY LORENA NIÑO, por su excelente profesionalismo en el desarrollo de su proyecto de pregrado, el cual fue una base importante para el desarrollo de este proyecto. En su libro está reflejada la dedicación, constancia, tolerancia y compromiso.

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, al Director de la maestría en Ingeniería Ambiental, el Doctor HUMBERTO ESCALANTE, por su dedicación, apoyo y compromiso con los estudiantes de postgrado.

A la Representante de ASFALTART S.A., la Ingeniera MARIA ELIZABETH RIOS, por el aporte de la información, para el desarrollo del Inventario. También a la Ingeniera MAYERLI QUINTERO, por la gestión de documentos y procesos para la ejecución de desarrollo de este proyecto.

A toda la familia de CORASFALTOS, porque en ella he crecido y desarrollado profesionalmente en el área de asfaltos y pavimentos.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
1 MARCO TEORICO.....	17
1.1 MEZCLA ASFALTICAS.....	17
1.1.1 Cemento asfáltico.....	17
1.1.2 Agregados pétreos.....	17
1.2 PRODUCCIÓN DE MEZCLA ASFALTICA DENSA EN CALIENTE.....	17
1.2.1 Calentamiento del cemento asfáltico.....	18
1.2.2 Carga.....	18
1.2.3 Alimentación de agregados pétreos en tolvas.....	18
1.2.4 Bandas transportadoras.....	19
1.2.5 Secado.....	19
1.2.6 Pesado del agregado pétreo y asfalto.....	19
1.2.7 Mezclado.....	19
1.2.8 Emisiones de gases contaminantes.....	19
1.3 EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL POTENCIAL.....	21
1.3.1 Generalidades.....	21
1.3.2 Análisis del ciclo de vida (Norma ISO 14040-44:2006).....	22
1.3.2.1 Etapas del ACV.....	23
1.4 APLICACIÓN DE ACV, EN TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN DE MEZCLAS ASFALTICAS.....	27
2. METODOLOGIA.....	31
2.1 DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE (FASE I).....	31
2.1.1 Definición de Objetivo y Alcance.....	32
2.2 ANÁLISIS DEL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA (FASE II).....	32
2.2.1 Recopilación de datos.....	32
2.2.2 Cálculo de los datos.....	32
2.2.3 Herramienta informática utilizada.....	33
2.3 EVALUACION DEL IMPACTO AMBIENTAL (FASE III).....	33

2.3.1	Identificación y caracterización de cargas ambientales	33
2.3.2	Selección de categoría de impacto	33
2.3.3	Método de evaluación de impacto IMPACT 2002+	34
2.4	COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS PROPUESTOS....	36
2.5	INTERPRETACION DE RESULTADOS (FASE IV).....	37
3	RESULTADOS	38
3.1	DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE (FASE I).....	38
3.1.1	Objetivo.....	38
3.1.2	Alcance.....	38
3.1.2.1	Sistema del producto bajo estudio	38
3.1.2.2	Función y unidad funcional del sistema.....	39
3.1.2.3	Límites geográficos y temporales del sistema	39
3.2	ANÁLISIS DEL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA (FASE II).....	41
3.2.1	Principales hipótesis y limitaciones.....	41
3.2.2	Descripción cualitativa.....	42
3.2.3	Descripción cuantitativa.....	44
3.2.4	Vinculación de los datos a la unidad funcional.....	44
3.3	EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL (FASE IV).....	46
3.4	COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS PROPUESTOS....	50
3.5	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS (FASE IV)	66
3.5.1	Escenario de Referencia	66
3.5.2	Escenarios de mejoras.....	68
4.	CONCLUSIONES.....	71
5.	RECOMENDACIONES	72
	BIBLIOGRAFIA.....	73
	ANEXOS.....	79

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Corrientes De Entradas Y Salidas Del Proceso De Producción De Mezcla Asfáltica Densa En Caliente [4]).	45
Tabla 2. Identificación Y Selección De Las Categorías De Impacto Ambiental Asociadas A Las Etapas De Producción De Mezcla.	46
Tabla 3. Caracterización De Categoría De Impacto Ambiental, Asociadas A Las Etapas De Producción De Mezcla Asfáltica Densa En Caliente (Mdc-2).	48
Tabla 4. Contribución A Las Categorías De Impacto Ambiental, Asociadas A Las Etapas De Producción De Mezcla Asfáltica Densa En Caliente (Mdc-2).	49
Tabla 5. Resultados De Emisiones Durante La Formulación De Una Mezcla Densa En Caliente Y Una Mezcla Tibia [33].	51
Tabla 6. Descripción De Las Corrientes De Entradas Y Salidas De Los Escenarios Alternativos Propuestos.	53
Tabla 7. Caracterización De La Comparación Entre Los Impacto De Los Diferentes Escenarios Evaluados.	54
Tabla 8. Caracterización De Categoría De Impacto Ambiental, Asociadas A Las Etapas De Producción De Mezcla Asfáltica Aditivada I (Alternativa 1).	55
Tabla 9. Caracterización De Categoría De Impacto Ambiental, Asociadas A Las Etapas De Producción De Mezcla Asfáltica Aditivada Ii (Alternativa 2).	56
Tabla 10. Caracterización De Categoría De Impacto Ambiental, Asociadas A Las Etapas De Producción De Mezcla Asfáltica Aditivada Iii (Alternativa 3).	57

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Planta Discontinua, Para Producción De Mezcla Asfáltica.....	18
Figura 2. Proceso General De Una Planta Discontinua De Mezclas Asfálticas, Tomado De La Agencia De Protección Ambiental.....	21
Figura 3. Uso De Recursos Y Emisiones Asociados Al Sistema.....	23
Figura 4. Fases De La Metodología Análisis De Ciclo De Vida [13].....	24
Figura 5. Consumo De Combustible Vs La Temperatura De Fabricación Para Mezclas Asfálticas En Caliente Y Semi-Caliente [5]......	28
Figura 6. Comparación Mediante Aplicación Acv De Dos Plantas De Mezcla Asfáltica [19].....	29
Figura 7. Comparativa De Las Emisiones De Efecto Invernado De Las Diferentes Fases [20].....	30
Figura 8. Vinculación Del Lci A Través De Las Categorías Del Punto Medio A Las Categorías De Daños [25].....	35
Figura 9. Límites En La Producción De Mezcla Asfáltica Caliente	40
Figura 10. Diagrama De Bloques Del Proceso De Producción De Mezcla Asfáltica En Asfaltart.....	42
Figura 11. Diagrama Del Proceso De Mezcla Asfáltica – Asfaltart.....	43
Figura 12. Perfil Ambiental -Contribución A Las Categorías De Impacto Ambiental, Asociadas A Las Etapas De Producción De Mezcla Asfáltica -Mdc-2 (Alternativa De Referencia)	49
Figura 13. Comparación De Contribución A Las Categorías De Impacto (Respiratorio Inorgánicos & Respiratorio Orgánico), De Los Diferentes Escenarios	58
Figura 14. Comparación De La Contribución A Las Categorías De Impacto (Terrestre Acidez/Nitrificación & Acidificación), De Los Diferentes Escenarios	59
Figura 15. Comparación De La Contribución A Las Categorías De Impacto (Calentamiento Global), De Los Diferentes Escenarios	60
Figura 16. Comparación De La Contribución A Las Categorías De Impacto (Energía No-Renovable), De Los Diferentes Escenarios	61
Figura 17. Comparación De La Contribución A Las Categorías De Impacto (Extracción Mineral), De Los Diferentes Escenarios.....	62
Figura 18. Perfil Ambiental -Contribución A Las Categorías De Impacto Ambiental, Asociadas A Las Etapas De Producción De Mezcla Aditivada I (Alternativa 1) ...	63
Figura 19. Perfil Ambiental -Contribución A Las Categorías De Impacto Ambiental, Asociadas A Las Etapas De Producción De Mezcla Aditivada Ii (Alternativa 2) ..	64
Figura 20. Perfil Ambiental -Contribución A Las Categorías De Impacto Ambiental, Asociadas A Las Etapas De Producción De Mezcla Aditivada Iii (Alternativa 3) .	65

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A.....	80
ANEXO B.....	81
ANEXO C.....	84
ANEXO D.....	89

RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DE LA PRODUCCION DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE (MDC-2) DE LA PLANTA DE ASFALTART, EN GIRON – SANTANDER*

AUTOR: RUIZ OJEDA MARTHA PATRICIA**

PALABRAS CLAVE: Mezcla asfáltica, planta discontinua, evaluación de Impacto ambiental, análisis de ciclo de vida.

DESCRIPCION:

En este trabajo de investigación aplicada al sector industrial de construcción de vías, se evaluó el perfil ambiental, en términos del impacto ambiental en la producción de la mezcla densa en caliente tipo II, de una planta discontinua. Para la obtención de este perfil ambiental, se tomó como base la metodología estandarizada de análisis de ciclo de vida (normas ISO 14040 y 14044:2006) y se utilizó el método de evaluación de impacto "IMPACT 2002+", incluido en el software especializado Sima Pro 7.1.

En esta evaluación, se encontró que las etapas de: calentamiento de asfalto y acopio, pesado y mezclados del proceso, son las que presentan una mayor contribución en el impacto ambiental, generado principalmente por el uso del asfalto, para la producción de mezcla asfáltica MDC-2. Con base en los resultados, se propusieron tres escenarios alternativos de mejoras, en donde se reemplaza parte de la entrada del asfalto, al proceso de calentamiento, por tres aditivos diferentes (sasobit, aspa-min y morlife). La comparación de estos escenarios demostró de forma concluyente, que el uso de morlife mitiga notablemente, el impacto ambiental que es generado, por el uso del asfalto. Gracias a esta información, la empresa puede soportar la realización de planes de manejo ambiental.

*Trabajo de postgrado en maestría en Ingeniería ambiental

**Facultad de ingenierías físico-química. Escuela de ingeniería química. Director: Dra. María Paola Maradei. Co-Director: Israel Herrera.

ABSTRACT

TITLE: ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF THE PRODUCTION OF HOT-MIX ASPHALT (MDC-2) ASFALTART PLANT IN GIRON - SANTANDER*

AUTHOR: RUIZ OJEDA MARTHA PATRICIA**

KEYWORDS: Mix asphalt batch plant, environmental impact assessment, life cycle analysis.

DESCRIPTION:

In this research applied to industrial track construction, environmental profile was evaluated in terms of environmental impact and in the production of dense hot mix type II, in a batch plant design. To obtain this environmental profile, it was based on the standard methodology of life cycle assessment (ISO 14040 and 14044:2006) and for the evaluation, we used the method of impact assessment "IMPACT 2002 +" included in Sima Pro 7.1 specialized software used.

In this evaluation, we found that the steps of: asphalt heating and storage, material weight and mixed of material for the process, are all those that present a greater contribution to the environmental impact, mainly due to the use of asphalt for asphalt mix production type MDC-2. Based on the results, it was porpoise of three alternative scenarios for improvement, which replaces part of the material entrance to the asphalt, the warming process for the three different additives (Sasobit, Aspha-min and morlife). The comparison of these scenarios demonstrated in an unquestionable way that the use of morlife, significantly reduce the environmental impact that is generated by the use and application of asphalts. With this information, the company can support the implementation of environmental management plans with environmental improvements.

* Work Masters Degree in Environmental Engineering

** Faculty of physical-chemical engineering. School of Chemical Engineering. Director: Dra. María Paola Maradei. Co-Directors: Israel Herrera.

INTRODUCCIÓN

La mayoría de las actividades industriales, tiene subproductos de desecho como son las emisiones de los gases contaminantes de dióxido de carbono, óxido de nitrógeno y metano. El aumento en la concentración de estas emisiones a la atmosfera es un factor que posibilita el aumento de fenómenos tan ampliamente conocidos como el cambio climático y la acidificación [1]. En la actualidad, la intensificación de estos fenómenos ha llevado a la comunidad científica internacional a promulgar la declaración de Rio y crear el programa de Agenda XXI en 1992; allí se acordaron los temas sobre la protección del medio ambiente, el desarrollo económico y social de los países como pilares esenciales para lograr el desarrollo sostenible.

En Colombia, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) mediante el decreto 216 de 2003, Art. 2 No. 8, organizado sobre tres principios fundamentales, promueve la gestión ambiental de las empresas. Más específicamente el decreto define “una dimensión ambiental” del país donde el objetivo específico está atado a incorporar los principios de desarrollo sostenible en las políticas y los programas nacionales, para contribuir en la mitigación de la pérdida de los recursos naturales del medio ambiente.

El proceso de elaboración de mezcla asfáltica en caliente, es uno de los focos contaminantes más observado en la industria nacional, no sólo por el uso de recursos naturales como el material pétreo y asfalto, lo cual genera emisiones importantes que afectan directamente las áreas que se encuentran aledañas a las refinerías, sino además durante su transformación como mezclas asfálticas, ya que se pueden generar vertimientos accidentales afectando suelos y aguas

además de generar emisiones gaseosas por el consumo de combustibles como el gas natural y ACPM durante el proceso.

El trabajo presentado a continuación describe la Evaluación del Impacto Ambiental (EIA) potencial, mediante la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), norma ISO 14040/44:2006, de la producción de la mezcla asfáltica densa en caliente tipo II (MDC-2), en la planta discontinua de la empresa ASFALTART. Para esta evaluación, se identificó todas las entradas y salidas de las etapas del proceso utilizando los registros existentes de la empresa desde el año 2011 y los seis primeros meses del año 2012. Con ello se desarrolló los balances de masa y energía y se definieron los objetivos y alcance del sistema en estudio para el ACV. Finalmente, se desarrolló el análisis del inventario que permitió determinar la identificación, selección y caracterización de las cargas ambientales vinculadas al proceso de producción de mezcla.

Con los resultados de la caracterización fue posible determinar la etapa del proceso que más impacto genera al medio ambiente, éste es paso fundamental en el desarrollo de la comparación de tres escenarios alternativos: mezcla asfáltica aditivada I, mezcla asfáltica aditiva II y mezcla asfáltica aditivada III. Estos escenarios fueron generados modificando la entrada de masa en el calentamiento de asfalto, para esta etapa se simuló la adición de un aditivo en el asfalto con el fin de disminuir la temperatura del calentamiento. El análisis de inventario del ACV de la mezcla asfáltica convencional es comparado a los obtenidos con los tres escenarios propuestos de manera a poder determinar cuál de los escenarios permite una mejor mitigación del impacto ambiental.

Finalmente, se espera que los resultados obtenidos en el presente estudio soporten la toma de decisiones por parte de ASFALTART en el mejoramiento de los procesos, de manera que sus esfuerzos estén orientados hacia la mitigación de sus emisiones contaminantes y del uso eficiente de los recursos naturales.

1 MARCO TEORICO

1.1 MEZCLA ASFALTICAS

En la construcción de carreteras, el pavimento es una capa construida por nivelación de suelo (subrasante) que se colocan sobre un terreno nivelado con el fin de aumentar la resistencia de éste durante la circulación de vehículos, puesto que da mayor soporte al suelo. Una mezcla asfáltica se compone de agregados pétreos y de cemento asfáltico en proporciones definidas.

1.1.1 Cemento asfáltico. Conocido también como asfalto, proviene del proceso final de la destilación del crudo tratado en la refinería, posteriormente es clasificado de acuerdo a su viscosidad, penetración y otras propiedades físicas. De éstas las más importantes para la pavimentación son: durabilidad, adhesión, cohesión, susceptibilidad térmica, resistencia al envejecimiento y endurecimiento.

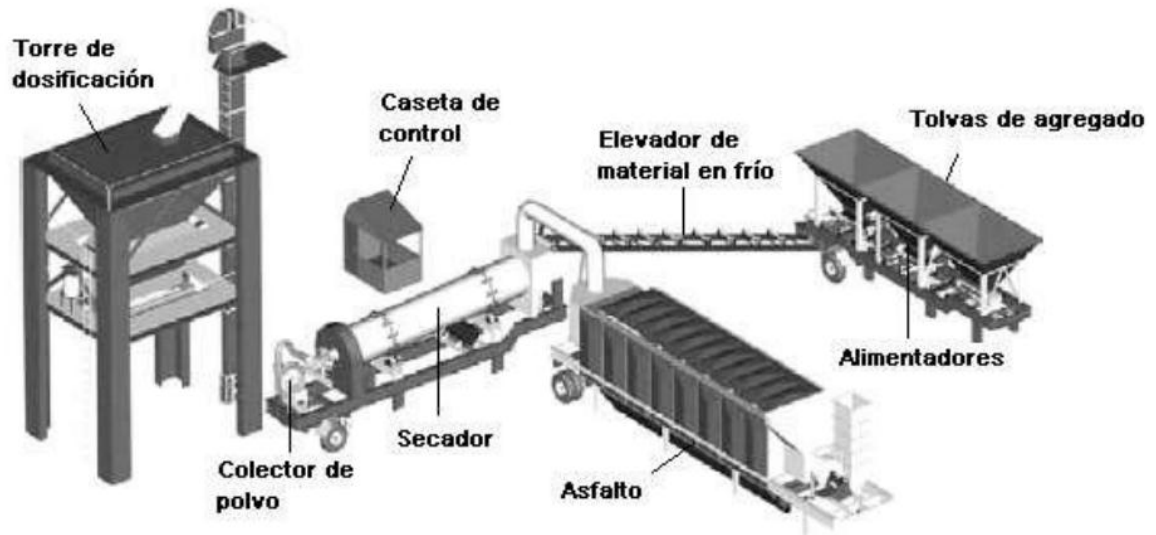
1.1.2 Agregados pétreos. Este material es utilizado en la mezcla como mineral pétreo, proviene de la explotación superficial o profunda de yacimientos minerales. Estos materiales, posteriormente, son llevados a una cantera, allí se trituran mediante molienda para reducir su tamaño [2-3].

1.2 PRODUCCIÓN DE MEZCLA ASFALTICA DENSA EN CALIENTE.

Para el proceso de producción de mezcla asfáltica densa en caliente tipo II (MDC-2), en planta discontinua, los agregados son secados y mezclados a temperaturas entre 150 a 180°C, el tipo de operación de la planta es de tipo discontinuo o Batch. En este proceso los agregados son combinados, calentados, secados, dosificados y mezclados con el cemento asfáltico para producir una mezcla en caliente. Las

etapas del proceso de elaboración de mezcla asfáltica en la planta, se observan en la Figura 1, que se describe a continuación:

Figura 1. Planta discontinua, para producción de mezcla asfáltica



Fuente: [2].

1.2.1 Calentamiento del cemento asfáltico. El sistema de almacenamiento consiste en unos tanques de acopio provistos de dispositivos para calentar el cemento asfáltico a la temperatura de hasta 150°C. Esto se hace a través de transferencia de calor mediante serpentines que contienen aceite caliente a 200°C proveniente de la caldera.

1.2.2 Carga. Se parte del almacenamiento de los agregados pétreos con granulometría de: arena triturada 3/8", triturado 1/2", triturado 3/4"; cada uno de estos se lleva a las tolvas de alimentación, a través, de una cargadora.

1.2.3 Alimentación de agregados pétreos en tolvas. La planta cuenta con tres tolvas de alimentación, distribuidas de la siguiente manera: tolva 1: triturado 3/8", tolva 2: triturado 1/2", tolva 3: triturado 3/4".

1.2.4 Bandas transportadoras. Cada tolva cuenta con una cinta dosificadora conectada a una banda transportadora colectora. Esta última lleva a los agregados a una banda lanzadora que se encarga de pasarlos al secador. La velocidad de cada una de las cintas transportadas está controlada desde la cabina de control de la planta.

1.2.5 Secado. Este proceso se lleva a cabo en un secador giratorio, el cual consiste en un cilindro metálico que gira alrededor de su eje. En su interior posee aletas para arrastrar los agregados y exponerlos a la llama para reducir el contenido de humedad y elevarlos a la temperatura de mezclado.

1.2.6 Pesado del agregado pétreo y asfalto. El cemento asfáltico es elevado por unos cangilones que llegan a una tolva de acopio, la cual deja pasar los agregados a la tolva de pesado, allí se pesan y se descargan a la tolva de mezclado. A su vez el asfalto se pesa según lo anteriormente determinado por el diseño Marshall.

1.2.7 Mezclado. Después de haberse dosificado los agregados, se realiza la mezcla homogénea de estos con el cemento asfáltico, para ello se emplean mezcladores de ejes gemelos provistos con paletas, las cuales mezclan los agregados y el cemento asfáltico de cada mazada en forma homogénea. Al girar en sentido opuesto las paletas baten y revuelven la mezcla en toda la tolva [4].

