ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN LA EXPLOTACIÓN DE ESMERALDA EN EL DISTRITO MINERO MUZO EN EL OCCIDENTE DE BOYACÁ

ESTUDIO DE CASO PARA UNA EMPRESA MINERA UBICADA EN EL DISTRITO MINERO MUZO EN EL OCCIDENTE DE BOYACÁ

Jessica Paola Flórez Murcia

UNIVERSIDAD EL BOSQUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ, JUNIO DE 2018

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA EN LA EXPLOTACIÓN DE ESMERALDA EN EL DISTRITO MINERO MUZO EN EL OCCIDENTE DE BOYACÁ

ESTUDIO DE CASO PARA UNA EMPRESA MINERA UBICADA EN EL DISTRITO MINERO MUZO EN EL OCCIDENTE DE BOYACÁ

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de: **Ingeniero Ambiental**

Jessica Paola Flórez Murcia

Director: Kenneth Ochoa

Línea de Investigación: Gestión Integral Sustentable
Tipo de Investigación: Aplicada

UNIVERSIDAD EL BOSQUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ, JUNIO DE 2018

“La Universidad El Bosque, no se responsabiliza de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velará por el rigor científico, metodológico y ético de este en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia”.

Agradecimientos

Mis profundos agradecimientos son para Dios todo poderoso, Rey del Universo, que mediante su creación me ha destinado a ser parte de este propósito por el cuidado, manejo y protección de la naturaleza.

Agradezco inmensamente a mi madre Blanca María Murcia Tavera que, con su lucha incansable, mis logros han sido alcanzados. A mi familia, mi abuelita María Graciela Gómez de Flórez, mi Tío Yesid Flórez Gómez por ser parte fundamental en el transcurso de mi Universidad.

A mis hermanos Jaime Flórez, Sandra Flórez, Mulisa Flórez y Laura Pedraza por ser mis amigos incondicionales de vida compartir mis alegrías y tristezas, con énfasis importante en este tránsito universitario.

A la Universidad el Bosque junto con profesores, administrativo y operativos; por ser una institución que más que prepárame para ser ingeniera Ambiental, me ha preparado para ser un buen ser humano con valores y principios biosocioculturales, dándome la oportunidad de realizar aportes positivos a la sociedad.

Este proyecto es un logro que ha sido alcanzado junto a la compañía de mi amiga y compañera de trabajo Juliana García, que Dios la siga llenando de sabiduría e inteligencia para que continúe desarrollando este proyecto el cual se ha empezado en el nombre de las dos, pero será terminado con su esfuerzo y desempeño en su maestría Gestión Ambiental Empresarial.

Así mismo a nuestro querido director de proyecto el ingeniero Kenneth Ochoa que con la ayuda de Dios ha estado presente a lo largo de esta investigación, en nombre mío y de mi compañera de trabajo le queremos entregar un sincero agradecimiento por su asistencia, paciencia, compresión y difusión de conocimiento.

A mis compañeras de universidad Paulina Ortegón, Catalina Navas, María Paula Pérez, Jimena Zúñiga, las cuales han hecho un gran aporte a mi crecimiento personal y profesional, hermanas de alma siempre dispuesta a estar en cualquier momento de mi vida.

Finalmente, a cada una de las personas que he conocido y compartido a lo largo de mi universidad, permitiéndome ser lo que hoy en día soy.

Dedicatoria

Este proyecto va a dedico a mi madre querida que con la ayuda de Dios hemos logrado avanzar con éxito nuestras etapas de la vida con paciencia y sabiduría, a mi abuelita Graciela Gómez, Tío Yesid Flórez, y hermanos que han sido como ángeles que Dios ha puesto en mi vida para acompañarme en cada una de mis etapas.

Tabla de Contenido

SIGLAS VII

Introducción 1

1 Planteamiento del problema 2

2 Justificación 4

3 Objetivos 5

3.1 Objetivo General 5

3.2 Objetivos Específicos 5

4 Marco referencial 5

4.1. Estado del Arte 5

4.1.1. Historia del ACV 5

4.1.2. Historia del ACV en Colombia 6

4.2. Marco de Antecedentes 6

4.2.1. Investigaciones de ACV en la minería a nivel mundial 7

4.2.2. Investigaciones de ACV en la minería en Latinoamérica 7

4.2.3. Investigaciones de ACV en la minería en Colombia 8

4.2.4. Motivación para la presente investigación 10

4.3. Marco conceptual 10

4.3.1. Gestión Ambiental 10

4.3.2. Análisis de Ciclo de Vida 10

4.3.3. Distritos Mineros 11

4.3.4. Minería 11

4.3.5. Yacimientos minerales 11

4.3.6. Esmeralda 11

4.3.7. Involucrados 11

4.3.8. Impacto Ambiental 11

4.4. Marco Teórico 11

4.4.1. Desarrollo Sostenible **¡Error! Marcador no definido.**

4.4.2. Ecología Industrial 12

4.4.3. Cadena de valor 12

4.4.4. Teoría de Stakeholders 12

4.4.5. Análisis de Ciclo de Vida 13
4.4.6. ACV como herramienta de evaluación de impactos en la minería 14
4.5. Marco Normativo 14
4.5.1. Normatividad Ambiental internacional 14
4.5.2. Normatividad Nacional 15
4.5.3. Normatividad minera Colombia 15
4.6. Marco Geográfico 16
4.6.1. Punto de estudio 17
4.7. Marco Institucional 18
4.7.1. FEDESMERALDAS 18
4.7.2. ASOCOESMERAL 18
4.7.3. APRECOL 19
4.7.4. ACODES 19
4.7.5. Organización de la empresa en estudio 19
4.8. Marco demográfico 20
4.8.1. Muzo 20
4.8.2. Quipama 21
5. Método 21
5.1. Diseño metodológico 21
5.2. Enfoque y tipo de investigación 21
5.2.1. Método Cualitativo 22
5.2.2. Método Cuantitativo 22
6. Resultados 29
6.1. Caracterización del proceso de explotación de la mina de esmeraldas 29
6.2. Definición del objetivo y Alcance para el ACV de la esmeralda 31
6.2.1. Objetivo 31
6.2.2. Alcance 32
6.3. Inventario de ciclo de vida 32
6.3.1. Datos de primer plano 32
6.3.2. Datos de fondo 36
6.4. Evaluación de impacto del ciclo de vida en explotación de la mina de esmeralda 39
6.4.1. Red del proceso 39

6.4.2. Evaluación del impacto 42
6.5. Interpretación del Ciclo de Vida en la explotación de la mina de Esmeralda 50
6.6. Identificación de los puntos críticos dentro del CV 51
6.6.1. Salud Humana 51
6.6.2. Recursos 55
6.6.3. Calidad del Ecosistema 57
6.7. Análisis de sensibilidad del proceso de explotación de la mina de esmeralda 60
7. Propuestas de Gestión Ambiental 67
7.1. Propuestas para el manejo de los impactos operacionales asociados a la madera 67
7.1.1. Diseño de Madera rolliza con modelo Propsetter 68
7.1.2. Madera Plástica 69
7.2. Propuestas para el manejo de los impactos operacionales del explosivo indugel 70
7.3. Simulación de escenarios con propuestas tecnológicas 71
7.3.1. Datos Madera rolliza 72
7.3.2. Datos Madera Plástica 73
7.3.3. Datos Detonadores electrónicos 73
7.3.4. Simulación con madera rolliza y detonadores electrónicos 74
7.3.5. Simulación con madera plástica y Detonador Electrónico 75
7.3.6. Simulación del análisis comparativo con el uso de las propuestas madera rolliza con DE y madera plástica con DE en el CV en la explotación de la empresa de esmeraldas 76
8.4. Análisis Financiero 77
8. Discusión de resultados 84
9. Conclusiones 85
10. Recomendación 86
11. Limitaciones 87
Bibliografía 0
Anexos 14
1. Producción de quilates esmeraldas según declaraciones para exportaciones del año 2015. 14
2. Histórico de producción de quilates esmeraldas según declaraciones para exportaciones del año 2015. 14
3. Exportaciones (USD$) de esmeraldas para el año 2015 15
4. Cadena de comercialización de esmeralda 15

5. Diagrama de flujo de la metodología en el proyecto de investigación 16
6. Bases de datos para Inventario de Ciclo Vida 17
7. Herramientas Software para Análisis de Ciclo de Vida 18
8. Ilustración del software SimaPro 8.4 19
9. Hoja de recolección de datos 20
10. Ciclo de vida de la esmeralda 21
11. Equipos y maquinaria de la mina 22
12. Imágenes de caracterización de la empresa caso de estudio 22
13. Entrada de datos de primer plano y datos de fondo al software SimaPr**o** 24
14. Proceso Bombilla incandescente 25
15. Capacidad de soporte de Sistema Propsetter frente a 4 tecnologías de soportes de madera 26
16. Tabla capacidad de soporte de Sistema Propsetter frente a 4 tecmnologias de soportes de madera27
17. Productos de madera plástica 27
18. Ficha técnica de madera plástica 28
19. Sistema de detonación electrónica 28
20. Estimación de la inversión de la madera 0

Listado de Tablas

Tabla 1. Análisis de convergencias y divergencias de los estudios recopilados 9
Tabla 2. Cálculo del factor de conversión con respecto a la unidad funcional 26
Tabla 3. Ejemplo de hoja de cálculo para un proceso unitario de la explotación minera 26
Tabla 4. Ejemplo de hoja de cálculo para el tráfico de carga 28
Tabla 5. Factor de conversión 32
Tabla 6. Fracturamiento de roca 33
Tabla 7. Lavado de materiales estériles 33
Tabla 8. Sostenimiento de túneles 34
Tabla 9. *Instalación del Sistema de ventilación* 35
Tabla 10. Instalación del Sistema de iluminación 35
Tabla 11. Energía termoeléctrica 35
Tabla 12. Energía eléctrica 36
Tabla 13. Transporte de materias primas 36
Tabla 14. Librerías y productos referenciados al proceso 36
Tabla 15. Procesos de SimaPro modificados respecto a las necesidades del estudio 37
Tabla 16. Matriz energética de Perú-Colombia 38
Tabla 17. Relación de los procesos con respecto a los indicadores de categorías y su porcentaje 50
Tabla 18. Relación de los procesos de análisis de sensibilidad con respecto a los indicadores de categorías 65

Tabla 19. Datos del inventario del reciclado de un kg de PEAD, ... 73
Tabla 20. Composición interna del DE 74
Tabla 21. Presupuesto de inversión de las propuestas 77
Tabla 22. Comparación de propuestas tecnológicas 77
Tabla 23. Proyección de diferencias 77
Tabla 24. Flujo Efectivo Anual 77
Tabla 25. Indicadores de proyección financiera 77

Listado de Figuras

Figura 1. Fases de un ACV 13
Figura 2. Ubicación del departamento de Boyacá con sus límites y municipios 16
Figura 3. División provincial del departamento de Boyacá. 17
Figura 4. Localización Provincia de Occidente-Boyacá. 17
Figura 5. Distrito minero Muzo. 18
Figura 6. Ejemplo del cálculo de distancias mediante Google Maps 27
Figura 7. *Diagrama del proceso de explotación de la mina de esmeraldas* 31
Figura 8. *Red de procesos de la explotación de minería* 41
Figura 9. Árbol de procesos del explosivo indugel asociado al indicador de categoría de impacto cambio climático 54
Figura 10. Sistema Propsetter 68
Figura 11. Escenario de cambio tecnológico para la madera 70
Figura 12. Escenario de cambio tecnológico para la detonación electrónica 71
Figura 13. Producción de quilates esmeraldas según declaraciones para exportaciones del año 2015. 14
Figura 14. Histórico de producción de quilates esmeraldas según declaraciones para exportaciones del año 2015. 14
Figura 15. Exportaciones (USD$) de esmeraldas para el año 2015. 15
Figura 16. Cadena de comercialización de esmeralda 24

SIGLAS

ACODES	Asociación Colombiana de Exportadores de Esmeraldas
ACV	Análisis de Ciclo de vida
ANM	Agencia Nacional de Minería
ASOCOESMERAL	Asociación de Comerciantes Esmeralderos
CV	Ciclo de Vida
DANE	Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
EICV	Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida
EPA	Agencia de Protección Ambiental (por sus siglas en inglés)
ICV	Inventario de Ciclo de Vida
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
INDUMIL	Industria Militar Colombiana
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático (por sus siglas en inglés)
IPC	Índice de Precios al Consumidor
ISO	Organización Internacional de estandarización (por sus siglas en inglés)
MRI	Instituto Investigativo del Medio Oeste (por sus siglas en inglés)
NTC	Norma Técnica Colombiana
REPA	Recursos y Análisis de perfil Ambiental (por sus siglas en inglés)
RSE	Responsabilidad Social Empresarial

Introducción

En Colombia la actividad minera tomó fuerza a partir del año 2008, desplazando sectores económicos como la agricultura, para ocupar los primeros lugares de la economía del país. En el ranking internacional de principales productores de minerales, Colombia ocupa el puesto 11 en carbón térmico, el 9 en níquel, el 19 en oro y en esmeraldas, bajó del primer puesto en 2013 al segundo puesto (FEDESAROLLO, 2014). Sin embargo, el país produce las esmeraldas de mejor calidad del mundo, por sus características especiales de brillo, color y propiedades únicas que le da el suelo colombiano (AFP & CONtexto ganadero, 2015).

Según el informe presentado por el Ministerio de Minas y Energía de Colombia y la Agencia Nacional de Minería de Colombia (ANM), esta gema representa un alto potencial para la economía del país; en el año 2015 llegó a representar el 14% de la producción de minerales no metálicos y alrededor de 2,4% del PIB minero. Según este informe, hubo un incremento del 15% en la producción de la piedra, ya que pasó de 1.551.549 en 2014 a 1.782.058 quilates en 2015, manteniendo así un crecimiento estable que contribuye al desarrollo del sector (FEDESMERALDAS, 2016) (Anexos 1,2 y3).

No obstante, esta actividad genera impactos negativos al ambiente, ya que hay una precaria gestión ambiental y social la mayoría de las empresas mineras y no cuentan con mecanismos de prevención y mitigación (FEDESARROLLO, 2008; Botín, 2010; Quijano & Pardo, 2010). Esto se corroboró con visitas técnicas realizadas en la empresa minera (estudio de caso), ubicada entre las minas de explotación de esmeraldas del distrito minero de Muzo, entre los municipios Muzo y Quipama del Departamento de Boyacá.

Por lo anterior, el sector esmeraldero del país busca asegurar su permanencia en el mercado por medio del desarrollo integral con el entorno, es decir teniendo en cuenta los aspectos sociales, ecológicos y económicos (Grammling, 2008). Ya que ciertos autores afirman, que la implementación de estrategias ambientales que se constituyan con alguna herramienta que ayude a mejorar su ventaja competitiva optimizando su rendimiento, capaz de proporcionar valor, se traduce en beneficios importantes para cualquier organización además que se cumple con la normatividad que lo regula (Fuente & Accinelli, 2012; Gónzales, 2015) .

Una de estas herramientas para lograr este objetivo es el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), por la cual se pueden obtener medidas cuantitativas de las etapas de un proceso productivo para mejorar la sostenibilidad de las empresas (Azapagic, Lehtinen, Rouhiainen, & Saarentaus, 2011; NTC-ISO 14040, 2007). Cuando las empresas mineras lleven a cabo este tipo de estudios, se pueden reducir los impactos sociales y ambientales negativos que estas provocan mediante la correcta implementación de medidas de gestión, lo que permite que las compañías operan en relación con los mejores estándares posibles (Centro Australiano para Prácticas de Minería Sostenible & Austrade, 2011).

Por lo tanto, este proyecto muestra el ACV para una empresa de explotación de esmeralda, la cual practica esta actividad desde hace ocho años. Esta fue contactada por las estudiantes para solicitar el acceso a su información, aceptando ser parte de la investigación con el interés de obtener aspectos de mejora en la eficiencia de su proceso extractivo. Se realizará propuestas estratégicas desde la gestión ambiental, para la búsqueda de implementación de medidas de mejora, fortalecer la responsabilidad

social y ambiental y finalmente obtener insumos para su planeación estratégica de los próximos 5 años.

De esta manera, se identificó que la minería de esmeralda está pasando por un momento de mejora económico, social y ecológico en el país, sin embargo, sus problemas tales como desconocimiento de los beneficios de un estudio de impacto ambiental, los limitados estudios de viabilidad técnica y ambiental debido a alta incertidumbre del negocio y la poca preparación para la mitigación de riesgos laborales, son unos de los mayores problemas que tiene las empresas mineras de esmeraldas.

Asimismo, se presenta la contextualización de las teorías: cadena de valor, ecología industrial; desarrollo sostenible y de stakeholders, ya que son las que mayor influencia tienen sobre este estudio de ACV. Posteriormente se describe la herramienta ACV y su empleo en el estudio de la empresa de acuerdo con la ISO 14040, donde se muestra la caracterización general del proceso de explotación en la empresa, con sus 10 proceso unitarios; los cuales fueron analizados de acuerdo con la unidad funcional (un metro de avance en túnel).

Con lo anterior, se realizó en ICV y EICV, donde se encontró mediante el uso del software SimaPro 8, que los indicadores ambientales con mayor carga fueron el uso del suelo por el territorio empleado para la explotación, el uso de recursos fósiles por el empleo de madera donde se usa Diesel como combustible y sustancias cancerígenas por el empleo de la dinamita.

Finalmente se expone tres propuestas de gestión ambiental para la mejora de los anteriores indicadores, estas son: cambiar el uso de dinamita por el empleo de detonadores electrónicos y madera plástica o madera estilo Propsetter para el remplazo de la madera actualmente empleada en la mina. Se obtuvo que las propuestas factibles para la empresa son el empleo de los detonadores electrónicos junto a la madera plástica, ya que no solo disminuyen la carga ambiental de dichos indicadores, sino que también cumplen con las necesidades de la empresa tales como viabilidad economía y responsabilidad social.

1 Planteamiento del problema

La minería es una actividad económica que consiste en extraer recursos no renovables de la superficie terrestre, la cual que puede producir impactos negativos en el ambiente (Arango Aramburo & Olaya, 2012). Estos van desde disposición inadecuada de estériles y de aguas de lavado, deforestación, pérdida de hábitats, como también afectación a las comunidades locales entre otros (Parrado & Robinson, 2012; CORPOCHIVOR, 2014; AnglogoldAshanti; Gramalote- Colombia Limited., 2015) .

En Colombia el poco seguimiento y control por parte de las autoridades competentes de la industria minera, contribuye al incumplimiento de las obligaciones tributarias y de las normas laborales y ambientales en algunas empresas, lo que genera impactos negativos en el ambiente (Fedesarrollo, 2012; Fundación Avina, 2010).

En el caso de la minería de esmeraldas, la mayoría de empresas no cuentan con un esquema claro del negocio y del capital para inversión en planeación estratégica minera, debido a la alta incertidumbre de este, así que las inversiones están dirigidas fundamentalmente a atender las prioridades de operación y

no a otros aspectos como lo es el ecológico (Fundación Avina, 2010). Sin embargo, se puede decir que hay empresas que generan reportes de Estudios de Impacto Ambiental (EIA) para cumplir con la normatividad, pero dichos estudios no contemplan dimensiones del Ciclo de Vida (CV) del producto o servicio, lo que genera una gestión ambiental y social precaria en la industria afectando toda la cadena de valor[2] por la poca información que se dispone (Fundación Avina, 2010; FEDESARROLLO, 2008; Botín, 2010; Contraloría General de la Nación, 2012).

Lo expuesto anteriormente, se corroboró con visitas técnicas realizadas en la empresa minera (estudio de caso) en el mes de año 2016, ubicada entre las minas de explotación de esmeraldas del distrito minero de Muzo situado entre los municipios Muzo y Quipama del Departamento de Boyacá. Se observaron diversas falencias en el aspecto ambiental, como el inadecuado manejo de estériles y residuos sólidos, contaminación de fuentes hídricas y del suelo, lo que implica afectaciones a la salud y calidad de vida de las comunidades locales.

El desconocimiento de los impactos ambientales asociados al proceso productivo y de los beneficios de desarrollar estos con enfoque de CV, imposibilita que las empresas tengan una visión holística en el sistema de producción, para la implementación de estrategias como lo mencionan algunos estudios (Ingwersen, 2010; Azapagic A. , Lehtinen, Pitts, & Saarentaus, 2011; Curran, 2012; Hélio & García, 2015).

En este contexto, no hay mecanismos que garanticen que las empresas mineras de esmeraldas colombianas mantengan el abastecimiento de la demanda en el creciente mercado de productos sostenibles a nivel ambiental. Sin estos mecanismos, hay desconfianza en la compra por parte de los clientes actuales que buscan productos y servicios con buenas prácticas (Fraguela, Carral, Iglesias, Castro, & Rodríguez, 2011).

Por otra parte, a partir de la revisión bibliográfica en diferentes bases de datos como *Science Direct*, *Proquest, Evesco*, entre otros donde se revisaron cerca de 20 artículos científicos y además, se contó con la asesoría de un experto internacional del *Sustainable Minerals Institute* de la Universidad de Queensland, se encontró que se han realizado pocos estudios de ACV en la minería y ninguno para la explotación de esmeraldas, además hay pocos reportes de estudios de impactos ambientales en la explotación de esmeraldas.

En respuesta a los cambios en el mercado y a la problemática anteriormente expuesta, la empresa objeto de este estudio ha manifestado la necesidad de conocer los impactos ambientales que se están generando en su proceso de explotación ya que desea darle cumplimiento a su misión estratégica de desarrollar una minería responsable para reducir el impacto ambiental y operar cumpliendo las normas que rigen esta industria.

Con base en lo anterior, surge una pregunta que es de particular interés para esta investigación: Utilizando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, ¿Cuáles son los impactos ambientales en el proceso de explotación de la empresa de esmeralda caso de estudio del distrito minero Muzo en el

[2] Herramienta de análisis que facilita la planeación estratégica de los negocios para obtener ventajas competitivas en la organización proveedores, clientes, usuarios, etc. (Porter, 1985).

occidente de Boyacá?

2 Justificación

La importancia del presente proyecto se abordará teniendo en cuenta los aspectos económicos, sociales, institucionales y ecológicos. Para empezar, la producción de esmeraldas en Muzo ha sido una importante actividad económica reconocida desde el período prehispánico hasta nuestros días (Siñuela, 2012). Es de este territorio donde Colombia extrae las esmeraldas de mejor calidad a nivel mundial, y ahora busca recuperar el liderazgo como exportador y productor de la gema, lugar que ganó Zambia desde 2013 (República, 2013; Gemfields, 2013). Una de las iniciativas recientemente lanzada al mercado fue la marca "*Mothergem*" que representa las esmeraldas del país en el mundo, bajo este lema "*Mothergem* es de todos", esta iniciativa de mercadeo busca recuperar el liderazgo internacional, generando conciencia en la necesidad de ofrecer esmeraldas que cuenten con un aval de confianza y que garanticen su autenticidad en cada uno de los procesos de producción y comercialización (FEDESMERALDAS, 2015; FEDESMERALDAS, 2016).

En el ámbito social, cabe mencionar que cerca de 100.000 familias dependen directamente de la actividad esmeraldera, entre las cuales se encuentran productores, mineros, comercializadores, exportadores y mineros informales. Esta actividad constituye, la principal fuente de empleo para la población aledaña a las minas, lo cual se extiende hasta Chiquinquirá y Bogotá (Mina de Piedras, 2014).

Por los motivos expuestos anteriormente, es necesario realizar estudios que cuantifiquen los impactos ambientales en la producción de esmeraldas, para evaluar mecanismos de Gestión Empresarial y Ambiental y estrategias que minimicen la alteración producida por esta actividad en el ambiente y mejorar la salud y calidad de vida de los involucrados. Para esto, se optó por implementar la herramienta de gestión ambiental ACV, cuya finalidad es analizar de forma objetiva, metódica y sistemática el impacto ambiental originado en la explotación de esmeraldas.

En este sentido, se trabajará con la empresa estudio de caso, quien aporto la información requerida para el ACV. Como valor agregado al proyecto, se investigó sobre el desarrollo de ACV en la minería de esmeraldas y hasta el momento no se han desarrollado estudios a nivel internacional y tampoco en Colombia, razón por la cual, este sería el primer estudio en su índole, representando un beneficio académico para la Universidad El Bosque, al ser parte del proceso de construcción de la gestión ambiental y empresarial en el sector esmeraldero del país.

Desde el ámbito de la ingeniería ambiental, la cual promueve la búsqueda del desarrollo en equilibrio con las dimensiones sociales, ambientales y económicas, esta herramienta permite analizar estas dimensiones con enfoque sistémico, facilitando la búsqueda de estrategias de mayor eficiencia en la utilización de los recursos, disminuyendo los impactos ambientales, y así proponer algunas pautas para el desarrollo e implementación en la industria de la explotación de esmeraldas en Colombia por medio de la ilustración de un estudio de caso.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Generar alternativas de mejora desde la gestión ambiental a los impactos ambientales potenciales asociados a la fase de explotación de una empresa de esmeraldas en el distrito minero Muzo en el occidente de Boyacá, a partir de la herramienta Análisis de ciclo de vida ISO 14040.

3.2 Objetivos Específicos

- Realizar un diagnóstico de la explotación de esmeraldas, bajo las condiciones de la empresa objeto de estudio
- Analizar los impactos ambientales de la explotación de esmeralda a partir de las condiciones identificadas en el ACV para la empresa en cuestión
- Proponer alternativas de mejora ambiental desde la Gestión Ambiental para la empresa en estudio.

4 Marco referencial

A continuación, se presenta el marco referencial, en el cual se desarrollan los diferentes temas que son trascendentales para la comprensión de la investigación, abarcando ocho marcos entre los cuales están el estado del arte del ACV, el marco de antecedentes, marco conceptual, marco teórico, normativo, geográfico, institucional y demográfico.

4.1. Estado del Arte

4.1.1. Historia del ACV

La génesis del concepto de ACV se remonta en la década de 1950 y 1960, en un período en el que los temas ambientales como el uso de recursos, la eficiencia energética, control de la contaminación y los residuos sólidos se convirtieron en asuntos de amplio interés público (Heijungs & Guinée, 2012).

En 1969, la organización *Midwest Research Institute* (MRI) desarrolló un estudio para Coca-Cola Company, denominado "Análisis del perfil ambiental y de recursos", el cual tuvo como objetivo, determinar las cantidades de energía, materiales e impactos ambientales asociados a lo largo del CV de envases de vidrio y de plástico (Chacón, 2008). A partir de este estudio, en Estados Unidos se creó Resources and Environmental Profile Análisis (REPA), que es la metodología que mide los recursos y las descargas ambientales de los productos. En 1971, la academia de Estados Unidos, por su lado, realizó un estudio que patrocinó el Programme of National Science Foundation of Research on National Needs, este estudio desarrollo un modelo para realizar la fase del inventario del ACV (Chacón, 2008).

En el año 1973, MRI creó el primer software sobre ACV. Posteriormente, hacia el año 1976 la

Agencia Federal de Energía de Estados Unidos (U.S. Federal Energy Agency) hoy llamado Department of Energy, publicó bases de datos y la metodología REPA establecida en los estudios sobre envases de bebidas realizados por Franklin Associates y Research Triangle Institute. Para el año 1991, la Agencia de Protección Ambiental de Estados (EPA) impulsa el ACV y pone a disposición del público en general, algunas guías metodológicas y bases de datos (Chacón, 2008).

En el 2001 se crea el Centro Americano para la Evaluación de Ciclo de vida, para mejorar la capacidad en la difusión de la comprensión sobre el ACV. En esta organización se empezó a generar conciencia en el empleo para el ACV, por medio de conferencias, estudios científicos e investigativos, en el que participan miembros del gobierno, academia, la industria, ONG entre otros (Curran, 2012).

En este contexto, se fundó la Red Iberoamericana de Ciclo de Vida en el 2003, la cual agrupa a diversas organizaciones, como universidades, centros tecnológicos, entes de normalización, empresas, asociaciones profesionales y entes gubernamentales de los países de Iberoamérica que comparten el pensamiento de CV. Posteriormente se han desarrollado diversos eventos sobre ACV, uno de los más destacados es la Conferencia Internacional de Análisis de Vida en Latinoamérica (CILCA).

4.1.2. Historia del ACV en Colombia

En Colombia los primeros estudios sobre ACV surgieron desde 1997 cuando el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (INCOTEC) creó normas técnicas junto con los Comités Técnicos de Normalización para el estudio del ISO/NTC-207 en donde se discutió y se aprobó algunas normas nacionales, y la serie de estándares internacionales de la familia ISO 14000, entre ellas la serie ISO 14040 sobre ACV. Los comités más importantes en el desarrollo del ACV fueron el Comité 14 de Sistemas de Gestión Ambiental, el Comité 13 de Gestión Ambiental, el Comité 33 de Auditorías Ambientales y el Comité 36 de Análisis de Ciclo de Vida (Chacón, 2008).

También se puede resaltar la importancia de la academia en Colombia, entre las Universidades partícipes, se resalta la intervención de la Universidad de los Andes en Bogotá y la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) en Medellín, las cuales fueron las instituciones que impulsaron en el conocimiento y la aplicación del ACV en Colombia (Chacón, 2008). Para el año 2009, se empieza a crear la Red Colombiana de Ciclo de Vida con Universidades investigadoras de ACV. Así mismo, la Universidad El Bosque, se ha convertido en un referente importante en estudios de investigación de ACV.

4.2. Marco de Antecedentes

Para efecto de la presente investigación, se recopilaron estudios que se han desarrollado en relación con el ACV en la minería. Se citan estudios a nivel mundial, regional y nacional, de los cuales se explicará brevemente los objetivos, los métodos y los principales resultados obtenidos de estos estudios. A continuación, se muestra los estudios de más impacto en esta investigación-

4.2.1. Investigaciones de ACV en la minería a nivel mundial

- El artículo titulado ***Application of a Life Cycle Impact Assessment framework to evaluate and compare environmental performances with economic values of supplied coal products*** elaborado por Mangena SJ, Brent AC (2006), se realizó en Sudáfrica. Estudio de los impactos que genera los diferentes métodos de extracción utilizados para la extracción de carbón mediante la herramienta ACV. Los objetivos se basaron en evaluar el comportamiento medioambiental de las minas de carbón, mediante el estudio de los diferentes métodos de explotación, para promover en la industria sudafricana minería del carbón, la toma de decisiones con respecto a las prioridades para la gestión ambiental.

La metodología que empleó fue el Inventario de Ciclo de Vida (ICV) de cuatro minas, dos a cielo abierto y dos subterráneas con información anual de estas, donde se cubre el CV desde la extracción de materia prima o de ejecución en la mina de producción, beneficio (detección y lavado), así como la distribución y el transporte (tren y la cinta transportadora) hasta llegar a los clientes (de la cuna a la puerta), se tuvieron en cuenta también procesos auxiliares, tales como electricidad y consumo de agua. La unidad funcional que este estudio emplea es 1 tonelada de carbón entregado y los resultados que se obtuvieron fueron que el impacto en el suelo, aire y agua es mayor en la minería a cielo abierto que la subterránea, y en general los impactos sobre los recursos hídricos son los más significativo desde una perspectiva de la minería del carbón en el contexto sudafricano (Mangena & Brent, 2006).

- Como segundo artículo a nivel mundial, se realizó en Australia y se titula ***Evaluación del ciclo de vida de la minería y procesamiento del mineral de hierro***. El objetivo del presente estudio fue evaluar los impactos ambientales resultantes del procesamiento de mineral de hierro en una empresa bajo la metodología de ACV, mediante el software SimaPro.

La unidad funcional fue 1 tonelada de mineral de hierro listo para su transporte hacia las instalaciones de extracción y refinación de metales de la empresa. Dentro de los principales resultados se encontró que las emisiones de gases de efecto invernadero corresponden a 11,9 kg de CO_2 por tonelada de mineral de hierro procesada. Los valores de energía fueron 153 MJ/ton de mineral de mineral de hierro. Con estos resultados, se evidenció que la carga y el transporte son los procesos que mayores contribuciones generan (aproximadamente 50%) a las emisiones totales de gases de efecto invernadero. A partir de esto, los autores recomiendan que se deben maximizar los esfuerzos para reducir la huella de GEI de mineral de hierro y centrarse especialmente en las fases de carga y acarreo, a la vez que se busque la reducción de la huella de carbono y la energía (Norgate & Haque, 2015).

4.2.2. Investigaciones de ACV en la minería en Latinoamérica

- El artículo ***Life Cycle Assessment study of iron ore mining*** elaborado por Ferreira Hélio, García Mariangela (2015), se localizó en Brasil, el objetivo fue evaluar, clasificar y caracterizar los impactos del CV en la explotación de hierro. La metodología empleada fue la clasificación y caracterización de los impactos del CV, sin incluir la normalización y ponderación, así como análisis de sensibilidad de los resultados. La unidad funcional establecida fue una tonelada de mineral de hierro concentrado producido, se recogieron los datos utilizados directamente desde informes de producción

de la empresa (caso de estudio) que cubren el tiempo de un año. La evaluación de los impactos se realizó utilizando el software SimaPro-7, Ecoinvent 2.0, Eco indicador y el IPCC 2007. Los resultados indicaron que el uso de medios de molienda en los procesos es la principal fuente de impactos ambientales en la cadena de producción de mineral de hierro, destacando su contribución a los impactos del CV en la salud humana y la calidad de los ecosistemas (Hélio & García, 2015).

- El artículo ***Life cycle inventories of gold artisanal and small-scale mining activities in Peru: Toward indicators for South America***, elaborado por Sonia M. Valdivia and Cassia M. L. Ugaya (2011), se realizó en Perú. Los objetivos fueron, estimar indicadores ambientales utilizando la metodología de inventarios de ciclo de vida (ICV) en uno de los dos mayores productores de oro en mineras artesanales y pequeña escala (A & Sma por sus siglas en inglés) en Sudamérica, Perú.

Se tomaron dos casos de estudio, en el caso 1, se analizó la minería aluvial a pequeña escala en Mazuka, Madre de Dios, Perú y en el caso 2, se examinó una minería subterránea artesanal Ayacucho, Perú. La unidad funcional fue la producción de 1 kg de oro con 99,5% de pureza en el caso 1 y la producción de 1 kg de oro con un 80,0% de pureza en el Caso 2. Cabe resaltar que los resultados entre estas dos no fueron comparables ya que la unidad funcional es diferente. El límite del sistema utilizado para desarrollar el ICV fue la cuna a la puerta: la extracción, transporte y concentración. Los resultados relevantes fueron que las cantidades de mercurio liberadas al ambiente por kg de oro, fueron de 0,2 a 2,2 kg en los casos 1 y 2 respectivamente, a pesar de que fue reciclado, en los casos 1 y 2 fueron altos que las cantidades emitidas por las grandes empresas según la literatura (Valdivia & Ugaya, 2011).

4.2.3. Investigaciones de ACV en la minería en Colombia

- El siguiente trabajo de investigación ***Análisis de ciclo de vida social en la exploración aurífera a cielo abierto: estudio de caso en el proyecto la Colosa-Cajamarca, (Tolima)***, fue desarrollado por Briyith Lilieth Álvarez Cano egresada de la Universidad El Bosque. El objetivo del presente trabajo de investigación fue evaluar los impactos ambientales y sociales del proyecto de explotación de oro de Cajamarca-Tolima, por medio de la herramienta de ACV, donde se tomó como unidad funcional una onza de oro para la evaluación de los impactos ambientales. Para la evaluación de los impactos sociales se utilizó un estudio de impacto social, donde se incluyó el enfoque de salud y la calidad de vida para establecer los impactos en la salud y la calidad de vida de los involucrados por este proyecto minero. Dentro de los principales resultados, se encontró que varios impactos negativos se hallan en el ambiente y la salud; los puntos críticos fueron la toxicidad humana, agotamiento de recursos y acidificación del suelo; Esto implica que tanto las autoridades locales como las empresas, deben desarrollar mecanismos adicionales a los propuestos en el proceso de licenciamiento ambiental (Plan de manejo ambiental), con el fin de reducir el impacto negativo de esa actividad (Álvarez, 2014).

De manera analítica de los artículos anteriormente citados, se plantea en la tabla 1, las convergencias y divergencias entre estos, donde se destacan los aspectos más importantes de cada estudio y que contribuyen al desarrollo efectivo de la investigación.

Tabla 1. *Análisis de convergencias y divergencias de los estudios recopilados*

Localización	Nombre	Convergencia	Divergencia
Local	1. Análisis de ciclo de vida social en la exploración aurífera a cielo abierto: estudio de caso en el proyecto la Colosa-Cajamarca, (Tolima).	- En el estudio 1,3 y 4 se empleó el software SimaPro para la evaluación de impactos ambientales - Los estudios 3 y 4, definen 1 tonelada de Fe como unidad funcional, así mismo el estudio 5 emplea una tonelada de carbón como unidad funcional - Los estudios 2, 3, 4 y 5 establecen el ciclo de vida de la cuna hasta la puerta - Los estudios 2 y 5 evaluaron dos métodos de explotación	- Los estudios 2 y 5 no informan acerca del software empleado para la evaluación de los impactos. - El estudio 1 definió 1 Oz de Au como unidad funcional y el 2 estableció 1 kg de Au, estos difieren en la magnitud de la unidad elemental - El estudio 1 a diferencia de los demás, establece sólo la fase de explotación de ciclo de vida
Regional	Life cycle inventories of gold artisanal and small-scale mining activities in Peru: Toward indicators for South America		
Regional	Life Cycle Assessment study of iron ore mining	- Los resultados de los estudios 1, 3 y 5, mostraron que esta actividad afecta principalmente a la salud y la calidad de los ecosistemas - Los estudios 3 y 5 establecen que las mayores afectaciones se generan en el aire debido al transporte de los minerales en camiones a diésel y ambos concluyen que la mejor alternativa de transporte es el uso de bandas transportadoras.	- En el estudio 2 se desarrolló solamente el ICV y midió la huella de mercurio según cada unidad funcional analizada. - El estudio 4 evaluó la huella de GEI y propone alternativas para reducirla, a diferencia del estudio 2 que mide huella de mercurio, pero no propone alternativas para su reducción
Global	Evaluación del ciclo de vida de la minería y procesamiento del mineral de hierro.		
	Application of a Life Cycle Impact Assessment framework to evaluate and compare environmental performances with economic values of supplied coal		

Localización	Nombre	Convergencia	Divergencia
	products		

Fuente: Elaborado por autor

4.2.4.Motivación para la presente investigación

El interés por investigar sobre la explotación de esmeraldas surgió junto a mis compañeros de estudios Juliana García y Yeison Montenegro en el curso de administración ambiental VII semestre de Ingeniería ambiental, el cual es guiado por el Ingeniero Kenneth Ochoa. Por medio de diferentes lecturas y estudios de casos sobre la gestión ambiental y buenas prácticas, se incentivó el interés de buscar alternativas de mejora en los procesos productivos de las organizaciones. Por medio de contactos y lecturas se dirigió dicho interés hacia la industria esmeraldera, en la que se contó con el acceso al lugar y a la información, además de que es un primer estudio en su índole. Igualmente, surgió el deseo por aportar a la academia, para que tanto esta como las diferentes industrias, se vinculen para obtener alternativas de mejora y terminar difundiendo un nuevo panorama en las organizaciones, donde el aspecto ambiental sea un factor para cualquier tipo de proceso de la producción de un producto o servicio. Junto a lo anteriormente expuesto, se suma la visita al lugar de estudio en la provincia occidente de Boyacá, donde se tuvo la oportunidad de conocer a grandes rasgos algunos procesos en la explotación de esta gema, y se percibió que esta actividad genera, fuertes impactos tanto a nivel ecológico como social en las zonas de influencia de las minas.

Posteriormente en el semillero de investigación sostenibilidad empresarial, se despertó el interés de investigar y aportar mejoras en la industria esmeraldera en Colombia, discutiendo la importancia del tema, y sobre posibles investigaciones que se podrían realizar sobre el mismo. Luego de una revisión bibliográfica, se encontró que, mediante un ACV, se pueden cuantificar y evaluar todos los impactos que se generan en las distintas etapas y cadena de valor de la esmeralda.

4.3. Marco conceptual

4.3.1. Gestión Ambiental

Es el proceso objetivo que permite evaluar las cargas ambientales asociadas a un proceso en el que se obtiene un producto, cuantificando tanto el uso de materia y energía como las emisiones al entorno, para determinar el impacto de ese uso de recursos y esas emisiones y para evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental (Camargo & Chiappetta, 2017).

4.3.2. Análisis de Ciclo de Vida

Es una metodología para la definición de estrategias empresariales a partir de la interpretar el desempeño ambiental de una unidad analizada en forma sistémica, tomando todos los impactos ambientales durante todo el CV (desde la cuna hasta la tumba) del producto y su posterior

identificación de acciones de mejora (Van Hoof, 2008).

4.3.3. Distritos Mineros

Los Distritos Mineros son zonas estratégicas, con continuidad geográfica y geológica (González, 2013). A su vez, un distrito minero es una región cuya actividad económica principal es la explotación de uno o más minerales, organizada en unidades empresariales con utilización de mano de obra local (UPME, 2004).

4.3.4. Minería

Es la exploración selectiva de minerales y otros materiales obtenidos de la corteza terrestre (excepto materiales orgánicos de formación reciente). Estos depósitos han estado allí por millones de años, comportándose como un depósito natural dentro de los ciclos biogeoquímicos de cada elemento en particular (Olivero, 2014). Esta actividad, en un principio se basaba en desenterrar rocas. A medida que se vaciaban los yacimientos de la superficie, las excavaciones se hacían más profundas, lo que constituye la hoy minería subterránea (Lavandaio, 2008).

4.3.5. Yacimientos minerales

Un yacimiento mineral es la concentración de una o más sustancias útiles, rodeada de materiales no aprovechables y que se encuentra distribuida de forma escasa en la corteza terrestre (Ingeominas, 2004).

4.3.6. Esmeralda

La esmeralda es una piedra preciosa de origen sedimentario hidrotermal con nombre químico Ciclo Silicato de Aluminio y Berilio, que debido a procesos tectónicos permitió la formación de pliegues y fallas, lugar donde se encuentra este mineral. Su color característico es verde y este se debe a la presencia de trazas de cromo en el lugar de los yacimientos esmeralderos (GEMSELECT, 2011))

.

4.3.7. Involucrados

Son aquellos grupos sociales que pueden afectar o ser afectados positiva o negativamente por el logro de los propósitos de una organización o un proyecto. Estos presentan también una distinción entre varios tipos de stakeholders, según sea su influencia directa o indirecta sobre la organización o proyecto (Friedman, 2006).

4.3.8. Impacto Ambiental

Según el decreto 2041 de 2014 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, este término hace referencia a cualquier alteración producida en el componente biótico, abiótico o socioeconómico, que sea favorable o desfavorable, total o parcial y que es atribuido al desarrollo de una actividad, proyecto, obra u operación.

4.4. Marco Teórico

Para iniciar este apartado, se cita tres eventos: la Conferencia de Estocolmo de 1972 (Un plan para la sobrevivencia), Informe Brundtland en 1987 (Nuestro futuro común) y La Cumbre de Río de 1992, recalcando la importancia del desarrollo sostenible con su documento de la Agenda 21, los cuales marcaron la génesis de la gestión ambiental (CEPAL, 2011; Gómez, 2014; Ligiaes, 2003). Adicionalmente, para finales del año 2000, ya se empezaba a insertar una nueva visión en la humanidad, en el que se empieza a promover la necesidad de incorporar políticas en el desarrollo

económico y social, con estos principios surge la gestión ambiental en todo mecanismo de producción; minimizando los efectos dañinos que pueden causar las actividades organizacionales (Belmonte, Burgos, & Plaza, 2011).

Entre los métodos que actualmente se emplea en la gestión ambiental, se pueden destacar cinco, los cuales son: CV, ecodiseño, tecnología limpia, ecología industrial y gestión de la calidad ambiental total (Arana, Arbulo, Basurto, & Landeta, 2013). La aplicación de dichos métodos se lleva a cabo por medio de herramientas, que emplean procedimientos de uso sistemático y de ser posible informativos, como lo hace el enfoque de la Gestión de Ciclo de Vida, donde permite la sostenibilidad de un producto y la incorporación de políticas integras, mediante herramientas tales como el ACV o los costos del CV (Aranda & Zabalza, 2010) .

4.4.1. Ecología Industrial

La Ecología Industrial (EI), surgió como alternativa al desarrollo económico basado en la producción masiva de bienes y servicios por una planeación y diseño estrategia resaltando el enfoque de sustentabilidad. Este contiene siete criterios: 1. Tendencia a un sistema industrial de ciclo cerrado; 2. Ahorro en la extracción y uso de recursos naturales; 3. Obtención de energía de fuentes renovables, ecoeficiencia; 4. Desmaterialización de la economía; 5. Inclusión de costos ambientales en los productos o servicios; 6. Generación de redes entre las entidades participantes y el entorno; 7. Generación y mejora de puestos de trabajo. La aplicación de estos criterios permite alcanzar las metas de la EI que son: equidad socioeconómica, eficiencia y minimización en el uso de recursos y ambientes seguros y saludables, con lo que se propicia el equilibrio en la sociedad, la economía y el medio ambiente. (Cervantes, Granados, Herrera, & Martínez, 2009)

4.4.2. Cadena de valor

La cadena productiva de la minería de esmeraldas se puede dividir principalmente en 5 eslabones. La primera de ellas da lugar a la exploración del área de donde se espera extraer los metales y minerales, en donde se hace un estudio detallado del suelo y de los materiales que lo componen. Posteriormente se da paso a la extracción y producción, etapa que comprende la preparación, desarrollo, montaje y explotación del área seleccionada.

Una vez se extraen los minerales del interior del subsuelo se da lugar al lavado para seleccionar y posteriormente clasificarlos según sus características y propiedades. En el momento que se tengan seleccionados y clasificados los diferentes tipos de productos se da paso al transporte de estos, en donde se traslada desde la mina hasta los sitios de terminado y elaboración, allí se lleva a cabo finamente la comercialización. En esta etapa final se distribuyen los esmeraldas para ser talladas o exportadas (SIMCO, 2015) (Anexo 4).

4.4.3. Teoría de Stakeholders

Teoría de las partes interesadas, incluye “accionistas, empleados, clientes, proveedores, financiadores y a la sociedad en general”, teniendo como base fundamental la integración de los intereses de todos sus Stakeholders, en lugar sólo maximizar la posición de un grupo, con la inherente limitación de los otros. Así, considerando que las organizaciones se justifican en la medida que son capaces de crear valor, mediante el estudio y mejora de la relación entre sus órganos rectores, sus

clientes o usuarios, sus integrantes y las comunidades en donde se desenvuelven.

Dichas relaciones se deben de administrar con base en la generación e intercambio de valor bilateral, e implican un flujo de información mutuo y el accionar con bases éticas. Así pues, la generación e intercambio de valor inherente en cada relación de la empresa con sus diferentes Stakeholders, debe de ser estudiado específicamente para cada uno de ellos y tomando en consideración las características específicas de cada grupo y su vínculo con la organización (Valencia & Vieyera, 2013).

4.4.4. Análisis de Ciclo de Vida

El ACV contempla aspectos ambientales e impactos ambientales potenciales, a lo largo de todo el CV de un producto desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, utilización, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final (Van Hoof, 2008).

De acuerdo con la metodología propuesta por la normativa ISO 14040: 2007 un estudio de ACV se puede dividir en cuatro fases: Definición de objetivos y alcance del estudio, análisis del inventario, evaluación del impacto e interpretación (ISO 14040, 2007). Tal y como ilustra la figura 1, estas cuatro fases no son secuenciales. El ACV es una técnica iterativa que permite ir incrementando el nivel de detalle en sucesivas interacciones (NTC-ISO 14040, 2007).

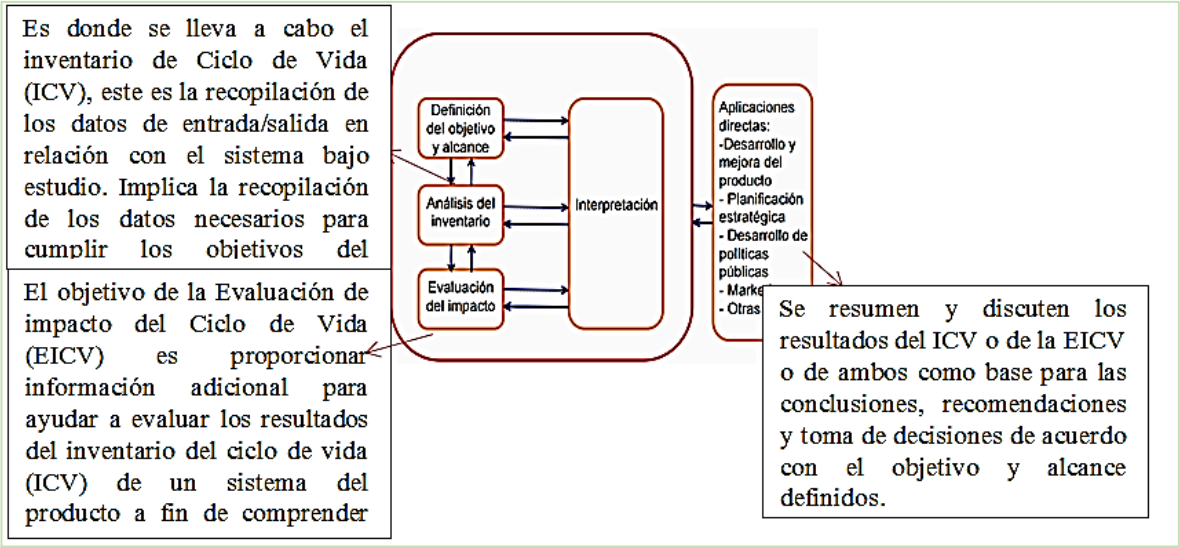


Figura 1. *Fases de un ACV*
Fuente: Tomado de (NTC-ISO 14040, 2007) y adaptado por autor

Las Guías internacionales que contemplan el ACV, con cada una de sus etapas son:

ISO 14040 Análisis de ciclo de vida-principios y metodología

ISO 14044 Requisitos para llevar a cabo el ACV

Otros documentos que sirven como base para la aplicación de un estudio de ACV son:

- ISO/TR 14047:2012. Gestión ambiental. Evaluación del ciclo de vida-Ejemplos de aplicación de la norma ISO 14044 para situaciones de evaluación de impacto.
- ISO/TS 14048:2002. Gestión ambiental. Evaluación del ciclo de vida-Formatos para documentación de datos.
- ISO/TR 14049:2012. Gestión ambiental. Evaluación del ciclo de vida-Ejemplos de aplicación de la ISO 14044 para la definición del objetivo y alcance para el análisis de inventario.

4.4.5. ACV como herramienta de evaluación de impactos en la minería

Las herramientas con un enfoque de CV han adquirido mayor importancia debido a que no se limita a evaluar el impacto puntual generado, sino que contempla otras dimensiones del CV del producto. Sin embargo, ACV representa puntos débiles para un estudio, ya que se discute su aplicación actual, por temas de subjetividad y complejidad (Hernández & Rieznik, 2015). Sin embargo, los autores recomiendan que se sigan realizando investigaciones con enfoque de ACV en la minería, ya que con los datos que se obtienen al emplear esta herramienta, se puede tener una base más clara acerca de los impactos y mejoras de esta actividad, de esta manera se lograría alcanzar fortalecimientos de la ingeniería en la industria minera (Adekpedjou & Awuah, 2010; Mancini, Recchioni, Pennington, & Sala, 2014).

Por último, en el ACV de la minería también hay retos en el uso de una terminología normalizada en la evaluación del impacto para definir la entrada de recursos minerales (Drielsma, Drnek, RusselL, & Weihed, 2016).

4.5. Marco Normativo

Este marco , aborda de manera ordenada las normas que son antecedentes, compatibles y reglamentarias en el tema del ACV para el caso internacional con énfasis en las normas ISO, así mismo en las normas nacionales. Todo esto con el fin de generar una contextualización puntual que permita el desarrollo adecuado de este proyecto en función del ACV en la explotación de una empresa de esmeraldas.

4.5.1. Normatividad Ambiental internacional

Como iniciativa para la normatividad ambiental internacional, se cita al Informe de Brundtland en 1983 *Nuestro futuro común* presentado por la Comisión Mundial Para el Medio Ambiente y el Desarrollo de la ONU, liderado por Gro Harlem Brundtland , donde se trata por primera vez el tema del desarrollo sostenible; y finalmente en 1992 con la convención en Río de Janeiro de las Naciones, en la segunda Cumbre de la Tierra, en donde se adoptó el programa de acción para el siglo XXI denominado la *Agenda 21* en el cual se resalta la sección II. *Conservación y gestión de los recursos para el desarrollo* (Helena, 2008).

En cuanto a la normatividad de calidad se tiene como iniciativa la Organización Internacional para la Estandarización (ISO por sus siglas en inglés) establecida en 1947.. En 1993 dentro de esta organización, se creó el Comité técnico 207-ISO/NTC 207, donde se constituyeron seis comités especializados: Sistemas de Gestión Medioambiental, Análisis del ciclo de vida, Auditorías Medioambientales, Ecoetiquetado, Evaluación del desempeño medioambiental y Terminología medioambiental. Como consecuencia se obtuvo la serie de normas relacionadas con la serie 9000 enmarcadas dentro del grupo 14000, las cuales son la 9001/9002/9003, con el fin de demostrar el cumplimiento de los requisitos de la calidad mediante la certificación, de igual manera también se crearon la ISO 9004 y la 9004/2. En cuanto a la serie 14000, está la ISO 14001:2004, la cual contiene

especificaciones y guías de uso a la vez que explicita un sistema de gestión para la gestión medioambiental y la 14004:2004, que es la guía general y soporte técnico para el sistema de gestión medioambiental (Corrie, Jmenez, & Nava, 2002; Yañes, 2008).

Para el 2006 se publicó la ISO 14040, con tema de enfoque *Ciclo de vida del producto,* originalmente con el fin de evaluar la calidad ambiental de un producto, actualmente contiene la metodología específica para el análisis del producto a lo largo de todo su CV (ISO 14040, 2007; Monterroso, 2015).

4.5.2. Normatividad Nacional

Si bien es cierto, Colombia ha acogido los lineamientos mundiales ambientales que se han generado a partir de convenciones y organizaciones no gubernamentales, entre otros, y ha expedido las leyes ambientales del país (Antero & Ramírez, 2013).

Teniendo en cuenta lo anterior, este marco tendrá en cuenta la normativa que es antecedente y/o que repercute en el desarrollo de ACV en Colombia. En primera instancia, se cita el Código de los Recursos Naturales Renovables y de Protección del Medio Ambiente de 1974 y la Constitución Política en 1991, esta última incluye por primera vez los derechos y mecanismos judiciales para la protección ambiental (Constitución Política de Colombia, 1991).

Como consecuencia de esta nueva Constitución, la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia establece su comité ambiental en una Gerencia Nacional en el año de 1992, para anticiparse al nuevo marco de la política ambiental. En este mismo periodo, el gobierno nacional formula la Ley 99 de 1993, la cual da paso al Ministerio de Medio Ambiente (actual Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible) y al Sistema Nacional Ambiental (SINA) (Van Hoof & Herrera, 2007).

4.5.3. Normatividad minera Colombia

Actualmente, Colombia cuenta con el Decreto 933 de 2013 , el cual derogo la ley 1382 porque no realizo consulta previa a comunidades étnicas ni negras, como lo establece la nueva definición de minería en el actual decreto (PBI, 2011; Rubiano, S., 2012).

Así mismo, El Artículo 112 de la Ley 1450 de 2012 (Plan Nacional de Desarrollo) ordena implementar medidas de control a la comercialización de minerales, indicando que se debe publicar la lista de los titulares mineros, así como la información de los agentes autorizados para comercializar minerales. Con el fin de reglamentar este tema, el Decreto 2637 de 2012 le da vida al Registro Único de Comercializadores de Minerales (RUCOM), el cual busca apoyar la minería legal y controlar adecuadamente la comercialización de minerales.

Finalmente se cita la Resolución 90325 de 2014, la cual presenta la adopción de los criterios de los

planes de mitigación en los sectores de energía eléctrica, minería e hidrocarburos (MinMinas, 2016).

4.6. Marco Geográfico

El lugar en el cual desarrolló este estudio, se ubica en el departamento de Boyacá, en el centro oriente del país y es atravesado por la Cordillera Oriental de la región Andina Colombiana,. Sus coordenadas son 04°39’10’’ y los 07°03’17’’ de latitud norte y los 71°57’49’’ y los 74°41’35’’ de longitud oeste. Boyacá ocupa el 2.03% del territorio nacional. Limita al Norte con los departamentos de Santander, Norte de Santander y parte de la República de Venezuela, al Sur con el departamento de Cundinamarca y una parte del departamento del Meta. Por el este, con los departamentos de Arauca y Casanare, por el Oeste limita con los departamentos de Antioquia y Caldas (Gobernación de Boyacá , 2012)

Este departamento está conformado por 123 municipios (figura 2), los cuales están organizados en 13 provincias (Figura 3) (Gobernación de Boyacá, 2008). La Provincia de Occidente, es el lugar donde se llevó a cabo el presente proyecto.

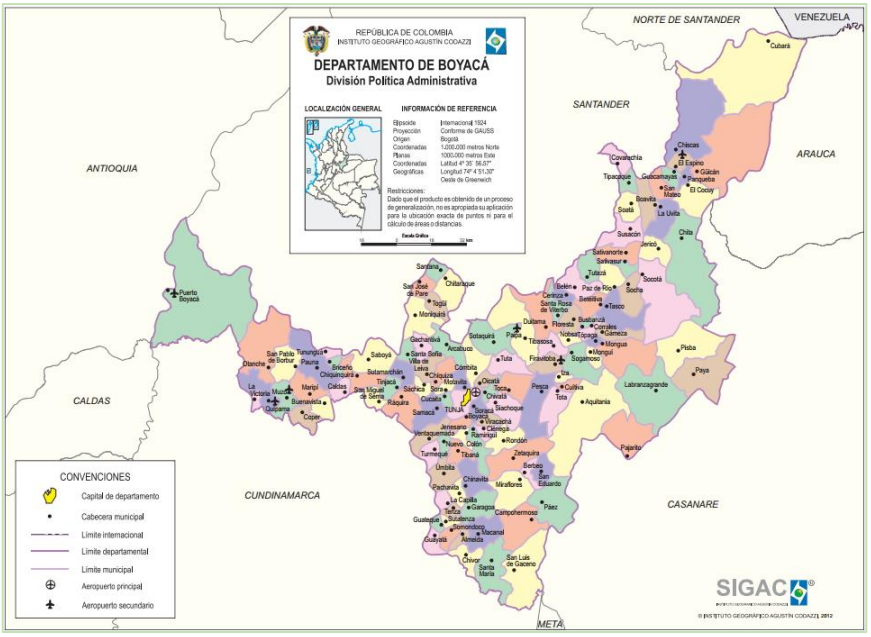


Figura 2. *Ubicación del departamento de Boyacá con sus límites y municipios*
Fuente: (Gobernación de Boyacá , 2012)

Figura 3. *División provincial del departamento de Boyacá.*
Fuente: *(Gobernación de Boyacá, 2008)*

4.6.1. Punto de estudio

La provincia de Occidente está conformada por los municipios Briceño, Buenavista, Caldas, Chiquinquirá, Coper, La Victoria, Maripí, Muzo, Otanche, Pauna, Puerto Boyacá, Quipama, Saboyá, San miguel de Sema, San pablo de Borbur y Tununguá (Gobernación de Boyacá , 2012).

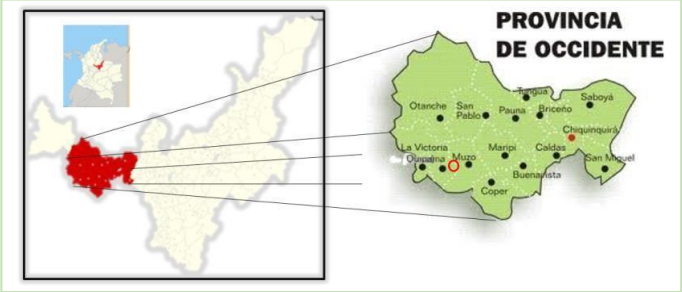


Figura 4. *Localización Provincia de Occidente-Boyacá.*
Fuente: (Gobernación de Boyacá, 2008)

La empresa objeto de estudio, se localiza en la provincia del occidente de Boyacá entre los municipios Muzo y Quipama, sobre el cinturón Esmeraldero occidental en el distrito minero Muzo (figura 5). Este cinturón tiene elevaciones entre 850 y 1020 metros sobre el nivel del mar y presenta una dirección N20ºE (Ingeominas, 2004).

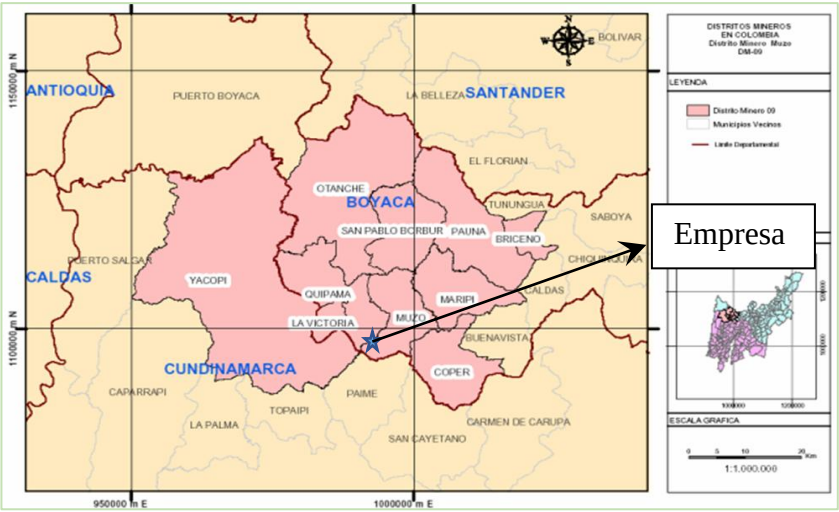


Figura 5. *Distrito minero Muzo.*
Fuente: (UPME, 2004)

4.7. Marco Institucional

El presente estudio se acoge principalmente a 5 instituciones las cuales son: La federación Nacional de esmeraldas (FEDESMERALDAS), la Asociación Colombiana del Comercio de Esmeralda (ASOCOESMERAL), la Asociación de Productores de Esmeraldas Colombianas (APRECOL), ACODES y la empresa objeto de estudio, los cuales se explican a continuación brevemente acerca de su organización.

4.7.1. FEDESMERALDAS

Es una federación constituida legalmente en el año 1995, de carácter gremial integrada por la Asociación Colombiana de Exportadores de Esmeraldas "ACODES", Asociación Colombiana del Comercio de la Esmeralda "ASOCOESMERAL" y la Asociación de Productores de Esmeraldas Colombianas "APRECOL", las cuales intervienen en las diferentes actividades de la industria de la esmeralda. El objetivo principal de FEDESMERALDAS consiste en la representar, defender y orientar a la industria de las esmeraldas de Colombia. Esta, se rige por normas legales vigentes y en general por las normas de derecho privado aplicable a su condición de persona jurídica y a los estatutos (FEDESMERALDAS, 2015).

4.7.2. ASOCOESMERAL

Esta asociación agrupa comerciantes, comisionistas, talladores de esmeraldas en el país. Cuenta con 26 años de existencia y funcionamiento, y su Personería Jurídica fue otorgada desde 1988. Su función básica es agremiar y capacitar a los comerciantes de esmeraldas del país y representarlos frente a las leyes expedidas por el Gobierno Nacional (FEDESMERALDAS, 2015).

4.7.3. APRECOL

Es una organización enfocada en representar y agremiar a los productores de Esmeraldas Colombianas con el fin de lograr competitividad y mejores prácticas industriales, laborales en el área minera y en especial en forjar empresas mineras socialmente responsables y comprometidas ambientalmente (FEDESMERALDAS, 2015).

4.7.4. ACODES

Tiene como principal objetivo promover, fomentar y fortalecer la exportación de la esmeralda colombiana, la unidad, crecimiento y defensa de sus asociados, la investigación permanente del mercado mundial de la esmeralda y la divulgación de tales investigaciones a sus asociados (FEDESMERALDAS, 2015).

4.7.5. Organización de la empresa en estudio

A continuación, se hace una breve descripción del mecanismo de trabajo bajo el cual labora la empresa estudio de caso de esta investigación. Inicialmente se describe la licitación de la cual hace parte la empresa. No se proporciona el nombre de esta, por requerimientos de confidencialidad de esta.

4.7.5.1.*Organización de la empresa Mina Real*

La empresa Mina real cuenta con tres licitaciones, con una duración de 30 años para explotación, las cuales fueron solicitadas en el 2003 ante la Agencia Nacional de Minería, estas son: LH143, LK113 y SH122. Cada una de estas, cuenta con miembros asociados, que en conjunto conforman la empresa Mina Real.

El mecanismo de trabajo, consiste en que Mina Real, da permisos de explotación sobre las licitaciones a empresas conformadas por inversionistas externos, los cuales deben cumplir con unos requisitos que solicita Mina Real, con este permiso se les permite trabar el terreno por medio de cortes (dos de estos cortes es sobre el cual trabaja la empresa estudio de caso,) actualmente hay 27 cortes a los que la empresa Mina Real les realiza el control mediante un representante que es enviado a cada corte para supervisar de 7am a 5 pm, las actividades como perforaciones, y especialmente la producción.

Mina Real trabaja por medio de porcentajes con la empresa de cada corte, en el momento que hay producción, la empresa inversionista debe dar un porcentaje. Para esto se presentan dos casos: sí el accionista es uno de los dueños de alguna de las licitaciones de Mina real, el 40% será para Mina Real y el restante lo toma el inversionista; el segundo caso consiste en que sí es un inversionista externo los porcentajes serán 50%-50% respectivamente.

Cada inversionista, se encarga de los insumos y materiales que requiere para la explotación de su corte, estos materiales van desde carros para transporte de material, herramientas, madera para túneles, equipos como compresor (cuando la contextura del suelo es frágil) y explosivos como dinamita

(cuando el suelo es consistente), así como la contratación del personal requerido y demás operaciones necesarias. Sin embargo, la empresa dueña de la licitación (Mina Real) es quien administra y entrega los explosivos a cada corte, bajos estrictos estándares de seguridad y con el personal capacitado para el adecuado manejo de estos, para lo cual se cuenta con la certificación y permisos por parte de INDUMIL (Industria Militar Colombiana).