1.2.8 Emisiones de gases contaminantes. La actividad industrial produce gases contaminantes provenientes de la combustión de los combustibles que se utilizan como fuente de energía para el proceso. Estos gases son: los óxidos de nitrógeno, que tienen un efecto a nivel regional sobre la acidificación y eutrofización. También reacciona con compuestos orgánicos presentes en la atmósfera para formar ozono troposférico que actúa como gas de efecto invernadero. El óxido de azufre que tiene efectos de ámbito regional sobre la

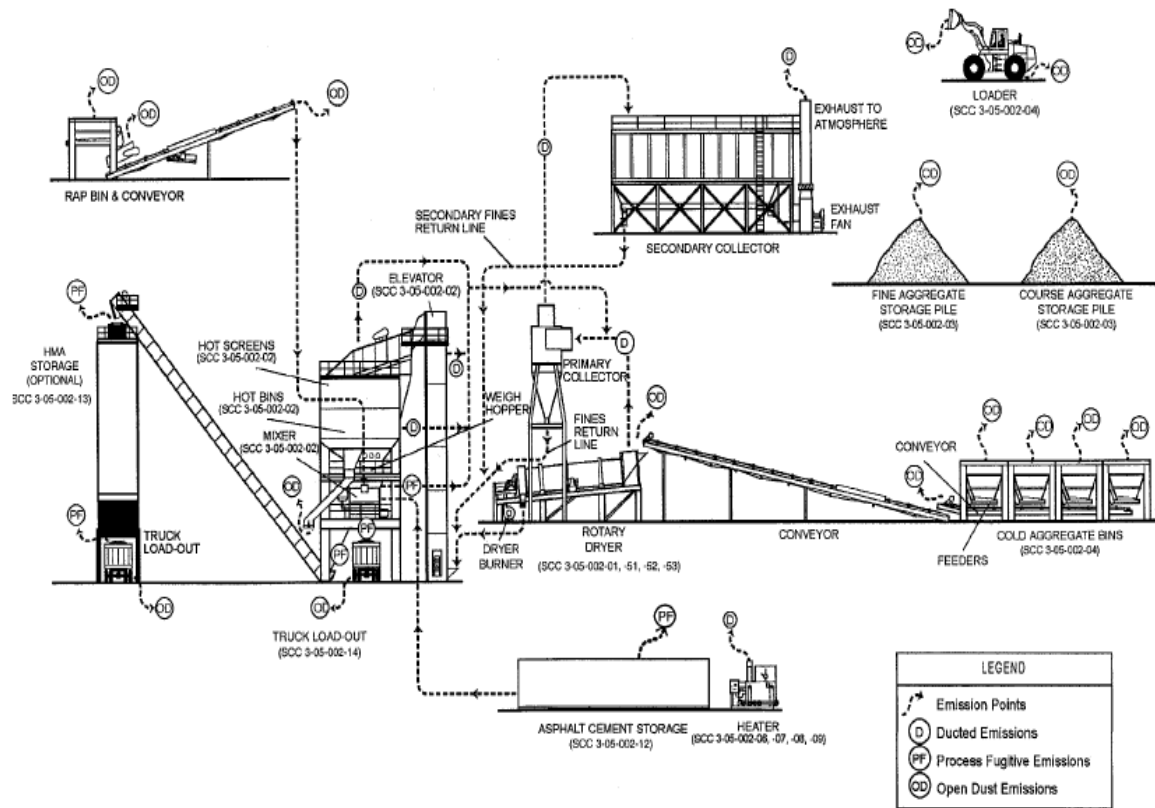
acidificación y el monóxido de carbono, el cual se produce debido a la combustión incompleta de los combustibles. Este gas reacciona con otros componentes en la atmósfera elevando las concentraciones de metano y ozono troposférico [5-6].

En la actividad de la producción de mezclas asfálticas en caliente se generan emisiones atmosféricas asociadas a su proceso, las cuales son: extracción y elaboración de las materias primas usadas para la obtención de producto, el cual corresponden a las siguientes actividades [7].

- Descarga de material en la zona de planta de agregados,
- Operaciones unitarias en la planta de agregados,
- Descarga de material en la zona de planta de asfalto,
- Operación de la planta de asfalto y
- El proceso de producción de mezcla asfáltica.

En la Figura 2, se observa que durante el proceso de producción en una planta discontinua de mezcla asfáltica en caliente, los puntos de emisiones de material particulado (OD) ocurren durante la carga (tolvas) y transporte (bandas transportadoras) de agregados; puntos de fuga por emisiones (PF) en el proceso de calentamiento del asfalto y en la descarga del producto caliente (mezcla asfáltica).

Figura 2. Proceso general de una planta discontinua de mezclas asfálticas, tomado de la Agencia de protección ambiental



Fuente: [7]

1.3 EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL POTENCIAL

1.3.1 Generalidades. El impacto ambiental es una alteración que se produce en el ambiente debido al desarrollo de proyectos y/o actividades. Un impacto puede generar una alteración negativa o positiva, esto depende según el beneficio o no, que se dé al medio ambiente.

La evaluación de impacto ambiental (EIA), tiene como finalidad identificar, predecir e interpretar los impactos ambientales que están asociados a la actividad, también es una herramienta de prevención que fortalece la toma de decisiones para el mejoramiento de la calidad ambiental de los procesos. Para la aplicación de las

herramientas informáticas que agilicen el cálculo de los resultados y su posterior análisis, es importante seleccionar la metodología adecuada para conocer el impacto generado [8-9-10].

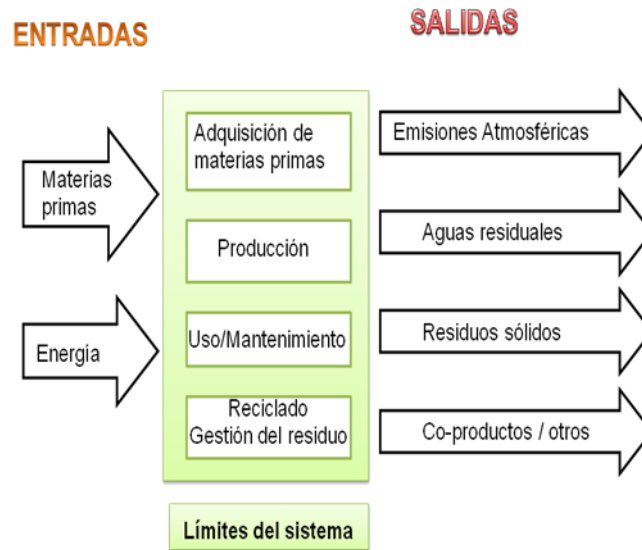
Para la evaluación de impacto ambientales existen algunos métodos como: la matriz causa-efecto, listado de revisión y diagramas de redes, que evalúan de forma cualitativa la influencia de las acciones del proceso o actividad desarrollada en las acciones y factores impactados en el medio ambiente, la economía y la sociedad. Otros como la matriz de Leopold y el método de Batelle, son métodos cuantitativos, que evalúa el nivel de impacto de carácter subjetivo. Los métodos mencionados, permite la identificación y síntesis de los impactos, pero no establecen de forma objetiva el perfil ambiental de la actividad (balance energético y másico de las entradas y salidas [11].

1.3.2 Análisis del ciclo de vida (Norma ISO 14040-44:2006). En la actualidad, la metodología ACV propuesta por la norma ISO 14040/4, se ha perfilado como una herramienta que analiza de manera objetiva los impactos ambientales de una actividad o proceso. Esta permite cuantificar las emisiones, el consumo de recursos naturales y el uso de energía, asociados con la transformación de una materia prima, para la obtención de un producto final. Esta metodología, toma en cuenta los impactos tanto de procedimiento directos (el proceso) como los indirectos (materias primas, insumos, depósitos de residuos, entre otros) y su evaluación permite el desarrollo de mejoras con respecto a la calidad ambiental [12].

El ACV fue promovido por el programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente e impulsado en la Cumbre Mundial de Desarrollo Sostenible de Johannesburgo de 2002, estandarizándose con las series 14040-14044 de la norma ISO. El uso de esta metodología en el sector de producción de mezclas asfálticas, evalúa el impacto potencial sobre el ambiente a lo largo del proceso

mediante la cuantificación del uso de recursos ("entradas" como energía, materias primas, agua) y emisiones ambientales ("salidas" al aire, agua y suelo) asociados al sistema que se está evaluando (ver Figura 3). (ISO 14040, 2006; [12])

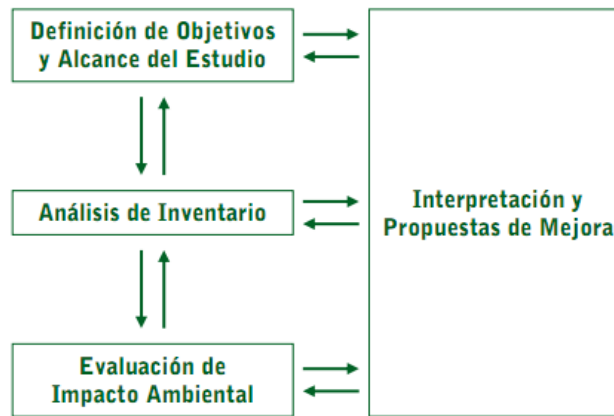
Figura 3. Uso de Recursos y emisiones asociados al sistema



1.3.2.1 Etapas del ACV. Para la determinación de los aspectos e impactos ambientales potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto, desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, mediante la aplicación de las normas ISO 14040/44:2006, se requiere desarrollar cuatro fases principales (ver la Figura 4), las cuales son:

- Fase I: definición de objetivos y alcance del estudio,
- Fase II: análisis de inventario,
- Fase III: evaluación de impacto ambiental y
- Fase IV: interpretación y propuestas de mejora.

Figura 4. Fases de la metodología análisis de ciclo de vida [13]



1.3.2.2 Fase I: Definición de objetivos y alcance. Está diseñada para obtener las especificaciones requeridas para el estudio del ACV. Durante esta etapa, se define el propósito de incluir la evaluación de los impactos ambientales en el procedimiento de toma de decisiones. Esta fase determina el tipo de información necesaria como:

a. Objetivo del estudio: Se especifican sin ambigüedad los siguientes puntos:

- ✓ Aplicación prevista
- ✓ Las razones para realizar el estudio
- ✓ El público previsto, es decir, las personas a quienes se prevé comunicar el resultado del estudio

b. Alcance del estudio: Es necesario considerar y describir claramente los siguientes puntos:

- ✓ El sistema de productos objeto del estudio.
- ✓ Las funciones del producto y si es necesario hacer comparaciones con los sistemas del producto
- ✓ La unidad funcional
- ✓ Límites del sistema en estudio

- ✓ La metodología para el estudio del impacto
- ✓ La interpretación a utilizar
- ✓ Las necesidades relativas a los datos
- ✓ Las suposiciones y su sustento
- ✓ Elementos opcionales y juicios de valor

1.3.2.3 Fase II: Análisis de inventario, en esta fase se realiza un proceso de cuantificación de los flujos de energía y materiales que entran y salen de una actividad durante su ACV. Cuando se ejecuta el plan para el análisis de inventarios del ciclo de vida, se deber realizar los siguientes pasos:

a. Recopilación de datos. Son los datos cualitativos y cuantitativos a incluir en el inventario, el cual debe recopilarse para cada proceso unitario incluido dentro de los límites. Estas medidas deben incluir:

- ✓ Elaboración de diagrama de bloques del procesos
- ✓ Descripción en detalle del proceso, con respecto a los flujos de entradas y salidas
- ✓ Lista de los flujos y datos pertinentes para las condiciones operativas de entradas y salidas asociadas al proceso

b. Cálculo de los datos. Es la cuantificación de las entradas y salidas del proceso o producto a evaluar, para ello es necesario:

- ✓ La validación de datos
- ✓ Recopilación de datos relacionados con los procesos unitarios y la unidad funcional
- ✓ Ajustes de los límites del sistema

1.3.2.4 Fase III: Evaluación del Impacto ambiental. En esta fase se evalúa el impacto ambiental en el ACV, es un proceso técnico cualitativo o cuantitativo

que permite caracterizar y evaluar los efectos de las cargas ambientales identificadas en la fase de inventario, su objetivo es determinar la magnitud de los impactos ambientales potenciales a partir de las cargas identificadas en el inventario de las etapas implicadas a lo largo del proceso.

a. Método de clasificación y caracterización. Para realizar la evaluación de impacto ambiental, la norma ISO 14040/44 del 2006, contempla los siguientes elementos obligatorios:

- Selección de la categoría de impactos, indicadores de categoría y modelos de caracterización
- Realización de las etapas de clasificación y caracterización, solamente donde se asigna los datos procedentes del inventario de ciclo de vida a cada categoría del impacto según el tipo de efecto ambiental esperado y mediante los factores de caracterización de los datos del inventario a cada una de las categorías del impacto.

b. Categorías de impacto ambiental. Con el fin de evaluar la influencia de los efectos ambientales producidos por una actividad y/o servicio, se ha desarrollado una clasificación de categorías de estos efectos en el ambiente; entre ellas tenemos:

Cambio Climático. Es un factor que tiene un efecto potencial porque describe el forzamiento radiactivo de los diferentes gases de efecto invernadero en relación al forzamiento radiactivo del dióxido de carbono en función de las propiedades de absorción de los gases de sus vidas medias.

Acidificación/Nitrificación Terrestre. La eutrofización es la alta concentración de nutrientes en el ecosistema. La acidificación es el depósito de compuestos que aumenten la acidez en el suelo o en agua, este efecto se conoce por la medición de iones hidronios (H⁺) emitida en el medio.

Consumo Energético. Es un componente significativo en el ciclo de vida del proceso, y se define como la cantidad de energía utilizada y pérdida, respectivamente, en un sistema durante el ciclo de producción para la obtención del servicio o producto.

Efectos respiratorios. Se refiere a los efectos causados por las emisiones de compuestos orgánicos relacionados por la absorción de compuestos orgánicos volátiles y orgánicos peligrosos que generan un impacto en el estado respiratorio de la población; esto al igual que los efectos respiratorios causados por material inorgánico o material particulado.

Fase IV: Interpretación, es una técnica sistemática para identificar, cuantificar, verificar y evaluar información de los resultados del inventario de ciclo de vida (LCI) y de la evaluación del impacto (LCIA).

En el análisis de mejoras se realiza una evaluación sistemática de las necesidades y oportunidades para reducir las cargas ambientales en todo el ciclo de vida de un producto, proceso o actividad.

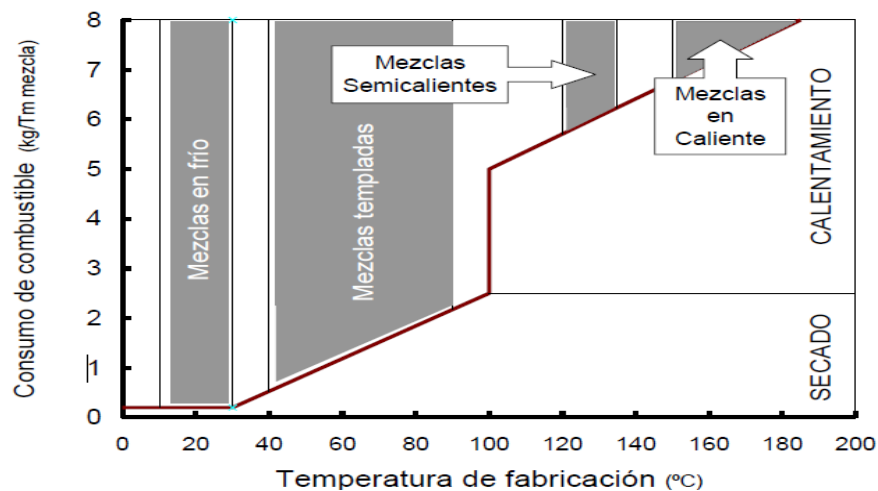
1.4 APLICACIÓN DE ACV, EN TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

En la construcción de vías, la capa de rodadura, es una mezcla asfáltica, que es fabricada a partir del consumo de aproximadamente 90% de agregado y 10% de asfalto. Este gran porcentaje de consumo de agregado, es una de las principales preocupaciones a nivel mundial, debido a la explotación del recurso natural no renovable, cuya consecuencia genera daños en el ecosistema. Por lo mencionado anteriormente, investigadores en el área ambiental de vías han desarrollado estudios de impacto, aplicando la metodología de ACV, para identificar los

consumos cuantitativos de recursos y los impactos ambientales. Con estas bases han desarrollado alternativas para mitigar estos problemas [14-15-16-17-18].

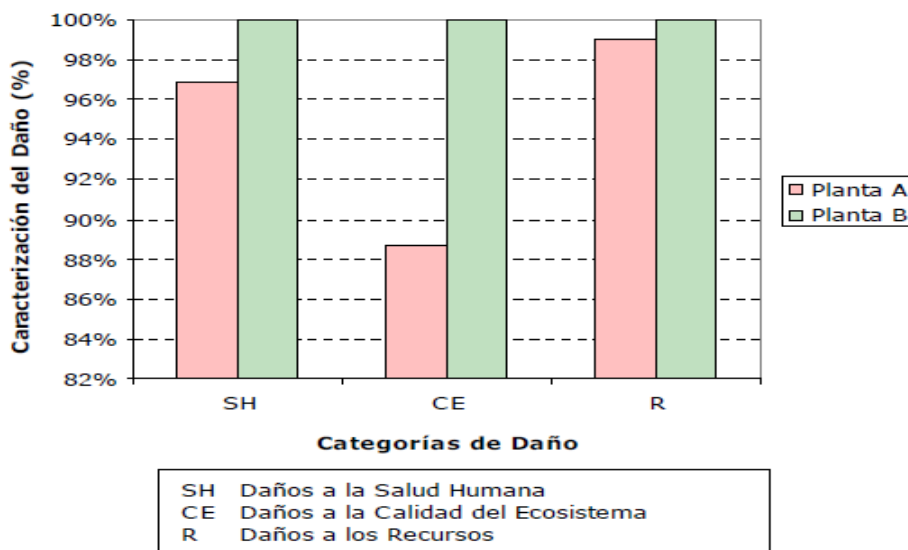
En el año 2006, un grupo de ingeniería viaria y ambiental desarrolló un estudio en donde aplican la metodología de ACV para evaluar el impacto ambiental generado por la producción de mezclas asfálticas. En la producción, la temperatura necesaria para el calentamiento del asfalto como para el secado de agregados está directamente relacionada con el consumo de combustible y las emisiones contaminantes generadas, el cual pueden variar de acuerdo al rango de temperatura utilizado en el proceso. Por ejemplo, para las mezclas asfálticas en caliente, el rango de temperatura necesaria para el calentamiento de asfalto es de 155-175°C, lo que equivale a un consumo de 5 a 8kg de combustible por tonelada de mezcla en caliente y, para la producción de las mezclas asfálticas semi-calientes, la temperatura de calentamiento es de 125-145°C, esta reducción de 30°C, como lo muestra la Figura 5, se debe a la modificación del cemento asfáltico mediante la incorporación de aditivos en el mismo [5].

Figura 5. Consumo de combustible vs la temperatura de fabricación para mezclas asfálticas en caliente y semi-caliente [5].



Otro estudio basado en la aplicación de la metodología ACV, se presentó en una ponencia del 8º Congreso Nacional de FIRMES. En este estudio se realizó una evaluación comparativa de impactos ambientales de dos plantas (A y B), productores de mezcla asfáltica en caliente, el cual difieren entre sí por el funcionamiento del proceso; continuos y discontinuos, de distintas capacidades, móviles y fijas, con distintos tipos de combustible fósil, etc. Según los resultados obtenidos en el estudio y, de acuerdo con la Figura 6, el combustible utilizado por la planta A es más amigable con el medio ambiente, que el utilizado por la planta B, debido al menor porcentaje en la caracterización en los daños de la salud humana y la calidad del ecosistema, comparado con los porcentajes de caracterización de la planta A [19].

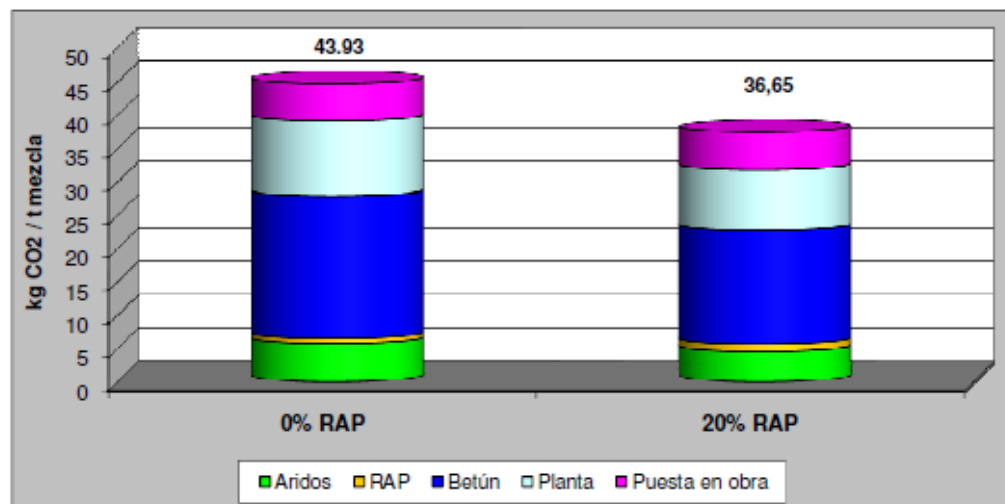
Figura 6. Comparación mediante aplicación ACV de dos plantas de mezcla asfáltica [19]



En el área del sector vial en España, se desarrollaron varios estudios de evaluación ambiental en los que se utilizó la metodología del ACV, para determinar el gasto energético, el impacto ambiental y la huella de carbono generada por la producción de mezcla asfáltica en caliente y mezcla reciclada,

desde la producción hasta su aplicación para la construcción de carreteras en servicio. En uno de los estudios, gracias a la aplicación de la metodología del ACV, se observó que con el uso del 20%p de reciclado de pavimento asfáltico en caliente (RAP), las emisiones de gases de efecto invernadero se reducen significativamente con respecto a las emitidas en el proceso de producción de mezcla asfáltica en caliente sin RAP, como se muestra en la Figura 7 [20-21].

Figura 7. Comparativa de las emisiones de efecto invernadero de las diferentes fases [20]



La aplicación del ACV ha llamado la atención en el área de producción de mezclas asfálticas y construcción de vías a tal punto que Huang *et al.* [22], en su investigación desarrollaron herramientas de evaluación del ciclo de vida para la construcción y mantenimiento de pavimentos asfálticos. También se realizó un estudio comparativo de las emisiones por las obras de mantenimiento de carreteras y del tráfico interrumpido mediante la evaluación del ciclo de vida y micro-simulación.

2. METODOLOGIA

Es posible analizar procesos industriales desde una perspectiva de desarrollo sostenible, de manera práctica y con validez científica. Esto puede lograrse a través de la consideración de la incidencia ambiental en la toma de decisiones, desde las fases tempranas hasta las finales del análisis de procesos nuevos y existentes [23].

En este trabajo de investigación, la metodología usada involucra la evaluación del impacto ambiental integrada al análisis del proceso en estudio, bajo la perspectiva del ACV.

Para el desarrollo de la evaluación de impacto ambiental potencial, aplicando la metodología del ACV, en la producción de mezcla asfáltica densa en caliente (MDC-2) de la planta de Asfaltart S.A se realizaron las actividades descritas a continuación.

2.1 DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE (FASE I)

Se identificaron las corrientes de entrada y salida, de masa y energía, mediante la elaboración de un diagrama de bloques del proceso, teniendo en cuenta las operaciones unitarias involucradas desde su almacenamiento hasta la obtención de la mezcla asfáltica densa en caliente tipo II (MDC-2).

En el diagrama por bloques se identificaron seis etapas de transformación. Para la descripción de cada una de las etapas fue necesario la recopilación de datos como: producción de la mezcla asfáltica densa en caliente tipo II, entradas de materia prima como agregado y asfalto, entradas de combustibles como gas natural y diesel, medición de gastos energéticos, medición de emisión de gases y

material particulado de la empresa Asfaltart del año 2011 y los seis primeros meses del 2012.

2.1.1 Definición de Objetivo y Alcance. La información generada durante el desarrollo de este trabajo de investigación fue la base para la definición del objetivo y alcance de este estudio, del análisis de inventario, de la evaluación del impacto ambiental potencial y de su interpretación, de acuerdo con lo estipulado por la metodología del ACV propuesta por la norma ISO 14044.

2.2 ANÁLISIS DEL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA (FASE II)

Con los objetivos y alcance del sistema en estudio, se desarrolla la fase de inventario del ciclo de vida siguiendo los siguientes pasos metodológicos:

2.2.1 Recopilación de datos. Son los datos cualitativos y cuantitativos a incluir en el inventario, el cual debe recopilarse para cada proceso unitario incluido dentro de los límites. Estas medidas que se deben incluir son:

- ✓ Elaboración del diagrama de bloques para desarrollar la descripción cualitativa del proceso.
- ✓ Planteamiento de las principales hipótesis y limitaciones
- ✓ Selección de datos teniendo en cuenta los registros desde enero del 2011 hasta junio del 2012.
- ✓ Balance de materia en unidades de kg/mes y para el balance de energía las unidades fueron en MJ/mes.
- ✓ Determinación de la descripción cuantitativa del proceso

2.2.2 Cálculo de los datos. Este procedimiento es realizado para obtener el valor del número de los flujos del sistema, está relacionado con:

- ✓ Vinculación de los datos a la unidad funcional
- ✓ Etapas excluidas del sistema

2.2.3 Herramienta informática utilizada. Para el desarrollo de las dos fases del ACV que presentan una mayor intensidad en tiempo y esfuerzo (análisis del inventario y evaluación de impacto ambiental del ciclo de vida) se utilizó el software especializado Sima Pro versión 7.1. Este software permite identificar las cargas ambientales más importantes asociada al producto principal (en nuestro caso la mezcla asfáltica) y sus contribuciones al proceso o actividad durante su ciclo de vida, de “puerta a puerta”. Igualmente, es posible comparar las cargas ambientales de diferentes etapas del proceso.

2.3 EVALUACION DEL IMPACTO AMBIENTAL (FASE III)

En la evaluación del impacto de ciclo de vida, se establece una relación o vínculo entre la etapa del proceso y sus impactos medioambientales mediante el perfil ambiental. Para la evaluación del impacto de ciclo de vida (LCIA) se llevaron a cabo los siguientes pasos que son:

2.3.1 Identificación y caracterización de cargas ambientales. En la identificación de las cargas ambientales, todos los impactos son asociados a las categorías de impacto ambiental del proceso productivo en la elaboración de mezcla asfáltica densa en caliente tipo II (MDC-2). En la caracterización de las cargas ambientales se determinaron, de forma cualitativa y cuantitativa, los efectos asociados de las cargas ambientales identificadas en la fase del inventario.

2.3.2 Selección de categoría de impacto. Para la evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida, se utilizó el método IMPACT 2002+, de éste se seleccionaron solamente, las siguientes categorías de impacto ambiental:

- ✓ Calentamiento global 100 años
- ✓ Efectos respiratorios (orgánicos e inorgánicos)
- ✓ Acidificación y nitrificación terrestre

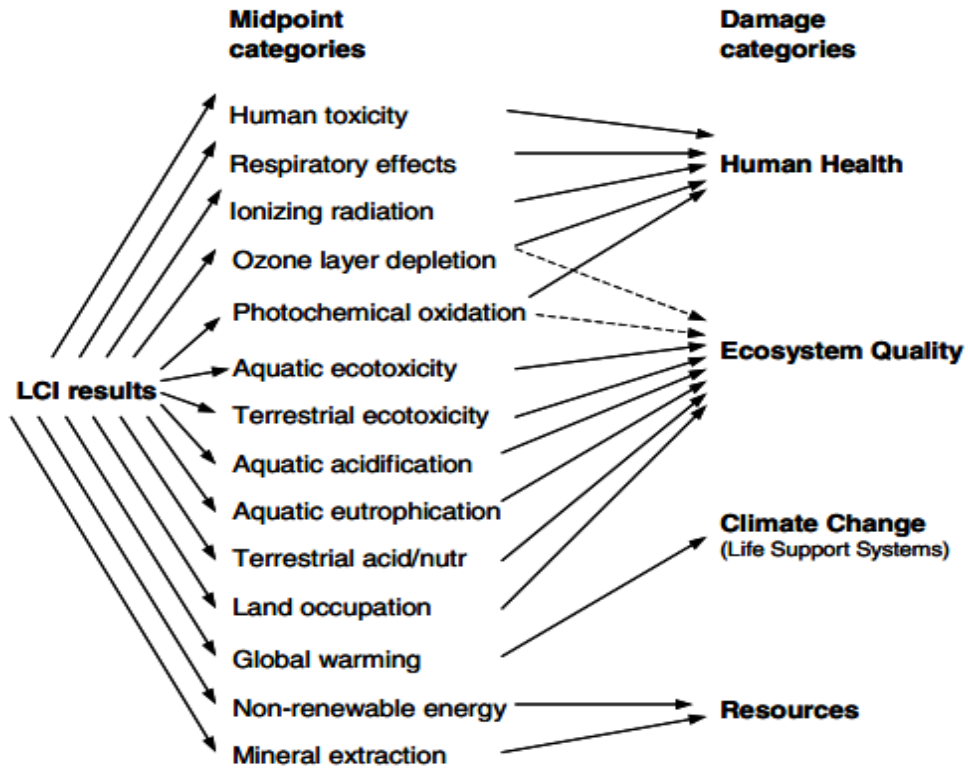
- ✓ Acidificación acuática
- ✓ Energías no renovables
- ✓ Extracción de minerales

2.3.3 Método de evaluación de impacto IMPACT 2002+. Fue creado por el Escuela Politécnica Federal de Lausanne (EPFL) en Suiza y es el resultado de una combinación entre las metodologías Impact 2002, Ec99, CML2001 e IPCC. Es un método de evaluación de impacto, cuyo objetivo principal es conectar el ciclo del inventario (intervención de los flujos) al impacto ambiental asociado al proceso [24].

Los métodos de evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) buscan conectar, en la medida de lo posible, cada resultado del inventario de ciclo de vida (ICV) (flujo elemental u otra intervención) a los impactos ambientales correspondientes. De acuerdo con la norma ISO 14042, los resultados del ICV se clasifican en las categorías de impacto, cada uno con un indicador de categoría. El indicador de categoría se puede ubicar en cualquier punto entre los resultados del ICV y la categoría de puntos finales (donde se produce el efecto ambiental) en la cadena de causa-efecto.

En la Figura. 8 se muestra la vinculación del ICV de las categorías de puntos medios a las categorías de daños. Los resultados del ICV con impacto similares se agrupan en categorías de impacto en nivel del punto medio, también llamado categorías del punto medio. Un punto medio indicador caracteriza los flujos elementales y otras intervenciones ambientales que contribuyen a la misma repercusión. El término 'punto medio' expresa el hecho de que este punto se localiza en alguna parte; en una posición intermedia entre los resultados del ICV y el daño (o punto final) sobre el impacto vía.

Figura 8. Vinculación del LCI a través de las categorías del punto medio a las categorías de daños [25]



La metodología IMPACT 2002+, propone una aplicación de la combinación de los métodos de evaluación del impacto 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). [26-27-28-29-30].

En el IMPACT 2002+, la vinculación de Inventario se realiza de acuerdo a las afectaciones; en el caso de la categoría de daños a la **salud humana** los puntos medios se clasifican como: toxicidad humana, efectos respiratorios, ionización por

radiación, deterioro de la capa de ozono y oxidación fotoquímica. Para la categoría de **calidad del sistema**, los puntos medios se clasifican en: deterioro de la capa de ozono, oxidación fotoquímica, ecotoxicidad acuática, ecotoxicidad terrestre, acidificación acuática, eutrofización acuática, acidificación y nitrificación terrestre y ocupación de la tierra. En la categoría de daño del **cambio climático**, el punto medio es: el calentamiento global y en la categoría de **daño para los recursos**, es la extracción minera y las energías no renovables [25].

2.4 COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS PROPUESTOS

En este punto se propone tres alternativas como mejoras en la producción de mezclas; mezcla asfáltica aditivada I, mezcla asfáltica aditivada II y mezcla asfáltica aditivada III. La aplicación de estas mezclas, están basadas en la tecnología de mezclas tibias, ya que se diferencia de las mezclas en calientes (método convencional) por la adición de aditivos en el ligante (cemento asfáltico). La adición de estos aditivos permite disminuir la temperatura de producción de la mezcla y la temperatura de colocación de las mismas en la carretera. Tales aditivos puede ser: Sasobit, Aspha-Min (Eurovia) y Morlife [30-31].

2.5 INTERPRETACION DE RESULTADOS (FASE IV)

En este punto se realiza una interpretación de los resultados basado en el análisis de 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.

2.5.1 Discusión de los resultados. En este punto se realiza una interpretación de los resultados, basados en las contribuciones de las categorías ambientales asociadas a las etapas del proceso de producción de mezcla asfáltica MDC-2 tanto de escenario de referencia como de los escenarios de mejora propuestos.

2.5.2 Análisis de las mejoras propuestas. Con los resultados obtenidos de la comparación se examina el comportamiento de los tres escenarios alternativos (mezcla asfáltica aditivada I, mezcla asfáltica aditivada II y mezcla asfáltica aditivada III) con respecto al escenario de referencia. Así mismo, con esta comparación se podrá proponer a la empresa una alternativa que contribuya a la reducción de los impactos identificados en su proceso convencional.

3 RESULTADOS

3.1 DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE (FASE I)

De acuerdo con la metodología propuesta por la norma ISO 14040/44:2006, se realizó la identificación del sistema, la definición del objetivo, el alcance del estudio, el análisis de inventario y la evaluación de impacto; los cuales están descritos a continuación.

3.1.1 Objetivo. Es la aplicación de la metodología del ACV para determinar la EIA potencial en la producción de mezcla asfáltica en caliente (MDC-2) de la planta de Asfaltart S.A en Girón – Santander. Así mismo, a partir de la interpretación de los resultados obtenidos, y de acuerdo al análisis del estudio, se propone algunas alternativas como escenarios de mejoras para la mitigación de impacto ambiental.

3.1.2 Alcance. Está definido por el sistema del producto bajo estudio, los límites geográficos y temporales y, la función y unidad funcional, el cual es parte central para el análisis del impacto ambiental potencial que genera las etapas involucradas en el proceso de producción de la mezcla asfáltica densa en caliente tipo II (MDC-2) de una planta discontinua.

3.1.2.1 Sistema del producto bajo estudio. El sistema de proceso de fabricación de una mezcla asfáltica densa en caliente (MDC-2) de la empresa Asfaltart S.A; comprende las siguientes seis etapas:

Etapas 1 - calentamiento del cemento asfáltico o asfalto,

Etapas 2 - transporte de agregados (almacenamiento, tolvas y tambor secador),

Etapas 3 - secado de agregados,

Etapas 4 - secado de agregados pétreos y salida de gases,

Etapa 5 - transporte de finos y agregados a la tova de acopio,

Etapa 6 - acopio, pesado y mezclado, los cuales conforman el sistema bajo estudio.

3.1.2.2 Función y unidad funcional del sistema. Se define como función de estudio la producción de mezcla asfáltica densa en caliente tipo II (MDC-2) proveniente de la planta Asfaltart. Esta mezcla es utilizada como carpeta asfáltica en la pavimentación de la construcción de carreteras de vías para el departamento de Santander y Norte de Santander.

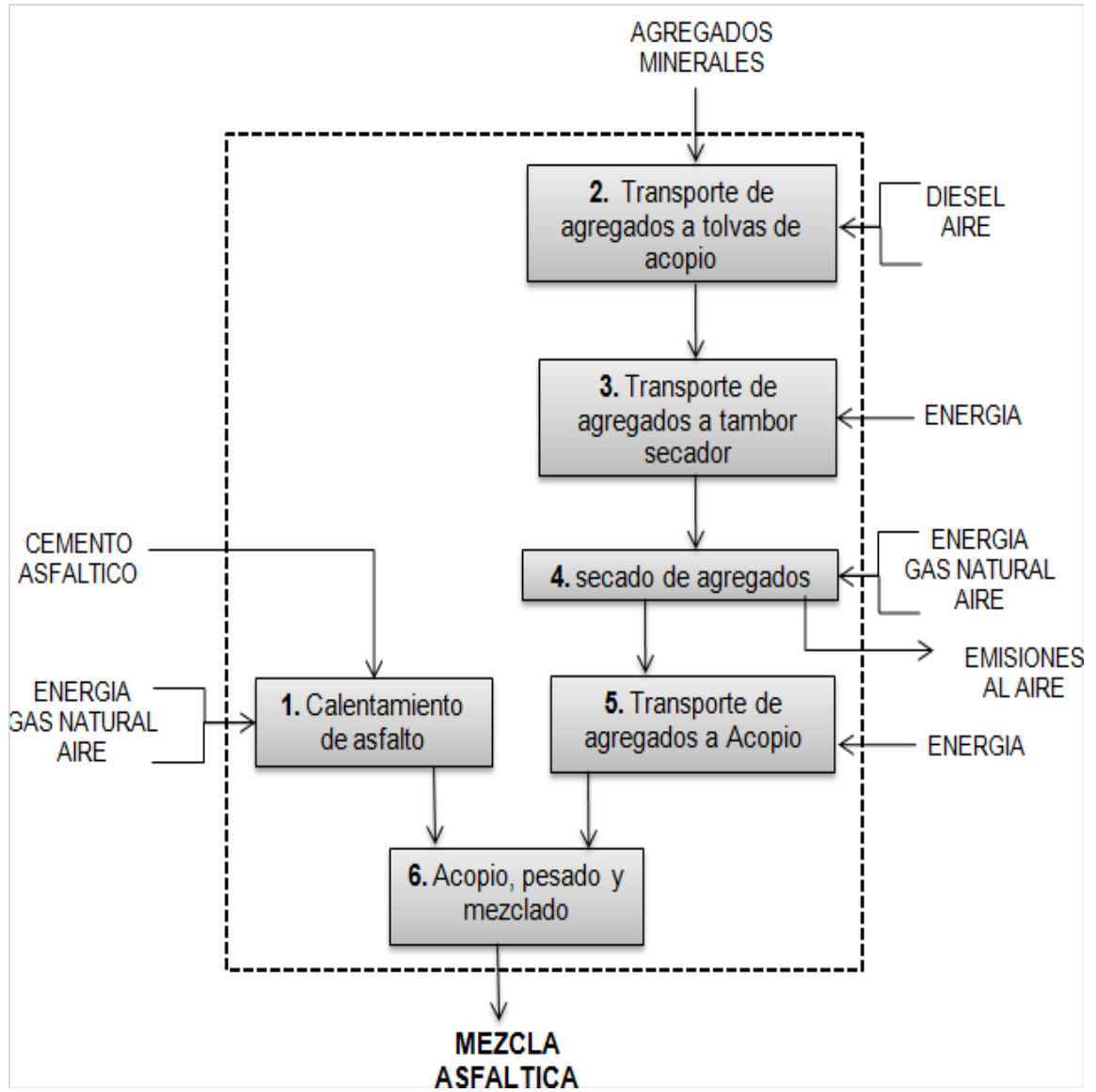
La unidad funcional definida para este estudio es 3960,45 t/mes de mezcla producida; esta unidad es básica para cuantificar el consumo de masa y energía del proceso.

3.1.2.3 Límites geográficos y temporales del sistema. El *límite geográfico* del estudio está relacionado con la ubicación de la planta Asfaltart, la cual está en la localidad del Anillo Vial entre Girón, Zona Industrial – Floridablanca, en el kilómetro 5, vereda Río Frío.

Los *límites temporales* para el desarrollo de esta evaluación están definidos por los datos obtenidos de producción de la empresa Asfaltart que corresponden a los datos registrados de todo el año 2011 y los seis primeros meses del año 2012.

En la Figura 9, se encuentra la representación gráfica del sistema de estudio y sus límites, en donde se describen las etapas involucradas para el estudio; información que ha sido obtenida a partir de los registros de la empresa presentados en los anexos A y B.

Figura 9. Límites en la producción de mezcla asfáltica caliente



3.2 ANÁLISIS DEL INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA (FASE II)

El análisis de inventario es la cuantificación de los flujos de masa y energía que entran y salen en el proceso de producción de mezcla asfáltica densa en caliente (MDC-2). En este se encuentra cuantificado los consumos de materia como los agregados, gas natural, aire, diesel, asfalto y energía. También se cuantifican las emisiones a la atmósfera como el dióxido de carbono, vapor de agua, oxígeno, nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y material particulado. Estas cargas ambientales son la derivación de todas las etapas en el proceso que están dentro de los límites del sistema. Esta parte del trabajo fue realizada con la participación de un estudiante de pregrado [4].

3.2.1 Principales hipótesis y limitaciones. Para el escenario de la fabricación de mezclas asfálticas densa en caliente de la empresa productora Asfaltart, inicialmente se diagramó las etapas que intervienen en este proceso, esto permitió identificar cualitativa y cuantitativamente todos los flujos de entradas y salidas pertenecientes a cada etapa.

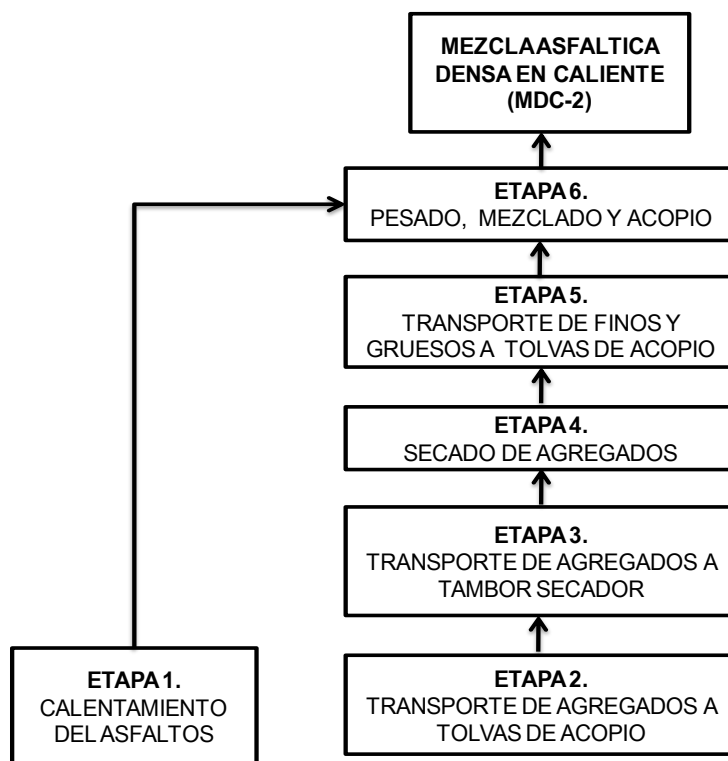
La información suministrada por la empresa, la cual está basada en los registros de enero del 2011 hasta junio del 2012, corresponde a los datos limitantes para el desarrollo de los balances de masa y energía; necesario para el análisis de inventario y base para la evaluación del impacto ambiental potencial. Una limitación de estos datos, fue la falta de un muestreo isocinético de la caldera, en el calentamiento de asfalto, por ello, para el desarrollo del balance fue necesario, hacer la aproximación de combustión completa para la determinación de las emisiones de la caldera.

Otras limitaciones a tener en cuenta fueron la exclusión de los datos relacionados con la explotación y transporte de agregados a la planta y de refinación de crudo para la producción de asfalto así como el transporte del mismo.

Para la no existencia de ciertos insumos dentro de la base de datos del software Sima Pro se utilizaron datos de especies presentes en la base con las mismas características fisicoquímicas.