4.7.5.2.*Organización de la empresa estudio de caso*

La sociedad pertenece al tipo Sociedad Anónima Simplificada, esta tiene como sede principal la ciudad de Bogotá D.C. y adelanta sus labores mineras en jurisdicción de los municipios de Muzo y Quipama (Boyacá), donde cuenta con instalaciones e infraestructura propia. El personal se compone por 80 personas con diferentes funciones, los cuales están organizados de la siguiente manera:

- Junta directiva: Nombrada por los socios y constituida por 5 miembros encargados de diseñar y propender para que las políticas de la empresa se cumplan.
- Gerente general: Es quien debe desarrollar las políticas y propósitos que la empresa se ha trazado con la mayor eficiencia y la dirección de esta.
- Dirección administrativa: Tiene la responsabilidad del manejo administrativo en la sede principal y en la operadora.
- Dirección técnica: Responde por el desarrollo técnico y seguro de las labores mineras y aquellas relacionadas con las obligaciones adquiridas y referidas en el contrato de operación suscrito y junto con la dirección administrativa vela por que las normas de higiene y seguridad social se cumplan.
- Personal operativo mina: Realizan, según la función y el cargo asignado, las labores de exploración-explotación, mantenimiento y logística en la operadora.

4.8. Marco demográfico

La empresa en estudio se encuentra ubicada en medio de los municipios de Muzo y Quipama, por ello a continuación se expone la descripción demográfica de estos dos municipios.

4.8.1. Muzo

Según el Censo realizado por el Departamento Nacional de Estadística (2005), Muzo presentaba para el 2005 una población de 9828 hab., de los cuales 5389 hab corresponden a población rural y 4439 hab en área rural. La proyección del censo establece que para el 2016, la población sería de 8914 hab, disminuyendo el 9.3 % de la población que presentaba para el 2005, por factores de migración de los habitantes en búsqueda de mejores oportunidades de vida (DANE, 2005).

El 82,5% de la población de 5 años en adelante saben leer y escribir, el 0,5 de la población se reconoce como Raizal, palenquero, negro. El 49,9% de la población residente en Muzo, ha alcanzado el nivel básico primaría y el 23,9% secundaria; el 1,0% ha alcanzado el nivel profesional y el 0,4% ha realizado estudios de especialización, maestría o doctorado. La población residente sin ningún nivel educativo es el 16,2%. El 82,8% de las viviendas tienen conexión a energía eléctrica, hay

aproximadamente 4 o menos personas en 69% de los hogares de Muzo, el 0,4% de los hogares tiene experiencia emigratoria internacional (DANE, 2005).

El 4,0% de su economía se debe a establecimientos que se dedican a la industria; el 51,1% a comercio; el 44,2% a servicios y el 0,7% a otra actividad (DANE, 2005).

4.8.2. Quipama

Según el Censo realizado por el Departamento Nacional de Estadística (2005), Quipama presentaba para el 2005 una población de 8815 hab., de los cuales 1619 hab corresponden a población rural y 7196 hab en área rural. La proyección para el 2016, la población disminuye a 7776 hab, por factores de migración en búsqueda de oportunidades en otros lugares el departamento (DANE, 2005).

El 53,1% de la población residente en Quipama, ha alcanzado el nivel básico primaría y el 19,3% secundaria; el 1,0% ha alcanzado el nivel profesional y el 0,2% ha realizado estudios de especialización, maestría o doctorado. La población residente sin ningún nivel educativo es el 17,7% (DANE, 2005). El 92,2% de las viviendas de Quipama son casas, el 75,5 % de estas tienen conexión a energía eléctrica, el 7,4 % de los hogares tienen actividad económica en sus viviendas, el 67,7% de las viviendas tienen de a 4 o menos personas (DANE, 2005).

El 4,9% de su económica se debe a establecimientos que se dedican a la industria; el 55,7% a comercio; el 38,2% a servicios y el 1,3% a otra actividad (DANE, 2005).

5. Método

5.1. Diseño metodológico

Esta investigación toma como caso de estudio a una empresa minera dedicada a la explotación de esmeraldas. En este orden de ideas, el estudio de caso se clasifica según su funcionalidad como instrumental, debido que se pretende examinar para proveer insumos de conocimiento al tema de ACV y dar solución a la necesidad insatisfecha de la empresa mediante propuestas de mejora. Por el número de casos, se clasifica en un solo caso con una unidad de análisis, específicamente un estudio de caso holístico, por lo que se pretende confirmar retar o extender la teoría o hipótesis, en cuanto a los posibles puntos críticos de impacto ambiental en la explotación de la empresa minera de esmeraldas (Sampieri, Collado, & Baptista, 2010).

5.2. Enfoque y tipo de investigación

Inicialmente este estudio de caso se vincula con lo que plantea al respecto Hernández, Sampieri y Mendoza (2008), ya que la investigación se realizará bajo la conjugación de los métodos cualitativos y cuantitativos, lo que le da un enfoque mixto a la investigación, ya que promueve el desarrollo pertinente de obtención de información, procesamiento de esta y resultados fiables, que fomenten una descripción real del objeto de análisis (Sampieri, Collado, & Baptista, 2010) (Ver Anexo 5). A continuación, se describen las actividades que se desarrollaran para cada método.

5.2.1. *Método Cualitativo*

El diseño de investigación cualitativo se realizó en dos fases: el manejo y recolección de información primaria, para lo cual se realizaron actividades de trabajo en campo y la recolección de información secundaria, qué se desarrolló mediante la obtención de información a partir de una exhaustiva revisión bibliográfica.

5.2.1.1. Recolección de Información

Revisión Bibliográfica

Se tomaron en cuenta dos de los lineamientos del grupo de normas internacionales ISO, específicamente la ISO 14040:2007- Gestión Ambiental- Análisis de Ciclo de Vida *"Principios y marco de referencia"* y también la ISO 14044:2006 *"Requisitos y directrices"*. Además, se manejan los principales textos de apoyo que abordan el tema de ACV como son *"Life Cycle Assessment Handbook"* de Mary Ann Curran (2012), así como el Manual para la Producción más Limpia de la Explotación de Esmeraldas (Registro número 37788) del IDEAM y Corpochivor.

Para la revisión de información en línea, se accedió a la plataforma de búsqueda de la biblioteca Juan Roa Vásquez de la Universidad El Bosque (IDEA) y Google Académico. Se consultaron algunas bases de datos como Engineering Village, ProQuest, ScienceDirect, eBook, Ebrary, entre otras. De donde se obtuvieron Libros, artículos de revista, informes institucionales y documentos en línea, que nutran la investigación para el desarrollo óptimo de este proyecto.

- *Información en campo*

La recolección de información en campo se realizó bajo las siguientes actividades:

- Una primera visita de reconocimiento en la empresa objeto de estudio, en el que se tomaron registros fotográficos, entrevistas y videos, a partir de esto, se obtuvo la información primaria acerca de los diferentes procesos socioeconómicos y ambientales alrededor de la explotación de la esmeralda en el distrito minero Muzo del Occidente de Boyacá, con el fin de caracterizar los aspectos del área de estudio y de las zonas aledañas a este.
- Posteriormente, se realizó una segunda visita a la empresa, con el fin de caracterizar las etapas en la explotación de la esmeralda, a partir de esto, se solicitó información técnica que alimentará el ICV y demás información requerida para el desarrollo de la investigación.
- Por último, se mantuvo frecuente comunicación con las directrices de la empresa para confirmación y extra-información de los datos obtenidos para el ICV.

5.2.2. Método Cuantitativo

5.2.2.1. Método ACV NTC/ ISO 14040:2007

El enfoque cuantitativo de la presente investigación se basa de la información obtenida del enfoque cualitativo anteriormente expuesto. Para promover calidad en el proyecto, se empleó una revisión crítica del ACV, en las siguientes consideraciones: a) Validación del método utilizado respecto a la normativa correspondiente, b) Los datos del ICV complementan los objetivos planteados, y c) las limitaciones identificadas son claramente definidas y desarrolladas dentro del estudio (Chacón, 2008).

- *Definición del Objetivo y Alcance*

Objetivo

El objetivo de un estudio de ACV debe ser preciso sin ambigüedad. Según la ISO 14040 el objetivo debe tener en cuenta:

- La aplicación prevista
- Las razones para llevar a cabo el estudio
- El público objetivo, es decir, a qué grupo de interés los resultados del estudio están destinados a ser comunicados
- Si los resultados están destinados a ser utilizados en aseveraciones comparativas y/o a ser divulgados al público (ISO 14040, 2007).
- En algunas ocasiones, el objetivo del estudio puede variar debido a limitaciones imprevistas, restricciones o información adicional. Por ello se recomienda que tales modificaciones, juntamente con sus justificaciones, se documenten en el estudio (NTC ISO 14041, 2000).

Alcance

Según la NTC ISO 1040: 2007, expresa que "El alcance debería estar suficientemente bien definido para asegurar que la amplitud, profundidad y el nivel del estudio sean compatibles y suficientes para alcanzar el objetivo establecido". Por lo tanto, debe estar en congruencia con los estudios realizados y el objetivo establecido, y en caso de que se realicen modificaciones deben estar justificadas. El alcance incluye: El sistema del producto a estudiar, las funciones del sistema del producto o funciones de los sistemas en el caso de realizarse estudios comparativos unidad funcional:
La unidad funcional de un estudio debe ser claramente definida y medible, se define a partir de las funciones que cumple el producto (NTC-ISO 14040, 2007; Van Hoof, 2008).

- *Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (AICV)*

Según la NTC-ISO14040:2007, el ICV es la recopilación de datos que se obtienen en las 6 etapas que componen el CV: Adquisición de materias primas, fabricación y procesado, transporte y distribución, uso/reúso/mantenimiento, reciclado y gestión de residuos, así mismo se debe considerar algunos factores como son las entradas de energía y materia prima, y las salidas (emisiones ambientales de gases, líquidos y desechos sólidos), por lo que se requiere un gran volumen de datos, estos se pueden obtener de distintas manera, ya sea una fuente directa con la empresa de producción, del gobierno, bases de datos comerciales o publicaciones científicas. La calidad del ICV depende en gran medida de las tecnologías utilizadas, las condiciones regionales y el alcance de la información, por lo que la falta de datos adecuado de ICV continúa siendo un obstáculo en la realización de ACV. (Du & Karoumi, 2014).

Se recomienda que se utilice datos que son obtenidos directamente del proceso en estudio, esto puede ser a través de:

- Medidas "in situ"
- Balances de materia y energía -Entrevistas, fuentes bibliográficas (Van Hoof, 2008).
- Realizar detalladamente la descripción del método a emplear para recoger los datos y de las técnicas de cálculo para cada categoría de datos.

• Emplear el uso de un software para realizar el listando de diferentes categorías de los datos. En el anexo 6 se presenta un resumen de las principales bases de datos de ICV que se encuentran disponibles en la web.
• Desarrollar una evaluación y una documentación de los resultados del inventario (SAIC, 2006).

- *Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV)*

La fase de EICV de un ACV evalúa los impactos ambientales potenciales por la utilización de recursos y emisiones durante la fase de ICV, esto se realiza en diferentes fases: Categorización, caracterización, normalización y ponderación, de los posibles causantes de impactos (Díaz, 2014)(Díaz, 2014; NTC-ISO 14040, 2007).

Aunque se puede obtener algunas conclusiones directamente del ICV, se requiere una evaluación del impacto para realizar las aseveraciones de dichos datos obtenidos en el ICV, ya que el equilibrio entre las entradas y salidas del sistema debe ser un hecho (Thiebault, 2010)**.**

- *Interpretación del Ciclo de Vida*

La interpretación es la fase de un ACV en la que se combinan los resultados de AICV con los de la EICV, para obtener las conclusiones del estudio; en ocasiones la interpretación puede implicar un proceso repetido de revisión y actualización del alcance, de igual manera la naturaleza y calidad de los datos recopilados para que sean coherentes con el objetivo y el alcance. Puede ir asociado con las herramientas de prevención de la contaminación industrial, tales como minimización de residuos, o rediseño de productos (Romero, 2008).

5.2.2.2. *Software para ACV*

Para elaborar un ACV con calidad, se debe tener en cuenta diversos parámetros y cálculos que exige una labor detallada. Actualmente se han desarrollado una serie de herramientas de software para la elaboración de cálculo del ACV, algunos de estos softwares tienen incluido base de datos ICV y metodologías de EICV (Anexo 6).

5.2.2.3.Método en SimaPro

Es un programa que permite desarrollar el ACV y ofrece la posibilidad de utilizar bases de datos de ICV creadas por el usuario en función de sus disposiciones y consideraciones, así bibliográficas como Ecoinvent, BUWAL, ETH-ESU e IDEMAT (ver anexo 7). Actualmente el software SimaPro se encuentra en su octava versión, este programa exige al usuario la definición de la biblioteca de ICV que desea disponer (ver anexo 7), para la definición de los procesos y fases del sistema, así como la elección de la metodología para la realización de la fase de EICV. El primer paso para realizar consiste en recopilar previamente todos los datos que se desean introducir y considerar en la definición del sistema (Roca, 2014).

- *Objetivo y Alcance en SimaPro 8*

La definición del objetivo y alcance se realiza bajo las características del software, en el cual una vez se crea el proyecto en el sistema, la interface presenta opciones con sus respectivos espacios a llenar donde permite establecerlos (ver anexo 8).

- *ICV en SimaPro 8*

Para el desarrollo del ICV en SimaPro, es necesario crear procesos asociados al sistema a estudiar. El procedimiento inicia con la creación de un nuevo proceso en el software SimaPro, el cuál expone una hoja o plantilla para establecer las entradas y salidas de dicho proceso (Anexo 9).

De igual forma, para alimentar los requerimientos de información el software diferencia entre dos tipos de datos, estos son los datos de primer plano, que se refieren a los datos específicos requeridos para modelar el sistema, por lo general un sistema de producción en particular o un sistema de producción más especializado.
Por otro lado, están los datos de fondo, los cuales se refieren a la producción de materiales genéricos, energía, transporte y gestión de residuos. Por lo general se pueden encontrar en las bases de datos de SimaPro y literatura (Pré Consultants, 2016).

i. *Recolección de datos de primer plano*

Para la recolección de los datos de primer plano se realizaron dos visitas técnicas a la empresa minera. La primera con el fin de obtener información primaria e identificar las necesidades de la empresa, donde se realizaron entrevistas al gerente de la mina y a algunos funcionarios de esta. De igual forma se documentaron en las hojas de recolección de datos las entradas del proceso de explotación de la esmeralda y se tomaron registros fotográficos, video y grabaciones de audio. Con la finalidad de establecer un balance de masas y energía del proceso extractivo a partir de documentación metódica (Anexo 9).

En la segunda visita se elaboró una hoja de cálculo en el Software Excel la cual puede ser observada en la tabla 2, para la recolección de datos de las entradas y salidas del proceso de explotación de la esmeralda.

Tabla 2. *Ejemplo de hoja de cálculo para un proceso unitario de la explotación minera*

	Cantidad	Unidad	Factor de conversión	Unidad	Cantidad con respecto a la unidad funcional	Unidad	Observaciones
Entradas							
Materias primas		kg/JE		JE/ m A		kg/ 1 m A	
Insumos		kg/JE		kg/JE		kg/JE	
Salidas							
Salidas		kg/ JE		JE/ m A		kg/ 1 m A	
Emisiones		N/A		N/A		N/A	

Fuente: Elaborado por autor

Esta hoja de cálculo contaba con el comando para incluir el factor de conversión aplicable para cada una de las entradas y salidas del proceso. En la tabla 3, se muestra el proceso para hallar el factor de

conversión, este contiene la relación entre el avance promedio en metros dentro de la mina explotados en una Jornada de Explotación (JE[4]). Con el fin de determinar la cantidad de entrada en cada proceso requerido para avanzar un metro bajo las condiciones características de esta mina.

Tabla 3. *Cálculo del factor de conversión con respecto a la unidad funcional*

	Valor	**Unidad**
Equivalencia		Jornada de explotación (JE)
		Metros de avance (mA)
Factor de conversión		JE/m A

Fuente: Elaborado por autor

$$Factor\ de\ conversión = \frac{1\ Jornada\ de\ explotación}{metros\ de\ avance}$$

[Ecuación 1]

Donde

- Factor de conversión [$\frac{JE}{m\ A}$]: valor para normalizar los datos de entrada a la unidad funcional del ACV.
- Jornada de Explotación [JE]: unidad que hace referencia a periodo de explotación minera en un día.
- Metros de avance [m A]: Unidad que hace referencia a la cantidad en metros de avance como resultado de labores de explotación minera.

$$Cantidad\ con\ respectola\ unidad\ funcional = Cantidad * Factor\ de\ conversión$$

[Ecuación 2]

Donde,

- Cantidad [Unidad variable/JE]: datos numéricos de entrada de materias primas, insumos y energía para una JE minera.
- Cantidad con respecto a la unidad funcional: cantidades de las entradas normalizadas para la unidad funcional ACV
- Factor de conversión [$\frac{JE}{m\ A}$]

En el consumo de energía eléctrica se tuvo en cuenta el consumo global de la empresa. El consumo

[4] Una Jornada de Explotación hace referencia al periodo de tiempo en el cuál se realizan labores de explotación en la mina. Una JE comprende dos turnos de trabajo de 8 horas cada uno. En las labores de desarrollo y explotación se utilizan dos escuadras de 6 hombres cada una por JE.

se estimó por medio de las facturas de cobro del servicio público de la empresa EBSA y se calculó de acuerdo con JE que la empresa realiza al mes (ver ecuación 3).

$$Consumo\ de\ energía\ por\ unidad\ funcional = \frac{Promedio\ de\ consumo\ de\ energía\ eléctrica}{mes} * \frac{1\ mes}{Jornadas\ de\ explotación} * Factor\ de\ conversión$$

[Ecuación 3]

Donde,

- Consumo de energía por unidad funcional $[\frac{kwh}{m\ A}]$: consumo normalizado para la unidad funcional
- $\frac{Promedio\ de\ consumo\ de\ energía\ eléctrica}{mes}$ $[\frac{kwh}{mes}]$: consumo promedio obtenido de facturas
- Factor de conversión $[\frac{JE}{m\ A}]$

Para la estimación de las distancias de transporte para el abastecimiento de materias primas (madera, dinamita, sistema de ventilación e iluminación) se emplea la aplicación web de Google Maps. Con esta es posible obtener el valor en kilómetros desde el punto del proveedor de materias primas hasta la empresa minera. A continuación, en la figura 6 se presenta como ejemplo la representación gráfica de la ruta Bogotá- Muzo, en la ecuación 4 el procedimiento para determinar el tráfico de carga y en la tabla4 la hoja de cálculo para este insumo de transporte.

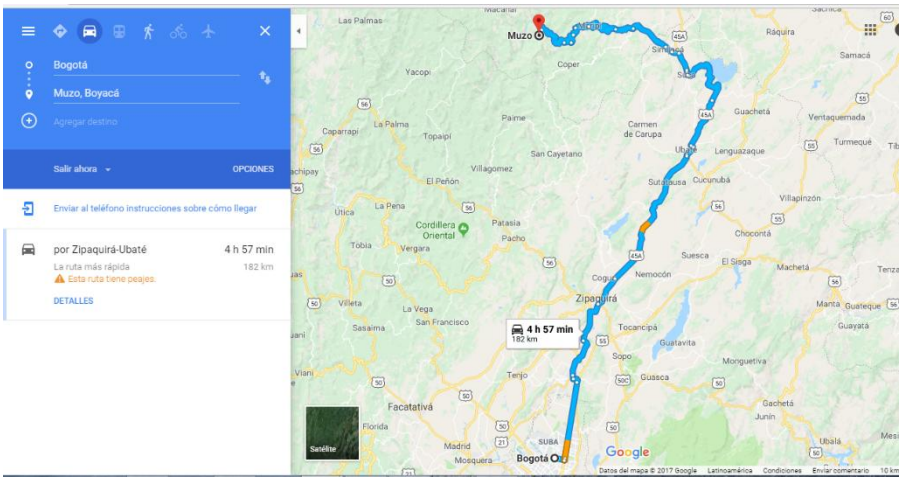


Figura 6. *Ejemplo del cálculo de distancias mediante Google Maps*

Fuente: Tomado de Google Maps.

$$Tráfico\ de\ carga = \frac{distancia\ recorrida * cantidad\ por\ unidad\ funcional}{1000}$$

[Ecuación 4]

Donde,

- Tráfico de carga [tkm]: variable para ingresar dato al software SimaPro 8
- Distancia recorrida [km]: distancia recorrida por tierra para los diferentes procesos de transporte.
- Cantidad por unidad funcional [$\frac{kg}{m\ A}$] Cantidad del producto o insumo, normalizado por unidad funcional, que será tenido en cuenta en el proceso de transporte calculado.
- 1000: Conversión automática de kilogramos a toneladas.

Tabla 4. *Ejemplo de hoja de cálculo para el tráfico de carga*

Tipo de transporte	Distancia recorrida	Unidad	Cantidad con respecto a la unidad funcional	Unidad	Tráfico de carga	Unidad	Trayecto
Transporte de madera		km		kg/1 m A		tkm	Chiquinquira-Mina
Transporte de arena		km		kg/1 m A		tkm	Maripí-Mina
Transporte de dinamita		km		kg/1 m A		tkm	Bogotá-Mina
Transporte de cemento		km		kg/1 m A		tkm	Chiquinquira-Mina

Fuente: Elaborado por autor

ii. Datos de fondo

Las bases de datos de SimaPro 8 contienen librerías, proyectos y datos generales, estos permiten complementar los datos de primer plano del sistema en estudio y tener un CV más robusto. Estas bases de datos se definen de acuerdo con el objetivo y alcance del estudio de CV.

Entre las principales bases de datos se encuentra Ecoinvent V3, la cual contiene cerca de 10.000 procesos que van desde los sectores de energía, transporte, materiales de construcción, productos químicos, productos de lavado, papel y cartón, la agricultura y la gestión de residuos.

- *EICV en SimaPro 8*

SimaPro incluye además varios métodos de evaluación de impacto reconocidos. Todos utilizan el procedimiento de caracterización por el cual se calcula la contribución relativa de una sustancia a una categoría de impacto determinada. Algunos métodos también utilizan otros procedimientos como la evaluación de daño, la normalización o la ponderación. Entre los métodos más comunes se encuentran Eco-indicador 99, IMPACT 2002+, CML - IA Baseline, entre otros, disponibles para utilizarlos dependiendo del objetivo del estudio.

Una vez seleccionado el método para la EICV, se cumplen por omisión los dos primeros elementos obligatorios de la norma (ISO 14044:2006), es decir, la selección de las categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización y la asignación de los resultados del ICV a las respectivas categorías de impacto seleccionadas.

Para el desarrollo del criterio de caracterización se emplean las herramientas de cálculo presentes en el software. Aquí se pueden observar los resultados en redes o árboles de procesos, gráficos y tablas, los cuales arrojan la información según el método para la EICV por el que se hay optado (Hernández & Duque, 2014).

- *Interpretación del ciclo de vida en SimaPro 8*

De acuerdo con la norma ISO 14040 esta etapa comprende tres partes:

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

Finalmente, a partir del análisis de los puntos críticos obtenido en el estudio de ACV se realizará una propuesta técnica para la mitigación de estos.

6. Resultados

Para el cumplimiento del primer objetivo específico se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica y se realizaron dos visitas técnicas, la primera con el fin de identificar las necesidades de la empresa y la segunda para la recolección de información primaria, esto se documentó en un informe de visita técnica. De igual manera se tuvo acceso a la información suministrada por la empresa objeto de estudio, con la cual se caracterizó el CV en la explotación de una mina subterránea de esmeraldas. Así mismo se indago sobre el CV de la esmeralda colombiana (Anexo 10). Este consta de cuatro eslabones principalmente, la recepción de materias primas, el montaje y explotación en mina, comercialización nacional e internacional junto con los procesos de tallado y tratamiento de la esmeralda y finalmente la fase de uso de la esmeralda y el cierre de la operación minera en frentes explotados.

6.1. Caracterización del proceso de explotación de la mina de esmeraldas

En la figura 7, se puede observar el CV completo del proceso de explotación de la mina de esmeraldas, donde es representada por la característica fundamental de una mina subterránea discontinua.

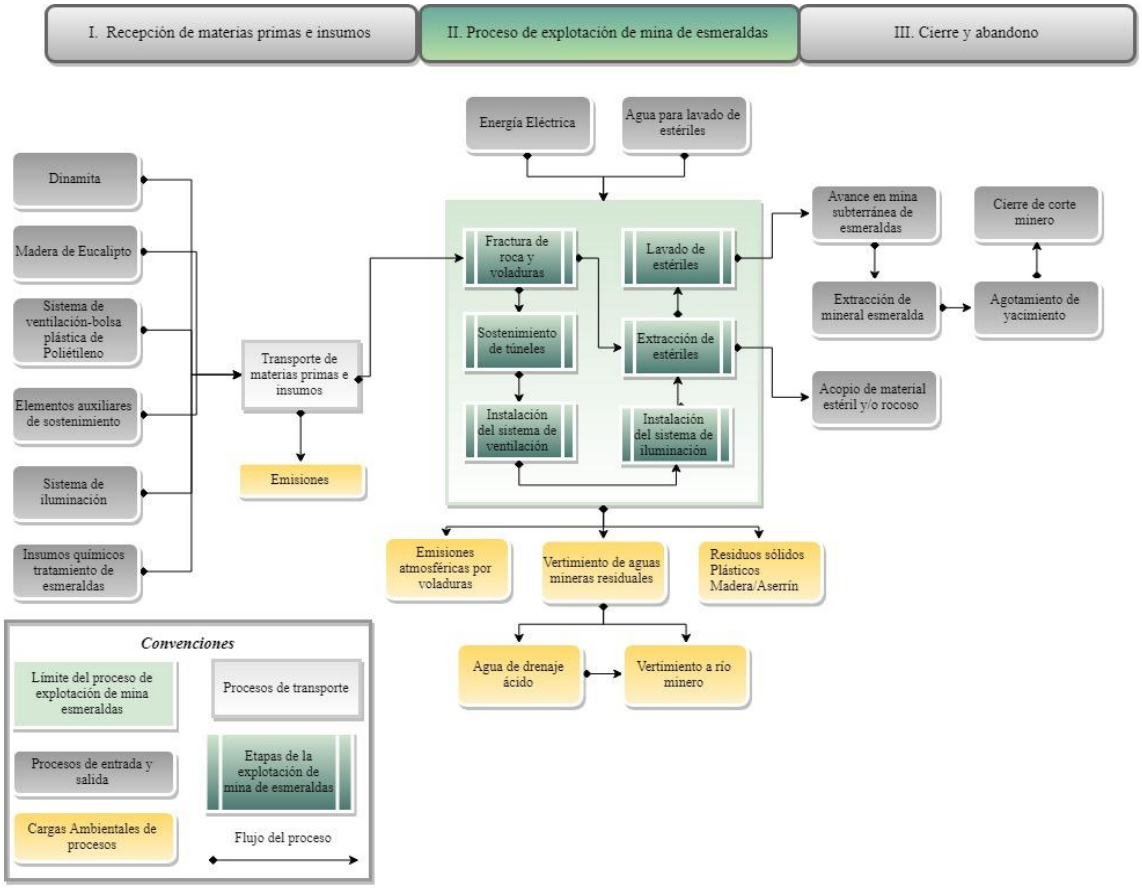


Figura 7. *Diagrama del proceso de explotación de la mina de esmeraldas*

Fuente: Autor

Como se muestra en la figura 7, el ciclo de vida del proceso de explotación en la empresa caso de estudio, se divide en 3 fases, recepción de materias primas, proceso de explotación y cierre y abandono, así mismo se puede observar los flujos de relación de los procesos, donde se evidencia que las etapas del proceso de explotación se realiza de manera lineal con excepción de extracción de estériles, el cual se realiza de manera simultánea con el sostenimiento de túneles. Asimismo, se puede observar que hay 6 insumos representativos para llevar a cabo los subprocesos dentro de la explotación de esmeraldas. Sin embargo, para una compresión completa de esta actividad, a continuación, se relata de manera descriptiva el funcionamiento de la mina.

En esta mina utiliza para el arranque del material medios mecánicos como martillos neumáticos y eléctricos o explosivos; el material rocoso previamente fracturado se carga en canecas con palas y es sacado del pozo mediante una pluma con motorreductor, aquí se voltea a una vagoneta y se acumula en el sitio asignado como patio de estériles, donde se forma una escombrera por vertimiento libre; con el tiempo este material es arrastrado o es recogido en volquetas para reparar sectores de los accesos externos que requieren mantenimiento (Anexo 11 para ver lista de maquinaria) .

Una vez hallado el mineral esmeralda, se extrae la piedra rompiendo la veta, si es dura, con el

empleo de un rompedor eléctrico o con un pico y/o una puñaleta en el caso que el mineral se encuentre en una veta blanda o en una zona de brecha. Una vez se explota, totalmente una zona productiva se continua con la explotación por medio de la construcción de cruzadas en búsqueda del mineral esmeralda; encontrado el mineral esmeralda se continua con galerías, pozos y/o tambores, según sean las condiciones presentes de la mineralización, hasta lograr la explotación total del sector; una vez esto, se avanza con cruzadas o galerías en el mismo nivel o a diferentes niveles en la búsqueda y extracción de la piedra. Sin embargo, el uso de materiales depende de las condiciones geológicas de la zona en la cual se esté laborando y de características como la dureza del material (Anexo 12 para ver imagines de la empresa).

Avance en túneles y pozo

Conforme se va avanzando en los túneles o pozos se hace necesario el sostenimiento de estos. Sin embargo, esto depende de las características que presente la zona, es decir si es de consistencia dura no es necesario el empleo de tablones de madera para el caso de los túneles. Para dicha labor se emplea madera de eucalipto proveniente del municipio de Simijaca, Boyacá.

Las cruzadas o galerías se sostienen con madera de eucalipto, así mismo se reviste en concreto algunas partes de los túneles. Las dimensiones de los planchones que se usan para sostenimiento horizontal son 5cm de espesor por 15cm de ancho y 220cm de largo. Las dimensiones de las columnas para sostenimiento vertical son de 15cm de espesor por 15cm de ancho y 220cm de largo. Estas son cortadas de acuerdo con las necesidades del frente de trabajo. Durante el año 2016 la empresa utilizó 3120 unidades de planchones y 1680 unidades de columna.

Para el avance de explotación se hace el uso de barras de dinamita. El consumo es ante la brigada designada por la Industria Militar Colombiana (INDUMIL), se solicita por kilos. Sin embargo, la distribución dentro de Mina Real para los cortes se realiza en unidades, donde una caja contiene 25 Kilos; la mecha de seguridad se solicita por rollos o bobinas y el detonador común N°8, se solicita por cajas de 100 unidades. El consumo promedio al mes de dinamita en la empresa en estudio es de aproximadamente 50-65 cajas.

6.2.Definición del objetivo y Alcance para el ACV de la esmeralda

6.2.1. Objetivo

El objetivo del presente estudio es evaluar los impactos ambientales generados en la explotación de la empresa de esmeraldas ubicada en el distrito minero Muzo en el cinturón esmeraldero del occidente de Boyacá. A partir de este estudio se determinarán los puntos críticos de esta actividad minera. Con base en los resultados del estudio se busca generar estrategias desde la gestión ambiental para mejorar el desempeño ambiental en la empresa de esmeraldas caso de estudio, ser una guía para el resto del sector esmeraldero. La divulgación de los resultados del estudio se realizará en el ámbito académico de la Universidad El Bosque y la empresa objeto de estudio, con el fin de que esta tenga insumos para su planeación estratégica de los próximos 5 años.

6.2.2. Alcance

Siguiendo la metodología de ACV NTC ISO 14040, la unidad funcional para este estudio es un metro de avance en mina con las características geológicas del cinturón esmeraldero occidental, el cual está asociado a formaciones específicas del Cretáceo Inferior. El yacimiento de la empresa pertenece a la Formación Muzo que cuenta con tres unidades litológicas, estas son Lutitas arcillosas o arcillolitas, Lutitas carbonosas y Lutitas carbonosas calcáreas.

La explotación de esmeraldas a diferencia de la minería de carbón u oro presenta altos niveles de incertidumbre debido a que los estudios para determinar la localización de los depósitos no son precisos. Por lo anterior, un metro de avance en mina es la unidad que permite establecer las relaciones entre el balance de masas y energía con menor grado de incertidumbre para esta actividad minera.

De igual manera se tratará la información del año 2016 ya que es el último registro de información del que se dispone, esto se debe a que los registros más recientes no están completos y en los años anteriores al 2016 la empresa se encontraba realizando actividades de montaje y constitución legal.

Para la delimitación de este sistema, se contempló la etapa de obtención de materias primas, así como la etapa de explotación de la esmeralda, el cuál abarca procesos unitarios como: el sostenimiento de túneles, voladura de roca, lavado de estériles, instalación del sistema de ventilación e iluminación.

Por otro lado, se resalta que los datos para el desarrollo del ICV se recopilaron por medio de visitas técnicas a la empresa en los formatos establecidos por Mary Ann Curran, 2012 y que, dentro de las principales limitaciones encontradas para este estudio, está la obtención de la información y su verificación, puesto que la misma está sujeta al conocimiento de los empresarios, administradores de la mina y a los registros que lleva la empresa.