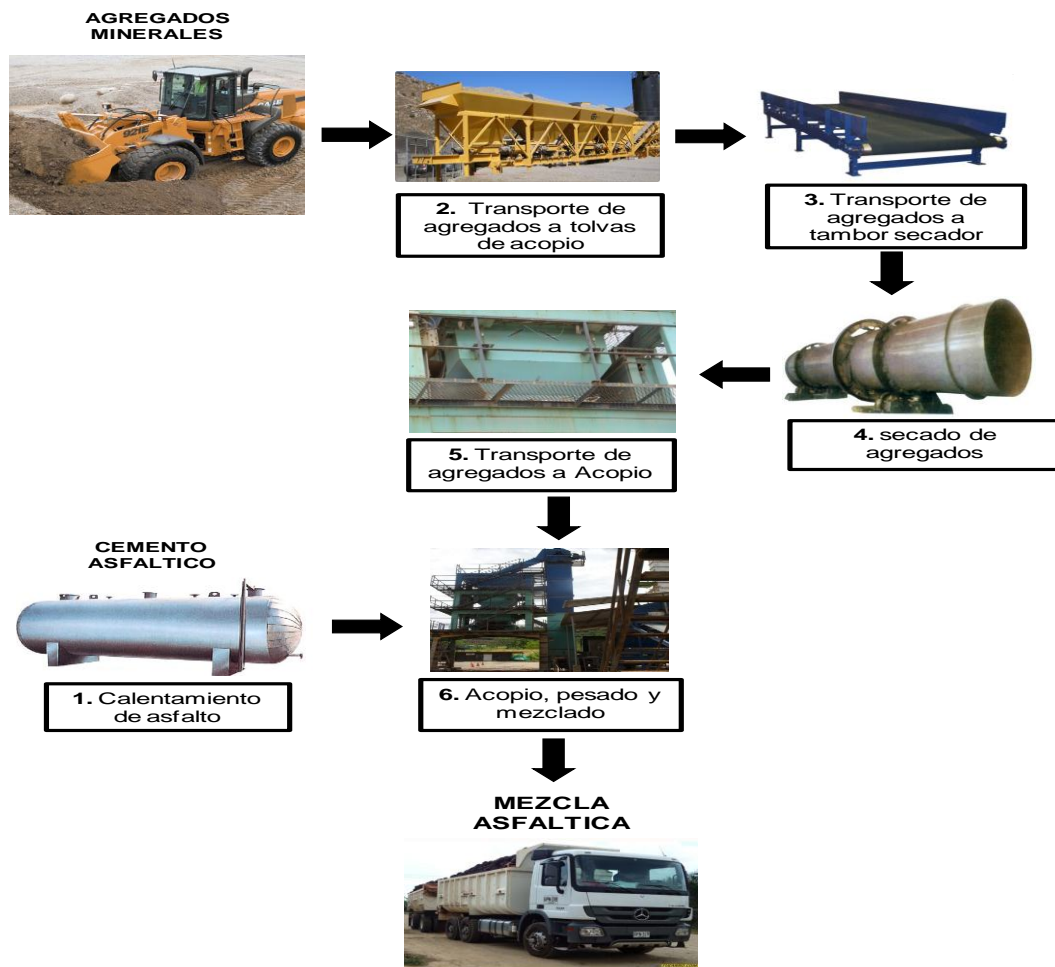
3.2.2 Descripción cualitativa. El análisis cualitativo del proceso de producción de mezcla (MDC-2), se dividió en seis etapas (Ver figura 10): 1) calentamiento del cemento asfáltico, 2) transporte de agregados desde el almacenamiento hasta tolvas de acopio, 3) transporte de agregados al tambor secador, 4) secado de agregados, 5) transporte de agregados finos y gruesos a la tolva de acopio y 6) acopio, pesado y mezclado.

Figura 10. Diagrama de bloques del proceso de producción de mezcla asfáltica en Asphaltart



En la Figura 11 se encuentra la representación del proceso de producción de mezcla (MCD-2). La primera etapa es el calentamiento previo del asfalto o cemento asfáltico, a una temperatura óptima de 155°C por un tiempo de 5h. Este calentamiento se realiza mediante serpentines que contienen aceite térmico que es calentado por una caldera a 220°C por un tiempo adicional de 4h para la preparación de la mezcla asfáltica en caliente.

Figura 11. Diagrama del proceso de mezcla asfáltica – Asfaltart



La segunda etapa del proceso de producción es el transporte de los agregados desde el lugar de almacenamiento hasta las tolvas de acopio, el cual se realiza utilizando una cargadora CASE que tiene un peso aproximado de 10 a 15t. El

recorrido de esta máquina es de 5,2km para cada producción, transportando 26,76m³/h de volumen de agregado.

En la tercera etapa, los agregados que se encuentran en las tolvas de acopio son transportados mediante dos bandas hasta el tambor secador.

En la cuarta etapa, los agregados se introducen dentro de un tambor secador. El calentamiento de estos agregados se realiza utilizando gas natural y aire, este último es impulsado mediante un turbo ventilador. Los agregados gruesos son llevados a un colector primario, los agregados medios son retenidos por la unidad de multiciclones. Los agregados más finos son retenidos por un filtro de mangas. Este tiene una entrada de aire ejercida por un compresor a la salida tiene un ventilador exhaustor que se conecta a una chimenea por donde salen los gases.

En la quinta etapa, estos agregados (gruesos, medios y finos) son transportados por medio de un tornillo sin fin a los cangilones.

En la sexta etapa los cangilones transportan a los agregados hasta el lugar de acopio para ser pesados junto con el asfalto y finalmente mezclarlos.

3.2.3 Descripción cuantitativa. Con la identificación de las corrientes, de entrada y salida de materia y energía, se determina la cantidad de materia en unidades en unidades de t, kg ó m³ y, de energía en unidad de MJ.

3.2.4 Vinculación de los datos a la unidad funcional. La cuantificación de los flujos másicos y energéticos de las corrientes identificadas de entradas y salidas de cada una de las etapas mencionadas anteriormente se desarrolló teniendo en cuenta como unidad funcional el promedio de los datos recolectados, el cual fue de 1,0 t/mes de mezcla asfáltica.

En la Tabla 3 se encuentran los datos obtenidos (ver anexo C y D) de las corrientes de entrada y salida obtenida de la recopilación de datos de los registros de Asfaltart S.A. del proceso de elaboración de mezclas asfáltica en caliente, método convencional de fabricación de carpeta de rodadura.

Tabla 1. Corrientes de entradas y salidas del proceso de producción de mezcla asfáltica densa en caliente [4]

CORRIENTES	COMPOSICIÓN	UNIDAD/MES	CANTIDAD
ENTRADAS	Cemento asfáltico	t	0,049
	Agregado mineral	t	0,95
	Energía	MJ	13,7
	Diesel	t	0,00011
	Aire	t	0,63
	Gas natural	m ³	7,6
SALIDAS	dióxido de carbono	kg	10,1
	Material particulado	kg	0,0060
	dióxido de azufre	kg	0,0022
	Oxido de nitrógeno	kg	8,8
	Oxígeno	kg	55,4
	Vapor de agua	kg	38,0
	monóxido de carbono	kg	0,069
	di nitrógeno	kg	169,9
	Nitrógeno	kg	4,1
	Mezcla asfáltica	t	1,0

3.2.5 Etapas excluidas del sistema. Del análisis de impacto de las cargas ambientales asociados a la fabricación de la mezcla asfáltica densa en caliente MDC-2 quedan excluidas las etapas de diseño volumétrico en el laboratorio, la explotación de agregados, transporte de agregado desde la cantera a la planta, transporte de asfalto desde la refinería a la planta, transporte de mezcla asfáltica al sitio de pavimentación, pavimentación, mantenimiento y construcción de carreteras.

3.3 EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL (FASE IV)

Para la evaluación del impacto ambiental, las categorías de impacto consideradas están relacionadas con las sustancias contaminantes emitidas por el proceso de producción de mezcla que se identificaron y seleccionaron de acuerdo al análisis del inventario obtenido en este estudio. El siguiente paso de la metodología fue la determinación de la caracterización y el perfil medioambiental de la contribución por etapas de las categorías de impacto asociadas al proceso.

3.3.1 Identificación y selección de las categorías de impacto ambiental. Las emisiones contaminantes identificadas en las etapas del proceso obtenidas del análisis del inventario fueron consideradas para relacionar la selección de las categorías de impacto ambiental que permitan la evaluación del impacto. En la Tabla 3 se encuentra la identificación y la selección de las categorías de impacto ambiental a analizar para la caracterización y evaluación de impacto, de acuerdo con la intervención ambiental del proceso.

Tabla 2. Identificación y selección de las categorías de impacto ambiental asociadas a las etapas de producción de mezcla

CATEGORIA DE IMPACTO	FACTOR EQUIVALENTE	UNIDAD REFERENCIA	INTERVENCION AMBIENTAL	AFECTACION
Sustancias respirables inorgánicas	0,536	kg PM2.5 eq	PM2,5	Salud Poblacional
Sustancias respirables orgánicas	0,986	kg C ₂ H ₄ eq	Hidrocarburos y aromáticos	
Acidificación y nitrificación terrestre	1,0 & 5,488	kg SO ₂ eq	SO ₂ , NOx	Ecosistema
Acidificación acuática	1,0 & 0,7			
Calentamiento global	1,0 & 1,47	kg CO ₂ eq	CO ₂ , CO	Cambio climático
Energía No-renovable	1,0	MJ primario	Crudo	uso de recursos
Mineral extracción	16,32	MJ surplus	Agregados	

3.3.2 Caracterización. Con la intervención ambiental de las emisiones del proceso y la selección de las categorías, se obtuvieron los impactos a través de la caracterización, estos resultados se presentan en la Tabla 4.

3.3.3 Perfil ambiental. Basados en los datos de la caracterización de categoría se obtuvo la contribución que aporta cada etapa del proceso en las categorías de impacto ambiental seleccionadas (ver Tabla 5).

Con los resultados obtenidos en la Tabla 4 se procedió a determinar el perfil ambiental que se muestra en la Figura 12. Allí se ve de forma clara la contribución que ejerce cada etapa sobre las categorías de impacto seleccionadas para este estudio. Tales categorías se relacionan con las intervenciones que se producen en el proceso de la elaboración de la mezcla.

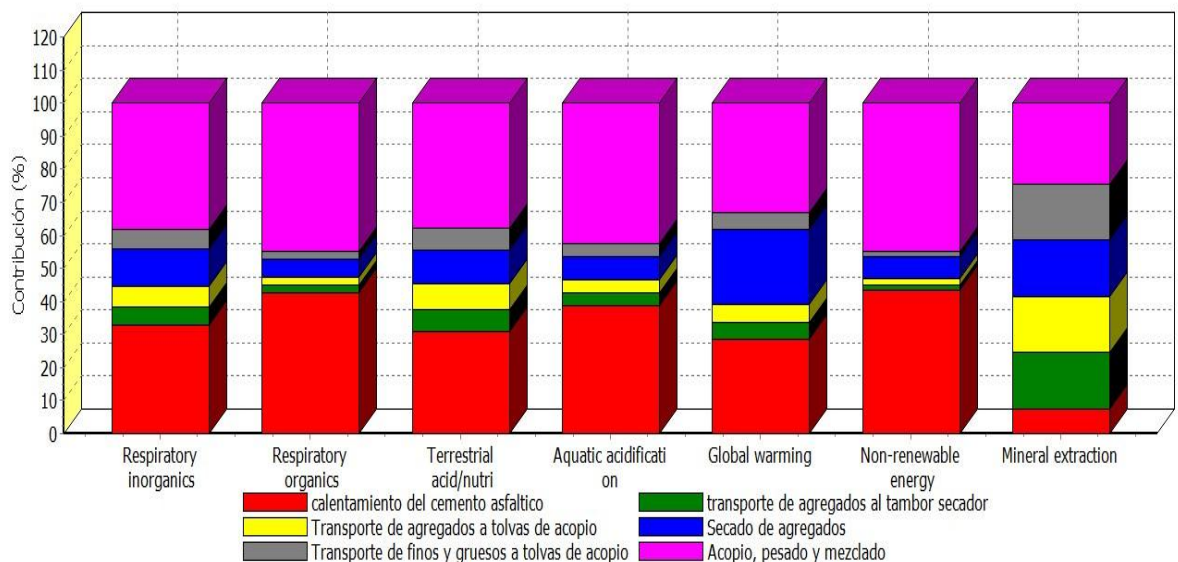
Tabla 3. Caracterización de categoría de impacto ambiental, asociadas a las etapas de producción de mezcla asfáltica densa en caliente (MDC-2)

Categorías de impacto	Total	Etapas del proceso					
		Calentamiento del cemento asfáltico	Transporte de agregados a tolvas de acopio	transporte de agregados al tambor secador	Secado de agregados	Transporte de finos y gruesos a tolvas de acopio	Acopio, pesado y mezclado
Sustancias respirables inorgánicas [kg PM2.5 eq]	379,7465	124,3457	23,3772	21,53609	43,15948	21,59585	145,7322
Sustancias respirables orgánicas [kg C2H4 eq]	359,1318	152,3927	9,28106	8,51945	19,80187	8,51945	160,6173
Acidificación/nitrificación Terrestre [kg SO2 eq]	7787,262	2392,555	588,7157	544,1355	783,7538	545,7101	2932,392
Acidificación acuática [kg SO2 eq]	2458,91	952,4547	99,91942	94,02429	172,7166	94,59488	1045,2
Calentamiento global [kg CO2 eq]	129,4149	62,79227	0,793046	0,727241	0,855864	0,727241	63,51926
Energía No-renovable [MJ primary]	274519,2	78638,01	14551,59	14035,86	62361,44	14139,55	90792,78
Mineral extracción [MJ surplus]	23172927	10059941	393538,8	384647,3	1534681	385794,4	10414324

Tabla 4. Contribución a las categorías de impacto ambiental, asociadas a las etapas de producción de mezcla asfáltica densa en caliente (MDC-2)

Categoría de impacto	Contribución (%)					
	Calentamiento del cemento asfáltico	Transporte de agregados a tolvas de acopio	transporte de agregados al tambor secador	Secado de agregados	Transporte de finos y gruesos a tolvas de acopio	Acopio, pesado y mezclado
Sustancias respirables inorgánicas	32,63	6,16	5,66	11,37	5,68	38,42
Sustancias respirables orgánicas	42,34	2,58	2,37	5,52	2,37	44,85
Acidificación y nitrificación Terrestre	30,68	7,56	6,98	10,06	7,01	37,61
Acidificación acuática	38,70	4,06	3,82	7,03	3,85	42,68
Calentamiento global	28,58	5,31	5,09	22,69	5,13	33,02
Energía No-renovable	43,53	1,70	1,66	6,59	1,66	44,83
Mineral extracción	7,60	17,00	16,86	17,15	16,86	24,37

Figura 12. Perfil ambiental -Contribución a las categorías de impacto ambiental, asociadas a las etapas de producción de mezcla asfáltica -MDC-2 (Alternativa de referencia)



Analizando 1 p (mezcla asfáltica convencional); Método: IMPACT 2002+ (seleccionados) V2.05 / IMPACT 2002+ / Caracterización

3.4 COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS PROPUESTOS

La aplicación de la técnica de mezclas tibias fue desarrollada en Europa y reportado por Harrison y Christodulaki en First International Conference of Asphalt Pavements en Sydney en 2000 y en Eurobitumen en el mismo año. Estas producción de estas mezclas ayudan a disminuir los gastos energéticos y emisiones al aire durante la construcción vial. Aunque esta técnica no es nueva se ha discutido hace varias décadas desde 1956.

Otra tecnología utilizada es la aplicación de mezclas en frío con emulsiones de alta concentración del ligante; se identifica el uso del asfalto espumado desde 1994. Se nota en todos los reportes que los sistemas espumados son de menor consumo energético y favorable para el medio ambiente. Sin embargo, las primeras aplicaciones de estas mezclas en frío no son competitivas con las mezclas en caliente debido a su menor durabilidad en servicio.

Una de las ventajas que presentan las mezclas tibias está dado porque se producen a temperaturas menores que las mezclas calientes, es decir entre 100 y 135°C, por lo cual es posible producir y colocar el cemento asfáltico a temperaturas sensiblemente inferiores a las técnicas convencionales, esto hace que haya un ahorro de la energía ya que no es necesario secar y calentar los agregados en la planta antes de mezclarlos; el asfalto espumado se dosifica directamente a los agregados fríos y húmedos. Además, se disminuyen las emisiones a la atmósfera debido a la disminución de la temperatura de mezclado, colocación y compactación. Por otro lado, la introducción de los aditivos como las zeolitas sintéticas a las mezclas, permiten crear un efecto de espumación y mejorar la trabajabilidad. En la Tabla 5, se encuentran los resultados de un estudio de medición de emisiones durante la formulación de una mezcla densa en caliente y una mezcla tibia [32].

Tabla 5. Resultados de emisiones durante la formulación de una mezcla densa en caliente y una mezcla tibia [33]

Producción de mezcla	Temperatura mezclado (°C)	Emisiones BSM* (mg/m3)	Emisiones PAC** (ng/m3)	Emisiones TPM*** (mg/m3)
Caliente	165	20 y 0,5	39 y 119	1,2 y 0,93
Tibias	115	Menor o igual a 0,05	4,9 y 2,3	0,09 y negativo

*BSM – Benzene Soluble Matter

**PAC – Polycyclic Aromatic Compounds

***TPM – Total Particle Matter

Otras ventajas de estas mezclas es la reducción del consumo de energía; algunos estudios han demostrado que la reducción del consumo de energía de alrededor de 30% se puede lograr mediante la reducción de las temperaturas de producción en la planta de asfalto. También presenta reducciones importantes con respecto a las mezclas asfálticas en caliente; en cuanto a emisiones se pueden lograr reducciones del 25% en material particulado, 30% en las emisiones de dióxido de carbono, 60% en las de óxido de nitrógeno y 35% en las emisiones de dióxido de azufre [33]

ALTERNATIVA REFERENCIA: Este escenario, mezcla asfáltica convencional, contiene únicamente la cantidad de cemento asfáltico sin aditivar, mostrado en los resultados anteriores.

ALTERNATIVA 1: En este escenario, mezcla asfáltica aditivada I, se adiciona Sasobit, que es una resina hidrocarbonada soluble en el asfalto y formada por cadenas alifáticas largas, la cual se incorpora al cemento asfáltico en un 3% antes de realizar el mezclado.

Sasobit. Es un producto obtenido a partir de la síntesis de Fisher tropsch, es de Sasol Wax (formerly Schümann Sasol), South Africa, que disminuye la viscosidad del asfalto. Este aditivo tiene un punto de ablandamiento de 99°C y se recomienda

utilizarlo en concentraciones entre 3 y 4%p del asfalto. A estas concentraciones se garantiza la reducción de la temperatura de mezclado en 18°C [34-35].

ALTERNATIVA 2: En este escenario, mezcla asfáltica aditivada II, se adiciona Aspha-Min, que es una zeolita sintética en polvo, esta se adiciona en un 0,3%p al cemento asfáltico de la mezcla asfáltica.

Aspha-Min. Es un producto de Eurovia Services GmbH, Bottrop, Alemania. Por su naturaleza química es una zeolita sintética (Sodium Aluminum Silicate) que fue cristalizada bajo condiciones hidro-térmicas. La cantidad del agua interna en la zeolita corresponde a 21%p. Este material se agrega en estado de polvo a la mezcla en la concentración aproximada a 0,3%p de la mezcla durante el mezclado. El agua en la zeolita es liberada gradualmente como resultado de la acción continua de la espumación de la mezcla. Este fenómeno actúa como extendedor y lubricante al mismo tiempo garantizando la trabajabilidad adecuada [37-36].

ALTERNATIVA 3: En este escenario, mezcla asfáltica aditivada III, se adiciona Morlife que es una líquida de base amina. Este se adiciona en un 1%p en el cemento asfáltico a la mezcla asfáltica.

Morlife. Es un líquido en base amina que mejora la adherencia entre el par agregado-asfalto evitando la formación de bolsas de agua que impiden la adhesión del cemento asfáltico al agregado. Es un gran “anti-striping” entre el asfalto y los agregados y que además permiten una excelente cohesión del pavimento durante largo tiempo. Se utiliza en rango de dosificación del 0,25 al 1%p del cemento asfáltico [38].

En la Tabla 6, se muestran las corrientes de entrada de cemento asfáltico, agregado y la corriente de salida de mezcla asfáltica, del escenario de referencia,

el cual fue evaluado anteriormente, y de los tres escenarios propuestos como alternativas de mejoras en la elaboración de mezcla asfáltica, teniendo en cuenta el análisis desarrollado por Lopera [33].

Tabla 6. Descripción de las corrientes de entradas y salidas de los escenarios alternativos propuestos

CORRIENTES	COMPOSICIÓN	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica aditivada I	Mezcla Asfáltica aditivada II	Mezcla asfáltica aditivada III
ENTRADAS	Cemento asfáltico [t]	192,672	187,191	192,093	190,745
	Aditivo [t]	0	5,78016	0,578	1,927
	Agregado mineral	3767,808	3767,808	3767,808	3767,808
	Energía [MJ]	54312,58	32587,54	32587,54	32587,54
	Diesel [t]	0,432	0,432	0,432	0,432
	Aire [t]	2506,998	2506,998	2506,998	2506,998
	Gas natural [m ³]	29991,9	19494,7	19494,7	19494,7
SALIDAS	dióxido de carbono [kg]	40367,78	24220,668	24220,668	24220,668
	Material particulado [kg]	23,944	10,7748	10,7748	10,7748
	dióxido de azufre [kg]	21,336	13,8684	13,8684	13,8684
	Oxido de nitrógeno [kg]	8,8	3,52	3,52	3,52
	Oxígeno [kg]	217600	217600	217600	217600
	Vapor de agua [kg]	150577,784	150577,784	150577,784	150577,784
	monóxido carbono [kg]	272,2664	272,2664	272,2664	272,2664
	di nitrógeno [kg]	672772	672772	672772	672772
	Nitrógeno [kg]	16229,448	16229,448	16229,448	16229,448
	Oxígeno [kg]	1917,936	1917,936	1917,936	1917,936
	Mezcla asfáltica [kg]	3960,456	3960,456	3960,456	3960,456

Con los tres escenarios alternativos propuestos, se determinó la caracterización de categorías y el porcentaje de contribución para la comparación de las

alternativas propuestas para los diferentes escenarios. Los datos se observan en las Tablas 7 a 10.