6.3.Inventario de ciclo de vida

Para el desarrollo del ICV se consideraron las entradas y salidas de cada proceso unitario establecido dentro de los límites del sistema, donde se manejaron datos de primer plano y datos de fondo.

6.3.1. Datos de primer plano

Estos datos constituyen la información específica requerida para consolidar el sistema y facilitar su descripción. En este sentido, fueron recopilados en los formatos descritos en el apartado de metodología, así como las hojas de cálculo para el balance de masa y energía de cada proceso unitario delimitado en el sistema.

- Factor de conversión con respecto a la unidad funcional

En la tabla siguiente, se presenta el factor de conversión para este estudio, con base a la plantilla presentada en la tabla 3 y a la ecuación 1.

Tabla 5. *Factor de conversión*

	Valor	Unidad
Equivalencia	1	Jornada de explotación (JE)
	2	Metros de avance (mA)
Factor de conversión	0,500	JE/m A

Fuente: Elaborado por autor

De acuerdo con el factor de conversión señalado en la tabla 5, a continuación, se muestra desde la tabla 6 a la13, las hojas de cálculo desarrolladas para cada proceso unitario, en estas hojas se muestra la cantidad de las materias primas y energía normalizadas por la unidad funcional establecida.

Tabla 6. Fracturamiento de roca

	Cantidad	Unidad	Factor de conversión	Unidad	Cantidad con respecto a la unidad funcional	Unidad	Observaciones
Entradas							
Dinamita	10	kg/JE	0,500	JE/ m A	5	kg/ 1 m A	Una caja de 100 unidades de barras de dinamita pesa 25 kilogramos.
Energía Eléctrica	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	La energía eléctrica se cuantificará para el procreso completo
Salidas							
Estériles	7020	kg/ JE	0,500	JE/ m A	3510	kg/ 1 m A	Según la empresa, se extraen 5,2 metros cúbicos de material rocoso por JE, con un peso aproximado de 1350 kg por metro cúbico
Emisiones	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	Para el cálculo de las emisiones se requiere de un estudio isocinético, sin embargo se determinará una aproximación con el software SimaPro

Fuente: Elaborado por autor

- Proceso unitario lavado de estériles

Tabla 7. *Lavado de materiales estériles*

	Cantidad	Unidad	Factor de conversión	Unidad	Cantidad con respecto a la unidad funcional	Unidad	Observaciones
Entradas							
Agua	1440	L H2O/JE	0,500	JE/ m A	720	L/ 1 m A	El valor de agua por jornada de explotación se obtuvó a partir del consumo promedio por hora 90L/h multiplicado por las horas que dura la JE, es decir 16 horas
Salidas							
Pérdidas de agua	1440	L H2O/JE	0,500	JE/ m A	720	L/ 1 m A	La cantidad de agua utilizada en el proceso de lavado de estériles es igual a la cantidad de agua vertida

Fuente: Elaborado por autor

- Proceso unitario sostenimiento de túneles

Tabla 8. *Sostenimiento de túneles*

	Cantidad	Unidad	Factor de conversión	Unidad	Cantidad con respecto a la unidad funcional	Unidad	Observaciones
Entradas							
Bultos cemento Argos de 50 kg	31,15	kg/JE	0,500	JE/ m A	15,58	kg/ 1 m A	
Arena	111,48	kg/JE	0,500	JE/ m A	55,74	kg/ 1 m A	Un metro cubico de arena seca pesa 1600 kg/m3 al multiplicar por 17 m3 da 27200 kg
Tornillo y puntilla de acero	0,87	kg/JE	0,500	JE/ m A	0,44	kg/ 1 m A	
Varilla	0,91	kg/JE	0,500	JE/ m A	0,45	kg/ 1 m A	
Planchones de madera de eucalipto	2,98	m3/JE	0,500	JE/ m A	1,49	m3/ 1 m A	Cada unidad tiene un volumen de 0,24 m3 (0,20m*0,40m*3m)(empresa Maderas del Altiplano)
Salidas							
Empaques de cemento	0,15	kg/JE	0,500	JE/ m A	0,075	kg/ 1 m A	Una bolsa de cemento pesa aproximadamente 250 gramos
Sobrantes de madera y aserrín	12	kg/JE	0,500	JE/ m A	6	kg/ 1 m A	Según la empresa se desperdician 12 kg de madera por JE

Fuente: Elaborado por autor

- Proceso unitario instalación de sistema de ventilación

Tabla 9. *Instalación del Sistema de ventilación*

	Cantidad	Unidad	Factor de conversión	Unidad	Cantidad con respecto a la unidad funcional	Unidad	Observaciones
Entradas							
Mangas de ventilación-ductos de Polietileno	1,00	kg/JE	0,500	JE/ m A	0,50	kg/ 1 m A	Cada rollo de pesa 25 kg y mide 200 metros, el peso de 1952 m equivale 244 kg.
Salidas							
Residuos plásticos	0,75	kg/JE	0,500	JE/ m A	0,375	kg/ 1 m A	El mantenimiento de los ductos de ventilación se realiza tres veces al año, es decir al año se generan tres veces residuos plásticos

Fuente: Elaborado por autor

- Proceso unitario instalación del sistema de iluminación

Tabla 10. *Instalación del Sistema de iluminación*

	Cantidad	Unidad	Factor de conversión	Unidad	Cantidad con respecto a la unidad funcional	Unidad	Observaciones
Entradas							
Cableado	0,65	kg/JE	0,500	JE/ m A	0,325	kg/ 1 m A	
Bombillo incandescente	0,36	kg/JE	0,500	JE/ m A	0,18	kg/ 1 m A	
Salidas							
Residuos bombillas	0,23	kg/JE	0,500	JE/ m A	0,12	kg/ 1 m A	

Fuente: Elaborado por autor

- Energía termoeléctrica

Tabla 11. *Energía termoeléctrica*

	Cantidad	Unidad	Factor de conversión	Unidad	Cantidad con respecto a la unidad funcional	Unidad	Observaciones
Entradas							
Gasolina	63,12	MJ/JE	0,500	JE/ m A	31,56	MJ/1 m A	La energia de la gasolina es de 34,78 MJ/L al multiplicar los litros por este valor se obtiene 15400 MJ/L
DIESEL	31,18	MJ/JE	0,500	JE/ m A	15,59	MJ/1 m A	La energia deL Diesel es de 38,65 MJ/L al multiplicar los Litros por este valor se obtiene 7607,1 MJ/L
Aceite motor	0,08	kg/JE	0,500	JE/ m A	0,04	kg/1 m A	
Salidas							
Pérdidas	0,25	L/JE	0,500	JE/ m A	0,125	L/1 m A	Las pérdidas se generan en la manipulación de los insumos

Fuente: Elaborado por autor

- Energía eléctrica

Tabla 12. *Energía eléctrica*

	Cantidad	Unidad	Factor de conversión	Unidad	Cantidad con respecto a la unidad funcional	Unidad	Observaciones
Entradas							
Energía Eléctrica	9,09	kWh/JE	0,500	JE/ m A	4,55	kWh/1 m A	El consumo de energía eléctrica promedio se obtuvó de las facturas de energía de la empresa
Salidas							
Pérdida de energía	NA	kWh/JE	0,500	JE/ m A	NA	kWh/1 m A	No se tiene cuantificación

Fuente: Elaborado por autor

- Proceso unitario transporte de materias primas

Tabla 13. *Transporte de materias primas*

Tipo de transporte	Distancia recorrida	Unidad	Cantidad con respecto a la unidad funcional	Unidad	Tráfico de carga	Unidad	Trayecto
Transporte de madera	88,5	km	140,590	kg/1 m A	12,4	tkm	Chiquinquira-Mina
Transporte de arena	43,3	km	55,74	kg/1 m A	2,41	tkm	Maripí-Mina
Transporte de dinamita	202	km	5	kg/1 m A	1,0	tkm	Bogotá-Mina
Transporte de cemento	88,5	km	15,58	kg/1 m A	1,4	tkm	Chiquinquira-Mina

Fuente: Elaborado por autor

6.3.2. Datos de fondo

Los datos de fondo se obtienen a través de la herramienta SimaPro 8.4, los cuales son asociados con los procesos de material, energía y transporte. En la realización de esta etapa, se utilizó la base de datos Ecoinvent 3, Agri-footprint y USLC, donde se referenciaron 1, 35 y 1 productos respectivamente al proceso de esta investigación (tabla 14).

Tabla 14. *Librerías y productos referentes al proceso*

Librería	Productos referentes al proceso
Agri-footprint- gross energy allocation	1
Ecoinvent 3 - Allocation, Recycled content – U.	35
USLCI	1

Fuente: Autor con base a información proporcionada por SimaPro

De la librería Ecoinvent 3, se seleccionó el nuevo modelo sistemático "Ecoinvent 3 - Allocation, Recycled content – Unit" (EARU), el cual utiliza la misma base datos de "Ecoinvent 3 - Allocation, Default content – Unit" (EADU) que de la misma forma permiten revisar los detalles de los datos del

proceso y las diferentes metodologías. Estos difieren en que en la producción primaria de materiales de EARY, siempre se asigna al primer usuario de un material. Si un material se recicla, el productor primario no recibe ningún crédito por materiales reciclables. Como consecuencia, los materiales reciclables están disponibles sin carga para los procesos de reciclaje, y los materiales secundarios - reciclados solo soportan los impactos de los procesos de reciclaje (PRé Consultants, 2014). De esta librería se vincularon 35 proceso de los 9870 que contiene (tabla 14).

Así mismo, se seleccionó la librería "Agri-footprint- gross energy allocation", el cual vincula los inventarios de proceso unitarios de cultivos, procesamiento de cultivos, sistemas de producción animal, y procesamiento de productos de animales. También, contiene los datos del inventario de transporte, producción de fertilizantes y materiales auxiliares, de esta librería se vinculó un proceso de los 29 que contiene. Este proceso es el de energía obtenida a partir de combustión de diésel, el cual se requiere para el funcionamiento de maquinaria en el proceso de explotación.

Finalmente, la librería USLCI "The U.S. Life Cycle Inventory", cuya base de datos contiene módulos que cuantifican los flujos de materia y energía dentro y fuera del ambiente por procesos unitarios comunes. De esta librería se vinculó un proceso de los 53 disponibles. Este proceso es el de la madera redonda, la cual es introducida en el proceso unitario de montaje y sostenimiento, para visualizar las entradas y salidas de los datos de primer plano y los datos de fondo en el software SimaPro ver anexo 13.

En la tabla 15, se puede observar las modificaciones en los procesos existentes en las librerías para la introducción de los valores del ICV en el software SimaPro, con el fin de generar mayor certeza en la EICV.

Tabla 15. *Procesos de SimaPro modificados respecto a las necesidades del estudio*

Proceso en Simapro	**Proceso modificado**
Explosive, tovex {RoW}| production | Alloc Rec, U	Explosivo indugel
Electricity, high voltage {PE}| production mix | Alloc Rec, U	Electricity, high voltage CO

Fuente: Elaborado por Autor con base en SimaPro 8

Dinamita: Las características químicas de la dinamita empleada en la explotación de la mina son con el principio básico del explosivo ANFO, el cual contiene nitrato de amonio y aceite combustible (Indumil, 2016). Por lo tanto, al proceso explosivo tovex que se encuentra en SimaPro el cual contiene nitrato de Metilamonio, se modificó dejando solo los químicos del ANFO más los procesos de fabricación y transporte.

Electricidad: Con respecto a la energía eléctrica, el software no cuenta con un proceso de electricidad para Colombia, así que se estudió la información de algunos países latinoamericanos y sé escogió el proceso de energía eléctrica de Perú., ya que este presenta un proceso similar al de Colombia con los aspectos de energía hidráulica, fósil y renovables, ambos países no cuentan con la producción de energía nuclear. Con base en la librería Ecoinvent, se obtuvieron las entradas generadas

en el proceso de producción y se localizó el documento empleado para la creación del proceso de energía eléctrica en Perú. Adicionalmente, se investigó el informe anual de generación eléctrica para el año 2017 en Colombia, se encontró que Colombia tiene una energía eléctrica total de 474877 GWh, mientras que Perú 26262 GWh. Sin embargo, la participación por tecnología en la matriz eléctrica de ambas es predominada por las hidroeléctricas y los demás sistemas que participan son parecidos, aunque en sus contribuciones no.

Tabla 16. *Matriz energética de Perú-Colombia*

	Perú		**Colombia**	
	"Generación GWh	Porcentaje	Generación GWh	Porcentaje
Gas	91354	19%	1132.7	4%
Biogas	1978	0.4%	51.2	0%
Agua	230189	48%	23009.6	88%
Carbón	123127	26%	772.9	3%
Viento	18423	4%	1054.1	4%
Rad solar	9805	2%	241.8	1%
Total	474877.0	100%	26262.3	100%

Fuente: Elaborador por Autor tomado de (UPME, 2016)

Igualmente, se expone a continuación los procesos que fueron creados o agregados para los insumos que presentan diferentes características a los existentes en el software o que no se encontraban.

Bombilla: Las características de una bombilla incandescente no fueron encontradas en el software, por lo tanto, se investigó el estudio de ACV en el proceso de producción de la bombilla incandescente. El documento citado es "*Life Cycle Assessment of Incandescent, Fluorescent, Compact Fluorescent and Light Emitting Diode Lamps in an Indian Scenario*", elaborado por Sangwan, Bahkar & Andrat (2014), hace una comparación de cuatro tipos de bombillas: incandescente, fluorescente, fluorescente compacta y diodo. En tal estudio, la unidad funcional se basa en el número de horas de iluminación de cada bombilla. Tomando este estudio como referencia se creó un nuevo proceso en el software, partiendo de los datos de la bombilla incandescente, donde fueron tomadas en cuenta el número de horas por 50 bombillas y se adaptaron los datos del estudio citado a los de una bombilla incandescente con peso de 0.028 kg con el fin de facilitar la introducción de la información obtenida en el inventario de la empresa minera (Anexo 14).

Ocupación área industrial: Para la creación de un proceso de infraestructura minera se requiere introducir la información de la ocupación del área industrial, es decir el área que ocupa la empresa minera y para este caso, el avance de un metro de explotación en túnel se requiere directamente e indirectamente el uso del área de la propiedad de la empresa; la cual, de acuerdo con la información obtenida en las por parte de las directivas de la empresa, este corresponde a 15000 m^2.

Transformación de sitio de extracción minero a explotación minera: Para la valoración de la transformación del sitio, se tuvo en cuenta las medidas del túnel, las cuales son 2,2 m de alto, 1.5 m de ancho y 1 m de avance (profundo), entonces el área de transformación por metro de avance es la correspondiente al resultado de 1.5 m de ancho por el metro de avance, esto es 1.5 m^2 de transformación de avance de extracción minero a explotación minera.

Salidas al agua: Uno de los principales impactos generados en la extracción de minerales son los Drenajes Ácidos de Mina (DAM), que se generan a partir de la oxidación de sulfuros metálicos, especialmente los de hierro como la pirita (FeS_2), en presencia de oxígeno atmosférico y agua. Los drenajes ácidos son efluentes de trabajos mineros que contaminan fuentes hídricas superficiales y cuerpos de agua subterráneos porque presentan valores de pH entre 1,5 y 6, aportando una gran cantidad de acidez debida a la formación de ácido sulfúrico y elevadas concentraciones de metales pesados como el cobre, plomo, arsénico, entre otros; que son solubles a valores de pH bajos. En el caso del proceso de explotación de una mina de esmeraldas se debe remover el material estéril o rocoso de los túneles y se disponen en patios de estériles para procesos de lavado y disposición final (Aduvire, 2006).

Salidas al suelo: La movilización de los metales pesados y la clase de productos de reacción generados está controlada principalmente por la composición geoquímica de los materiales presentes (suelo de mina, estériles de escombreras) y el agua de lavado. Cuando estos drenajes migran desde los puntos de generación e ingresan al medio receptor, aportan una alta carga de metales pesados hacia los cuerpos de agua subterránea, generan sedimentos de color rojo/naranja debido a precipitados de hierro y de sulfatos que ocupan las áreas para el desove de los peces, se introducen entre sus branquias y permean los detritos que sirven como alimento. Por otra parte, la vegetación terrestre que pueda estar en contacto con los drenajes ácidos ya que impide su normal crecimiento (Aduvire, 2006)

6.4.Evaluación de impacto del ciclo de vida en explotación de la mina de esmeralda

En este apartado se muestra los resultados de la EICV en la explotación de la mina de esmeralda obtenidos en la simulación con SimaPro.

Inicialmente se muestra los resultados de la red del proceso, para el sistema analizado con sus respectivas entradas y salidas de acuerdo con el análisis del software SimaPro 8. Donde el valor de corte para nodo es 4% generando así 6 niveles de jerarquía.

Así mismo se presentan las gráficas correspondientes a la caracterización y evaluación del daño, para el CV en explotación de esmeralda de la mina y posteriormente, los resultados asociados únicamente al proceso de explotación, con el objetivo de cuantificar las cargas ambientales por medio del método de evaluación de impacto Ecoinvent 99.

6.4.1. Red del proceso

La red presenta el análisis de gravedad, donde cada proceso aparece solo una vez, y se puede observar cómo se distribuye la carga ambiental a través de la red. Esta, se ve ilustrada a través de flujos de conexión entre procesos.

La red del proceso de explotación en la empresa minera de esmeraldas puede ser observada en la figura 8, está fue extraída con un nivel de corte para nodo es del 4%, en donde se visualizan seis niveles completos de significancia vinculados a 33 procesos de contribución. Este nivel de corte se tomó para identificar los aspectos más destacados en la red del proceso de explotación de la mina. En el primer nivel, los principales procesos que definen el sistema son madera, explosivo indugel, cemento, gasolina, cable, y Diesel con un porcentaje de 29%, 22,5%, 12%, 9,09%, 5,32%, y 4,65% respectivamente.

Igualmente, se puede observar en la figura 8, el proceso madera presenta un grosor notable en la línea roja de flujo la cual corresponde a la magnitud de la carga ambiental para todo el proceso de explotación de la mina, esto quiere decir que este proceso es el más significativo, seguido por explosivo indugel y cemento.

Se puede observar que, en el proceso de la madera, la carga ambiental se deriva de los procesos de combustibles asociados a la operación de la maquinaria empleada para la extracción del recurso. Igualmente, en el flujo del proceso del explosivo indugel, la carga ambiental se deriva de los procesos de producción del nitrato de amonio, el cual es su principal componente. En los niveles inferiores del explosivo indugel se visualiza el proceso de ácido nítrico, esto se debe a que el nitrato de amonio se obtiene por neutralización de ácido nítrico con hidróxido de amonio tras la evaporación del agua.

Con respecto al proceso de cemento, su carga ambiental se deriva de los procesos contribuyentes como el proceso de producción de Clinker, el cual requiere de altos consumos de combustible para la operación del horno rotativo que quema los componentes para su producción, que en este caso es combustible de aceite pesado.

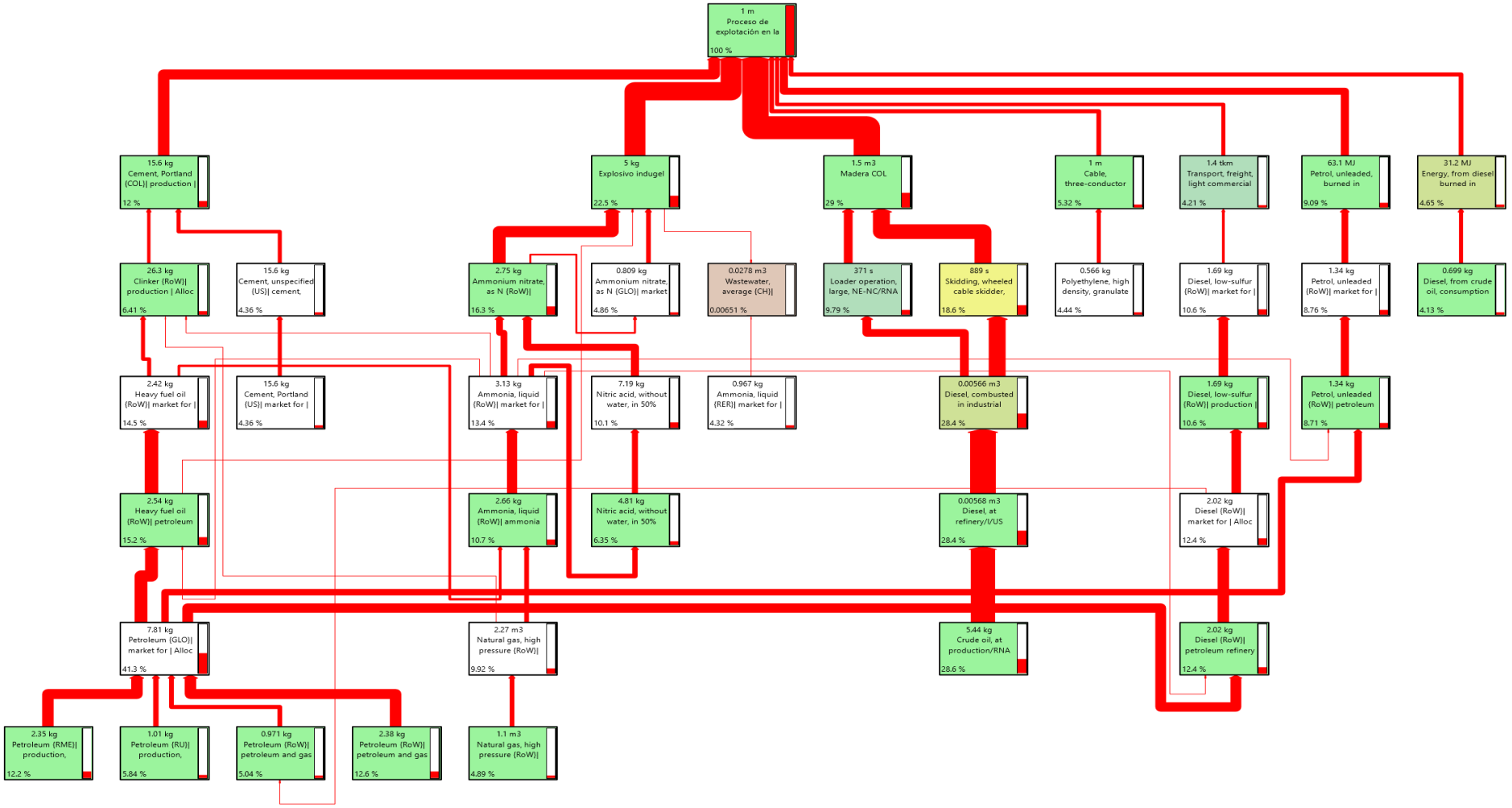


Figura 8. *Red de procesos de la explotación de minería*
Fuente: Elaborador por Autor en el software SimaPro

6.4.2. Evaluación del impacto

En el CV en la explotación de la mina, el proceso de explotación presenta mayor carga ambiental que los procesos de transporte de materias primas. En la gráfica 1, se puede observar que los indicadores de categorías de impacto uso del suelo "Land Acidificación/ Eutroficación "Acidification/ Eutrophication" y Respiración de sustancias inorgánicas presentan un porcentaje casi del 99% sobre el proceso de transporte. En el indicador de categoría de impacto capa de ozono "ozone layer", el proceso de transporte presenta una afectación notoria con respecto a las otras categorías de impacto, el insumo vehículo comercial de carga ligera de explosivos, toma el 5% en esta categoría, sobre 87% de impacto que genera el proceso de explotación. Adicionalmente, se puede observar como varia ligeramente el impacto de este uso de transporte en los indicadores de combustibles fósiles "fosil fuel", radiación "radiation" y cambio climático "climate change".

Lo anteriormente descrito, puede ser observado en las gráficas 1 y 2, la última mencionada muestra tres categorías: daño a la salud humana, calidad de ecosistema y uso de recursos. Calidad de ecosistema contiene el indicador de uso del suelo, sobre el cual la actividad minera causa mayor impacto, este impacto presenta una puntuación alta sobre las otras dos categorías en el proceso de explotación. Por otro lado, gráficas 3 y 4 muestran como la categoría de daño a la calidad de ecosistema persiste, las categorías de salud humana y uso de recursos disminuyen en el proceso de explotación y el impacto del proceso de transporte no se evidencia.

En cuanto a la evaluación del proceso de explotación, y de acuerdo con los resultados del EICV arrojados por el método eco-indicador 99, gráfica 5 pauta que la mayor carga ambiental es por parte el proceso extracción en el indicador de uso del suelo (100%), respiración de sustancias orgánicas (85,7%), acidificación/ eutrofización (58%) e inorgánicas (33,4%).

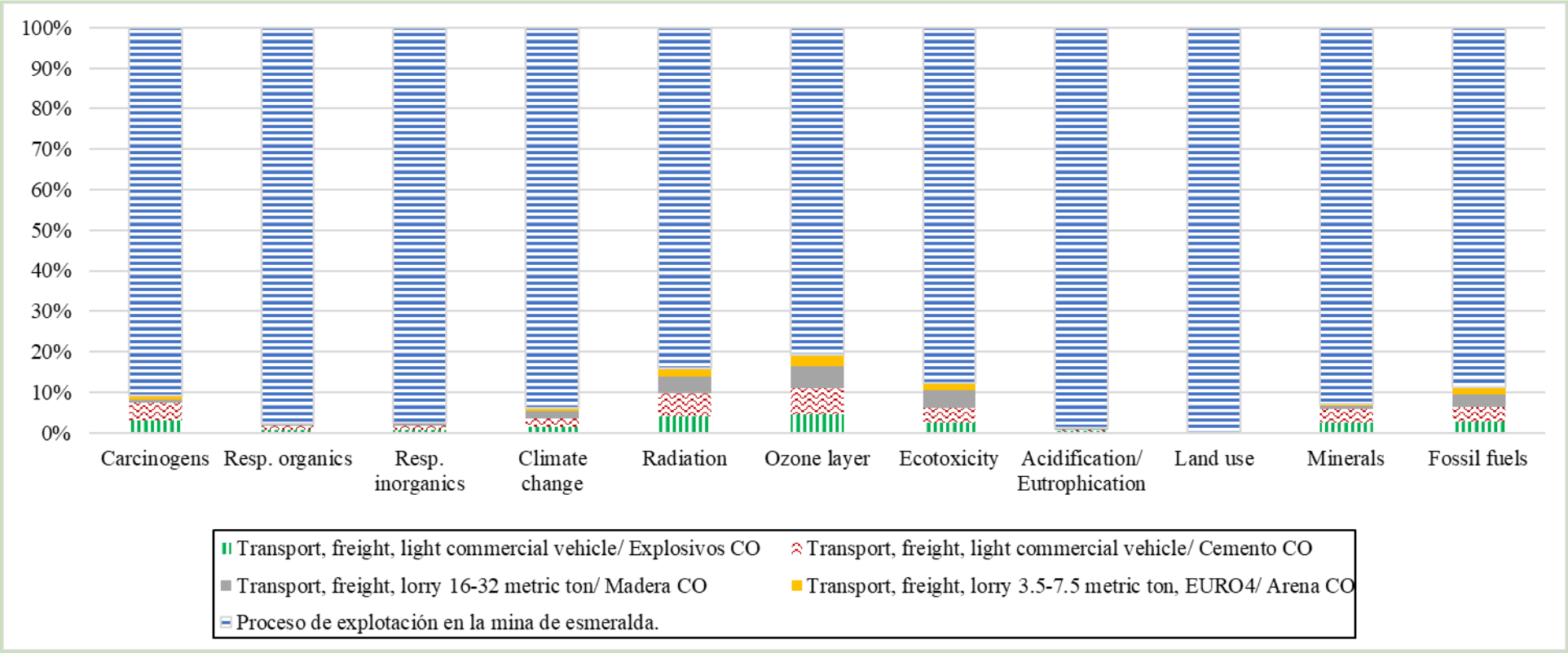
Con respecto a las categorías relacionadas a los demás procesos unitarios, el proceso de voladura de roca es el segundo que genera mayor carga ambiental. Dentro de este proceso, se resalta el proceso asociado al explosivo indugel con un porcentaje del 47.1% en el indicador de capa de ozono, 45,3% en el indicador radiación y 35,1% en el indicador minerales. Para el proceso unitario de sostenimiento de túneles el proceso de cemento aporta el 39,7% en el indicador de cambio climático, 31,2% en el indicador radiación y 30,4% en el indicador capa de ozono. Así mismo, la madera aporta el 36,9% en el indicador de combustibles fósiles, 24,8% en el indicador respiración de sustancias inorgánicas y 23,1% en el indicador de acidificación/ eutrofización. Con relación al proceso unitario instalación del sistema de iluminación el proceso asociado al cableado aporta el 69,1% en el indicador carcinógenos, 57,1% en el indicador minerales y 50,1% en el indicador ecotoxicidad.

La grafica 6 evidencia que, para la categoría de calidad de ecosistema, el proceso de extracción genera el 99,4% de carga ambiental. Así mismo, en la categoría de salud humana el proceso de extracción aporta el 23,4% de carga ambiental, la madera aporta el 19,3%, el explosivo indugel 19,1% y el cemento 15%. En la categoría de recursos, la madera aporta el 35,3% de la carga ambiental, seguido por el explosivo indugel la cual presenta un porcentaje 27,7% y finalmente el cemento con 14,6%.

Finalmente, las gráficas 7 y 8, se observa que el proceso de extracción aporta carga

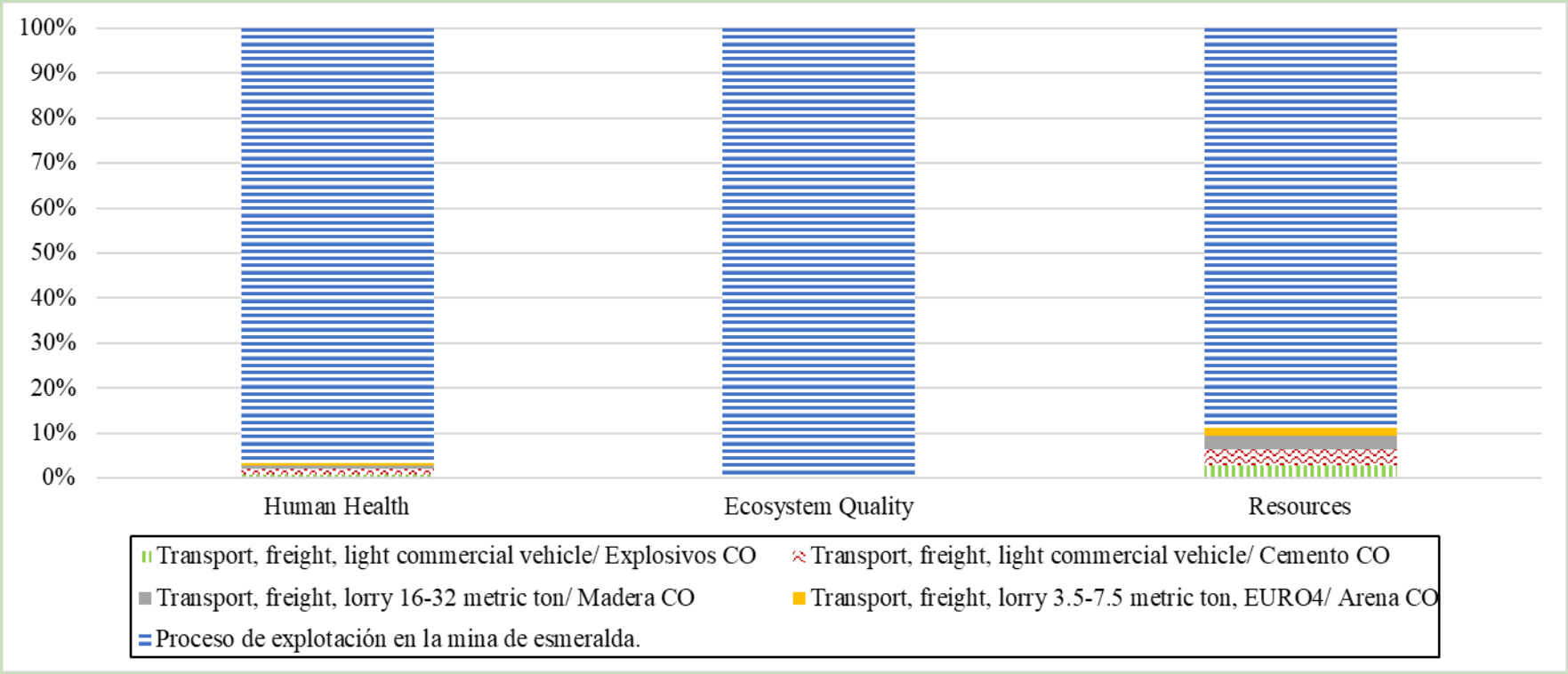
ambiental principalmente la categoría de daño a la calidad de ecosistema y el impacto de los demás procesos es mínima de acuerdo con los resultados de esta gráfica.

Gráfica 1. *Caracterización de la EICV del ciclo de la vida de la explotación de la mina de esmeraldas*



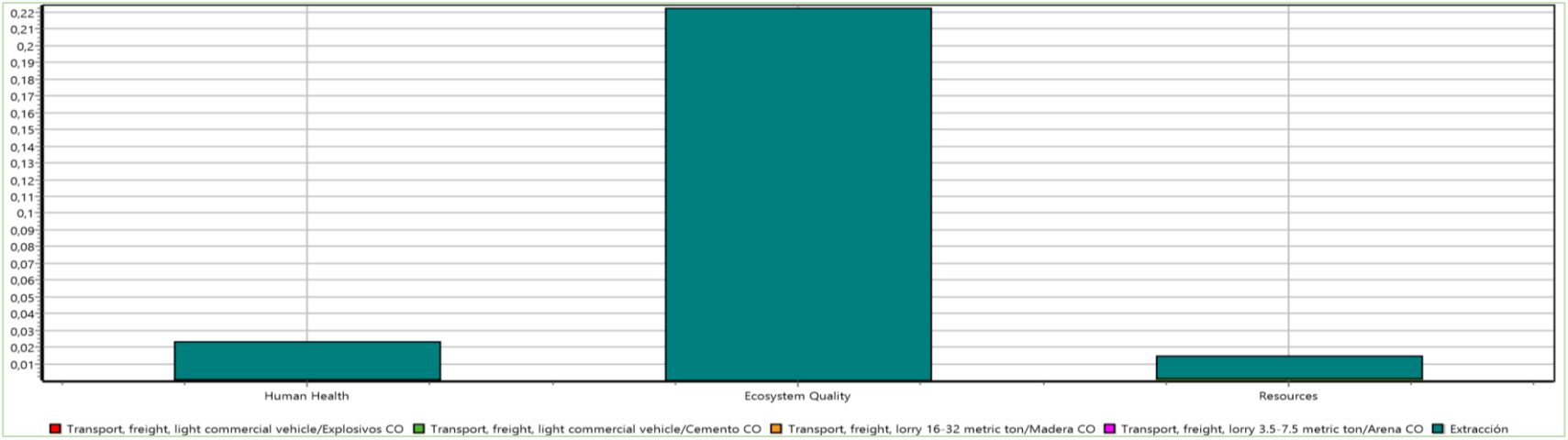
Fuente: Elaborador por Autor en el software SimaPro

Gráfica 2. *Evaluación del daño de la EICV del ciclo de la vida de la explotación de la mina de esmeraldas*

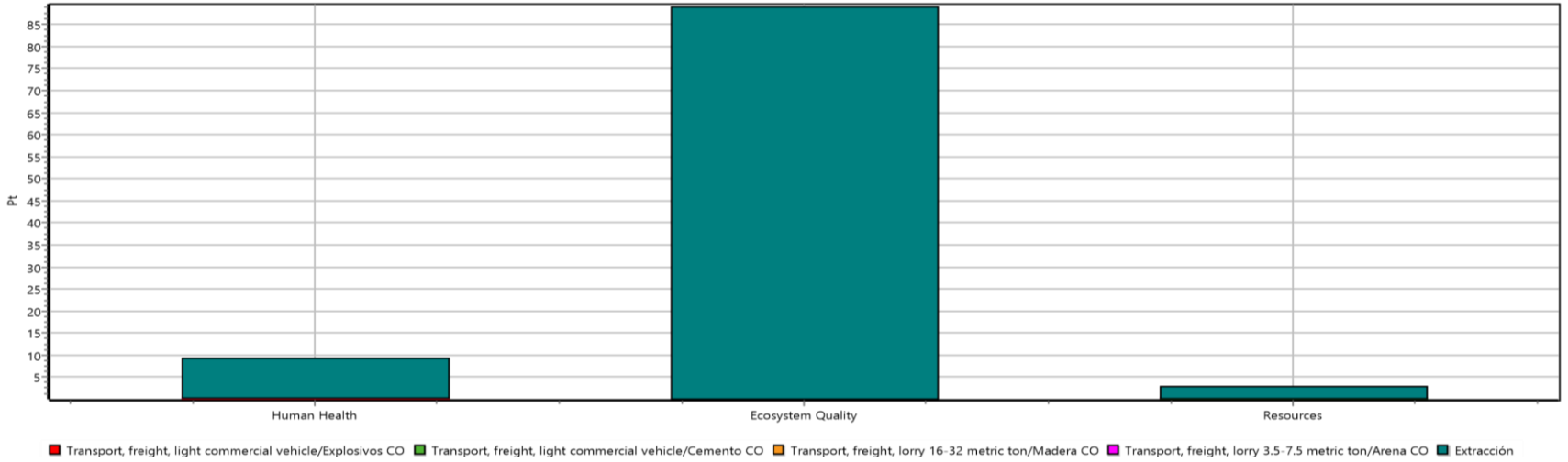


Fuente: Elaborador por Autor en el software SimaPro

Gráfica 3. *Normalización de la EICV del ciclo de la vida de la explotación de la mina de esmeraldas*

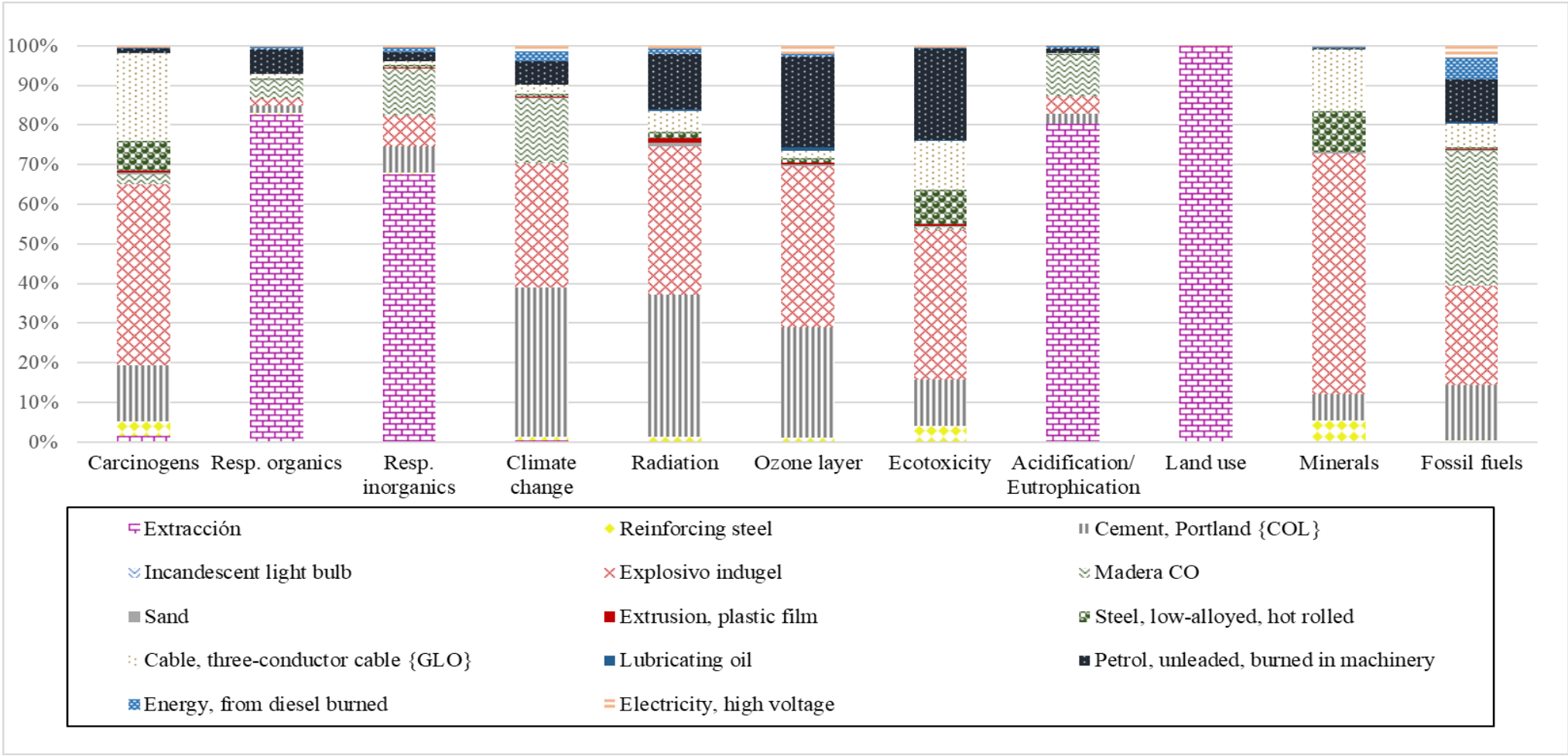


Gráfica 4. *Ponderación de la EICV del ciclo de la vida de la explotación de la mina de esmeraldas*



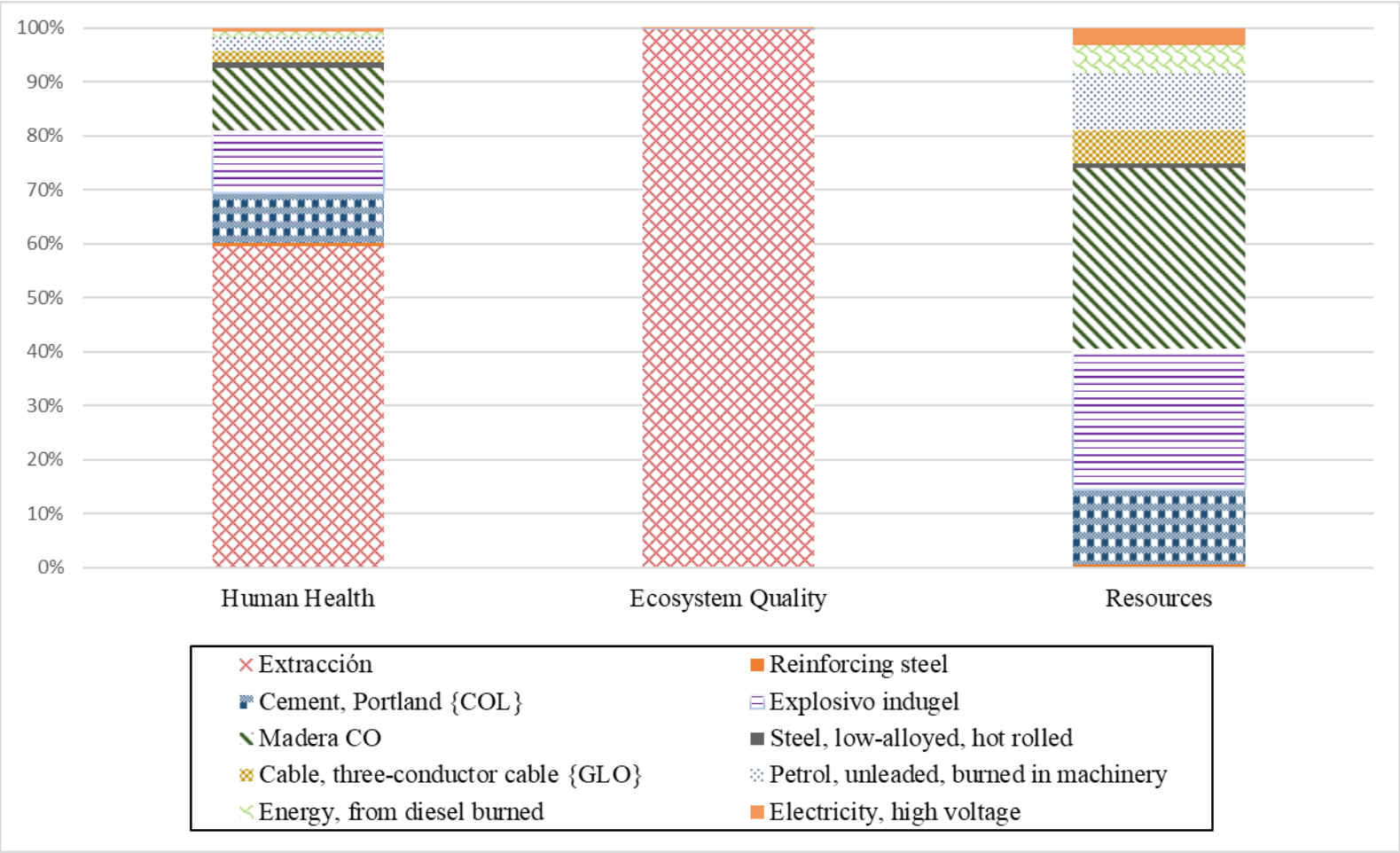
Fuente: Elaborador por Autor en el software SimaPro

Gráfica 5. *Caracterización del proceso de explotación de la mina de esmeralda*



Fuente: Elaborador por Autor en el software SimaPro

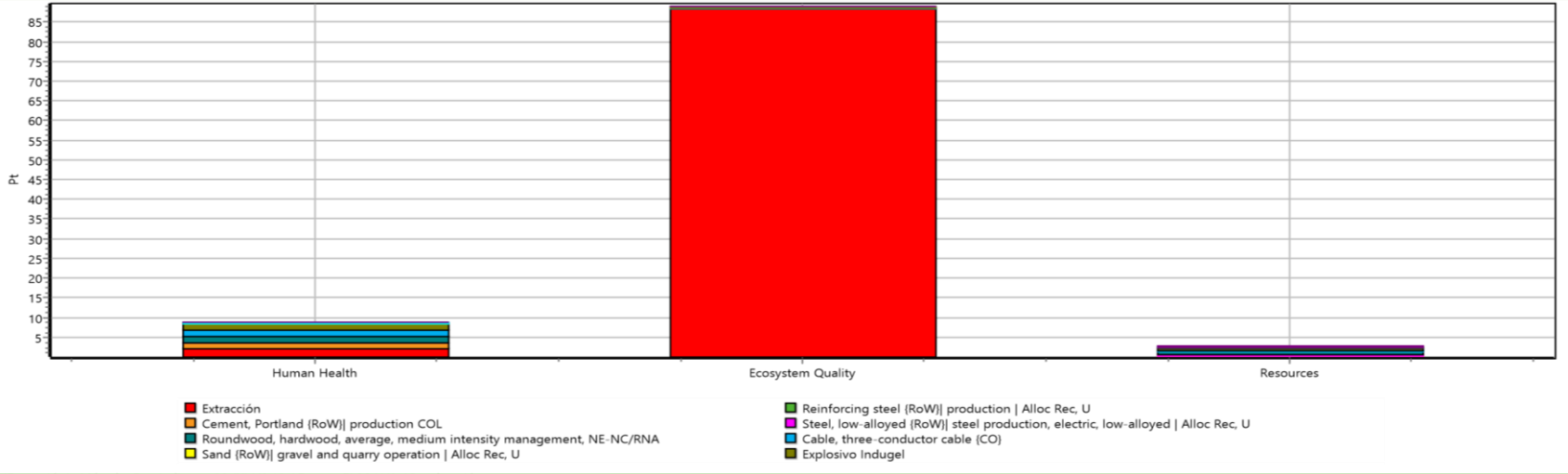
Gráfica 6. *Evaluación del daño del proceso de explotación de la mina de esmeralda*



Fuente: Elaborador por Autor en el software SimaPro

Gráfica 7. Normalización del proceso de explotación de la mina de esmeralda

Gráfica 8. Ponderación del proceso de explotación de la mina de esmeraldas



Fuente: Elaborador por Autor en el software SimaPro

6.5.Interpretación del Ciclo de Vida en la explotación de la mina de Esmeralda

De acuerdo con el desarrollo de la etapa del EICV de la explotación de la mina de esmeraldas, se evidenció que los procesos de transporte no aportan cargas significativas en la evaluación de los indicadores de las categorías de daño, por lo cual se excluyeron con el fin de centrar el análisis de las cargas ambientales sobre el proceso de explotación de la mina de esmeraldas y los diferentes procesos de entrada de materias primas y energía asociados al mismo.

Se clasificaron los flujos de procesos que mayores contribuciones representaron en los indicadores de categoría de impacto, los cuales fueron extracción, explosivo indugel, madera, cemento, gasolina y cableado.

Lo anterior se consolidó en la tabla 17, obtenida de las gráficas de caracterización y que relaciona los procesos de mayor carga ambiental con sus respectivos porcentajes de contribución para cada uno de los indicadores de categorías de impacto.

Tabla 17. *Relación de los procesos con respecto a los indicadores de categorías y su porcentaje*

ıdicadores de categorías	**Procesos**					
	Extrac.	**Cemento**	**Explos. indugel**	**Madera**	**Cableado**	**Gasolina**
Sustancias Carcinógenas	15%	12,8%	41,0%	2,4%	9,8%	0,9%
Respiración de S. O.	80,5%	1,9%	1,8%	4,6%	0,9%	6,1%
Respiración de S. I.	65,6%	6,3%	11,5%	7,6%	1,0%	2,2%
Cambio climático	0,5%	29,1%	35,2%	15,3%	2,0%	5,6%
Radiaciones Ionizantes	-	28,9%	30,3%	-	4,2%	11,2%
Capa de Ozono	-	21,1%	31,0%	-	1,4%	17,4%
Ecotoxicidad	-	9,9%	32,5%	0,6%	10,7%	19,8%
Acidificación / eutrofización	79,4%	2,5%	4,1%	10,4%	0,2%	1,0%
Uso del suelo	100,0%	-	-	-	-	-
Agotamiento de minerales	-	6,0%	56,1%	-	14,2%	0,3%
Agotamiento de combustible fósil	-	12,2%	21,8%	29,6%	5,1%	9,3%

Fuente: Valores obtenidos a partir de la gráfica de caracterización del proceso

de explotación de la esmeralda y adaptado por autor.

6.6. Identificación de los puntos críticos dentro del CV

Para la interpretación de los resultados de cada indicador, se muestran sus respectivas gráficas con las tendencias para cada categoría de daño con sus indicadores de categoría de impacto, además de las cargas ambientales generadas por los principales procesos que inciden sobre el proceso de explotación de la mina de esmeralda.

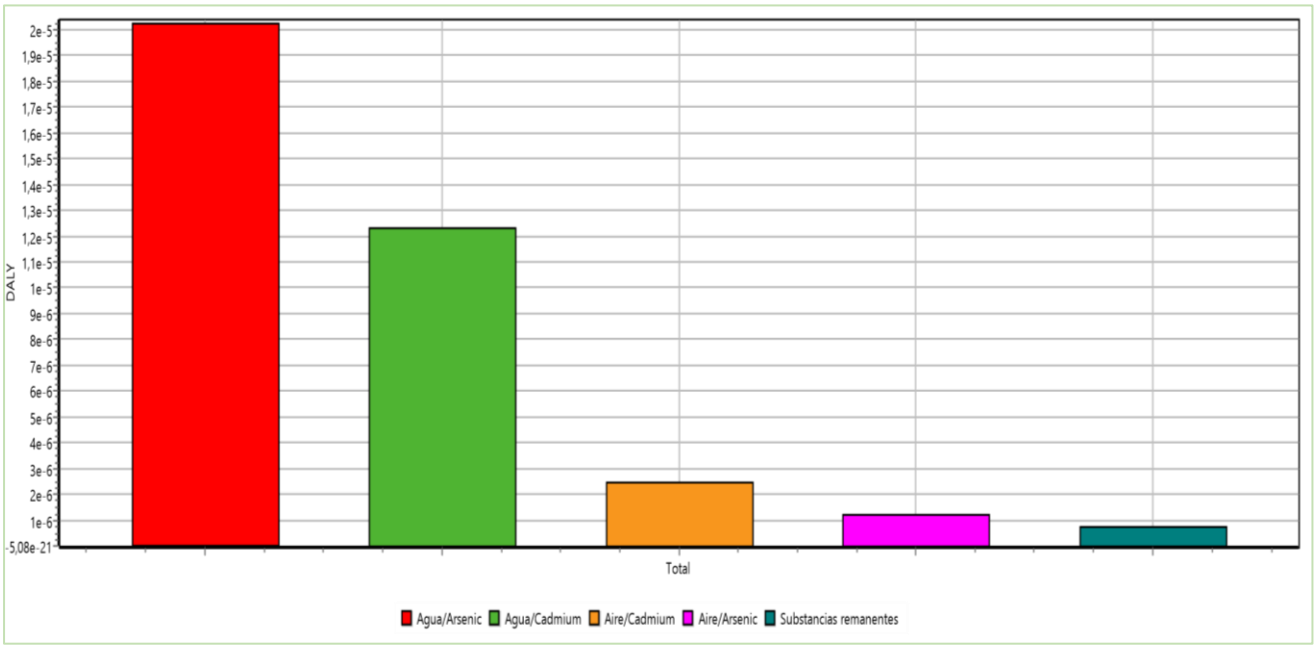
6.6.1. Salud Humana

Sustancias carcinógenas

Para el análisis de este indicador se tiene en cuenta que los procesos asociados a las voladuras para la fractura de roca, así como los subsecuentes procesos de remoción y extracción de material rocoso, dejan expuestos algunos compuestos químicos presentes en la composición estratigráfica del terreno. Para el caso de la mina en estudio, uno de los principales componentes en los yacimientos de esmeralda del distrito Minero Muzo es la Pirita, asociada a la mineralización hidrotermal. En este sulfuro aparecen las mayores concentraciones de arsénico con niveles entre 100 y 77.000 ppm. Al ser removida, la pirita se oxida en presencia de aire y agua, generando soluciones con altas concentraciones de arsénico o cadmio, que son transportadas por aire, suelo o corrientes agua (Lillo, sf) (Bundschuh & Litter, 2008).

Con base en la tabla 17, se observa en la gráfica 9 que el proceso que mayor contribución de sustancias carcinógenas genera es el proceso explosivo indugel con un porcentaje del 41%. De igual manera el arsénico está clasificado en el grupo I de sustancias cancerígenas por el Centro Internacional de Investigaciones sobre el cáncer (en inglés IARC), el cadmio también representa alto riesgo para el desarrollo del cáncer (Londoño, Muñoz, & Londoño, 2016).

***Gráfica 9**. Análisis por sustancias y compartimiento, para la categoría de sustancias carcinógenas*



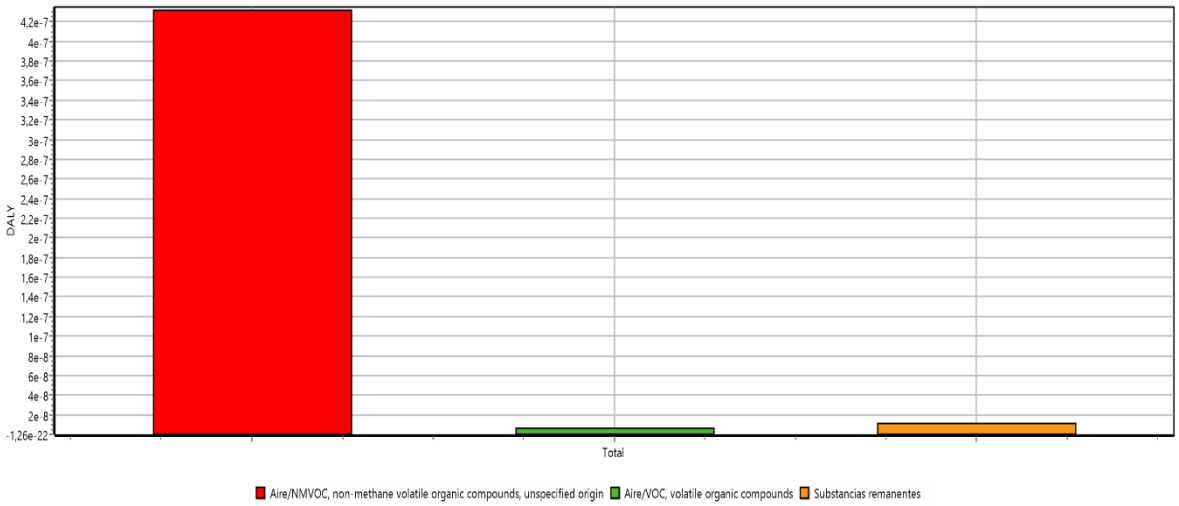
Fuente: Elaborado por Autor en el software SimaPro

Efectos Respiratorios por sustancias orgánicas

De acuerdo con la tabla 17, la mayor contribución para este indicador la genera el proceso asociado a la extracción con un porcentaje del 80,5% y se debe a la presencia de Compuestos Orgánicos Volátiles No Metálicos (en inglés NMVOC). Estos compuestos constituyen la fracción de los compuestos orgánicos volátiles (COV) que contiene sólo carbono e hidrógeno en su composición y constituyen la mayor parte de las emisiones antropogénicas de COV (Novazo, 2003). La minería e industrias extractivas son una de las actividades responsables de los procesos de contaminación por compuestos orgánicos. La cual se genera como consecuencia de la manipulación antropogénica e inadecuada de estas sustancias o productos que las contienen.

Sin embargo, se revisó en la literatura y no se encontró una correlación directa entre el proceso de extracción y la generación de compuestos orgánicos volátiles no metálicos. Por lo tanto, este resultado se puede deber al manejo de los hidrocarburos empleados para el funcionamiento de los equipos y maquinarias en el proceso de explotación de toda la mina.

Gráfica 10. *Análisis por sustancias y compartimiento, para la categoría de sustancias orgánicas*



Fuente: Elaborado por Autor en el software SimaPro

Efectos Respiratorios por sustancias inorgánicas

Durante las operaciones de voladura, extracción, movimiento a escombreras y tratamiento de mineral se produce una alta concentración de partículas en suspensión por acción del viento, movimiento con vehículos pesados y cintas transportadoras (De la Rosa, 2008).

Para el análisis de este indicador, se tiene en cuenta la tabla 17 donde se evidencia que el proceso de extracción es el que mayor contribución tiene frente a este indicador de categoría de impacto con el 65,6%, seguido del proceso asociado al explosivo indugel con el 11,5% y la madera con 7,6%. De igual forma con respecto a la gráfica 11, se deduce que las principales sustancias que se generan son óxidos de nitrógeno,

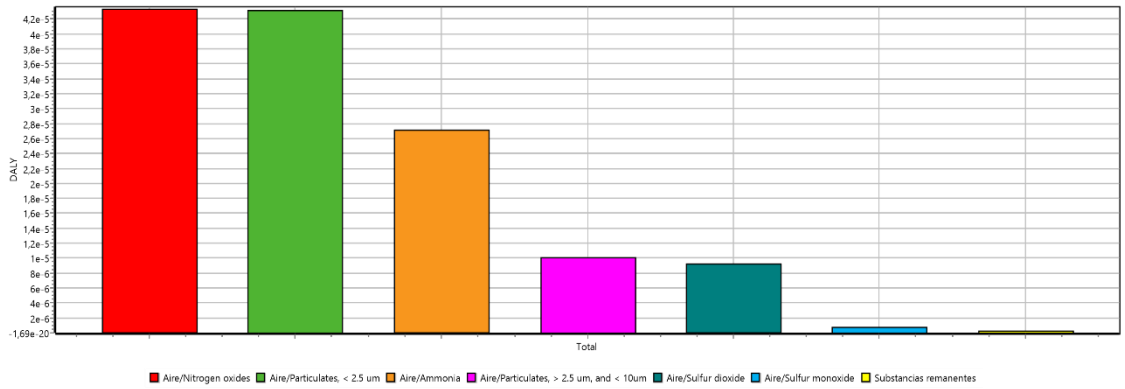
partículas menores a 2,5 μm y amonio.

Debido a la predominancia que representa el proceso de extracción sobre los procesos de explosivo indugel y madera, se asume que este domina sobre la tendencia de la gráfica 11 y estas sustancias se derivan principalmente de este proceso. Como ya se mencionó, en el proceso de extracción se generan reacciones a partir del mineral pirita en contacto el oxígeno y el agua que producen óxidos de nitrógeno, por lo cual esta carga ambiental se atribuye al proceso de extracción.

Sin embargo, las partículas < 2.5 μm y el amonio, también están asociadas al proceso de voladuras realizadas con el explosivo indugel cuyo principal componente es el nitrato de amonio, lo que representa una limitante para atribuir toda esta carga ambiental al proceso de extracción.

De igual manera, los residuos mineros o estériles acumulados en las escombreras pueden ser una fuente principal de material particulado y es susceptible de ser arrastrado largas distancias. Este material tiene un alto potencial de afectación de la salud para los mineros, la población aledaña y la calidad de los ecosistemas (Thornton, 1996).

Gráfica 11. *Análisis por sustancias y compartimiento, para la categoría de sustancias inorgánicas*



Fuente: Elaborado por Autor en el software SimaPro

Cambio climático

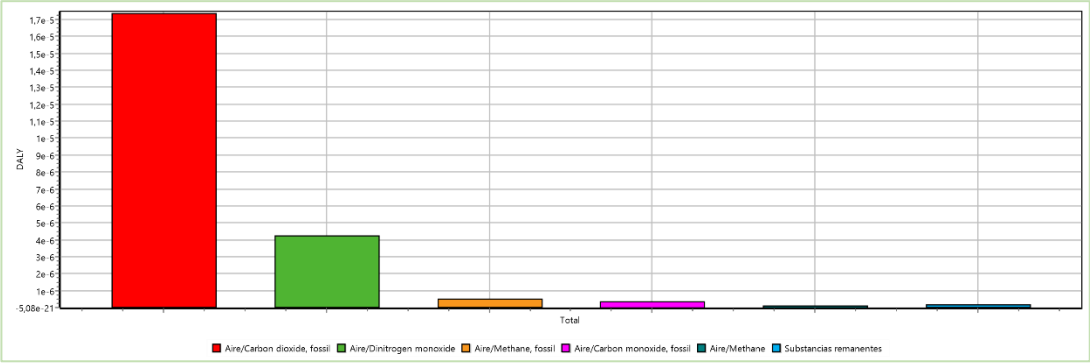
De acuerdo con los valores obtenidos en la tabla 17 se evidencia que los procesos asociados al explosivo indugel con 35,2% y cemento con 29,1% aportan una mayor contribución para la tendencia de la gráfica 12, donde las principales sustancias son el dióxido de carbono y óxidos de nitrógeno. En las voladuras se utiliza el explosivo indugel cuyo componente activo es el ANFO (Ammonium Nitrate + Fuel Oil), compuestos por un 94% aproximadamente de nitrato de amonio que actúa como oxidante y 6 % de gasoil que actúa como combustible. Es de baja densidad y alta absorción de petróleo con un rendimiento óptimo en minería subterránea (Indumil, 2016) (Córdova, 2015).

En las voladuras el uso de explosivos origina gases tóxicos. En este caso, el uso de ANFO produce diversos óxidos de nitrógeno los mismos que aun en bajas concentraciones y sin la adecuada ventilación en la mina pueden causar la muerte en personas, en la figura 9, se muestra el árbol del proceso explosivo indugel, donde se evidencia que el flujo de los procesos asociados a la producción del explosivo como la producción del ácido nítrico para la obtención del nitrato amonio son los que mayor carga representan.

De igual manera, se generan gases por los escapes de motores a diésel, en los estratos que existen dentro de las estructuras rocosas del yacimiento, además de los gases producidos por las personas al exhalar dióxido de carbono (CO_2) en las labores mineras y por los residuos orgánicos en la interior mina como madera y otras sustancias.

Con respecto al cemento Portland, su principal componente es el Clinker cuyos procesos de producción requieren altas cantidades de combustibles para alcanzar y mantener constantes las temperaturas de los hornos rotativos.

Gráfica 12. *Análisis por sustancias y compartimiento, para la categoría de cambio climático*



Fuente: Elaborado por Autor en el software SimaPro

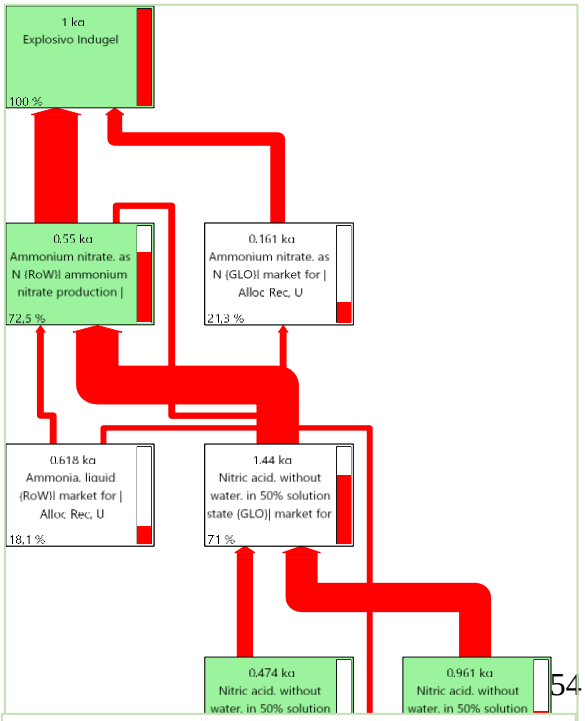


Figura 9. *Árbol de procesos del explosivo indugel asociado al indicador de categoría de impacto cambio climático*

Fuente: Elaborado por Autor en el software SimaPro

Radiaciones ionizantes

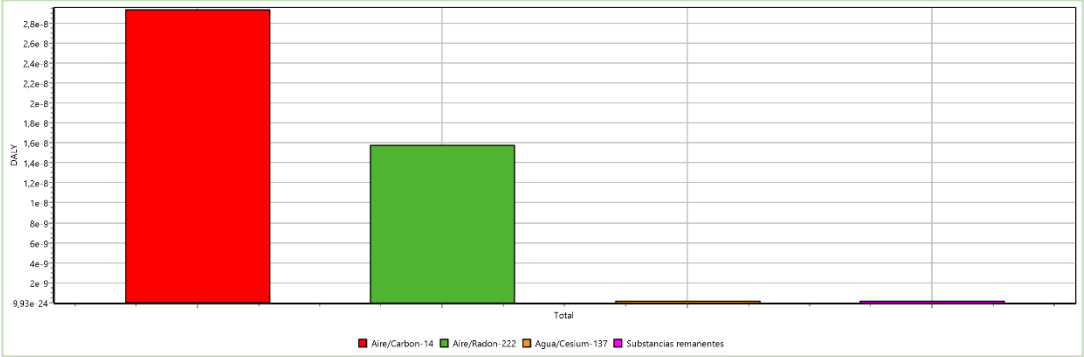
En la tabla 17 se puede observar la relación de los procesos con respecto a los indicadores de categorías, se evidencia que la tendencia en el indicador de categoría de impacto radiaciones ionizantes es atribuida a los procesos de explosivo indugel con 30,3%, cemento con 28,9% y gasolina con 11,2%. De acuerdo con la gráfica de radiaciones ionizantes, las sustancias presentes son el Radón 222 es considerado cancerígeno por la Organización Mundial de la Salud (OMS), de acuerdo con la International Agency for Research on Cancer (IARC) y la Environmental Protection Agency

(EPA) de EE. UU. que lo clasifican como carcinógeno del Grupo 1 y del Grupo A, respectivamente.