En las Figuras del 13 al 20 se ilustran las caracterizaciones de la contribución a las categorías de impacto seleccionadas para este estudio, de los diferentes escenarios alternativos propuestos, de mezclas asfálticas aditivadas.

Tabla 7. Caracterización de la comparación entre los impacto de los diferentes escenarios evaluados

Categoría de impacto	Mezcla asfáltica convencional	Mezcla asfáltica aditivada I	Mezcla asfáltica aditivada II	Mezcla asfáltica aditivada III
Sustancias respirables inorgánicas [kg PM2.5 eq]	306,672	312,331	301,761	198,753
Sustancias respirables orgánicas [kg C2H4 eq]	331,062	349,536	329,488	185,765
Acidificación/nitrificación terrestre [kg SO2 eq]	6049,337	6232,297	5999,086	4047,699
Acidificación acuática [kg SO2 eq]	2116,394	2167,236	2102,195	1235,942
Calentamiento global [kg CO2 eq]	225202,915	240940,941	212080,121	147863,420
Energía No-renovable [MJ primary]	22346148,042	22488055,47	22081097,637	12316655,891
Mineral extracción [MJ surplus]	632,214	586,291	583,200	580,546

Tabla 8. Caracterización de categoría de impacto ambiental, asociadas a las etapas de producción de mezcla asfáltica aditivada I (alternativa 1)

Categoría de impacto	Total	Etapas del proceso					
		Calentamiento cemento asfáltico aditivado I	Transporte de agregados a tolvas de acopio	transporte de agregados al tambor secador	Secado de agregados (asfalto aditivado)	Transporte de finos y gruesos a tolvas de acopio	Acopio, pesado y mezclado
Sustancias respirables inorgánicas [kg PM2.5 eq]	385,6019	137,6829	23,3772	21,53609	35,67766	21,59585	145,7322
Sustancias respirables orgánicas [kg C2H4 eq]	377,4875	173,3165	9,28106	8,51945	17,23371	8,51945	160,6173
Acidificación/nitrificación terrestre [kg SO2 eq]	7938,925	2671,063	588,7157	544,1355	656,9085	545,7101	2932,392
Acidificación acuática [kg SO2 eq]	2507,692	1033,023	99,91942	94,02429	140,9304	94,59488	1045,2
Calentamiento global [kg CO2 eq]	290532,2	110426,7	14551,59	14035,86	46585,7	14139,55	90792,78
Energía No-renovable [MJ primary]	23322573	10484080	393538,8	384647,3	1260189	385794,4	10414324
Mineral extracción [MJ surplus]	5759,948	921,9148	942,0574	934,0084	673,2004	934,0084	1354,759

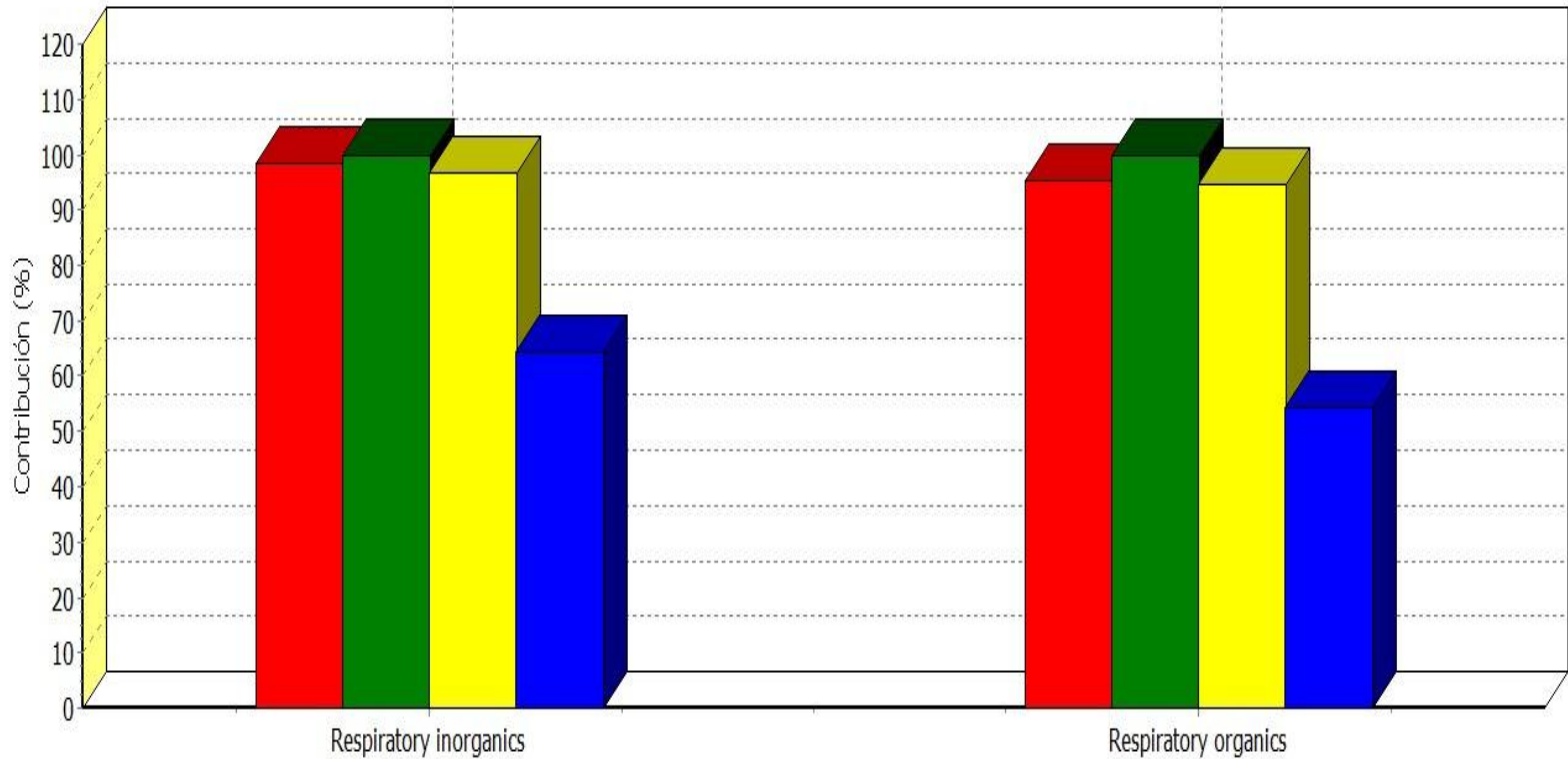
Tabla 9. Caracterización de categoría de impacto ambiental, asociadas a las etapas de producción de mezcla asfáltica aditivada II (alternativa 2)

Categoría de impacto	Total	Etapas del proceso					
		Calentamiento cemento asfáltico aditivado II	Transporte de agregados a tolvas de acopio	transporte de agregados al tambor secador	Secado de agregados (asfalto aditivado)	Transporte de finos y gruesos a tolvas de acopio	Acopio, pesado y mezclado
Sustancias respirables inorgánicas [kg PM2.5 eq]	372,9928	125,0737	23,3772	21,53609	35,67766	21,59585	145,7322
Sustancias respirables orgánicas [kg C2H4 eq]	356,9906	152,8196	9,28106	8,51945	17,23371	8,51945	160,6173
Acidificación/nitrificación terrestre [kg SO2 eq]	7676,581	2408,72	588,7157	544,1355	656,9085	545,7101	2932,392
Acidificación acuática [kg SO2 eq]	2433,617	958,9481	99,91942	94,02429	140,9304	94,59488	1045,2
Calentamiento global [kg CO2 eq]	260047,9	79942,38	14551,59	14035,86	46585,7	14139,55	90792,78
Energía No-renovable [MJ primary]	22888671	10050178	393538,8	384647,3	1260189	385794,4	10414324
Mineral extracción [MJ surplus]	5264,325	426,2911	942,0574	934,0084	673,2004	934,0084	1354,759

Tabla 10. Caracterización de categoría de impacto ambiental, asociadas a las etapas de producción de mezcla asfáltica aditivada III (alternativa 3)

Categoría de impacto	Total	Etapas del proceso					
		Calentamiento cemento asfáltico aditivado III	Transporte de agregados a tolvas de acopio	transporte de agregados al tambor secador	Secado de agregados (asfalto aditivado)	Transporte de finos y gruesos a tolvas de acopio	Acopio, pesado y mezclado
Sustancias respirables inorgánicas [kg PM2.5 eq]	248,3128	0,393781	23,3772	21,53609	35,67766	21,59585	145,7322
Sustancias respirables orgánicas [kg C2H4 eq]	204,5817	0,410666	9,28106	8,51945	17,23371	8,51945	160,6173
Acidificación/nitrificación terrestre [kg SO2 eq]	5277,629	9,767044	588,7157	544,1355	656,9085	545,7101	2932,392
Acidificación acuática [kg SO2 eq]	1478,048	3,378726	99,91942	94,02429	140,9304	94,59488	1045,2
Calentamiento global [kg CO2 eq]	182270,2	2164,744	14551,59	14035,86	46585,7	14139,55	90792,78
Energía No-renovable [MJ primary]	12877358	38864,96	393538,8	384647,3	1260189	385794,4	10414324
Mineral extracción [MJ surplus]	4838,867	0,833457	942,0574	934,0084	673,2004	934,0084	1354,759

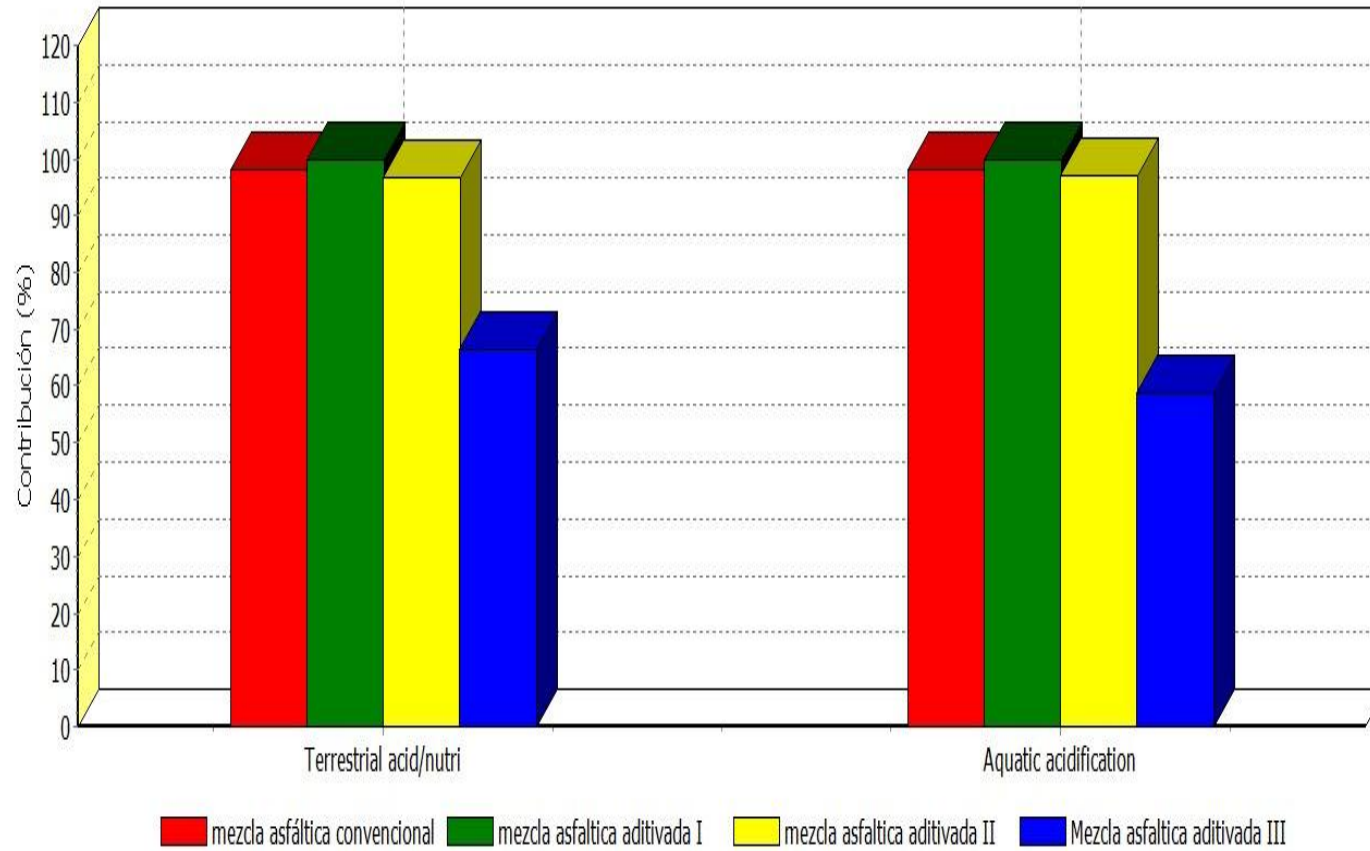
Figura 13. Comparación de contribución a las categorías de impacto (Respiratorio inorgánicos & Respiratorio orgánico), de los diferentes escenarios



■ mezcla asfáltica convencional ■ mezcla asfáltica aditivada I ■ mezcla asfáltica aditivada II ■ Mezcla asfáltica aditivada III

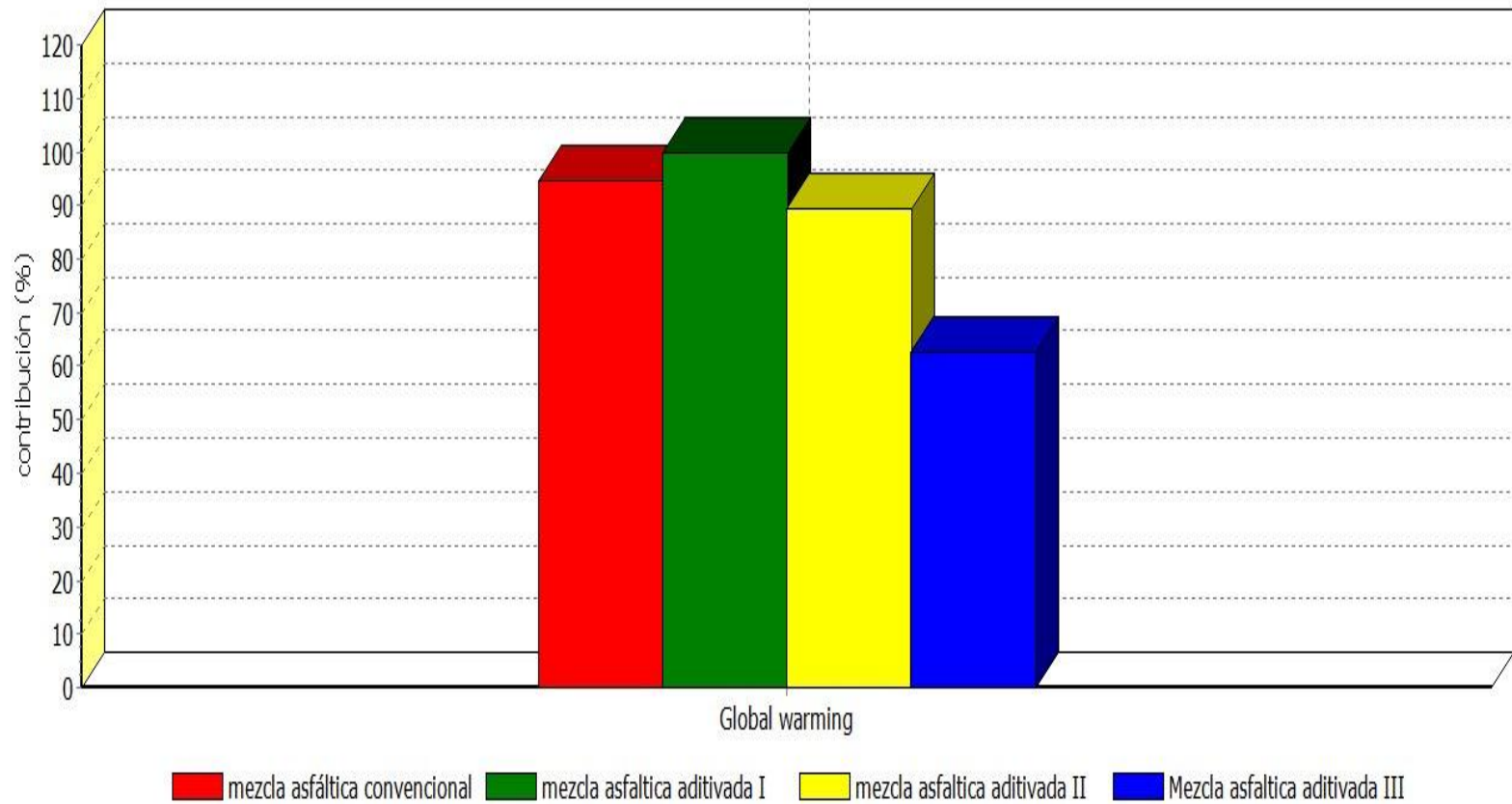
Comparando 1 p (mezcla asfáltica convencional), 1 p (mezcla asfáltica aditivada I), 1 p (mezcla asfáltica aditivada II) y 1 p (Mezcla asfáltica aditivada III); Método: IMPACT 2002+ (re

Figura 14. Comparación de la contribución a las categorías de impacto (Terrestre acidez/nitrificación & Acidificación), de los diferentes escenarios



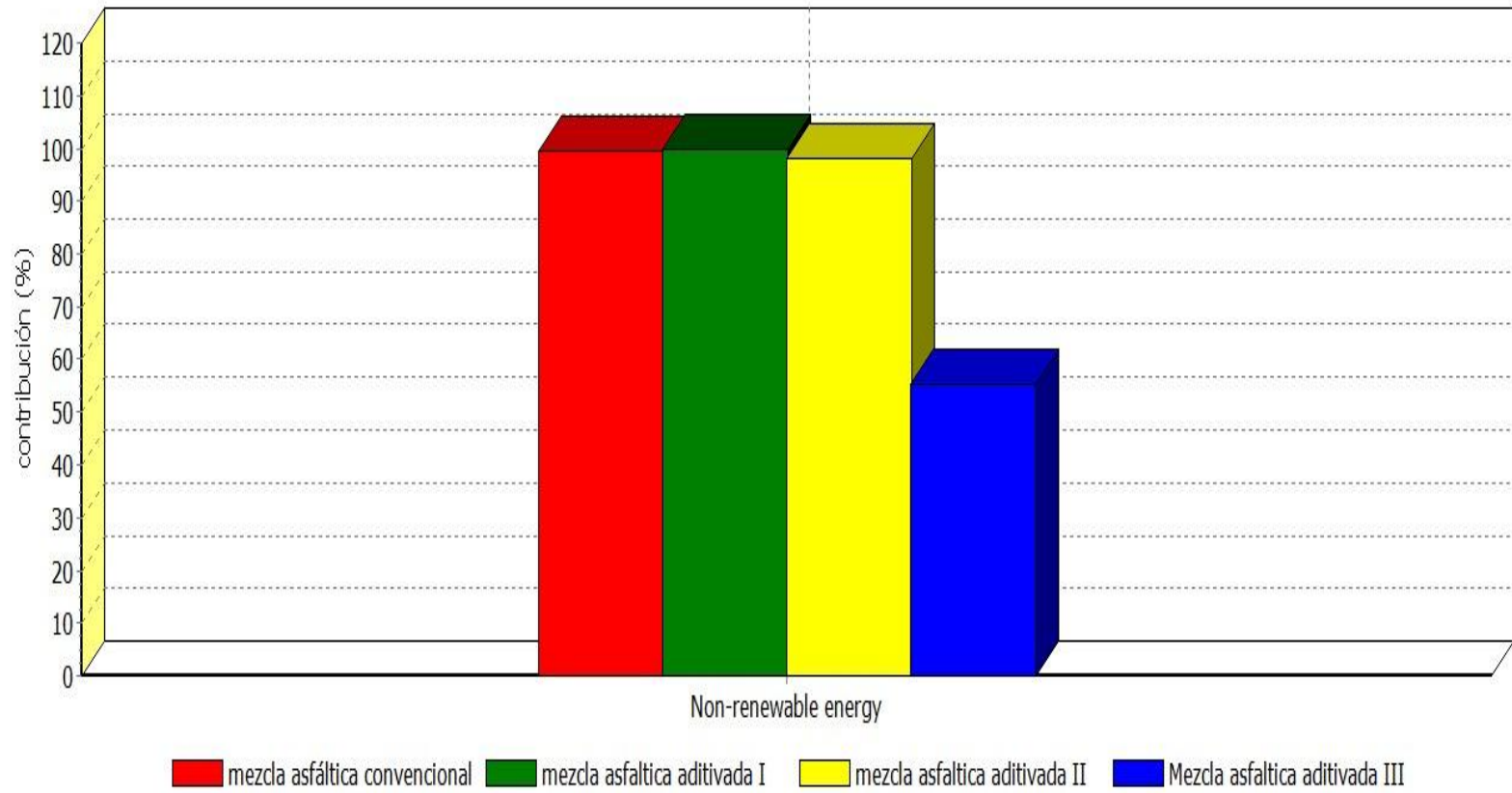
Comparando 1 p (mezcla asfáltica convencional), 1 p (mezcla asfáltica aditivada I), 1 p (mezcla asfáltica aditivada II) y 1 p (Mezcla asfáltica aditivada III); Método: IMPACT 2002+ (te

Figura 15. Comparación de la contribución a las categorías de impacto (Calentamiento Global), de los diferentes escenarios



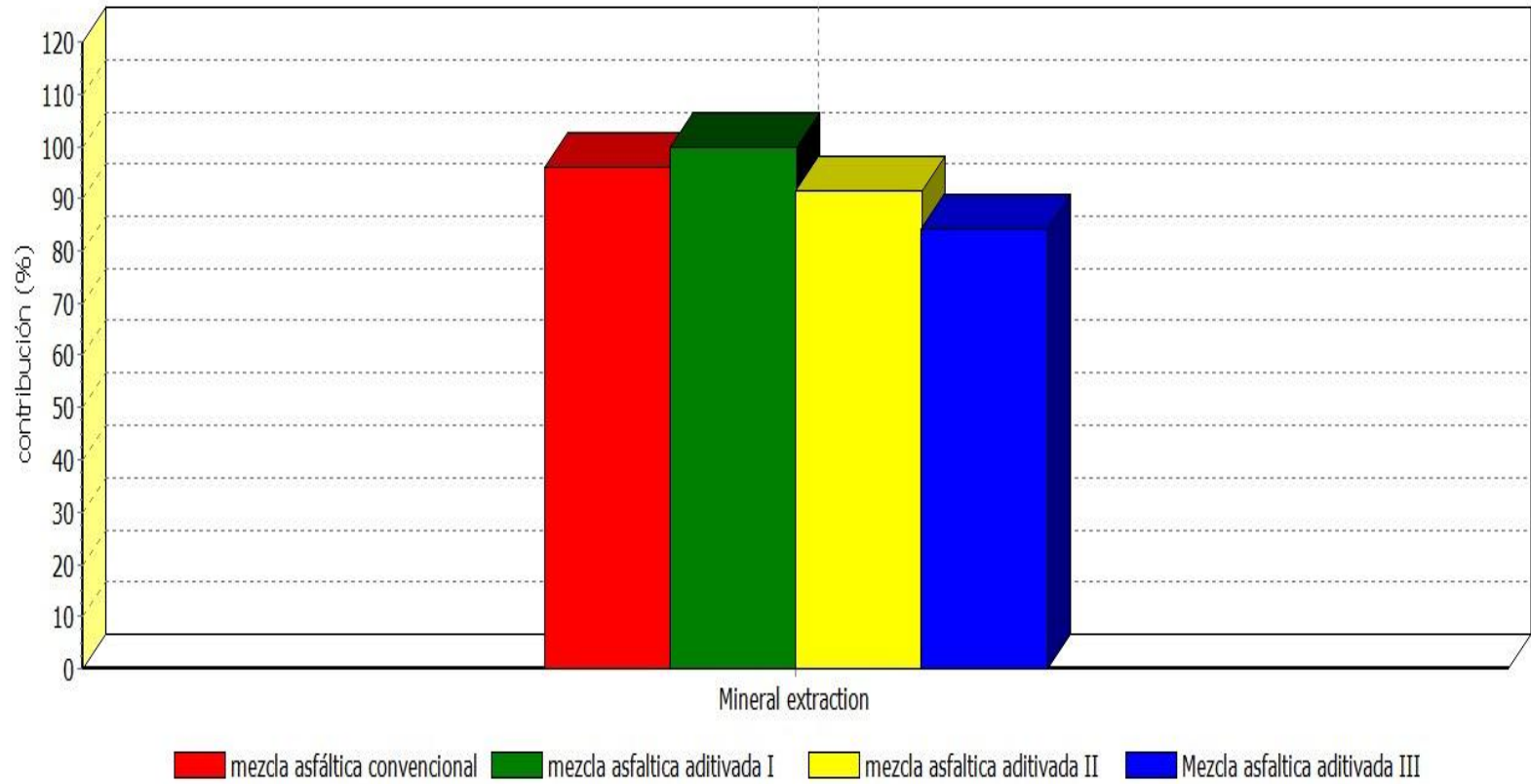
Comparando 1 p (mezcla asfáltica convencional), 1 p (mezcla asfáltica aditivada I), 1 p (mezcla asfáltica aditivada II) y 1 p (Mezcla asfáltica aditivada III); Método: IMPACT 2002+ (g)

Figura 16. Comparación de la contribución a las categorías de impacto (Energía No-renovable), de los diferentes escenarios



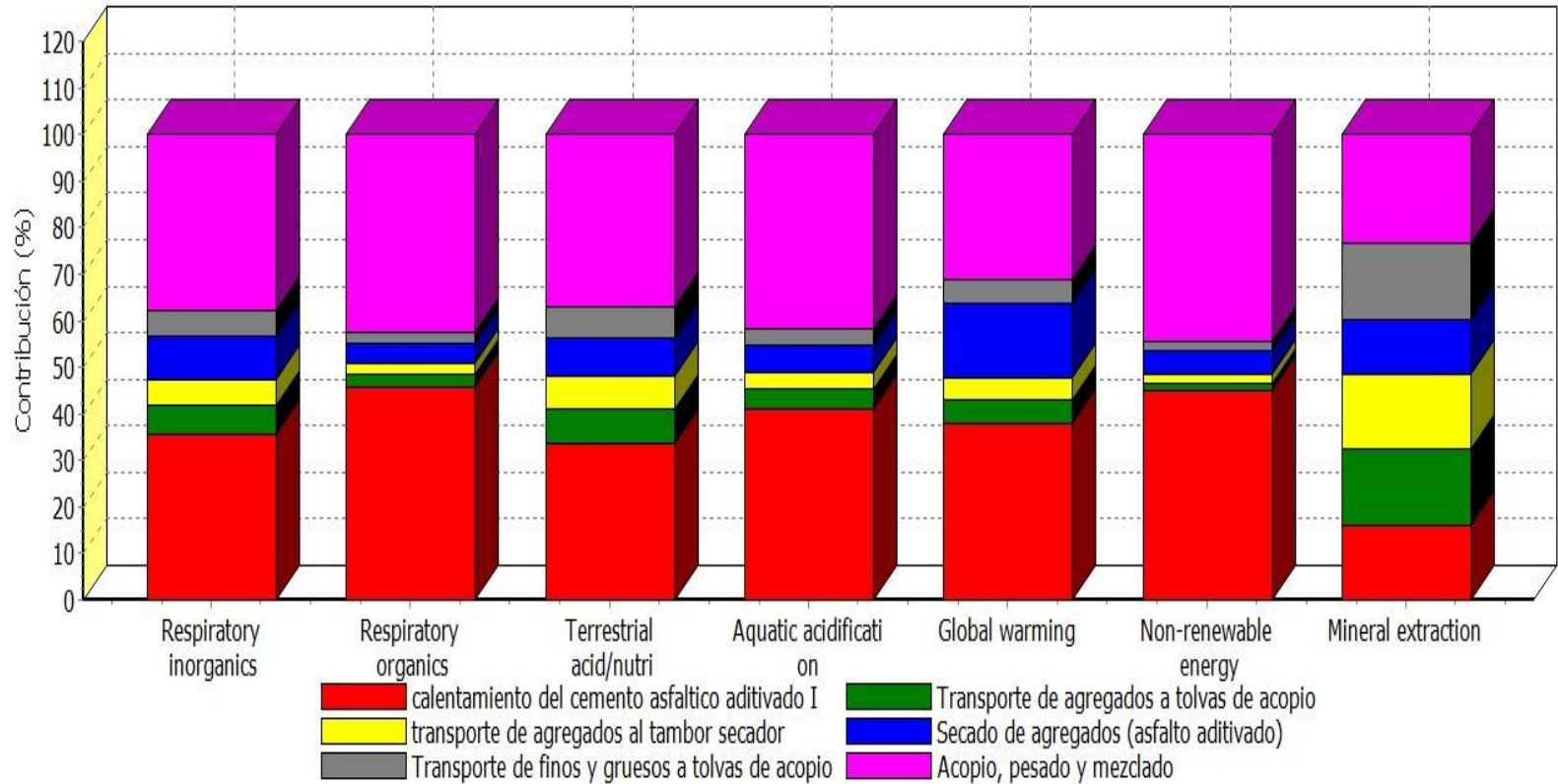
Comparando 1 p (mezcla asfáltica convencional), 1 p (mezcla asfáltica aditivada I), 1 p (mezcla asfáltica aditivada II) y 1 p (Mezcla asfáltica aditivada III); Método: IMPACT 2002+ (er

Figura 17. Comparación de la contribución a las categorías de impacto (Extracción mineral), de los diferentes escenarios



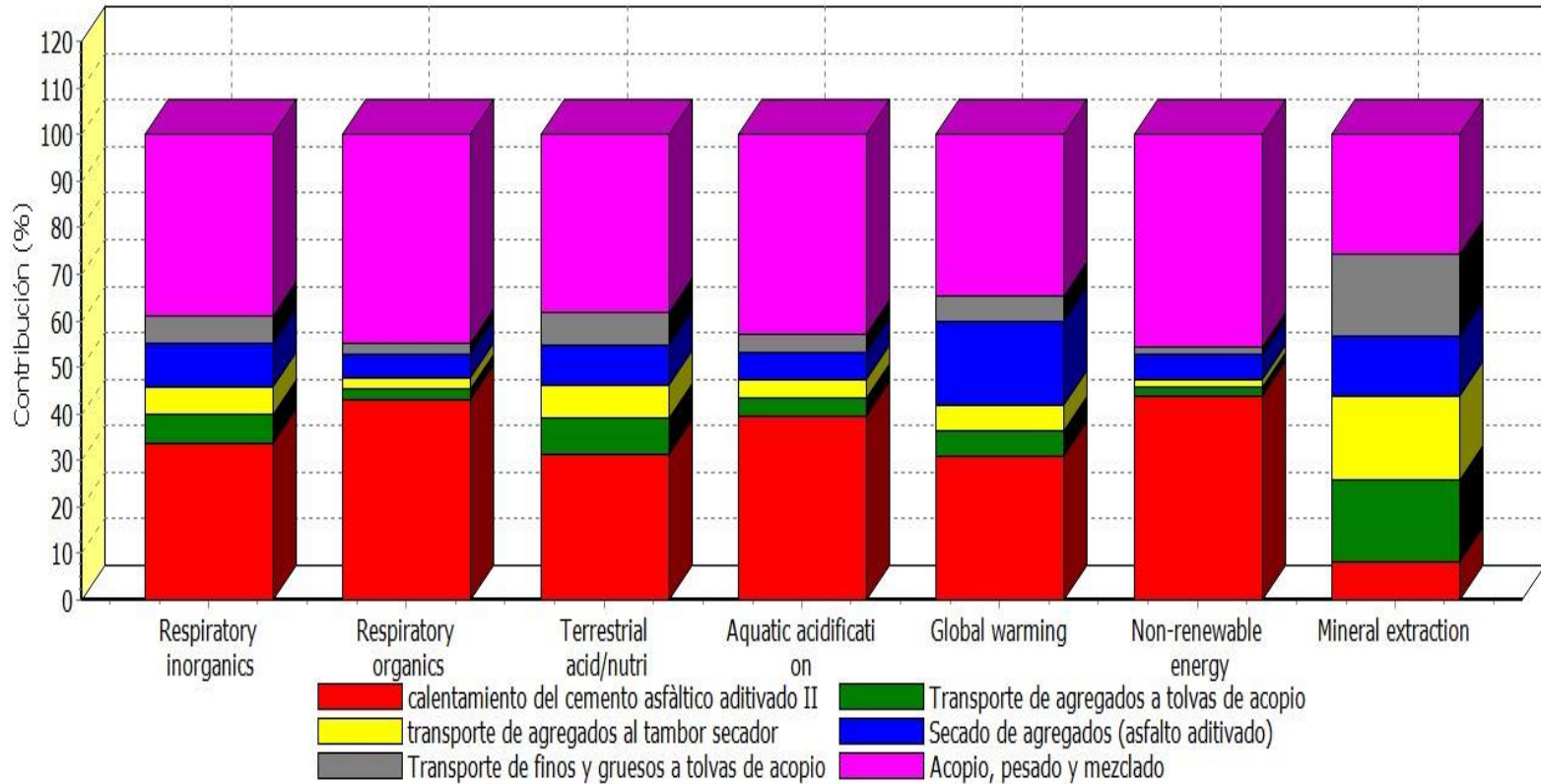
Comparando 1 p (mezcla asfáltica convencional), 1 p (mezcla asfáltica aditivada I), 1 p (mezcla asfáltica aditivada II) y 1 p (Mezcla asfáltica aditivada III); Método: IMPACT 2002+(mi

Figura 18. Perfil ambiental -Contribución a las categorías de impacto ambiental, asociadas a las etapas de producción de mezcla aditivada I (alternativa 1)



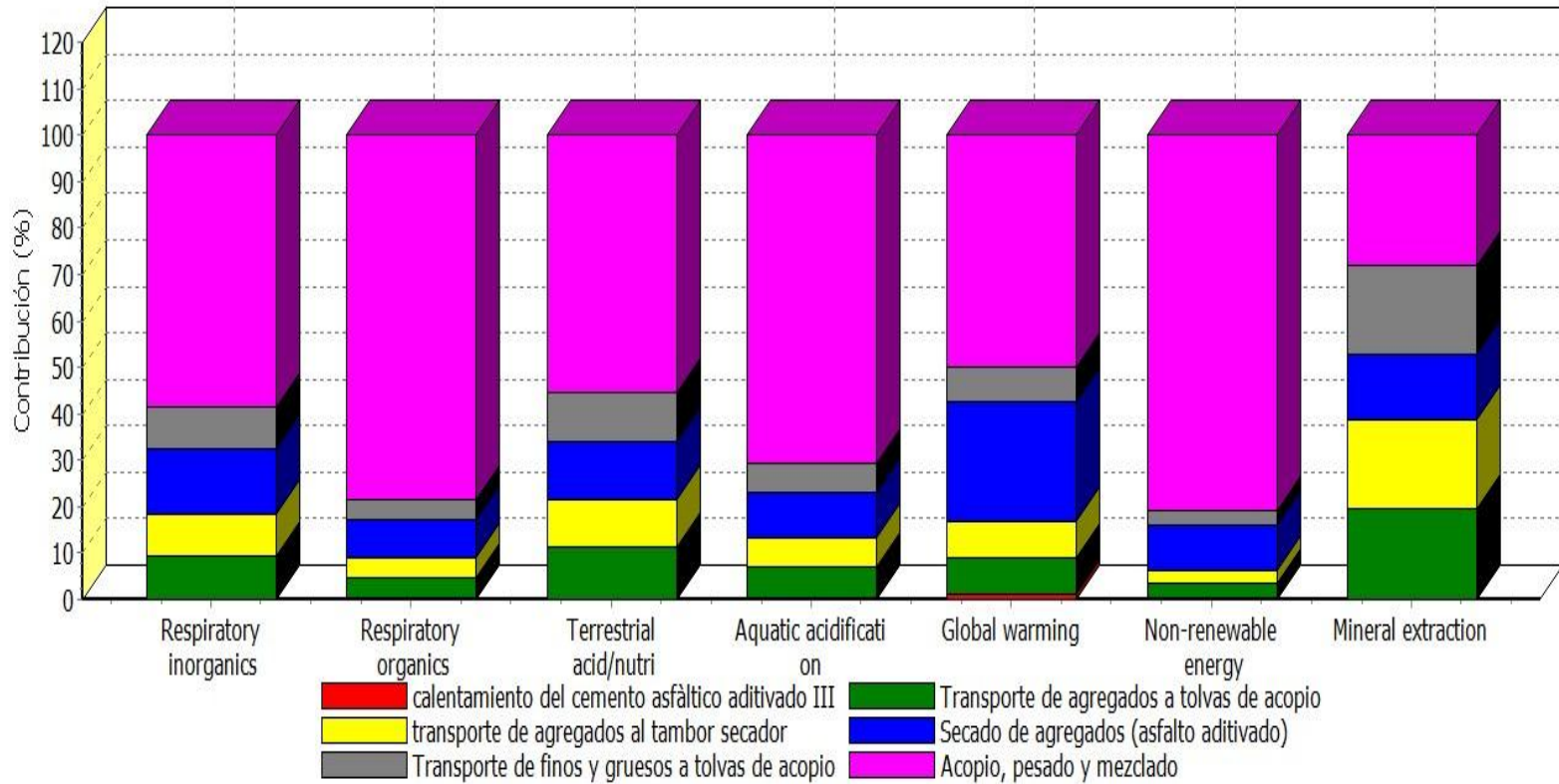
Analizando 1 p (mezcla asfáltica aditivada I); Método: IMPACT 2002+ (seleccionados) V2.05 / IMPACT 2002+ / Caracterización

Figura 19. Perfil ambiental -Contribución a las categorías de impacto ambiental, asociadas a las etapas de producción de mezcla aditivada II (alternativa 2)



Analizando 1 p (mezcla asfáltica aditivada II); Método: IMPACT 2002+ (seleccionados) V2.05 / IMPACT 2002+ / Caracterización

Figura 20. Perfil ambiental -Contribución a las categorías de impacto ambiental, asociadas a las etapas de producción de mezcla aditivada III (alternativa 3)



Analizando 1 p (Mezcla asfáltica aditivada III); Método: IMPACT 2002+ (seleccionados) V2.05 / IMPACT 2002+ / Caracterización

3.5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS (FASE IV)

En este apartado se presenta el análisis de los resultados obtenidos de la evaluación de impacto ambiental realizada a partir del análisis de inventario en la producción de mezcla asfáltica en caliente (MDC-2). También se realiza un análisis sobre las mejoras para planta de producción de mezcla que está bajo estudio.

3.5.1 Escenario de Referencia. En la evaluación de impacto, se ha observado que la etapa del calentamiento de asfalto y la etapa de acopio, pesado y mezclado son las que más contribuyen a las categorías de impacto ambiental seleccionadas en este estudio. De acuerdo a los datos arrojados por el software Sima Pro, reportados en las Tablas 3 y 4. Se observó que:

La contribución del calentamiento del asfalto a las categorías de sustancias inorgánicas respirables y a las sustancias orgánicas respirables con valores de 124,3457kgPM_{2.5}eq y 152,3927 kgC₂H₄eq, cuyas contribuciones son de 32,63% y 42,34%. En el acopio, pesado y mezclado, la contribución a estas categorías fue de 145,732 kgPM_{2.5}eq y 160,617 kgC₂H₄eq, con porcentajes de 38,42% y 44,85%. Estas etapas también contribuyen significativamente en el impacto de acidificación y nitrificación terrestre en un 30,68% y 37,61%. Así mismo, se ve afectada la acidificación acuática por la etapa de calentamiento de asfalto con un 38,70% y la etapa acopio, pesado y mezclado con un 42,68%. Otra categoría afectada, es el consumo de energía no renovable con un 43,53% y 44,83%.

Existen dos razones que explican porque estas etapas son las más contaminantes en estas categorías de impacto ambiental asociadas al proceso producción de mezcla. Una es porque el material de entrada a la tecnosfera, el asfalto, tiene involucradas una serie de sustancias tóxicas, de fracciones de hidrocarburos alifáticos, cíclicos, aromáticos u otros, como cargas ambientales emitidas al aire, donde algunas de éstas son generadas a partir de una temperatura de 20°C. Otra

razón, es porque para el proceso de producción de mezcla asfáltica, el asfalto (Punto de fusión: 54-173°C) debe calentarse a una temperatura de 150 a 200°C, para aumentar la viscosidad y hacerlo más adherente cuando sea mezclado con los agregados. Al calentarse el asfalto, aumenta los vapores de sustancias tóxicas que se dispersan rápidamente en el aire y alcanzan una concentración nociva en el ambiente [30].

Como consecuencia de la generación de vapores de sustancias tóxicas se puede generar aumento en la concentración de la acidificación y nitrificación en el suelo, debido a que estas sustancias se solubilizan con el agua de lluvia y son absorbidos por la superficie terrestre y superficie acuática.

Otra etapa que contribuye en menor porcentaje a las categorías de sustancias inorgánicas respirables es el secado de agregados, el cual contribuyen con un valor 43,159kgPM2.5eq y con 11,37%. Los agregados, son una mezcla granulométrica de partículas gruesas y finas que están compuestos de materiales de arcillas, limos, arena y grava. Estos materiales, tiene una estructura cristalina, de carácter inorgánico (óxidos de metal), cuyas temperaturas de fusión están por encima de los 1000°C. La sílice (óxido de silicio), por ejemplo, que normalmente esta en mayor concentración en la arena, tiene una temperatura de fusión de 1730°C, mayor que la del asfalto.

En la etapa de secado de agregado, la temperatura del proceso alcanza los 100°C, esta temperatura tiene como objetivo principal eliminar el agua existente en los agregados. Cuanto más secos estén los agregados, el asfalto se adhiere más fuerte. Esto quiere decir, que en el proceso de producción de mezcla, esta etapa, no genera sustancias toxicas orgánicas, pero las partículas más finas puede volatilizarse debido a corrientes de aire o movimiento bruscos del material y dispersarse en el aire generando aumento de la concentración de material particulado en el ambiente.