En la minería el radón 222, es un gas que emerge del interior de las rocas fracturadas y/o sueltas y por acción de las voladuras con explosivos y liberan emisiones gaseosas con mayor intensidad si la voladura es reciente. Este es inhalado por el trabajador minero en una mezcla compleja de aire + material particulado + gas Radón y otros gases presentes en las labores mineras. Sin la adecuada ventilación su principal efecto adverso derivado de la inhalación de este y de sus productos de desintegración es el riesgo de cáncer de pulmón (Torres, Gozales, & Tapia, 2009).

Por otra parte, con respecto a los procesos de cemento y gasolina y su relación con el carbono 14, se tiene que las principales fuentes antrópicas asociadas a la liberación de radio nucleídos están relacionadas con el área médica, el procesamiento de minerales, la producción de fertilizantes fosfatados y la utilización de combustibles fósiles (OMS, 2016). Por su parte en la producción de cemento se asocia al mantenimiento de hornos de Clinker (Aniés & Perramón, 2017).

***Gráfica 13**. Análisis por sustancias y compartimiento, para la categoría de radiaciones ionizantes*



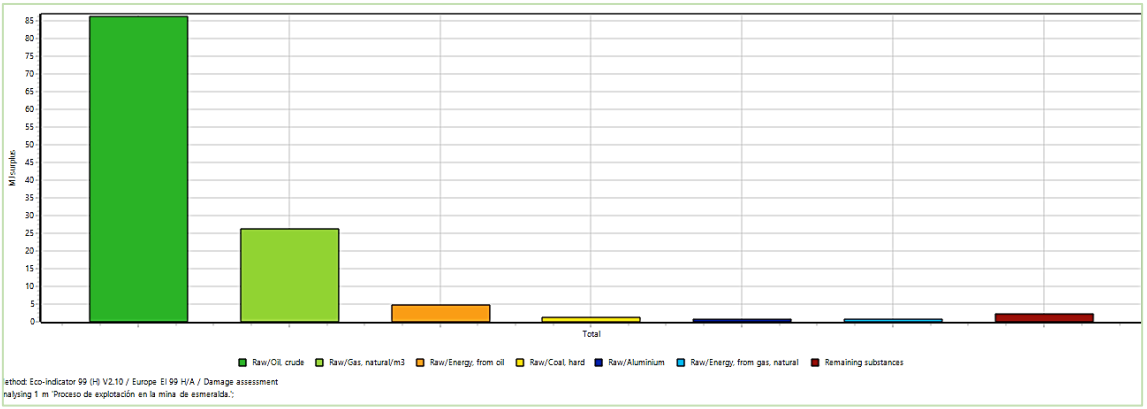
Fuente: Elaborado por Autor en el software SimaPro

6.6.2. Recursos

Este potencial de agotamiento abiótico es representado como los valores caloríficos netos en el punto de extracción de los recursos (PRé Consultants, 2014). Se puede observar en la gráfica 14, que los recursos más empleados son el Diesel y el gas natural. Donde madera aparece con el consumo del 39% de los 86.1 MJ superávit de los valores caloríficos netos en el consumo de Diesel. Para el caso del gas natural, el explosivo ANFO empleado en e l proceso de voladura, se toma el 52.4% de los 26.3

MJ superávit.

Gráfica 14. *Análisis por sustancias y compartimiento, para el impacto recursos*



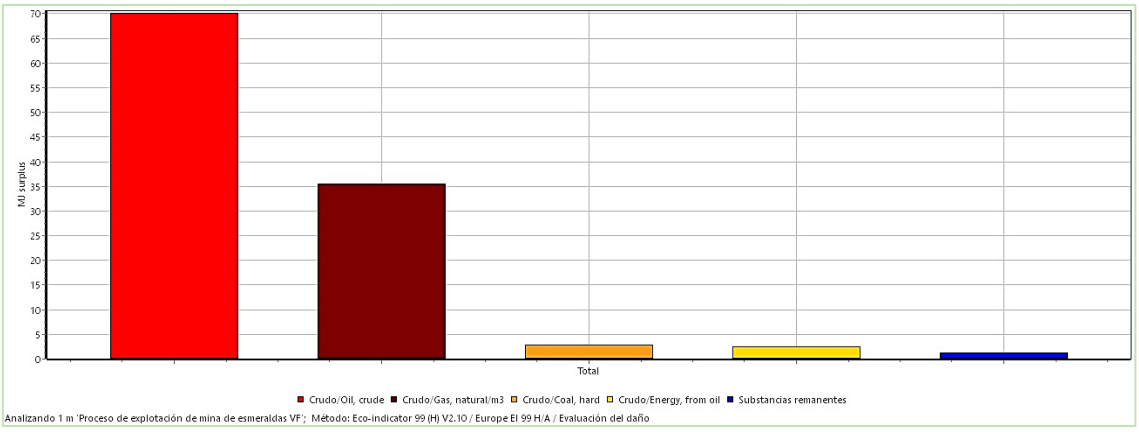
Fuente: Elaborado por Autor en el software SimaPro

Agotamiento de los recursos fósiles

En el CV de explotación de la mina de esmeralda, el aceite crudo, es el recurso fósil que presenta un mayor agotamiento de acuerdo con los valores caloríficos netos presentados en la gráfica 15. El insumo madera aparece con un 39% de carga en este recurso, con un uso del 86.1 MJ superávit; esto se debe a que, en las operaciones de carga se emplea el uso de vehículos de levantamiento y movimiento de cargas pesadas, los cuales requieren grandes consumos de Diesel y lubricantes para el mantenimiento de estos.

Esto se debe, que en Colombia el recurso fósil más empleado es Diesel/ACPM en el área de agropecuaria e industria, el cual de acuerdo con las estadísticas generadas por la (UPME), este aumento el 2.4%, para el 2016. Siendo este un recurso no renovable, el impacto o carga ambiental que presenta este derivado del petróleo es alta sobre otro tipo de combustibles provenientes de fuentes renovables. Como ejemplo se tiene el estudio realizado en Berlín por Silva, et al. (2014), donde el uso de maquinarias para el movimiento de carga pesada para la producción de madera está por debajo del 1% en todos los indicadores de categorías de daño, ya que la maquinaria emplea el uso de etanol.

Gráfica 15. *Análisis para la categoría de agotamiento de los recursos fósiles*



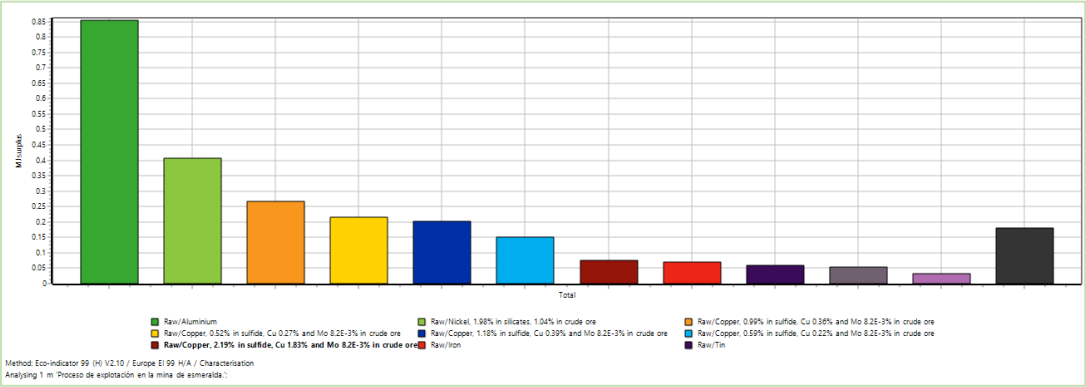
Fuente: Elaborado por Autor en el software SimaPro

Minerales

De acuerdo con la gráfica 16, el mineral más consumido es el aluminio crudo, el cual es a causa del explosivo indugel con un 0.803 MJ superávit, es decir 94 % del consumo total de minerales en el proceso de voladura.

El aluminio es adicionado para la producción del explosivo ANFO, debido a que facilita el desarrollo de una mayor cantidad de trabajo para una misma cantidad de explosivo, pudiéndose entonces aumentar la piedra y el espaciamiento de los esquemas, mientras que se mejora la fragmentación resultante de las voladuras. El ANFO es aluminizado, por la búsqueda de una mejora de la eficiencia de las operaciones y ahorro de costes, ya que se trata de productos de una alta potencia volumétrica y con un precio relativamente bajo (Watanabe, 2013).

Gráfica 16. *Análisis por sustancias y compartimiento, para la categoría de minerales*



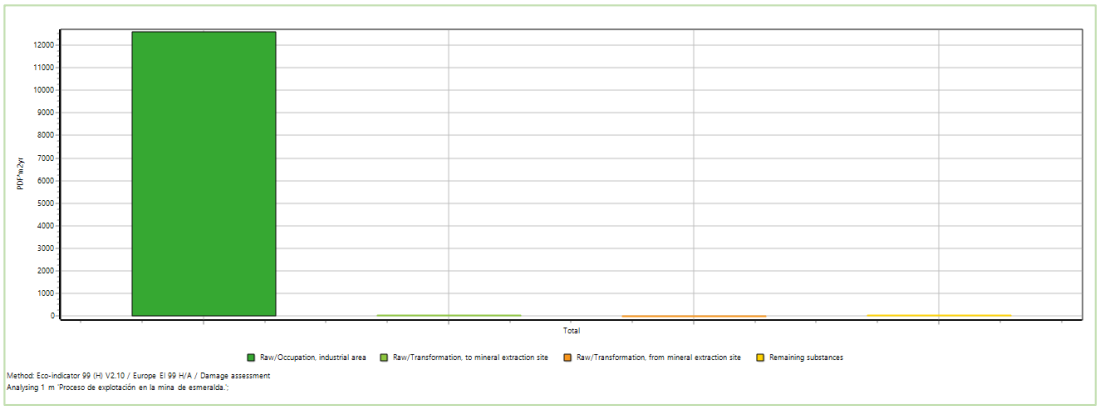
Fuente: Elaborado por Autor en el software SimaPro

6.6.3. Calidad del Ecosistema

Los indicadores de esta categoría están medidos la unida PDF·m^2 yr, el cual representa una fracción de especies desaparecidas en un metro cuadrado de la superficie de la tierra durante un año por causa de la salida con más carga del proceso.

Según la gráfica 17, en la categoría de calidad al ecosistema, los procesos que tienen mayor carga ambiental en todo el CV de la explotación de la mina de esmeraldas son: la ocupación del suelo para industria minera, transformación del suelo de un sitio de extracción minero a minería.

Gráfica 17. *Análisis por sustancias y compartimiento, para el impacto en la calidad del ecosistema*



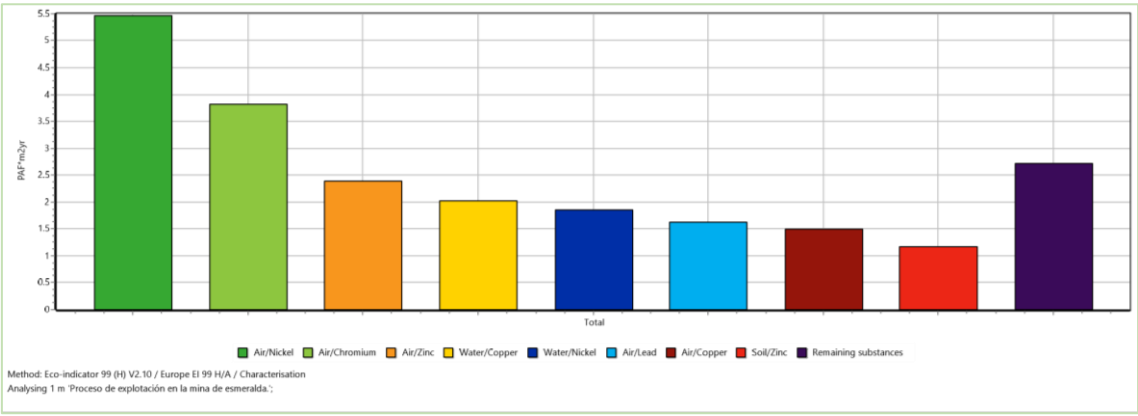
Fuente: Elaborado por Autor en el software SimaPro

Ecotoxicidad

La gráfica 18, muestra que los mayores contribuidores al potencial de ecotoxicidad son la emisión de metales al aire como nickel, zinc, cromo, plomo y cobre; al agua el metal cobre y al suelo zinc.

Así mismo, se puede observar que la sustancia con más carga producida es el nickel. Siendo esta emitida a la atmosfera por el proceso de voladura con dinamita con un 63.8% de la carga total de ecotoxicidad en la explotación de la mina. Este valor corresponde a 3.49 PDF.m^2.

Gráfica 18. *Análisis por sustancias y compartimiento, para la categoría de impacto de ecotoxicidad*



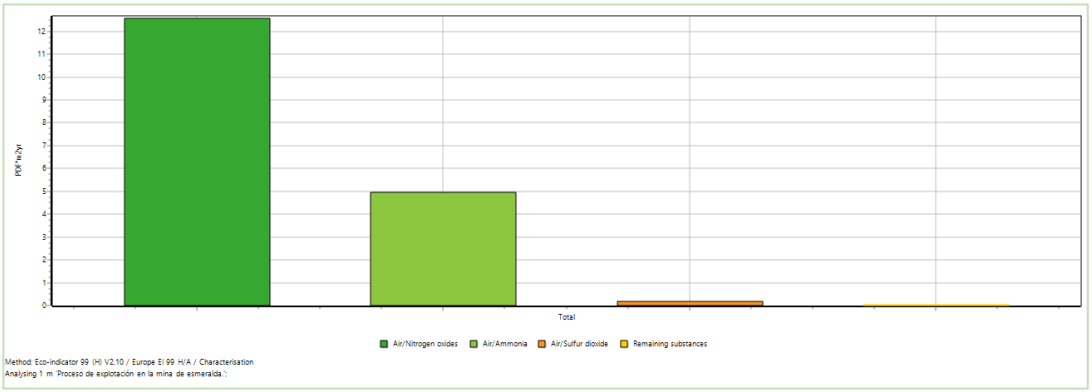
Fuente: Elaborado por Autor en el software SimaPro

Acidificación/Eutrofización

La substancia con más carga ambiental es el óxido de nitrógeno, el cual es generado en el proceso de voladura, este contiene 9.46 PDF·m^2 con el 75.1 de todo el CV de la explotación.

Esto se debe a la presencia de aluminio en el explosivo, cuando se genera la reacción del aluminio durante la detonación da lugar a la formación de óxidos sólidos y no productos gaseosos. El volumen de gas que se genera por el explosivo es, por esto, reducido. El calor de formación de los óxidos de aluminio es muy alto, así como de nitrógeno resultando una ganancia considerable del calor de explosión que aumenta la temperatura de los gases (Watanabe, 2013).

Gráfica 19. *Análisis por sustancias y compartimiento, para la categoría de impacto Acidificación/Eutrofización*



Fuente: Elaborado por Autor en el software SimaPro

Uso y transformación del suelo

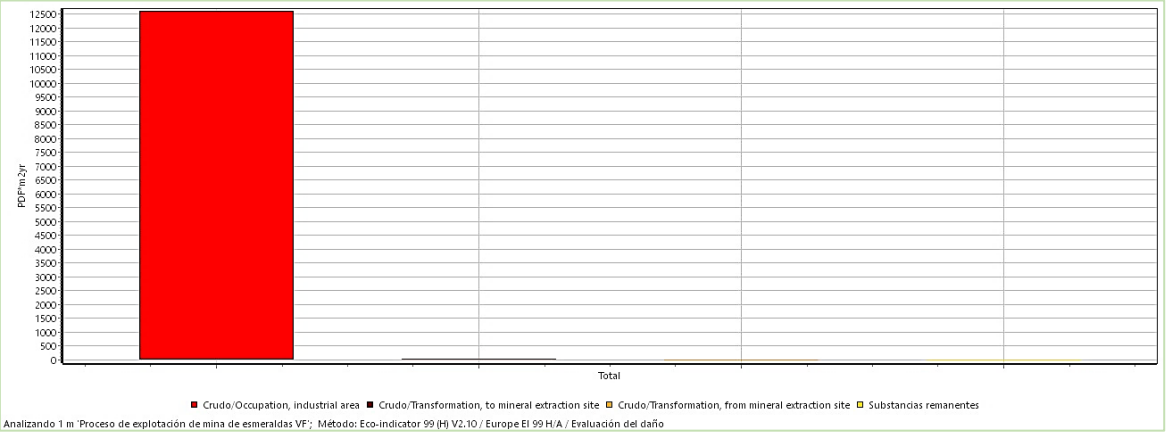
En cuanto al uso y transformación de suelo, las actividades más relevantes en el uso del territorio colombiano son la agropecuaria y la minera. Las áreas con exploración y explotación están situadas prácticamente en todo el país y lo que es el municipio de muzo su totalidad es considerado parte del distrito minero de Muzo. Evidentemente todas estas dinámicas antrópicas generan transformaciones las cuales causan variaciones a nivel estructural, de composición y de funcionamiento (Tovar, 2013).

La gráfica 20, muestra que el mayor contribuyente a este potencial de uso y transformación del suelo es la ocupación del área industrial con un valor de 12.600 PDF.m^2, ya que con respecto a la unidad funcional (1 metro de avance), los 15000 m^2 que tiene la empresa minera; la unidad funcional hace uso de un área extensa de terreno para su producción. Por lo tanto, se puede decir que el terreno que se utiliza en esta mina para llevar a cabo esta actividad de avance por día es excedente a la que se necesitaría.

Con respecto a transformación del suelo de un sitio minero a minería el impacto se resta con un valor 37.7 PDF.m^2 el hecho de que se ocupe un sitio minero y con un valor de -37.8 PDF.m^2.

Gráfica 20. *Análisis por sustancias y compartimiento, para la categoría de impacto*

uso y transformación del suelo



Fuente: Elaborado por Autor en el software SimaPro

7. Análisis de Sensibilidad

A partir de los resultados obtenidos con base en la EICV para el CV de la explotación de la mina de esmeralda, se evidencia que los procesos que contribuyen de manera más significativa a la carga ambiental son el uso de dinamita y madera además de los daños generados por el uso del suelo (ver apartado 6.3.3.).

Específicamente, la dinamita, es un explosivo con el principio de los explosivos ANFO el cual por sus composiciones y su reacción durante y después de las detonaciones, se lleva la carga ambiental más alta de todos los procesos. El uso de la dinamita es diario, y se realiza una vez en la JE con el empleo de 5 Kg por el metro de avance que es la unidad funcional.

En cuanto a la madera, este insumo es requerido para el proceso de sostenimiento de túneles, donde se requieren 140.59 Kg por el metro de avance, adicionalmente este es un proceso que se realiza en todas las JE, así que tanto este insumo y la dinamita, son indispensables para el proceso de explotación, pero pueden ser remplazados por insumos que cumplan las mismas funciones, pero con características que tengan menos cargas ambientales.

Por lo tanto, en los puntos críticos del proceso de explotación de la mina de esmeralda, se hizo el presente análisis de sensibilidad retirando las entradas de dinamita y madera que son las que se remontan a los procesos unitarios de fracturamiento de roca y sostenimiento de túneles respectivamente. Lo anterior permitió evaluar el desempeño ambiental del CV de la explotación de la mina de esmeralda, considerando las posibilidades de intervención dentro del alcance de este proyecto, para la generación de propuestas en gestión ambiental empresarial.

6.7. Análisis de sensibilidad del proceso de explotación de la mina de esmeralda

Una vez retirados los insumos Explosivo indugel, Madera COL y las entradas de

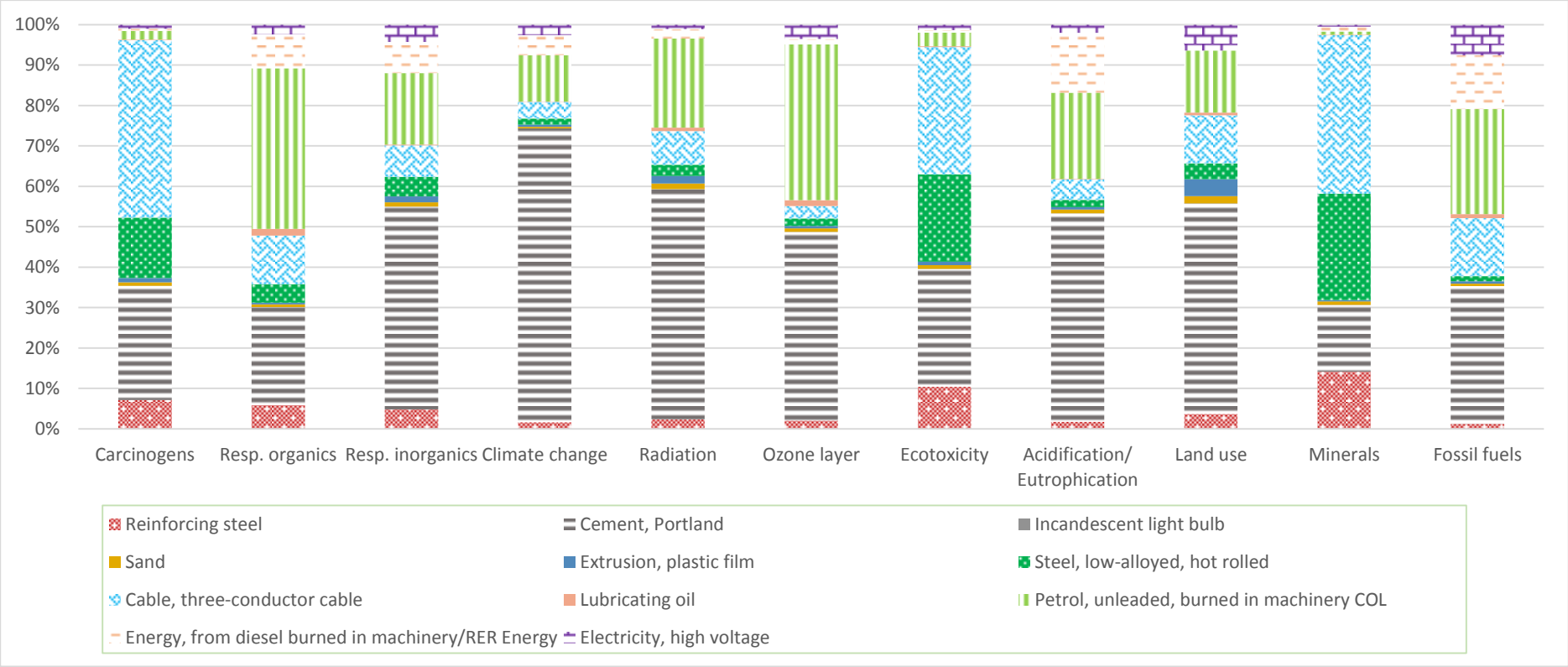
extracción que tomaban el 99% de carga ambiental en el uso del suelo, el software muestra en la gráfica 21, que cemento es el insumo con mayor carga ambiental mostrándose en todas las categorías de impacto por encima del 20% de los otros insumos.

Por otro lado, el insumo gasolina tiene presencia representativa sobre el 30% en las categorías de impacto carcinógenos y radiación (gráfica 21). En cuanto a la gráfica de normalización (22) se puede observar que el insumo de energía eléctrica tiene más del 30% en las tres categorías del eco indicador 99.

La tabla 18, muestra la relación de los procesos de análisis de sensibilidad con respecto a los indicadores de categorías y en esta se puede observar detalladamente que el insumo cemento tiene un impacto del 73% en la categoría de impacto cambio climático sobre las demás entradas, este insumo también tiene presencia representativa mayor al 50% en las categorías de impacto respiración de sustancias inorgánicas, radiación, acidificación/ eutroficación y uso del suelo.

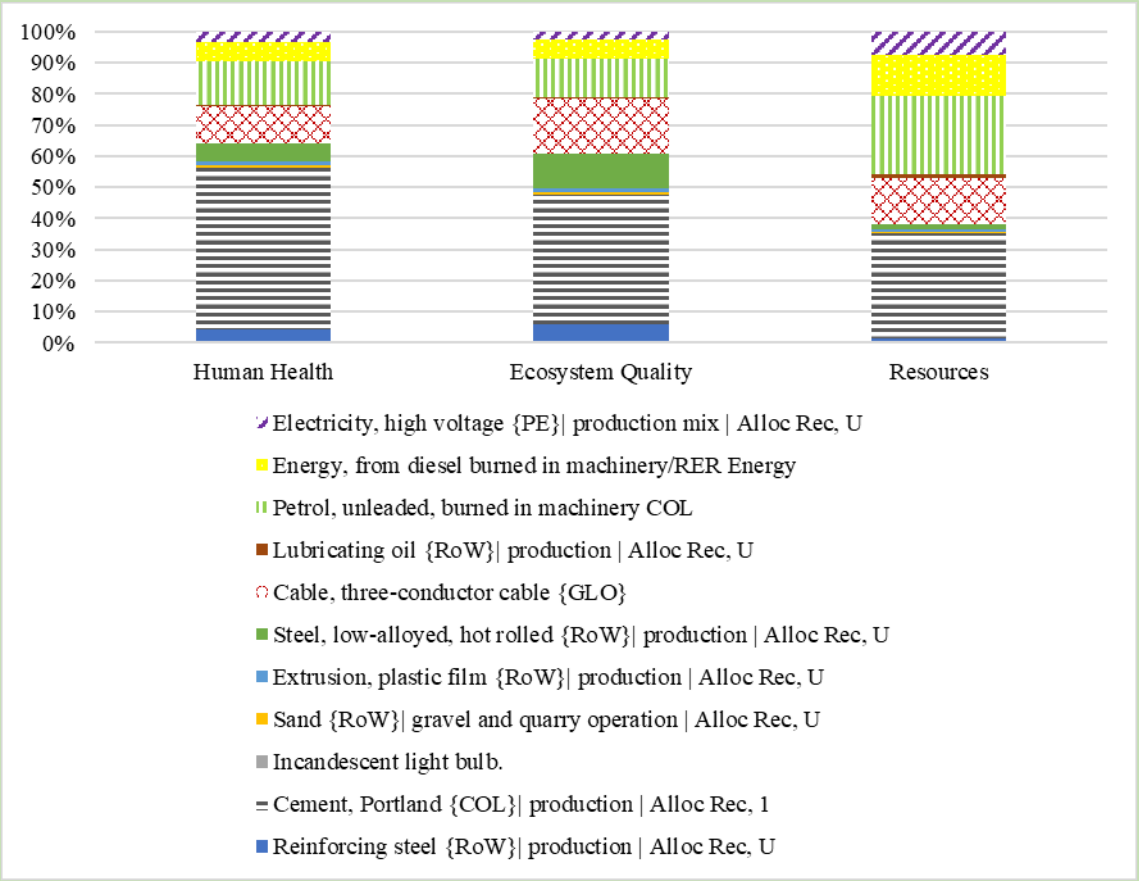
En cuanto a la caracterización del CV de la explotación de la mina de esmeralda (gráfica 24), el proceso de explotación toma más del 60% en todas las categorías de impacto sobre el proceso de transporte. Igualmente, esto se evidencia equitativamente en la gráfica 25, pero en este caso el transporte de explosivo indugel aumenta 10% en la categoría de impacto uso del suelo.

Gráfica 21. *Análisis de sensibilidad, Caracterización del proceso de explotación*



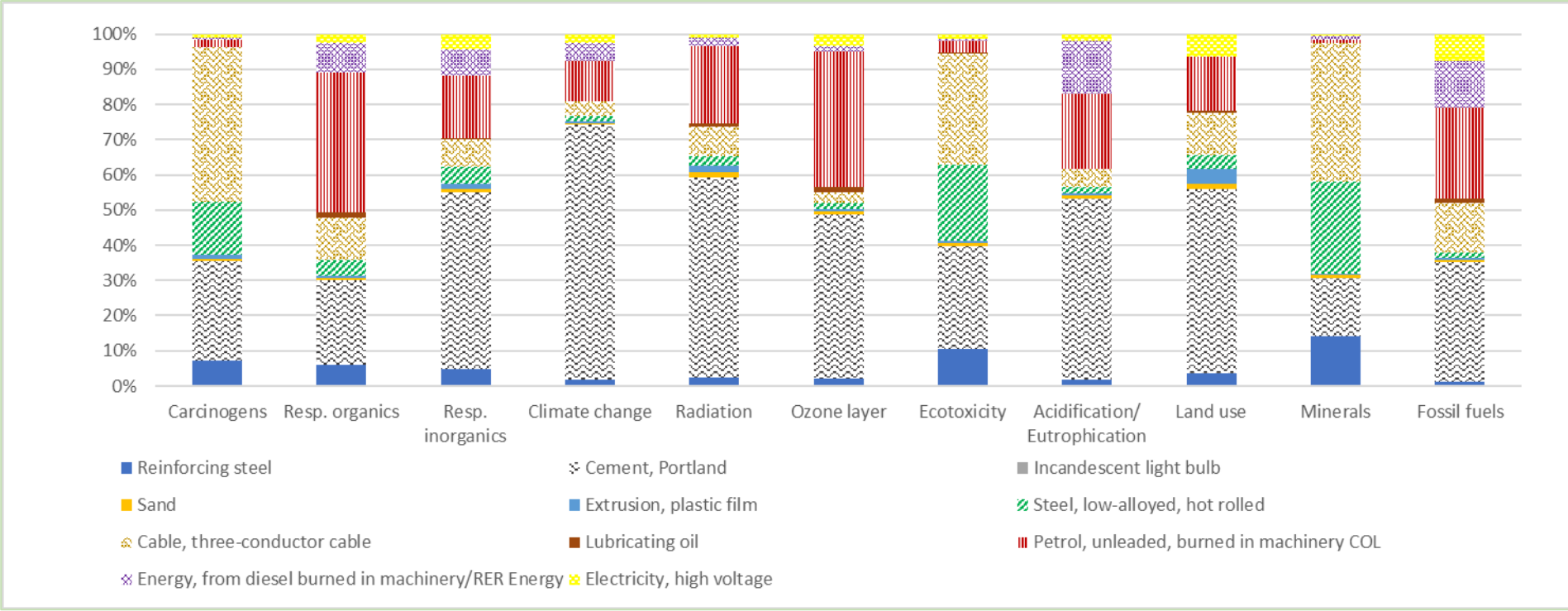
Fuente: Creado por Autor con base a SimaPro

Gráfica 22. *Análisis de sensibilidad, Normalización del proceso de explotación*



Fuente: Creado por Autor con base a SimaPro

Gráfica 23. *Análisis de sensibilidad, Normalización por categoría de impacto del proceso de explotación*



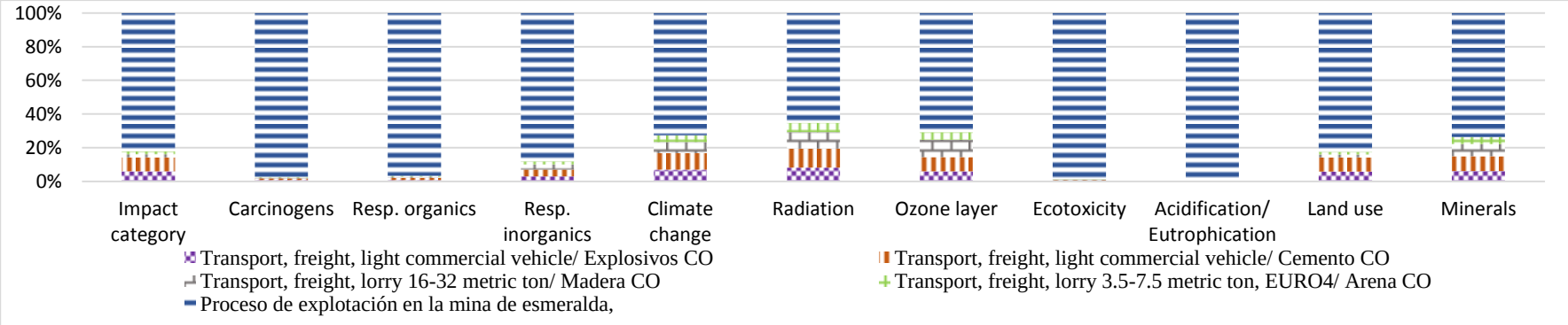
Fuente: Creado por Autor con base a SimaPro

Tabla 18. Relación de los procesos de análisis de sensibilidad con respecto a los indicadores de categorías

Impact category	Reinforcing steel	Cement, Portland	Light Bulb	Sand	Plastic film	Steel, low-alloyed, hot rolled	Cable,	Lubricating oil	Petrol, unleaded, burned in machinery COL	Energy, from diesel burned in machinery/RER Energy	Electricity,
Carcinogens	7%	28%	0%	1%	1%	15%	44%	0%	2%	1%	1%
Resp. organics	6%	24%	0%	1%	0%	5%	12%	2%	40%	8%	2%
Resp. inorganics	5%	50%	0%	1%	1%	5%	8%	0%	18%	8%	4%
Climate change	2%	73%	0%	0%	1%	1%	4%	0%	12%	5%	3%
Radiation	2%	57%	0%	1%	2%	3%	8%	1%	22%	2%	1%
Ozone layer	2%0	47%	0%	1%	1%	2%	3%	1%	39%	1%	4%
Ecotoxicity	10%	29%	0%	1%	1%	22%	31%	0%	3%	1%	1%
Acidification/ Eutrophication	2%	52%	0%	1%	1%	2%	5%	0%	21%	15%	2%
Land use	4%	52%	0%	2%	4%	4%	12%	1%	15%	0%	6%
Minerals	14%	17%	0%	1%	0%	26%	39%	0%	1%	1%	0%
Fossil fuels	1%	34%	0%	1%	1%	1%	14%	1%	26%	13%	8%

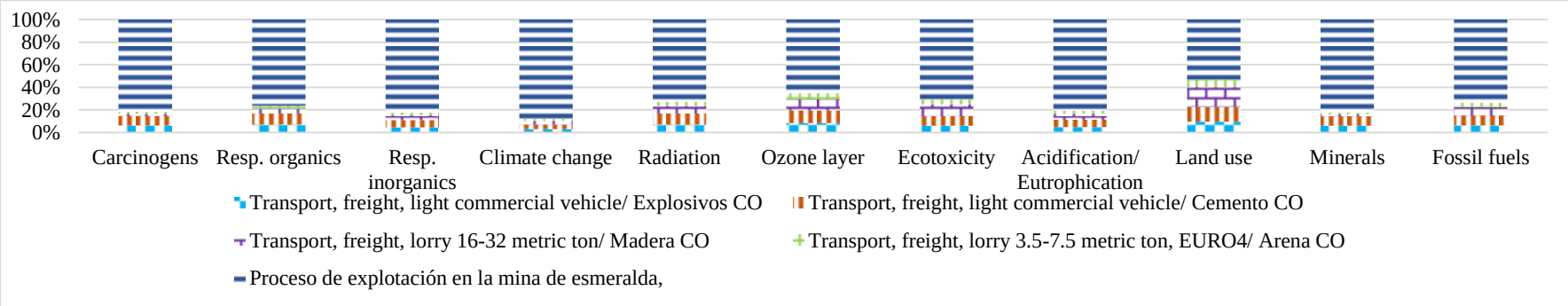
Fuente: Creado por Autor con base a Simapro

Gráfica 24. *Análisis de Sensibilidad, Caracterización del CV de la explotación de la mina de esmeralda*



Fuente: Creado por Autor con base a Simapro

Gráfica 25. *Análisis de Sensibilidad, Normalización del CV de la explotación de la mina de esmeralda*



Fuente: Creado por Autor con base a Simapro

7. Propuestas de Gestión Ambiental

De acuerdo con los resultados obtenidos en la EICV en la explotación de la mina de esmeraldas, se plantearon algunas propuestas de recomendación desde la gestión ambiental, que contribuyan al mejoramiento del proceso de explotación y que suplan las necesidades de la empresa en relación a estrategias de mayor eficiencia en la utilización de los recursos que disminuyan los impactos ambientales generados en su proceso extractivo, con el fin de vincular estrategias ambientales a su planeación estratégica.