La marcada diferencia de la composición y comportamiento del agregado y el asfalto hace que sea más contaminante la etapa de calentamiento de asfalto que el secado de agregados, además el asfalto tienen más efectos nocivos sobre la salud humana. Sin embargo, ambos materiales, asfalto y agregado, influyen de alguna forma en los efectos respiratorios que se produzcan en la población.

En la categoría de impacto de extracción de minerales, las etapas que tienen mayor contribución son: etapa transporte de agregados a tolvas de acopio con 17,00%, etapa transporte de agregados a tambor secador con un 17,15%, etapa de transporte de finos y gruesos a tolvas de acopio con 16,86% y la etapa acopio, pesado y mezclado con un 24,37%.

El dióxido de carbono producido durante el proceso contribuye al efecto del calentamiento global. Esta contribución se ve reflejada en las etapas de calentamiento de asfalto con un valor de 28,58%, la etapa transporte de agregados a tolvas de acopio con un 22,69% y en la etapa acopio, pesado y mezclado con un 33,02%.

El perfil ambiental del proceso, se muestra en la Figura 12, con esta gráfica se puede ver claramente que las etapas de calentamiento del asfalto y de acopio, pesado y mezclado, tienen mayor contribución en las categorías de impacto, en las etapas del proceso de producción de mezcla asfáltica densa en caliente MDC-2, que las otras etapas involucradas en el proceso.

3.5.2 Escenarios de mejoras. De acuerdo a los resultados obtenidos del software Sima Pro, la etapa más contaminante del proceso de estudio, es el calentamiento del asfalto, por esta razón, en la propuesta de mejora, se selecciona tres aditivos diferentes para disminuir la temperatura del calentamiento del asfalto. Este aditivo es adicionado al asfalto en una concentración determinada, haciendo

que parte del asfalto sea reemplazado por un porcentaje en peso del aditivo. Los aditivos utilizados son:

- ✓ **Sasobit** es una resina hidrocarbonada, en el software Sima pro se tomo una resina polivinilica fluoride (cloruro de polivinilo),
- ✓ **Aspa-min** es una zeolita sintética, en el software Sima pro se tomo una zeolita.
- ✓ **Morlife** es un líquido en base amina, en el software Sima pro se tomo una trimetil amina

En los resultados obtenidos de la comparación, presentados en la Tabla 7, y de acuerdo a la Figura 15, se encuentra la comparación a la contribución del calentamiento global que aporta la mezcla convencional, mezcla asfáltica aditivada I, aditivada II y aditivada III. Allí se observó que la mezcla asfáltica aditivada III, (donde se aplica el aditivo Morlife) permite disminuir de 225202,915 kgCO₂eq a 147863,430 kgCO₂eq el valor de la categoría de calentamiento global, es decir, se mitiga el 35% de CO₂ emitidos del proceso en la producción de mezcla de referencia. Esto es gracias a la.

Otro aditivo que disminuye la contribución de este impacto es el aspan-min que se aplicó a la mezcla asfáltica aditivada II, este disminuye 225202,915 kgCO₂eq a 212080,121 kKgCO₂eq el valor de la categoría de impacto “calentamiento global”, es decir, mitiga casi el 6% de emisiones CO₂ emitidos por el proceso convencional.

La diferencia en la reducción de la emisión de CO₂ entre morlife y aspan-min es debida a que la primera, en sus entradas a la tecnosfera para su producción, requiere menos materiales que el segundo aditivo estudiado.

La aplicación de la adición del aditivo morlife y aspan-min en mezcla asfáltica reduce el consumo de asfalto y mitiga las emisiones además de disminuir la temperatura de calentamiento de asfalto.

También se ha observado que la mezcla aditivada II y III reducen otros impactos como: las sustancias respirables inorgánicas e orgánicas (Ver Figura 13), acidificación/nitrificación terrestre (Ver Figura 14), energía no renovable (ver Figura 16) y extracción mineral (ver Figura 17) en un 2% y 35% de las emisiones, como lo muestra la Tabla 7, esto comparado con el proceso de la mezcla de referencia.

Los resultados de la caracterización de categoría de impacto ambiental asociadas a las etapas de producción de mezcla aditivada I, mezcla aditivada II y mezcla aditivada III se presentan en las Tablas 8, 9 y 10, respectivamente. Con los resultados de estas tablas se obtiene los perfiles ambientales de la contribución a las categorías de impacto ambiental asociadas a las etapas de producción de mezcla asfáltica aditivada I (ver Figura 18), mezcla asfáltica aditivada II (ver Figura 19) y mezcla asfáltica aditivada III (ver Figura 20).

Con estos resultados se puede comprobar que la contribución de las emisiones en la etapa de calentamiento de asfalto, al proceso de producción de mezcla, disminuye los efectos causados por sustancias respirables orgánicas de un 359,1318 kgC₂H₄eq a un 0,3937781 kgC₂H₄eq con la aplicación del aditivo morlife (alternativa 3), a diferencia de los otros dos aditivos: sasobit (alternativa 1) y aspan-min (alternativa 2); donde no se encontró disminución considerable.

4. CONCLUSIONES

Gracias a la metodología de ACV, empleando el Sima Pro 7.1, se ha determinado la evaluación de impacto ambiental potencial y con ello se ha observado que etapas contribuyen al impacto ambiental de las categorías seleccionadas en este estudio. Además, basados en la interpretación de los resultados se llegó a las siguientes conclusiones:

- ✓ Las etapas de calentamiento de asfalto y el acopio, pesado y mezclado, son los puntos de mayor concentración en las emisiones de gases de efecto invernadero y calentamiento global, producidas durante el proceso de elaboración de mezcla asfáltica densa en caliente MDC-2.
- ✓ Los potenciales problemas respiratorios de la población, principalmente habitantes de área aledañas, son debidos a las emisiones de compuestos orgánicos volátiles y sustancias inorgánicas, provenientes de la etapa de calentamiento del asfalto, secado de agregado y acopio, pesado y mezclado.
- ✓ De acuerdo a los resultados obtenidos en la comparación de los escenarios alternativos propuestos es posible concluir que la aditivación del cemento asfáltico con morlife reduce drásticamente los efectos que ejercen las cargas ambientales en las categorías de impacto estudiadas. Debido a que la contribución en la producción de la amina, tomada de la base de datos del software Sima Pro tiene menos entradas a la tecnosfera comparada con los aditivos de la resina polivinilica y la zeolita sintética.

5. RECOMENDACIONES

Finalmente, se propone recomendaciones a la empresa Asfaltart S.A, que sirvan como área de mejoramiento del sistema de gestión ambiental y seguridad industrial y, para el proceso de producción y comercialización de mezclas más amigables con el ambiente. Tales recomendaciones son:

- ✓ Aplicar la técnica de mezclas asfálticas tibias, utilizando como aditivo del cemento asfáltico, el morlife, para disminuir las temperaturas de producción de la mezcla. Así mismo, realizar las mediciones in-situ de las entradas y salidas del proceso, para con ello hacer un análisis de sensibilidad.
- ✓ Realizar un muestreo Isocinético en la caldera, de las emisiones reales que se producen durante el proceso de calentamiento del asfalto.
- ✓ Se recomienda a la empresa Asfaltart S.A aplicar tecnologías como: reciclado de pavimento y residuos minerales, con el fin de mitigar el impacto generado el consumo de minerales.
- ✓ También se recomienda, realizar un análisis de la calidad del aire en el área de producción, para determinar las emisiones de compuestos volátiles orgánicos, óxido de nitrógeno, óxido de azufre u otros gases y, de material particulado, que se producen durante el proceso de elaboración de mezcla.
- ✓ El uso de equipo de seguridad industrial al personal que se encuentre cerca de las etapas de calentamiento de asfalto, secado de agregados y acopio, pesado y mezclado, debido a que en estos puntos se tiene alta concentración de emisión de volátiles orgánicos y material particulado.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Rodriguez, R. Gamba, L. Lozano, O. Estevez, A. Castillo, E. Pedraza, E. Moreno, C. Orduz, J. Gregorio, J. Fonseca, J. Herrera, I. (2008). Desempeño ambiental de la tecnología en la industria Colombiana. Universidad Industrial de Santander. Tópicos avanzados en ciencias ambientales. Colombia. Páginas 498-532.
- [2] Garnica, A. P., Gomez, J. A., Romero, S. A., Alarcon, H. S. (2004) Aspectos volumétricos del diseño de mezclas asfálticas. Sandfandila. Páginas 1-53.
- [3] Chincilla, A. (2008). Montaje, operación y mantenimiento de Plantas para Mezclas asfálticas en caliente. Universidad San Carlos de Guatemala. Páginas 281.
- [4] Niño, L. (2012). Tesis pregrado: Balance ambiental del proceso de producción de mezcla asfáltica en caliente en la planta de Asfaltart Girón- Santander. Informe técnico N. 1: Diagrama del proceso de producción de mezcla asfáltica en caliente. Universidad Industrial de Santander. Colombia. Páginas 14.
- [5] Ortiz, J., Moncunill, C. (2006). Reducción de emisiones en la producción de mezclas bituminosas en caliente. Ingeniería Viaria y Ambiental (INVIAM). ASEFMA II Jornada Técnica. Madrid. Páginas 7-32.
- [6] Paris, A. M. Y Moncunill, C. Y Ortiz J. (2006). El análisis de ciclo de vida en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente. Revista Carreteras. Números extraordinario sobre Integración ambiental. Octubre de 2006.
- [7] Environmental Protection Agency- EPA. (2004). Hot Mix Asphalt Plants Emission Assessment Report. Emissions Monitoring and Analysis Division Office

of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, NC. Páginas 46.
[on line:] [En línea] [Citado el: 30 de diciembre de 2011.]
[http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/
ch11/bgdocs/b11s01.pdf](http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch11/bgdocs/b11s01.pdf)

[8] Conesa, F. (1997). Guía metodológica para la evaluación de impacto ambiental. Mundi prensa Madrid. España. Cuarta edición. Páginas 864. Consultado el 26 de mayo del 2012.],
[http://books.google.com.co/books?id=GW8lu9Lqa0QC&
printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](http://books.google.com.co/books?id=GW8lu9Lqa0QC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)

[9] Torres, J. (2009). Tesis pregrado: Evaluación del impacto ambiental y plan de manejo ambiental del proyecto parque lineal Chinbunga, canton, Riobamba, provincia de Chimborazo. Escuela Superior Politecnica de Chimborazo. Ecuador.

[10] Sánchez, L.E. (2011). Evaluación de Impacto Ambiental: Conceptos y métodos. Traducción Canossa, M. Ecoe Ediciones. Bogotá. 479 p. Capítulo 1 . Definiciones de contaminación, degradación ambiental e impacto ambiental

[11] Martinez, J. (2010). Tesis de Doctorado: Propuesta metodológica para la evaluación de impacto ambiental en Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Colombia

[12] Norma Técnica Internacional ISO-14044. (2006). Gestión Ambiental, Análisis de Ciclo de Vida, Requisitos y Directrices. Versión oficial en español de la Norma Europea. International Organisation for Standardisation ISO. Internacional standard. 14040. Madrid.

- [13] Ecodiseño. Innovación técnica. (2008). Clase 6. Análisis del ciclo de vida. Universidad de Chile. [En línea] [Citado el: 20 de Febrero de 2012.] http://www.lapetus.uchile.cl/lapetus/archivos/1222376210ed_clase06.pdf
- [14] Mroueh, M., Eskola, P. Ylijoki, J. (2001). Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction. VTT Chemical Technology. Waste Management Vol. 21. Finland. Pages 271-277.
- [15] Chui-Te, C., Tseng-Hsing, H., Wan-Fa, Y. (2007). Life Cycle Assessment on using recycled materials for rehabilitating asphalt pavements. Resources conservation and Recycling. Vol. 52. Taiwan. Páginas 546-556.
- [16] Chui-Te, C., Tseng-Hsing, H., Wan-Fa Y. (2009). Evaluation on environmental impacts of asphalt mixtures containing municipal solid waste incineration bottom ash. J. Environ. Eng. Manage. Vol 19. Taiwan. Páginas 127-133.
- [17] Chowdhury, R., Apula, D., Fryb, T. (2010). A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction. Resources, Conservation and Recycling. vol 54. United States. pages 250–255
- [18] Tatari, O., Nazzalb, M., Kucukvara, M. (2012). Comparative sustainability assessment of warm-mix asphalts: A thermodynamic based hybrid life cycle analysis. Resources, Conservation and Recycling. United Stated. 58 : 18– 24.
- [19] Felipo, J., Irusta, R., Nuñez, Y., García, C., García, N., Buisson, J., Peinado, D., Potti, J. (2008). Análisis del ciclo de vida de las técnicas constructivas de pavimentos para carreteras. VIII congreso Nacional FIRMES. Centro cultural Miguel de Delibes de Valladolid. 21 y 23 de octubre. España. Páginas 1-10.

[20] Sampedro, A., Del Val, M. A., Buisson, J. (2009). Aplicación del análisis de ciclo de vida (ACV) para la valoración de la sostenibilidad del Reciclado de mezcla asfáltica en caliente. XV Congreso Iberoamericano del Asfalto (CILA). Portugal. Páginas 10.

[21] Sampedro, A., Del Val, M., Gallego, J., Querol, N., Del Pozo, J. (2011). Huella de Carbono del Reciclado en planta asfáltica en caliente con altas tasas de RAP. XVI Congreso ibero lationamericano del asfalto. Brasil. Páginas 12.

[22] Huang, Y., Bird, R., Bell, M. (2009). A comparative study of the emissions by road maintenance works and the disrupted traffic using life cycle assessment and micro-simulation. Transportation Research Part D 14. Nottingham. Pages 197–204.

[23] Herrera I. Desarrollo metodológico de evaluación ambiental en el análisis de procesos. Tesis doctoral. Universitat Rovira I Virgili, Tarragona, España. 2004.

[24] Baltzua, H. (2009). Análisis del ciclo de vida y huella de carbono. Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto. Departamento del medio ambiente, planificación territorial, agricultura y pesca. [En línea] [Citado el: 30 de Febrero de 2013.] <http://www.eurespplus.net/sites/default/files/resource/An%C3%A1lisis%20de%20Ciclo%20de%20Vida%20y%20Huella%20de%20Carbono.pdf>

[25] Jolliet O., Margni M., Humbert S., Payet J., Rebitzer G. and Rosenbaum R. (2003) IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. In: Int J LCA, 8(6), pp. 324-330.

- [26] Guinée, J., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes G, Kleijn, R., Van Oers, L., Wegener, A., Suh, S., Udo de Haes, HA., Bruijn, H., Van Duin, R., Huijbregts, M., (2002): Life Cycle Assessment: An Operational Guide to the ISO Standards. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (NL).
- [27] Hauschild, M and Wenzel, H., (1998): Environmental Assessment of Products –Vol. 2: Scientific Background, Chapman & Hall, London (UK).
- [28] Goedkoop, M and Spriensma, R. (2000). The Eco-indicator 99: A Damage Oriented Method for Life Cycle Assessment, Methodology Report, second edition. PréConsultants, Amersfoort (NL), Netherlands.
- [29] Steen, B. (1999). A systematic Approach to Environmental Priority Strategies in Product Development (EPS). 2000-General System Characteristics & 2000-Models and Data. Chalmers. [on line:<http://eps.esa.chalmers.se/download.htm>].
- [30] Celis, L. & Serrano, C. (2008). Mezclas tibias. Tesis de pregrado en ingeniería Civil. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia. Pages 9-15.
- [31] Soares, J. & Santos, M. (2009). Mezclas asfálticas producto de la combinación técnica en mezclas de altos modulo y mezclas tibias. Tesis de pregrado en ingeniería Civil. Universidad industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia. Pages 7-26.
- [32] Groot, P.C., C. Bowen, B.G. Koenders, D.A. Stoker, O. Larsen, J. Johansen. A. (2001). Comparison of emissions from hot mixture and warm asphalt mixture production. IRF World Meeting, Paris, 2001.

[33] Lopera, F. (2011). Diseño y producción de mezcla asfálticas tibias, a partir de la mezcla de asfalto y aceite crudo de palma (*Elaeis guineensis*). Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas. Medellín.

[34] Hurley, G.C. and B.D. Prowell. (2005). Evaluation of Aspha-min® zeolite for use in warm mix asphalt. NCAT Report 05-04. National Center for Asphalt Technology, Auburn University, USA, June.

[35] Sasobit. (2004). The Bitumen Additive for Highly Stable Easily Compactable Asphalts. Product information 124. Sasol Wax, Germany, April.

[36] Barthel, W., J.P. Marchand, M. Von Devivere. (2005). Warm asphalt mixes by adding a synthetic zeolite. Eurovia. www.asphamin.com. Accessed November

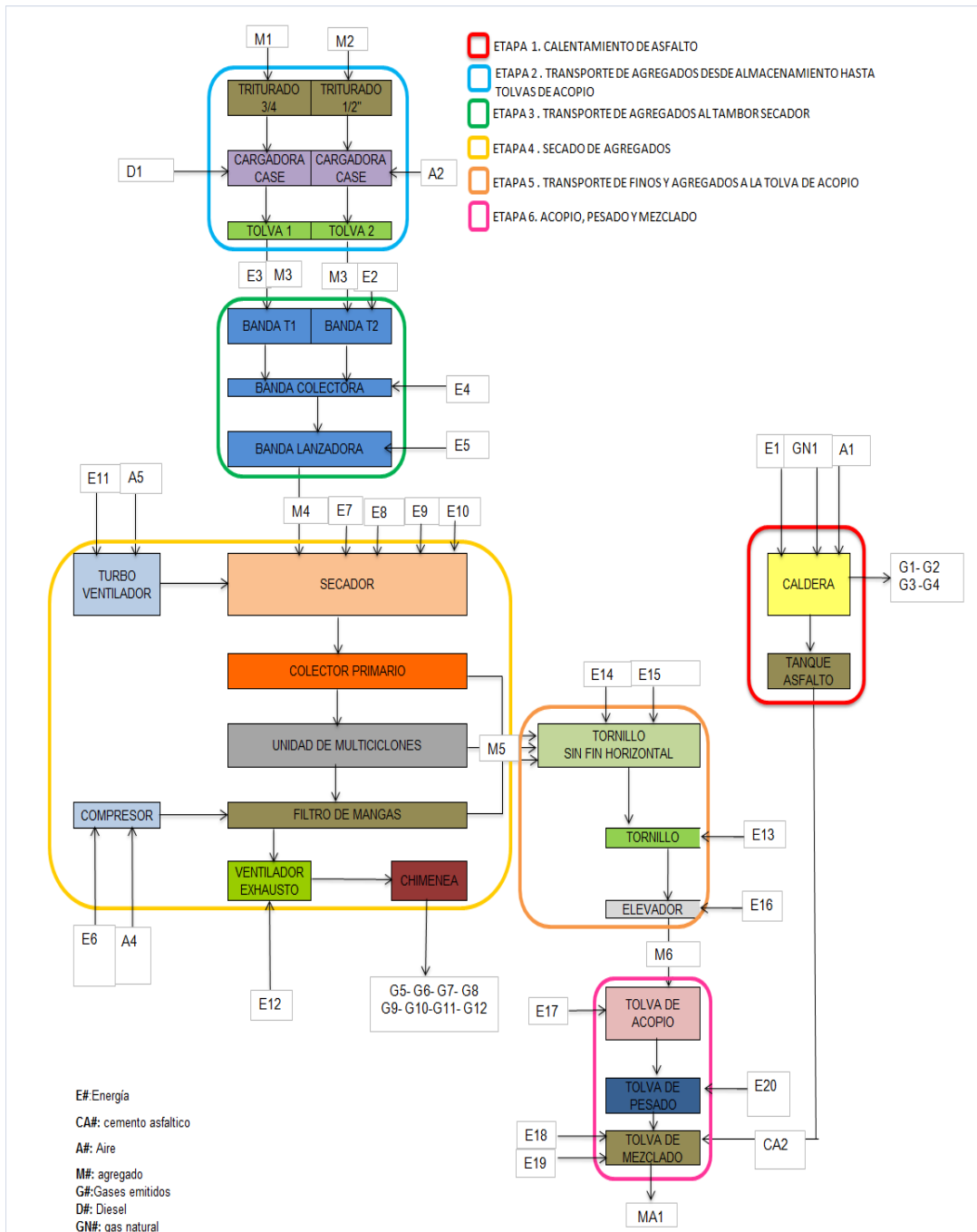
[37] Hurley, G.C. and B.D. Prowell. (2005). Evaluation of Sasobit® for use in warm mix asphalt. NCAT Report 05-06. National Center for Asphalt Technology, Auburn University, USA, June.

[38] Gómez, A. (2010). Aditivos para el rejuvenecimiento de los asfaltos. *Revista construir america central y Caribe*. Diciembre. [on line: <http://www.revistaconstruir.com/component/content/article/33-infraestructura/489-aditivos-para-el-rejuvenecimiento-de-los-asfaltos>].