De igual forma, estas propuestas de recomendación constituyen una herramienta para apoyar la toma de decisiones en la empresa y por lo tanto deben atender a optimizar el manejo de los impactos operacionales significativos que fueron identificados por medio del ACV. Cabe mencionar que estas medidas se clasifican como propuestas estratégicas y propuestas tecnológicas, estas están sujetas a la presentación y discusión con los empresarios mineros.

Los impactos operacionales a los que atienden las siguientes propuestas son los relacionados al explosivo indugel del proceso unitario voladura de roca, y el insumo de madera asociado al proceso unitario de sostenimiento de túneles. El manejo de los impactos asociados al proceso unitario extracción no se contemplan, ya que esta actividad impacta directamente sobre el subsuelo le corresponde a la empresa mitigarlos mediante la ejecución del plan de manejo ambiental incluido en la licencia ambiental del proyecto minero. Por lo tanto, el alcance de las presentes propuestas es ir más allá del cumplimiento normativo atreves de la herramienta ACV para contribuir a la gestión ambiental de la empresa y no están estrictamente ligadas al cumplimiento del plan de manejo ambiental.

Sin embargo, las propuestas presentadas a continuación tienen una significativa influencia en la reducción del impacto ambiental que genera todo el proceso de explotación de la mina de esmeraldas y están basadas en estudios de caso de proyectos mineros. Finalmente, las siguientes propuestas contemplan la implementación de tecnologías a ejecutar por metro de avance, sin tener en cuenta el cambio o mejoramiento de la estructura ya realizada en el corte.

7.1.Propuestas para el manejo de los impactos operacionales asociados a la madera

La madera que se emplea actualmente en la mina es obtenida por una empresa que no cuenta aún con un sistema sostenible para la producción de madera, esta solo cuenta con permisos de aprovechamiento. Por lo tanto, la carga ambiental que se recibe por parte de la mano de obra que se emplea en dicha empresa es alta. El proceso de producción de madera incluye insumos que generan alto impacto ambiental, uno de estos es el Diesel, el cual es empleado en la operación de la maquinaria, así como su método de extracción de madera en bosques no certificados y el proceso de secado en hornos. Adicionalmente la alta demanda de madera en la mina aumenta la carga ambiental en aspectos de uso de materiales.

Por lo anterior, esta propuesta de gestión ambiental incluye dos opciones para la disminución de dicha carga, las cuales son: cambiar el diseño para la mejora de rendimiento, soporte y empleo de materiales y/o cambiar el material por madera plástica con beneficios de reuso de materiales reciclados, largo ciclo de vida de este y

empleo de materiales.

7.1.1. Diseño de Madera rolliza con modelo Propsetter

Actualmente, la empresa emplea el diseño rectangular de cuatro puntas, donde de acuerdo con estudios de tecnología para soporte de cubierta subterránea, se encontró que este tipo de diseño requiere de una alta mano de obra para su instalación y mantenimiento, además que su duración es corta en comparación a otros tipos de tecnologías de soporte. Según el estudio de (Barczak, 2010), las tasas de instalación mejoran hasta en un 200% con el modelo de soporte de Propsetter en comparación a la del soporte de cuatro puntas, este sistema es un poste de madera de diseño cilíndrico con bases en los terminales y tres anillos de acero. Así mismo (McCartney, 1995; Strata, 2018) comparó el Propsetter de 216 mm de diámetro con la madera de 4 puntos de 914 mm y encontró que se maneja un 72% menos madera cuando se usa un Propsetter de 1,829 m de largo. El Propsetter reduce la resistencia de ventilación en un 76% y el mantenimiento de soporte es reducido por la contracción de la madera. Estos estudios, demuestran que el sistema Propsetter cumple con las necesidades asociadas con efectividad en sistemas de soporte (Anexo 15 y 16).

Las características físicas, capacidad y beneficios consiste principalmente en tres partes: el prop de cuña, el poste de rendimiento, una base/cabecera y los anillos de acero (imagen 10). La base se utiliza para distribuir la carga y evitar perforar el techo y piso de la mina, el puntal de cuña consiste en cuatro cortes de fondo en las puntas del poste, el ahusamiento de la punta permite el efecto de cepillado que ocurre cuando el Propsetter sostiene la carga. Así mismo, tres anillos de acero confinados los cuales ayudan a controlar el efecto de cepillado permitiendo que el sistema gane capacidad de soporte, cada anillo es 6 mm de alambre de acero (Brown, 2018).

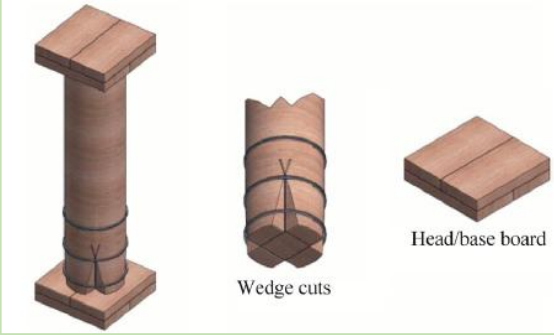


Figura 10. *Sistema Propsetter*

Fuente: (Brown, 2018)

Con base a lo anterior, esta propuesta consiste en que la empresa compre la madera rolliza de un distribuidor en la zona, que, de acuerdo con el ministerio de medio ambiente, hay alrededor de 15 empresas de madera en Boyacá de los cuales 5 cuentan con permisos de aprovechamiento forestal. Estas empresas cuentan con diferentes contratistas regionales que poseen la maquinaria y manejan las logísticas de acopio, bloqueo de trozas, transporte, consecución de permisos de aprovechamiento y licencias de movilización (MinAmbiente, 2016).

Posterior a la compra de la madera rolliza se sugiere que, en el taller de carpintería de la empresa, se realicen los cortes de acuerdo con el sistema Propsetter y la adhesión de los anillos de acero.

7.1.2. Madera Plástica

La estructura de sostenimiento de túneles es construida en madera con el fin de brindar el soporte y la estabilidad mecánica de muros y techos del túnel y evitar accidentes por desprendimientos inesperados de las rocas. La cantidad de accidentes ocurridos debido a una deficiencia o falla en la estructura es de alrededor del 38%. ‘Adicionalmente, el crecimiento de un árbol para alcanzar el tamaño óptimo para corte es de mínimo 4 años, esto hace que haya una alta demanda permanentemente de madera estructural para uso en minería como lo es el eucalipto. Asociado a esto, los costos son altos debido a la alta demanda y al aumento del flete por la necesidad de usar bosques cada vez más lejanos a los sitios de operación minera. Generalmente, el costo de la madera oscila entre el 8 y el 10% del total de los costos de explotación (Bolivar & Garcia, 2015).

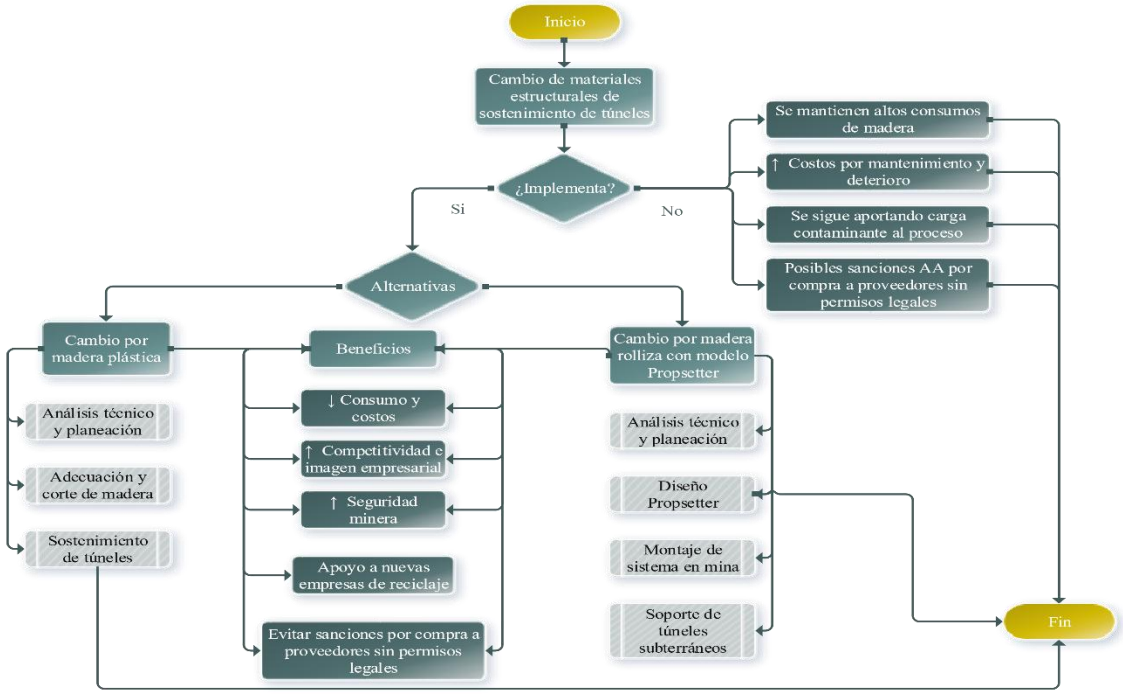
La madera plástica atiende a las necesidades de soporte, peso y estructuración, esta tiene como propósito remplazar el uso de madera natural como soportes estructurales. Su sustitución permite ciclos de tiempo apropiados para la renovación de bosques, disminuye la presión sobre estos sistemas naturales y conlleva a la reducción de la demanda por materias primas naturales. Por otra parte, se generan relaciones de apoyo a nuevas industrias en el mercado colombiano dedicadas a la recuperación y reutilización de materiales plásticos (REXCO, 2013).Sus características físicas:

- No se degrada al aire, ni por contacto con arena o agua, resistente a la humedad
- Vida útil de 100 años, no requiere mantenimiento para su conservación
- Buena resistencia mecánica, material duradero, inmune a microorganismos, roedores e insectos, seguro, no se agrieta ni produce astilla. Pirorresistente: alta resistencia al fuego y a los procesos de voladuras.
- Contribuye a mejorar la seguridad laboral, pues este material presente características más duraderas para su uso en las estructuras de las minas.

Para su uso en minería, la madera plástica empleada es en forma de postes de sección cuadrada las medidas son de (30x30) cm y longitudes entre los 2 y 4 metros, su peso es de 309 kg. Estos postes son utilizados para reemplazar las estructuras de la madera convencional en las minas, ya que por sus características fisicoquímicas son más resistentes. Esta madera es constituida por una mezcla de poliolefinas (polipropileno, polietileno de alta densidad y polietileno de baja densidad) y algunos contaminantes como el aluminio presente en varios envases (Anexos 17 y 18).

A continuación, en la figura 11 se puede observar el escenario de cambio tecnológico de la madera, donde se muestra que tanto la propuesta de madera plástica como la de madera rolliza con diseño propsetter, generan 4 notables beneficios ecológicos, sociales y económicos, por otra parte la no implementación de las propuestas puede traducirse en sanciones por la posibilidad de compra de madera de eucalipto en proveedores ilegales ya que la demanda es alta.

Figura 11. *Escenario de cambio tecnológico para la madera*



Fuente: Autor

7.2.Propuestas para el manejo de los impactos operacionales del explosivo indugel

De acuerdo con los resultados obtenidos, se encontró que el proceso que mayor genera afectaciones al ambiente es el asociado a los procesos de voladuras con el explosivo indugel. Entre las principales afectaciones se encuentran la inhalación de sustancias orgánicas e inorgánicas debido al material particulado generado por las voladuras. Además de efectos ionizantes, la acidificación del suelo y generación de drenajes ácidos al agua por residuos de compuestos químicos como óxidos de nitrógeno, aluminio y amonio, provenientes de la reacción de la voladura con explosivo indugel. Así mismos impactos como vibraciones en el suelo, ruido, explosión de aire sobre presión, voladura de rocas sin control, generación de grandes cantidades de estériles y respuesta humana (Torres, Gozales, & Tapia, 2009).

En el proceso de voladura con explosivos convencionales se generan grandes cantidades de material rocoso sin tamaños predeterminados, por lo cual su manejo aumenta los costos de extracción desde el interior de la mina hacia los patios de estériles y dificulta el desarrollo de los procesos de lavado y separación de acuerdo con el tamaño.

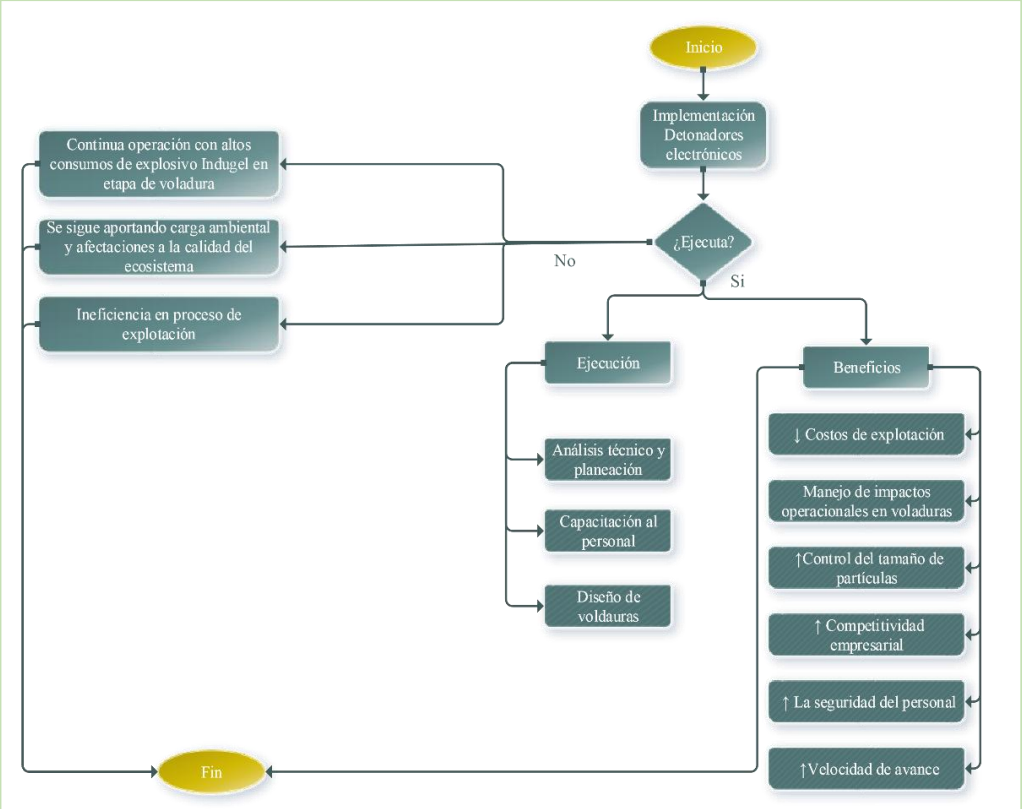
Por esto, se realizó una búsqueda de alternativas para la realización de voladuras con menor impacto sobre el ambiente y la salud del personal minero, que mejore la eficiencia del proceso de explotación. A partir de esto se encontró que existen en el mercado tecnologías que mejoran significativamente este proceso. Una de estas son los detonadores electrónicos (DE). Dentro de las principales marcas del mercado se encuentra el Sistema eDev II Electronic Tunnel Blasting System, para la aplicación en

desarrollo de túneles. El sistema provee de la precisión y flexibilidad del timing electrónico con operaciones rápidas y fáciles en túneles. Con su aplicación se aumentan la seguridad, eficiencia y rendimiento. Por medio de este se puede hacer un diseño de voladura que produzca el tamaño de fragmentación requerida por parte del proceso, reduciendo significativamente la cantidad de estériles en las escombreras y optimiza los demás procesos (Orica, 2018)(Anexo 19). Sus ventajas son:

- Mejora de la uniformidad del tamaño de las partículas
- Aumento de la productividad de la excavación.
- Ahorro de costos en operaciones de excavación
- Fragmentación mejorada en la pila de escombreras.
- Control mejorado de las vibraciones inducidas por la explosión y del chorro de aire.
- No hay exposición física humana a la voladura (Orica, 2018).

Desde el programa del sistema se puede operar las medidas deseadas de la voladura, el tiempo, control de vibración, ruido entre otras que hacen de este proceso una actividad exacta de los resultados esperados y reduce significativamente los impactos ambientales asociados a la explotación (Steyn, 2017).

Figura 12. *Escenario de cambio tecnológico para la detonación electrónica*



Fuente: Autor

7.3. Simulación de escenarios con propuestas tecnológicas

Para la construcción de los escenarios, se buscó analizar el comportamiento de las cargas ambientales sustituyendo la madera de cuatro puntas por la madera rolliza con diseño propsetter y/o la madera plástica, y para el caso de la dinamita por DE. Se calcularon los datos a introducir en el software SimaPro, en cada una de las propuestas tecnológicas. Posteriormente se muestra la simulación del CV de la explotación, con la madera rolliza y el DE y por otro lado con la madera plástica y el DE, y finalmente la comparación entre los dos escenarios y el actual proceso de explotación para identificar cual genera menor carga ambiental.

7.3.1. Datos Madera rolliza

Los datos correspondientes a la madera rolliza se estimaron con base a los estudios (McCartney, 1995; Strata, 2018), donde indica que el empleo del sistema Propsetter disminuye hasta el 72% el uso de madera por cuestiones de durabilidad y resistencia. Por lo anterior, se toma la cantidad empleada en la empresa para el año 2016 menos el 72% (para ver más acerca de este sistema ver apartado 7.1.1.) (Ecuación 5), esto dividido en el número de JE y multiplicado por el factor de conversión se obtiene el valor recorrido (Ecuación 6) y para alimentar el software se convierten a metros cúbicos teniendo en cuenta que las medidas de un poste de madera es 0.13 m de diámetro (0.65 m de radio) por 2.5 metros de altura (Ecuación7) (Ecuación 8).

$$Unid.\,de\,madera\,al\,año \equiv 3120\,unidades - (3120\,unidades \times 72\%) = 874$$

[Ecuación 5]

$$Cantidad\ = \frac{874\,unidades\,de\,madera}{488\,JE} \times \frac{0.5\,JE}{mA} = 0.89\ \frac{unidades\,de\,madera}{mA}$$

[Ecuación 6]

$$V\,de\,una\,unidad\,de\,madera = Altura\ \times \pi r2 \qquad V = 2.5m \times \pi \times (0.065\text{m})^2 = 0.010\ m3$$

[Ecuación 4]

$$V\ de\ 0.89\ unidades\,de\,madera = \frac{0.010\ m3}{1\ unidad\,de\,madera} \times 0.89\ unidades\,de\,madera = 0.0094m3$$

[Ecuación 5]

Cada poste requiere de 3.7m de alambre de acero para la base de este, así que por el metro de avance se requiere 3.23m (Ecuación 6).

$$Metro\,de\,alambre = \frac{3.7m}{1\,unidad\,de\,madera} \times 0.89\,unidades\,de\,madera = 3.23\,m$$

[Ecuación 6]

7.3.2. Datos Madera Plástica

Para alimentar las entradas de la madera plástica en el software, se basó en el estudio de caso "Análisis del ciclo de vida del reciclado del polietileno de alta densidad", realizado por (Garraín, Vida, & Franco, 2016), donde la unidad funcional es un kilogramo de plástico reciclado, se tomaron los datos de tal inventario y se descartó el proceso de purificación y recirculación de agua de lavado que realiza este estudio, ya que la empresa que provee la madera plástica no realiza este proceso (tabla 19).

Tabla 19. Datos del inventario del reciclado de un kg de PEAD,

ENTRADAS DE MATERIALES	KG
Residuo industrial	1,42850
Agua fresca de lavado	0,08620
Agua fresca para extrusión	0,42180
Agua purificada recirculada de lavado	20,35400
NaOH (s)	0,00420
Agentes tensoactivos aniónicos	0,00130
Estearato de zinc	0,00003
PEAD concentrado	0,02000
$CaCO_3$	0,00170
Floculante ($AlCl_3$)	0,00160
Filtros metálicos	0,00010
SALIDAS DE MATERIALES	**KG**
Barro (65% humedad)	0,13510
Agua purificada recirculada de lavado	20,35400
Agua evaporada de extrusora	0,42180
Granzas de plástico	1,00000
Residuo valorizable	0,40850
Residuos de filtros metálicos valorizables	0,00010
CONSUMOS DE ENERGÍA	
Electricidad	0,06400 kWh

Fuente: (Garraín, Vida, & Franco, 2016)

Para definir cuanto de madera plástica se requiere por metro de avance, se tomó el mismo valor que se requería para la madera de cuatro puntas actualmente en el sostenimiento de túneles de la empresa minera de esmeraldas los cuales eran 3120 bloques de madera al año y el volumen por metro de avance es 1.16 m^3 (ver apartado 6.3.1.) y su peso es 995 Kg teniendo en cuenta que un bloque de (30x30) cm y longitudes de 2.5 metros (0.36 m^3) es de 309 kg (ver aparta 8.1.12.).

$$Peso\ de\ la\ madera\ plástica = \frac{309\ kg}{0.36\ m3} \times 1.5\ m3 = 1287\ kg$$

[Ecuación 7]

7.3.3. Datos Detonadores electrónicos

Se tomó la información proporcionada por Austin Australia en su ficha de seguridad de detonadores eléctricos y electrónicos (tabla 20), la cual muestra la composición interna de los DE. Adicionalmente, en el software se agregaron las

entradas de cableado, y uso del sistema operativo eDev™ (ver apartado 7.2.)

Tabla 20. Composición interna del DE

Name	Product Identifier	% (w/w)
Zinc	CAS No. 7440-66-6	0-60%
Copper	CAS No. 7440-50-8	0-60%
Aluminum	CAS No. 7429-90-5	0-40%
Cyclonite (RDX)	CAS No. 121-82-4	0-15%
Hexanitrostilbene (HNS)	CAS No. 20062-22-0	0-15%
Pentaerythritol tetranitrate (PETN)	CAS No. 78-11-5	0-15%
Barium chromate	CAS No. 10294-40-3	0-5%
Boron	CAS No. 7440-42-8	0-5%
Lead Azide	CAS No. 13424-46-9	0-5%
Lead tetraoxide	CAS No. 1314-41-6	0-5%
Tungsten (W)	CAS No. 7440-33-7	0-5%
Silicon	CAS No. 7440-21-3	0-2%

Fuente: (Austinpowder , 2017)

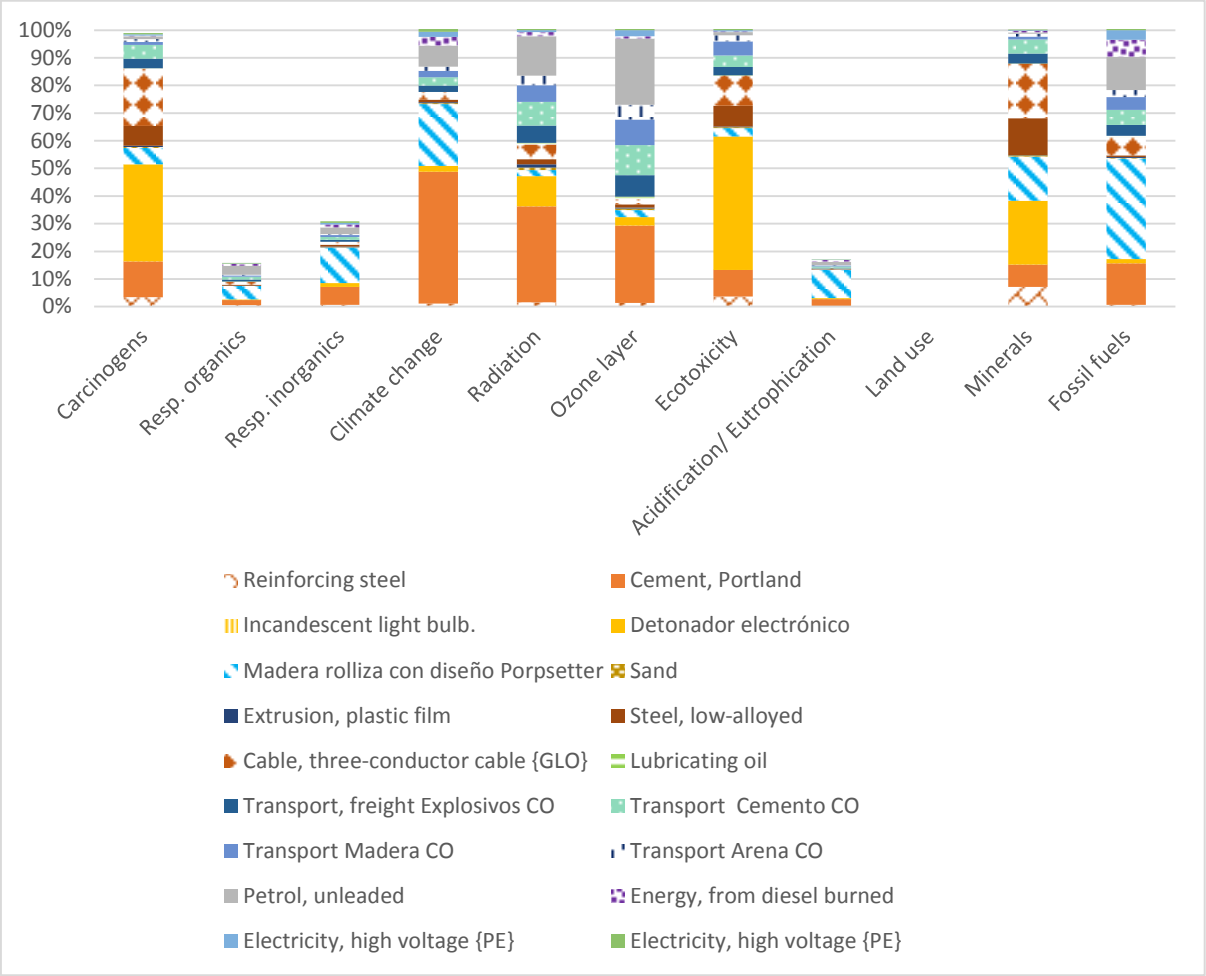
Para el avance horizontal de 1000 metros la duración de total del desarrollo de trabajo empleando el sistema eDev, se puede disminuir hasta en dos meses.

Para lograr 1000 metros de avance con explosivos convencionales se deben realizar 500 voladuras; mientras que con detonadores electrónicos eDev se reducen a 333 voladuras Esta diferencia se traduce en 167 voladuras no realizadas, lo cual se traduce en un beneficio económico al ahorrar material explosivo y gastos de operación (Torres, Gozales, & Tapia, 2009)

7.3.4. Simulación con madera rolliza y Detonador Electrónico

La EICV para este nuevo escenario, se eliminó el proceso de extracción, ya que toma la mayor carga ambiental en el uso del suelo y no permite analizar las demás entradas al sistema. En la gráfica 26, se puede observar que las nuevas entradas madera rolliza y DE, presentan una contribución significativa en las categorías de impacto recursos fósiles y ecotoxicidad respectivamente. Esto se debe a que en el proceso del insumo madera rolliza, se realiza el empleo de combustión de Diesel para la maquinaria que se usa en el corte y moldeamiento de la madera, y aunque el uso del material es menos para el suporte de túnel, el uso de tal recurso fósil sigue contribuyendo al aspecto del uso de energías no renovables. Para el caso del DE, su carga ambiental que es representativa en la categoría de impacto ecotoxicidad, se debe a sus componentes internos (ver tabla 20), los cuales son dispersados al aire, suelo y agua después de las voladuras.

***Gráfica 26**. Normalización para la simulación del proceso de la explotación de esmeraldas con la madera plástica y el DE en la empresa caso de estudio*

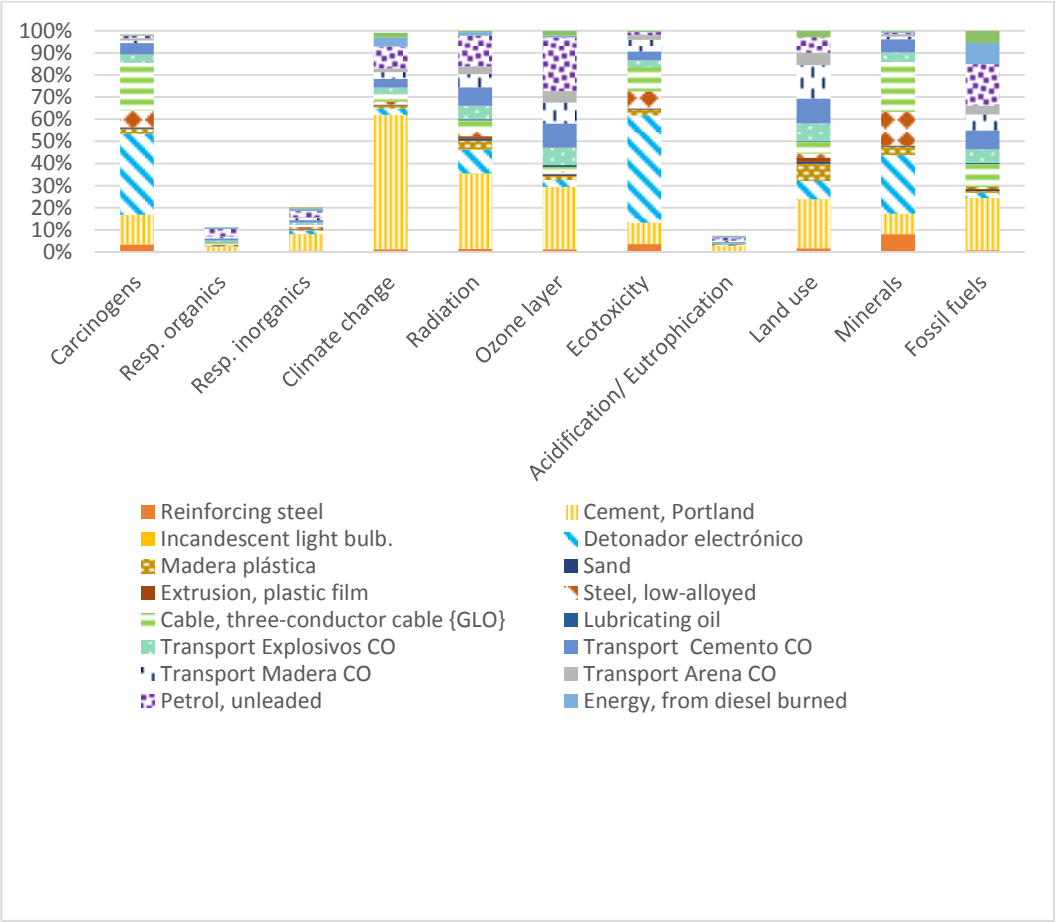


Fuente: Autor

7.3.5. Simulación con madera plástica y Detonador Electrónico

La EICV para este escenario, se eliminó igualmente el proceso de extracción, ya que toma la mayor carga ambiental en el uso del suelo y no permite analizar las demás entradas al sistema. En la gráfica 21, se puede observar que las nuevas entradas madera plástica y DE, presentan una contribución significativa en las categorías de minerales y ecotoxicidad respectivamente. Esto se debe a que en el proceso del insumo madera plástica, se realiza el empleo de. Para el caso del DE, su carga ambiental que es representativa en la categoría de impacto ecotoxicidad, se debe a sus componentes internos, los cuales son dispersados al aire, suelo y agua después de las voladuras.