ANEXOS


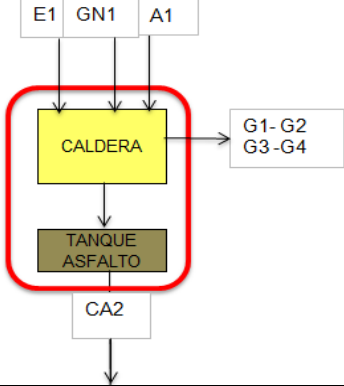

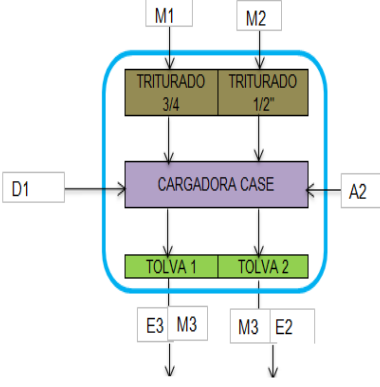
ANEXO A


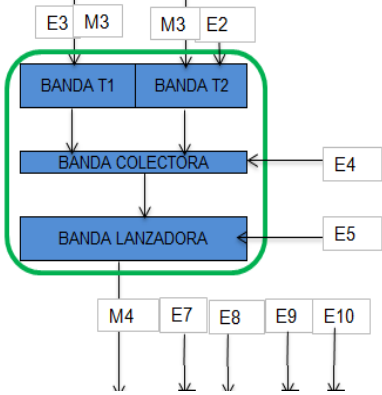

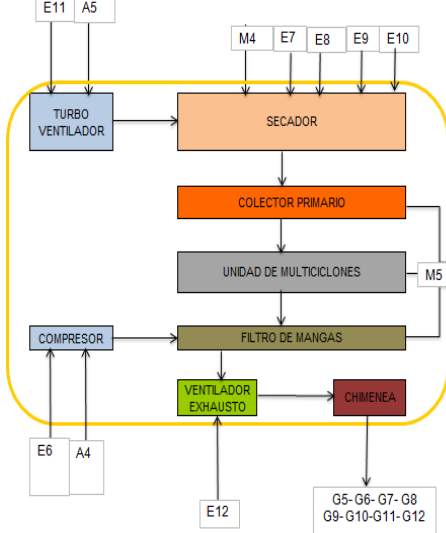
Identificación de las Corrientes del proceso de producción de mezcla (MCD-2).


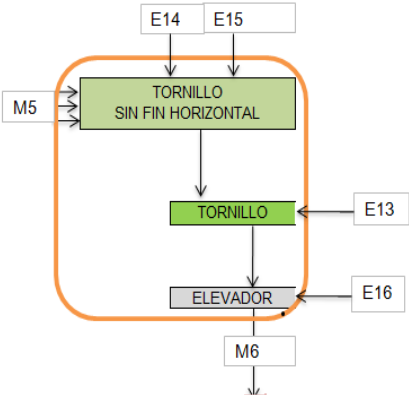

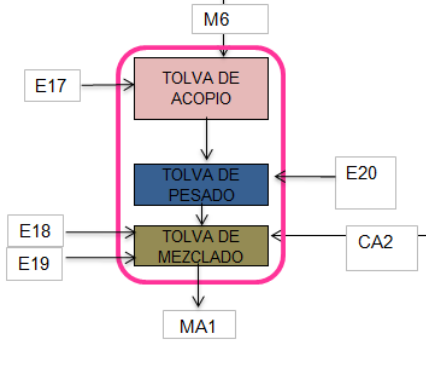


ANEXO B

Descripción detallada del proceso, por etapas [4])

ETAPA 1. Calentamiento del asfalto	CORRIENTES	DESCRIPCIÓN
		<p>La primera etapa es el calentamiento previo al cemento asfáltico a una temperatura óptima de 155°C, por un tiempo de 5h. Este calentamiento se realiza mediante serpentines que contiene aceite térmico, que es calentado por una caldera a 220 °C, por un tiempo adicional de 4h para la preparación de la mezcla asfáltica en caliente.</p>
ETAPA 2. Transporte de agregados a las tolvas de acopio.	CORRIENTES	DESCRIPCIÓN
		<p>La segunda etapa del proceso de producción es el transporte de los agregados desde el lugar de almacenamiento hasta las tolvas de acopio, lo cual se realiza utilizando una cargadora CASE que tiene un peso aproximado de 10 a 15 ton, el recorrido de esta máquina es de 5,2km para cada producción, transportando 26,76m³/h de volumen de agregado.</p>
ETAPA 3. Transporte de agregados al tambor secador	CORRIENTES	DESCRIPCIÓN

		<p>En la tercera etapa, los agregados que se encuentran en las tolvas de acopio son transportados mediante dos bandas hasta el tambor secador.</p>
<p>ETAPA 4. Secado de agregados</p>	<p>CORRIENTES</p>	<p>DESCRIPCIÓN</p>
		<p>En la cuarta etapa, los agregados se introducen dentro de un tambor secador. El calentamiento de estos agregados se realiza utilizando gas natural y aire, este último es impulsado mediante un turbo ventilador. Los agregados gruesos son llevados a un colector primario, los agregados medios son retenidos por la unidad de multiciclones. Los agregados más finos son retenidos por un filtro de mangas. Este tiene una entrada de aire ejercida por un compresor y a la salida tiene un ventilador exhaustor que conecta a una chimenea por donde salen los gases.</p>
<p>ETAPA 5. Transporte de agregados a Acopio</p>	<p>CORRIENTES</p>	<p>DESCRIPCIÓN</p>

		<p>En la quinta etapa, estos agregados (gruesos, medios y finos) son transportado por medio de unos tornillos sin fin a los cangilones.</p>
<p>ETAPA 6. Acopio, pesado y mezclado.</p>	<p>CORRIENTES</p>	<p>DESCRIPCIÓN</p>
		<p>En la sexta etapa los cangilones transportan a los agregados hasta el lugar de acopio para ser pesados junto con el asfalto y finalmente mezclarlos.</p>

ANEXO C

Balance de Energía y Masa del proceso [4]

a. ETAPA 1. Calentamiento de asfalto

- **Balance de masa**

$$Masa\ entrada - Masa\ salida = 0$$

$$M_{gas} + M_{oxígeno} + M_{nitrogeno} = M_{CO2} + M_{H2O} + M_{nitrogeno} + M_{oxígeno}$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} & 3.32885 \frac{kg}{h} gas + 23.96745 \frac{kg}{h} O_2 + \frac{90.1636 kg}{h} N_2 = \\ & = 9.1543375 \frac{kg}{h} CO_2 + 7.489912 \frac{kg}{h} H_2O + 90.1636 \frac{kg}{h} N_2 + 10.6552 \frac{kg}{h} O_2 \end{aligned}$$

- **Balance de energía:**

$$E_{ent} - E_{sal} + R_{xn} + W_{entra} = Q_{sistema}$$

Dónde:

E_{ent}: son las entalpías de los gases de entrada, aire y metano ($\Delta H_{ref} + \Delta H_{29^\circ C}$)

E_{sal}: son las entalpías de los gases de salida, dióxido de carbono CO₂, vapor de agua, nitrógeno y oxígeno en exceso ($\Delta H_{ref} + \Delta H_{336^\circ C}$)

W_{entra}: es el trabajo que entra al sistema

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} & \left\{ 0.208 \frac{Kmol}{h} gas \times 8391.438 \frac{KJ}{Kmol} + 3.97798 \frac{Kmol}{h} aire \times 8715.50 \frac{KJ}{Kmol} \right\} - \\ & \left\{ 0.208 \frac{Kmol}{h} CO_2 \times 22706.6 \frac{KJ}{Kmol} + 0.33187 \frac{Kmol}{h} O_2 \times 18217.9 \frac{KJ}{Kmol} + 3.229 \frac{Kmol}{h} N_2 \right. \\ & \quad \left. \times 17833.9 \frac{KJ}{Kmol} + 0.4161 \frac{Kmol}{h} H_2O \times 20728.7 \frac{KJ}{Kmol} \right\} + \\ & \left\{ \left(0.208 \frac{Kmol}{h} CO_2 \times -393520 \frac{KJ}{Kmol} + 0.4161 \frac{Kmol}{h} H_2O \times -241820 \frac{KJ}{Kmol} \right) \right. \\ & \quad \left. - \left(0.208 \frac{Kmol}{h} gas \times -74850 \frac{KJ}{Kmol} \right) \right\} + 26001.347 \text{ KJ/h} = Q_{sistema} \end{aligned}$$

$$36415.503 \frac{KJ}{h} - 76979.8224 \frac{KJ}{h} - 166904.662 \frac{KJ}{h} + 26001.347 \frac{KJ}{h} = Q$$

$$Q = -181467.634 \text{ KJ/h}$$

b. ETAPA 2. Transporte de agregados pétreos a tolvas de acopio

Balance de masa:

$$\text{Masa entrada} - \text{Masa salida} = 0$$

$$M_{\text{diesel}} + M_{\text{aire}} + M_{\text{Agregados}} \rightarrow M_{CO2} + M_{H2O} + M_{\text{Agregados}}$$

Por lo tanto:

$$5.4 \frac{Kg}{h} \text{ diesel} + 220.7019 \frac{Kg}{h} \text{ aire} + 47097.6 \frac{Kg}{h} \text{ agregados}$$

$$= 16.9548 \frac{Kg}{h} CO2 + 6.9842 \frac{Kg}{h} H2O + 27.8085 \frac{Kg}{h} O2 + 174.3545 \frac{Kg}{h} N2 + 47097.6 \frac{Kg}{h} \text{ agregados}$$

- **Balance de energía**

$$E_{\text{ent}} - E_{\text{sal}} + R_{\text{xn}} - W_{\text{sale}} = Q_{\text{sistema}}$$

Dónde:

Eent: son las entalpias de entrada, aire y diesel ($\Delta H_{\text{ref}} + \Delta H_{29^\circ C}$)

Esal: son las entalpias de los gases de salida, dióxido de carbono CO2, vapor de agua, nitrógeno y oxígeno en exceso ($\Delta H_{\text{ref}} + \Delta H_{190^\circ C}$)

Wsale: es el trabajo que sale del motor

$$\left\{ 5.4 \frac{Kg}{h} \text{ diesel} \times 1.9 \frac{KJ}{KgK} \times (29 - 25)^\circ C + 7.6752 \frac{Kmol}{h} \text{ aire} \times 874.4518 \frac{KJ}{Kmol} \right\}$$

$$- \left\{ 0.3853 \frac{Kmol}{h} CO2 \times 16046.5 \frac{KJ}{Kmol} + 0.388 \frac{Kmol}{h} H2O \times 15532.7 \frac{KJ}{Kmol} + 0.869 \frac{Kmol}{h} O2 \right.$$

$$\left. \times 13620.1 \frac{KJ}{Kmol} + 6.2269 \frac{Kmol}{h} \times 13487.2 \frac{KJ}{Kmol} \right\}$$

$$- 5.4 \frac{Kg}{h} \times \frac{45500 KJ}{Kg} - 26845.6375 \frac{KJ}{h} = Q_{\text{sistema}}$$

$$6752.6324 \frac{KJ}{h} - 108028.7166 \frac{KJ}{h} - 245700 \frac{KJ}{h} - 26845.6375 = Q_{sistema}$$

$$Q = -373821.7217 \text{ KJ/h}$$

c. ETAPA 3. Transporte de los agregados pétreos al tambor secador

- **Balance de masa**

$$Magregados\ entrada = Magregados\ salida$$

$$47097.6 \text{ kg/h} = Magsa$$

- **Balance de energía**

$$W_{tolva1} + W_{tolva2} + W_{banda\colectora} + W_{banda\lanzadora} = Q$$

$$8603.831 \frac{KJ}{h} + 8603.831 \frac{KJ}{h} + 10535.3 \frac{KJ}{h} + 10535.3 \frac{KJ}{h} = E_{sistema}$$

$$38278.262 \frac{KJ}{h} = E_{sistema}$$

d. **ETAPA 4. Secado de agregados pétreos y salida de gases.**

- **Balance de masa**

$$Magregados + M_{gas} + M_{aire\ turbo} + M_{aire\ compresor} = Magregados + M_{H2O} + M_{O2} + M_{particulado} + M_{SO2} + M_{NO} + M_{CO} + M_{CO2} + M_{N2}$$

$$47097.6 \frac{kg}{h} agregados + 278.9718 \frac{kg}{h} gas + 1357.9577 \frac{kg}{h} aire\ compr + M_{aire\ turbo} = 484 \frac{kg}{h} CO_2 + 0.2993 \frac{kg}{h} m_{particulado} + 0.2667 \frac{kg}{h} SO_2 + 0.11 \frac{kg}{h} NO + 1865.37 \frac{kg}{h} H_2O + 2720 \frac{kg}{h} O_2 + 3.40333 \frac{kg}{h} CO + 47097.3007 \frac{kg}{h} agregados + 8409.65 \frac{kg}{h} N_2$$

$$M_{aire\ turbo} = 11845.87 \frac{kg}{h} \text{ aire turbo ventilador}$$

Para el balance de masa se realiza unos cálculos adicionales:

- Entrada total de aire:

$$M_{airetotal} = 11845.87 \frac{Kg}{h} \text{aire turbo ventilador} + 1357.9577 \frac{Kg}{h} \text{aire compr} = 13203.8277 \frac{Kg}{h}$$

$$M_{airetotal \text{ moles}} = 13203.8277 \times \frac{1 \text{ Kmol}}{28.84 \text{ Kg}} = 457.83 \frac{\text{Kmol}}{h}$$

Balance de energía

$$E_{ent} - E_{sal} + R_{xn} + W_{neto} = Q_{transferido}$$

$$W_{neto} = W_{tambor1} + W_{tambor2} + W_{tambor3} + W_{tambor} + W_{vent} + W_{comp} + W_{ex}$$

Dónde:

E_{ent}: son las entalpías de los gases de entrada, aire y metano ($\Delta H_{ref} + \Delta H_{29^\circ C}$)

E_{sal}: son las entalpías de los gases de salida, dióxido de carbono CO₂, vapor de agua, nitrógeno y oxígeno en exceso ($\Delta H_{ref} + \Delta H_{75^\circ C}$)

W_{entra}: es el trabajo que entra al sistema de cada uno de los motores de los equipos de la etapa 4.

$$\left\{ 17.4357 \frac{\text{Kmol}}{h} \text{gas} \times 8391.43 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} + 457.83 \frac{\text{Kmol}}{h} \text{aire} \times 8715.50 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right\} -$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 11 \frac{\text{kmol}}{h} \text{CO}_2 \times 11272.6 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} + 0.1215 \frac{\text{kmol}}{h} \text{CO} \times 10122.6 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} + 85 \frac{\text{Kmol}}{h} \text{O}_2 \times 10153.6 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \\ + 103.63 \frac{\text{Kmol}}{h} \text{H}_2\text{O} \times 11584.4 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} + 0.004167 \frac{\text{Kmol}}{h} \text{SO}_2 \times 11976.5 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} + \\ 0.003667 \frac{\text{Kmol}}{h} \text{NO}_x \times 10275 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} + 300.345 \frac{\text{Kmol}}{h} \text{N}_2 \times 10121.6 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \end{array} \right\}$$

$$+ \left\{ \begin{array}{l} \left(11 \frac{\text{kmol}}{h} \text{CO}_2 \times -393520 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right) + \left(0.1215 \frac{\text{kmol}}{h} \text{CO} \times -137360.5 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right) + \left(103.63 \frac{\text{Kmol}}{h} \text{H}_2\text{O} \times -241820 \right) \\ + \left(0.004167 \frac{\text{Kmol}}{h} \text{SO}_2 \times -300109.824 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right) + \left(0.003667 \frac{\text{Kmol}}{h} \text{NO}_x \times 86746.309 \frac{\text{KJ}}{\text{Kmol}} \right) \\ - \left(17.4357 \frac{\text{Kmol}}{h} \text{gas} \times -74850 \text{ KJ/Kmol} \right) \end{array} \right\}$$

$$+ \left\{ \begin{array}{l} 14883.859 \frac{\text{KJ}}{h} + 14883.859 \frac{\text{KJ}}{h} + 17010.124 \frac{\text{KJ}}{h} + 17010.124 \frac{\text{KJ}}{h} + 88533.8574 \frac{\text{KJ}}{h} + 44112.466 \frac{\text{KJ}}{h} \\ + 241521.8204 \frac{\text{KJ}}{h} \end{array} \right\}$$

= $Q_{sistema}$

$$4136527.821 \frac{KJ}{h} - 5228835.404 \frac{KJ}{h} - 28101086.21 \frac{KJ}{h} + 437955.8618 \frac{KJ}{h} = Q_{sistema}$$

$$-28755437.94 \frac{KJ}{h} = Q_{sistema}$$

e. ETAPA 5. Transporte de finos y agregados a la tolva de acopio

- Balance de masa:

$$Masa\ entrada - Masa\ salida = 0$$

$$Masa\ salida = 47097.3007 \frac{Kg}{h} \text{ agregados}$$

- Balance de energía:

$$W_{torinclinado} + W_{torlateral} + W_{torfiltrom} + W_{elevador} = E_{sistema}$$

$$10315.817 \frac{KJ}{h} + 10315.817 \frac{KJ}{h} + 10315.817 \frac{KJ}{h} + 25789.54 \frac{KJ}{h} = E_{sistema}$$

$$56736.991 \frac{KJ}{h} = E_{sistema}$$

f. ETAPA 6. Acopio, pesado y mezclado

- Balance de masa:

$$Masa\ entrada - Masa\ salida = 0$$

$$Masa\ salida = 47094.8007 \frac{Kg}{h} \text{ agregados} + 2408.4 \frac{Kg}{h} \text{ cemento asfaltico} + 2.5 \frac{Kg}{h} \text{ agdestolve} \\ = 49505.7007 \frac{Kg}{h}$$

- Balance de energía:

$$W_{bombahidráulica} + W_{mezclado1} + W_{mezclado2} + W_{cargaasfalto} = E_{sistema}$$

$$16724.79 \frac{KJ}{h} + 31265.706 \frac{KJ}{h} + 31265.706 \frac{KJ}{h} + 8175.834 \frac{KJ}{h} = E_{sistema}$$

$$87432.036 = Q$$

ANEXO D

Inventario del proceso de producción de mezcla asfáltica MDC-2 [4]

ETAPA DEL PROCESO	CORRIENTE	COMPOSICIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	ORIGEN (Entrada o Salida)		
1. CALENTAMIENTO DE ASFALTO	E1	Energía de la bomba	MJ	4680,242	Entrada		
	GN1	Gas Natural	m3	784,18			
	A1	Aire	Kg	20543,589			
	1. CALENTAMIENTO DE ASFALTO	CA1	cemento asfáltico	kg	192672	Salida	
		G1	nitrogeno	kg	16229,448		
		G2	oxigeno	kg	1917,936		
		G3	carbono dioxide	kg	1647,78		
2. TRANSPORTE DE AGREGADOS A TOLVAS DE ACOPIO	G4	water	Kg	1348,184	Salida		
	M1	mineral Arena	kg	1130342,4		Entrada	
	M2	mineral Finos	kg	2637464			
	D1	Diesel a la cargadora	kg	432			
	A2	Aire a la cargadora	kg	17656,152		Salida	
	M3	Agregado mineral	kg	3767308			
3. TRANSPORTE DE AGREGADOS AL TAMBOR SECADOR	A3	Aire	kg	1412492,16	Entrada		
	E2	Energía Tolva 1	MJ	688,3064			
	E3	Energía Tolva 2	MJ	688,3064			
	E4	Energía Banda colector	MJ	842,824			
	E5	Energía Banda Lanzadora	MJ	842,824			
	M4	Agregado mineral	kg	3767808		Salida	
4. SECADO DE AGREGADOS Y SALIDA DE GASES	GN2	Gas natural	kg	22317,744	Entrada		
	A4	Aire del compresor	kg	108636,616			
	E6	Energía compresor	MJ	3528,99728			
	E7	Energía tambor 1	MJ	1190,7088			
	E8	Energía tambor 2	MJ	1190,7088			
	E9	Energía tambor 3	MJ	1360,80992			
	E10	Energía tambor 4	MJ	1360,80992			
	E11	Energía del turbo ventilador	MJ	7082,7085			
	E12	Energía Ventilador exhaustor	MJ	19321,74563			
	A5	Aire del turbo ventilador	MJ	947669,6			
	4. SECADO DE AGREGADOS Y SALIDA DE GASES	M5	Agregado mineral	kg		3767808	Salida
		G5	dioxido de carbono	Kg		38720	
		G6	Material particulado	Kg	23,944		
		G7	dioxido de azufre	Kg	21,336		
		G8	Oxido de nitrogeno	Kg	8,8		
G9		vapor de agua	Kg	149229,6			
5. TRANSPORTE DE FINOS Y AGREGADOS A LA TOLVA DE ACOPIO	G10	oxigeno	Kg	217600	Salida		
	G11	monoxido de carbono	Kg	272,2664			
	G12	dinitrogeno	Kg	672772			
	E13	Energía Tornillo sin fin inclinado	MJ	825,26536		Entrada	
	E14	Energía Tornillo sin fin lateral	MJ	825,26536			
	E15	Energía Tornillo sin fin filtro mangas	MJ	825,26536			
	E16	Energía elevador de cangilones	MJ	2063,1632			
5. TRANSPORTE DE FINOS Y AGREGADOS A LA TOLVA DE ACOPIO	M6	Agregado mineral	kg	3767784,024	Salida		
	M6	Agregado mineral	kg	3767584,056	Entrada		
6. ACOPIO, PESADO Y MEZCLADO	CA1	Cemento Asfáltico	kg	1926752			
	E17	Energía Bomba unidad hidráulica	MJ	13379832			
	E18	Energía Tolva mezclado 1	MJ	2501,25648			
	E19	Energía Tolva mezclado 2	MJ	2501,25648			
	E20	Energía Bomba de carga y descarga	MJ	654,2672			
	MA1	Mezcla asfáltica	kg	3960456,056	Salida		