Gráfica 27. *Normalización por categorías de impacto en el CV del proceso de explotación con las propuestas tecnológicas madera plástica y DE*



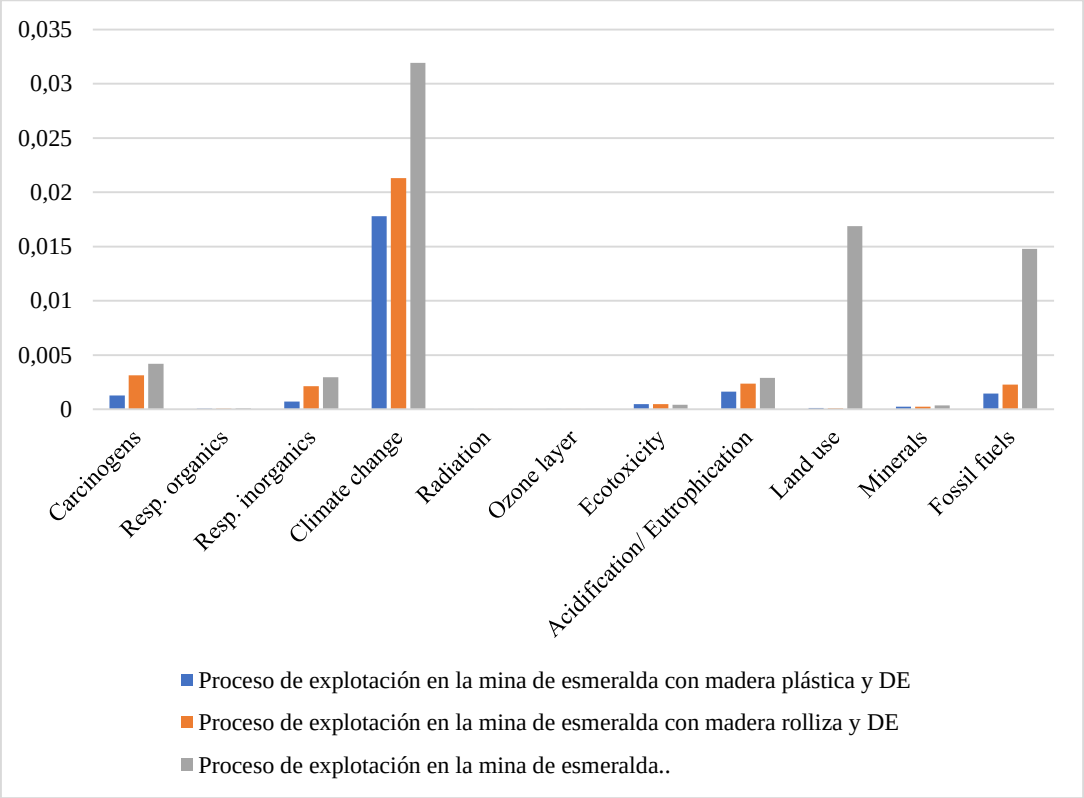
Fuente: Elaborado por Autor en el software Simapro

7.3.6. Simulación del análisis comparativo con el uso de las propuestas madera rolliza con DE y madera plástica con DE en el CV en la explotación de la empresa de esmeraldas

El análisis comparativo con el uso de las tres propuestas tecnológicas (madera rolliza con sistema propsetter, madera plástica y DE), se desarrolló poniendo las entradas de las simulaciones: madera rolliza y DE, madera plástica y DE y el proceso de explotación con las previas entradas (madera y explosivo indugel), se modelaron estos tres procesos sin la entrada del insumo extracción para analizar detalladamente los otros insumos (Gráfica 22). Allí, se pudo observar una ventaja en la implementación de las propuestas tecnológicas, en la categoría de impacto cambio climático muestra que cerca del 20% de la carga ambiental disminuye. En la categoría de impacto recursos fósiles la carga ambiental disminuye alrededor del 77% con las propuestas. Entre las dos simulaciones, la simulación con madera plástica y DE, presenta una leve ventaja en cuanto a menos carga ambiental, frente a la de la simulación con madera rolliza y DE, esto se debe principalmente porque en el proceso de la madera rolliza se emplea la combustión de un recurso no renovable (Diesel). A pesar de esto, la importante

reducción en aspectos relacionados con la salud humana debe considerarse a la hora de analizar el impacto en la salud y calidad de vida de los involucrados.

***Gráfica 28**. Análisis comparativo entre los tres procesos*



Fuente: Elaborado por Autor en el software SimaPro

8.4.Análisis Financiero

Este análisis comprende la implementación de las tres propuestas descritas en el apartado 8.2. Para esto, se realizó la estimación de inversión de cada medida tecnológica, a partir de esta información se hizo la diferencia de costos entre los nuevos insumos de dichas medidas y los que se utilizan actualmente en la empresa. Finalmente, se agrega el análisis financiero para la inversión de las medidas aplicando los indicadores Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Periodo de Recuperación (PR), utilizando hojas de cálculo en el software Excel.

El análisis financiero, se realizó para las propuestas tecnológicas descritas anteriormente y que están asociadas al cambio de madera de eucalipto por madera plástica o por madera rolliza con el modelo Propsetter, así como el cambio del explosivo indugel por el sistema de detonación electrónica.

En este análisis se contemplaron los costos de cada una de las propuestas, los cuales fueron recogidos por medio de cotizaciones proporcionadas por algunas empresas. Se tuvo en cuenta el consumo anual por cada una de las propuestas para continuar la operación minera sin disminuir el avance promedio de explotación. De igual forma, se

realizó una comparación de cada una de las propuestas tecnológicas teniendo en cuenta la diferencia en costos con respecto al insumo actual.

Así mismo, tomando como guía a (Ehrhardt & Brigham, 2007) y (Gutiérrez, 2012) se aplicaron algunos indicadores de conveniencia económica para la inversión en las propuestas presentadas, entre estos el Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Rendimiento (TIR) y Periodo de Recuperación (PR), los cuales fueron desarrollados en hojas de cálculo de Excel.

a. Estimación de la inversión

Para estimar la inversión de cada una de las propuestas tecnológicas se tuvo en cuenta el consumo anual actual para la operación de la mina de esmeraldas y se consideraron los rendimientos que genera cada una de las propuestas con respecto a este. En el caso del sistema de detonación electrónica se consideró el consumo anual requerido en cajas para la operación y se contabilizó el valor de los equipos que se adquieren una sola vez. En la madera se consideraron los consumos actuales y en la madera rolliza con sistema Propsetter se tuvieron en cuenta los rendimientos en el consumo que genera la implementación de este sistema.

Tabla 21. *Presupuesto de inversión de las propuestas*

Propuestas Tecnológicas				
Propuestas	**Cantidad anual**	**Ud**	**Valor unitario**	**Valor total**
Propuesta 1. Detonador electrónico				
eDev II detonadores (cajas de 40 ud)	12,2	Cajas	$ 1.627.384	$ 19.854.080
Blast Box 610	1	Equipo (se compra una vez)	$ 11.675.913	$ 11.675.913
eDev™ II Tester	1	Equipo (se compra una vez)	$ 5.101.952	$ 5.101.952
Scanner 260	1	Equipo (se compra una vez)	$ 9.417.771	$ 9.417.771
Subtotal				$ 46.049.715
Propuesta 2. Madera plástica				
Madera plástica	3025	Postes	$ 3.285	$ 9.937.125
Transporte	24	Viajes	$ 1.300.000	$ 31.200.000
Subtotal				$ 41.137.125
Propuesta 3. Madera rolliza con modelo Propsetter				
Madera rolliza	1220	Postes	$ 40.000	$ 48.800.000
Base de madera	3	Metros cúbicos	$ 1.284	$ 626.592
Alambre de acero	1806	Metros	$ 1.652	$ 2.983.512
Transporte	24	Viajes	$ 1.884.656	$ 45.231.750

Fuente: Autor

De acuerdo con la tabla 21 se puede apreciar que la inversión del sistema de detonación electrónica tiene un costo de $46.049.715 COP, la madera plástica supone una inversión de $41.137.125 COP y la inversión requerida para la madera rolliza con modelo Propsetter es de $97.641.854 COP.

b. Comparación económica entre los insumos empleados en la operación del 2017 y las propuestas presentadas

Adicionalmente, en la tabla 22 se realizó una comparación de las diferencias económicas entre los insumos empleados en la operación del 2017[6] y las propuestas presentadas. Para el caso del explosivo Indugel comparado con el sistema de detonación electrónica se obtiene una diferencia en el costo de $11.370.285 COP. La madera de eucalipto comparada con la madera plástica arroja una diferencia de $64.594.625 COP y finalmente la diferencia entre la madera de eucalipto y la rolliza con modelo Propsetter es de $8.089.896 COP.

Tabla 22. Comparación de propuestas tecnológicas

Comparación	
Insumo	**Costo Anual**
Explosivo Indugel	$ 57.420.000
Detonador electrónico	$ 46.049.715
Diferencia con DE	$ 11.370.285
Madera eucalipto	$ 60.500.000
Transporte madera eucalipto	$ 45.231.750
Subtotal	$ 105.731.750
Madera plástica	$ 9.937.125
Transporte madera plástica	$ 31.200.000
Subtotal	$ 41.137.125
Diferencia Madera plástica (MP)	$ 64.594.625
Madera rolliza y Propsetter	$ 52.410.104
Transporte madera rolliza	$ 45.231.750
Subtotal	$ 97.641.854
Diferencia con madera rolliza y Propsetter (MRP)	$ 8.089.896

Fuente: Autor

De acuerdo con lo anterior se evidencia que en el caso del cambio de la madera de eucalipto por la madera plástica presenta una mayor diferencia en los costos que la madera rolliza con modelo Propsetter. Y la implementación del sistema de detonación electrónica genera una disminución significativa con respecto al explosivo Indugel.

Para tener una proyección de estas diferencias se consideraron dos escenarios, en el primero la implementación de las propuestas sistema de detonación electrónica con madera plástica (DE+MP) y en el segundo la implementación de las propuestas sistema de detonación electrónica con madera rolliza y Propsetter (DE+MRP). Se manejo un incremento anual de 3,5% correspondiente al Índice de Precios al Consumidor (IPC), el cual se obtuvo del promedio de enero a marzo reportado en el boletín de indicadores económicos del Banco de la República y se proyectó a 10 años debido a que los proyectos mineros tienen una vida útil de 30 años (Banco de la República, 2018).

[6] Información obtenida vía telefónica con gerente operativo de la empresa minera.

De acuerdo con los resultados de la tabla 23 se evidencia que la propuesta DE+MP genera una mayor diminución en los costos, para el año 0 los costos asociados a la madera de eucalipto junto al explosivo Indugel son de $163.151.750 COP, mientras que con la implementación de la propuesta madera plástica junto con el sistema de detonación electrónica los costos se reducen a $75.964.910 COP, es decir una diferencia de $64.594.625 COP. Cabe mencionar que los equipos del sistema de detonación electrónica se compran una sola vez, es decir su inversión se realiza en el año 1 pero a partir del siguiente año sólo se invierte en las cajas de detonadores por un costo de $ 19.854.080 COP.

Además, de acuerdo con los resultados obtenidos en la modelación en el software SimaPro de estas propuestas se determinó que la propuesta de la madera plástica con el sistema de detonación electrónica genera menor carga ambiental al proceso de explotación de la mina comparada con la propuesta de la madera rolliza con modelo Propsetter y el sistema de detonación electrónica.

Teniendo en cuenta lo anterior y los valores obtenidos en la tabla 23 Proyección de diferencias, se desarrolló el análisis financiero de inversiones proyectado a 10 años de la propuesta DE+MP.

c. Análisis de conveniencia económica de inversiones proyectado a 10 años

Para el análisis financiero a 10 años se evaluaron dos escenarios, en el primer escenario se proyectaron los costos asociados al explosivo Indugel y la madera de eucalipto.
En el segundo escenario se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones. Primero, este análisis se basó en una propuesta de disminución en los costos operativos de la mina, donde las diferencias en costos que genera la propuesta DE+MP con respecto a los insumos actuales se consideraron como los ingresos y los egresos corresponden al costo de la propuesta.
En los dos escenarios se tuvo en cuenta la misma tasa de inflación (IPC) de 3,5% empleada anteriormente. Finalmente se desarrolló el flujo de efectivo anual actual para el primer escenario y para el segundo escenario se relacionaron las inversiones para la propuesta DE+MP para calcular el flujo de efectivo anual. A partir de esto, los resultados se muestran en las tablas 24 y 25 respectivamente.

Con base en la tabla 25 se calcularon los indicadores de viabilidad económica de inversión para las propuestas, estos indicadores se muestran en la tabla 26.

Tabla 26 Indicadores de proyección financiera

Indicador	Valor
VPN	$ 43.575.534
TIR	12%
PR	4,1

De acuerdo con los valores obtenidos para cada indicador se determinó que con el costo de la propuesta DE+MP por un valor de $87.186.840 COP y el flujo de efectivo

del primer año por un valor de $13.533.906 COP se obtuvo una TIR del 12%, lo cual indica una buena rentabilidad con respecto a la propuesta de inversión y considerando que esta va encaminada a la reducción de costos. Con respecto al VPN se obtuvo un valor positivo de $ 43.575.534 COP, lo cual indica que con la implementación de las propuestas evaluadas agregan valor a la empresa minera. Finalmente, el Periodo de recuperación (PR) fue de 4,1 años, es decir que el PR se alcanza al inicio del cuarto año. Esto indica la favorabilidad de las propuestas evaluadas ya que la recuperación de la inversión se realiza rápidamente, teniendo en cuenta que la vida útil de un proyecto minero es de 30 años.

Finalmente, cabe mencionar que la propuesta evaluada (DE+MP) representa una significativa reducción de costos operativos para la empresa minera. Sin embargo, debido a la cultura arraigada en el sector minero de las esmeraldas con respecto a las prácticas tradicionales de explotación, esta propuesta puede suponer incertidumbres para los empresarios. Debido a que son cambios tecnológicos e innovadores, que para la empresa objeto de estudio aún son desconocidos y su posible implementación está sujeta a cambios graduales para evaluar en terreno su efectividad.

Finalmente, la disminución de costos es una de las alternativas para mejorar la rentabilidad económica hacia un apalancamiento financiero positivo y un incremento en la rentabilidad financiera. En este caso las propuestas planteadas están enfocadas hacia la disminución de costos operativos y la disminución de los impactos operacionales en términos ambientales. La reducción de costos debe establecerse como una estrategia resultante de la visión y definición estratégica del negocio, teniendo en cuenta que la competitividad de la empresa minera se puede lograr por medio de la producción a costos bajos u ofreciendo productos de calidad superior por medio de la diferenciación del producto o en este caso procesos con menor impacto sobre el ambiente (Morillo, 2001).

Tabla 23. Proyección de diferencias

	Proyección de costos actuales										
Años	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Explosivo Indugel	$ 57.420.000	$ 59.429.700	$ 61.509.740	$ 63.662.580	$ 65.890.771	$ 68.196.948	$ 70.583.841	$ 73.054.275	$ 75.611.175	$ 78.257.566	$ 80.996.581
Madera de Eucalipto	$ 105.731.750	$ 109.432.361	$ 113.262.494	$117.226.681	$121.329.615	$125.576.152	$ 129.971.317	$134.520.313	$ 139.228.524	$ 144.101.522	$149.145.076

	Proyección de diferencias (disminución de costos)										
Años	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Proyección de diferencia con DE+MP	$ 75.964.910	$ 78.623.682	$ 81.375.511	$ 84.223.654	$ 87.171.481	$ 90.222.483	$ 93.380.270	$ 96.648.580	$ 100.031.280	$ 103.532.375	$107.156.008
Proyección de diferencia con DE+MRP	$ 19.460.181	$ 20.141.287	$ 20.846.232	$ 21.575.851	$ 22.331.005	$ 23.112.590	$ 23.921.531	$ 24.758.785	$ 25.625.342	$ 26.522.229	$ 27.450.507

Fuente: Autor

Tabla 24. Flujo Efectivo Anual Actual

Flujo de Efectivo Anual (Actual)											
Años	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Porcentaje de inflación proyectada (IPC fuente BanRep)		3,5%	3,5%	3,5%	3,5%	3,5%	3,5%	3,5%	3,5%	3,5%	3,5%
Ingresos											
	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -	$ -
Egresos											
Costos Operativos											
Explosivo Indugel	$ 57.420.000	$ 59.429.700	$ 61.509.740	$ 63.662.580	$ 65.890.771	$ 68.196.948	$ 70.583.841	$ 73.054.275	$ 75.611.175	$ 78.257.566	$ 80.996.581
Madera de Eucalipto	$ 105.731.750	$ 109.432.361	$ 113.262.494	$ 117.226.681	$ 121.329.615	$ 125.576.152	$ 129.971.317	$ 134.520.313	$ 139.228.524	$ 144.101.522	$ 149.145.076
Total egresos	$ 163.151.750	$ 168.862.061	$ 174.772.233	$ 180.889.262	$ 187.220.386	$ 193.773.099	$ 200.555.158	$ 207.574.588	$ 214.839.699	$ 222.359.088	$ 230.141.656
Flujo de Efectivo Anual	-$ 163.151.750	-$ 168.862.061	-$ 174.772.233	-$ 180.889.262	-$ 187.220.386	-$ 193.773.099	-$ 200.555.158	-$ 207.574.588	-$ 214.839.699	-$ 222.359.088	-$ 230.141.656
Flujo acumulado	-$ 163.151.750	-$ 332.013.811	-$ 506.786.045	-$ 687.675.306	-$ 874.895.692	-$1.068.668.791	-$1.269.223.949	-$ 1.476.798.537	-$ 1.691.638.236	-$1.913.997.324	-$2.144.138.980

Fuente: Autor

Tabla 25. Flujo Efectivo Anual con Propuestas Tecnológicas

Flujo de Efectivo Anual (Propuestas Tecnológicas)											
Años	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
Porcentaje de inflación proyectada (IPC fuente BanRep)		3,5%	3,5%	3,5%	3,5%	3,5%	3,5%	3,5%	3,5%	3,5%	3,5%
Ingresos											
Ahorros		$ 75.964.910	$ 78.623.682	$ 81.375.511	$ 84.223.654	$ 87.171.481	$ 90.222.483	$ 93.380.270	$ 96.648.580	$ 100.031.280	$ 103.532.375
Egresos											
Costos de Operativos											
Detonador electrónico	$ 46.049.715	$ 19.854.080	$ 20.548.973	$ 21.268.187	$ 22.012.573	$ 22.783.013	$ 23.580.419	$ 24.405.733	$ 25.259.934	$ 26.144.032	$ 27.059.073
Madera Plástica	$ 41.137.125	$ 42.576.924	$ 44.067.117	$ 45.609.466	$ 47.205.797	$ 48.858.000	$ 50.568.030	$ 52.337.911	$ 54.169.738	$ 56.065.679	$ 58.027.978
Total egresos	$ 87.186.840	$ 62.431.004	$ 64.616.089	$ 66.877.653	$ 69.218.370	$ 71.641.013	$ 74.148.449	$ 76.743.645	$ 79.429.672	$ 82.209.711	$ 85.087.051
Flujo de Efectivo Anual	-$ 87.186.840	$ 13.533.906	$ 14.007.592	$ 14.497.858	$ 15.005.283	$ 15.530.468	$ 16.074.034	$ 16.636.626	$ 17.218.908	$ 17.821.569	$ 18.445.324
Flujo acumulado	-$ 87.186.840	-$ 73.652.934	-$ 59.645.342	-$ 45.147.484	-$ 30.142.201	-$ 14.611.732	$ 1.462.302	$ 18.098.928	$ 35.317.835	$ 53.139.405	$ 71.584.729

Fuente: Autor

8. Discusión de resultados

En esta sección se discutirán y relacionarán los resultados obtenidos en este proyecto de investigación con respecto a los artículos y documentos expuestos con anterioridad en el marco de antecedentes, cabe resaltar que por motivos de alcance del estudio y técnicos del software, esta discusión de resultados desprecia los insumos suelo y agua.

Para el insumo suelo, en la categoría uso de suelo, este presenta la mayor carga ambiental de todo en el proceso de explotación por la actividad de transformación del suelo que la empresa minera ejerce sobre este, como se mencionó en el apartado 7, no se contempla una propuesta de mejoramiento para esta carga ambiental, puesto que le corresponde a la empresa mitigarlos mediante la ejecución del plan de manejo ambiental incluido en la licencia ambiental del proyecto minero. Sin embargo, cabe aclarar, que la recuperación total del territorio transformado solo es posible si se realiza una rehabilitación adecuada, esta misma declaración la realiza el estudio de ACV realizado a cuatro minas de carbón (2 a cielo abierto y 2 subterráneas) en Sudáfrica por Mangena & Brent (2006). Donde afirma que las operaciones de extracción mineral no pueden abordar la alta carga ambiental para la categoría uso del suelo en gran medida, debido a la naturaleza inherente de la industria. Así mismo, la ocupación de una gran área de tierra se atribuye a la geología del mineral explotado y de ahí los residuos minerales. Por lo tanto, la carga ambiental generada en el grupo de recursos del suelo puede ser de un valor insignificante para la industria minera.

Con respecto al insumo agua, no se evidencia carga ambiental en ninguna de las categorías de impacto, debido a que el software SimaPro no contempla en sus bibliotecas información necesaria acerca de impactos sobre el agua, el software solo contiene la herramienta huella hídrica relacionada a la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI); por ello futuros estudios como muestreo directo en la fuente hídrica afectada y uso de la técnica de huella hídrica en el software, son necesarios para evaluar este insumo que podría estar entre los más afectados a largo del CV del proceso de explotación en la empresa caso de Estudio.

Por otro lado, el consumo de Diesel en la maquinaria para la producción de madera es la principal fuente de agotamiento de combustibles fósiles, tomando el 29.6 % de toda este. De acuerdo con el estudio de Hélio & García (2015) , esto podría sugerir la adopción de un mayor uso de biodiésel como alternativa para minimizar el “cambio climático” y los impactos del “consumo de combustibles fósiles”. Sin embargo, el combustible de la planta de actividades mineras podría ser menor al que tiene otros impactos relacionados con las plantaciones de cultivos extensivos, por ejemplo, "uso de la tierra" y "emisiones de sustancias cancerígenas", estos aspectos deben ser considerados antes de llevar a cabo un simple intercambio de combustible. Igualmente, los resultados también muestran cómo se puede influir en los insumos e impactos asociados la cadena de explotación. Es decir, en la mayoría de los casos, el menor uso de entradas en un proceso puede ser más significativo para la conservación del medio ambiente que la limitación de su producción propia.

En el desarrollo de un estudio de ACV en la industria minera se deben asumir algunas variables las cuales hacen resaltar algunos puntos débiles del método ACV. Por ejemplo, en la etapa de ICV la introducción de datos de segundo plano, represento para este estudio algunas limitaciones, ya sea porque se obtuvieron por medio de fuentes secundarias, se asumieron o se despreciaron por temas de subjetividad y complejidad. Esto es también discutido en los estudios (Hernández & Rieznik, 2015; Erkayaoglu & Demirel, 2016), donde se estimaron o asumieron algunos datos para obtener una información completa de sus procesos y alimentar los requerimientos del ICV.

No obstante, el estudio de ACV permitió generar una visión clara acerca de los impactos y mejoras de esta actividad, como se hizo en la identificación de los cuatro insumos con mayor carga ambiental, explosivo, madera, cemento y gasolina de esta manera fue posible proponer estrategias tecnológicas de gestión ambiental que contribuyan a mejorar el desempeño ambiental de la empresa, y así mismo dichas propuestas pueden ser replicadas en otras compañías mineras de similares condiciones (Adekpedjou & Awuah, 2010).

La investigación en ACV y el fortalecimiento del sector minero, pueden contribuir para que este sector desarrolle estrategias de mayor eficiencia en la utilización de recursos enfocadas hacia la gestión ambiental empresarial, la cual debe contemplar todos los agentes en la cadena de valor de las operaciones mineras hasta los fabricantes de equipos. Así mismo, de acuerdo con todo el proceso investigativo se evidenció que es prioridad fortalecer las instituciones de investigación de ACV para que estas logren la consolidación de bases de datos para Colombia, con el fin de generar proyectos de acuerdo con las situaciones específicas del país, proporcionar datos de fácil acceso y herramientas analíticas para estudios de investigación ambiental.

9. Conclusiones

Por medio de la aplicación de la metodología ACV en el estudio del proceso de explotación de la mina de esmeraldas, se lograron identificar los puntos críticos del proceso (impactos ambientales significativos). Estos corresponden a la extracción, uso del explosivo Indugel en el proceso unitario de voladuras y la madera en el proceso de sostenimiento de túneles.

Así mismo se pudo observar que la mayor carga ambiental se encuentra sobre la categoría de impacto uso de suelo en todo el CV de la explotación, primordialmente por la transformación del suelo y el uso para la unidad funcional metro de avance.

En el proceso de la madera, la carga ambiental es del 29% en todo el CV del proceso de explotación, este se deriva principalmente de los procesos de combustibles asociados a la operación de la maquinaria empleada para la extracción del recurso. Igualmente, en el flujo del proceso del explosivo Indugel, la carga ambiental con 22.5% se deriva de los procesos de producción del nitrato de amonio, el cual es su principal componente y con respecto al proceso de cemento, su carga ambiental se deriva de los procesos contribuyentes como el proceso de producción de Clinker, el cual requiere de altos consumos de combustible.

Al excluir las entradas de explosivo y madera por su alta carga ambiental en el proceso de explotación, se pudo observar con mayor detalle las entradas cemento y gasolina las cuales se tomaron sobre el 20% y 10% respectivamente, así como el proceso de transporte con más del 20% en todas las categorías de impacto. De esta manera se identificó que el proceso de transporte toma casi el 45% de impacto en el uso de suelo sobre el proceso de explotación debido al transporte de la madera que es el material que se adquiere de mayor distancia.

Para disminuir dichas cargas ambientales, se demostró mediante un análisis financiero y la reevaluación de la carga ambiental que las propuestas Detonador Electrónico y madera plástica cumplen con las necesidades de la empresa ya que no solo son económicamente viables, sino que también disminuye significativamente los indicadores de sustancia carcinógenas e insumos fósiles lo que da una mejora en sus aspectos ecológicos y responsabilidad social.

Con lo anteriormente expuesto, la empresa puede intervenir en sus aspectos de mejora para sus próximos 5 años de explotación, los cuales son los mínimos deseados por la misma. Finalmente, se puede deducir que el ACV es una herramienta idónea para obtener insumos en la planeación estratégica de la empresa objeto de estudio, teniendo como base la gestión ambiental empresarial. Esto se demuestra por medio de las propuestas tecnológicas planteadas, ya que demuestran su eficiencia en la reducción de consumos de materias primas e insumos y en la optimización del proceso extractivo. Además, se evidenció en el apartado 7.4. del análisis financiero que la propuesta del sistema de detonación electrónica junto con la madera plástica genera altos rendimientos sobre su inversión, lo cual representa una aproximación de la rentabilidad de la incorporación de estrategias ambientales.

10. Recomendación

Las siguientes recomendaciones fueron creadas con el fin de promover el cumplimiento de la normativa para el ambiente y la salud y seguridad en el trabajo de los empleados, así como el incentivo por la compra verde en cuanto a la madera.

Se recomienda a la empresa evaluar el cambio de madera de eucalipto por madera obtenida de empresas certificadas ambientalmente, si no se realiza el cambio a madera plástica, ya que la compra de productos responsables con el ambiente ha ido aumentando en los últimos años y es la preferencia por compradores (GSIA, 2016; Kurczewski, Lewandowska, & Witczak, 2017). Así que la compra y el consumo responsable de madera legal o productos eco certificados, genera a la empresa minera beneficios tangibles e intangibles en responsabilidad social, económica y ambiental, permitiendo mejores resultados (Lubin & Esty, 2010). Adicionalmente, el estudio (Brown, 2018) muestra que la madera que proviene de las empresas que realizan secado naturalmente, es dura y consistente a diferencia de la que proviene de empresas con uso de maquinarias de secado, donde la madera se quiebra fácilmente y requiere de mantenimiento continuo.

. Actualmente, hay dos grandes tipos de certificaciones a nivel internacional, estas son Consejo de administración Forestal (FSC, por sus siglas en inglés) y Programa para el Reconocimiento de Certificación Forestal (PEFC, por sus siglas en inglés). En Colombia, existen empresas que cuentan con certificación aprobada por el FSC como Pizano S.A. y Smurfitkappa Cartón de Colombia quienes han recibido la certificación por el manejo de sus plantaciones con base en los principios, criterios e indicadores aprobados por dicha entidad (MinAgricultura, 2015).

Dado que la empresa objeto de estudio presenta altos consumos de agua por unidad de avance promedio y en la EICV no se evidenció ninguna carga ambiental atribuida a este, se recomienda realizar el cálculo de la huella hídrica del proceso de explotación de la mina, así como un análisis para determinar la presencia de drenaje ácido de mina. Esto con el fin de obtener un estudio más detallado sobre la calidad de los vertimientos de la empresa.

Debido a la alta contribución del explosivo indugel en la generación de (NOx, SOx y MP), se recomienda realizar un estudio de emisiones al aire y un estudio epidemiológico entre los trabajadores mineros para determinar la presencia de enfermedades asociadas a estas emisiones al aire.

Puesto que las propuestas de gestión ambiental evaluadas consistieron en un análisis parcial y de tipo cualitativo, se recomienda la evaluación de la rentabilidad de estas propuestas con un análisis financiero más detallado considerando otros indicadores de viabilidad económica.

11. Limitaciones

En el desarrollo de la etapa del ICV, se evidencio lo planteado por (Hernández & Rieznik, 2015; Erkayaoglu & Demirel, 2016) con respecto a las limitaciones de información para realizar estudios de ACV en la industria minera. Esto conllevó a encontrar ciertas incertidumbres en los datos debido a que algunas bases de datos del software tuvieron que ser copiadas y modificadas para la adaptación de la información en el contexto de la minería en Colombia.

Debido al acuerdo de confidencialidad, no fue posible proporcionar el nombre de la empresa ni información económica puntual de la empresa debido a políticas de seguridad. Esto represento algunas limitaciones para la evaluación financiera de las propuestas.

Bibliografía

Adekpedjou, K., & Awuah, A. (2010). Application of life cycle assessment in the mining industry. En *Life Cycle Assess, 16(1).* (págs. 82-89). doi:10.1007/s11367-010-0246-6 .

Aduvire, O. (2006). *Drenaje ácido de mina: generación y tratamiento.* Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

Aniés, J., & Perramón, T. (2017). *Seguridad y salud frente a las radiaciones ionizantes.* Madrid: Asepeyo.

Barczak, T. (2010). *A RETROSPECTIVE ASSESSMENT OF LONGWALL ROOF SUPPORT WITH A FOCUS ON CHALLENGING ACCEPTED ROOF SUPPORT CONCEPTS AND DESIGN PREMISES.* Obtenido de Center for desiase Control and Prevention (CDC): https://www.cdc.gov/niosh/mining/userfiles/works/pdfs/araol.pdf

Bolivar, R., & Garcia, J. (2015). A Technical and Environmental Study of Fortified Structures Used in Coal Mining in Norte de Santander. *Revista Facultad de Ingeniería, 24*(38), 107-116.

Brown, C. (2018). Development process for a higher capacity Propsetter system. *International Journal of Mining Science and Technology 28*, 121-126.

Bundschuh, J., & Litter, M. (2008). Distribución del arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamericana. En *Formas presentes de arsénico en agua y suelo* (págs. 5-27). Cyted.

Campos, R., & Christiansen, P. (2010). *Estudio comparatico de tres métodos de corte y trozado de Arboles con relación al grado de dureza* . Obtenido de http://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/rfp/article/viewFile/836/859

Córdova, J. (2015). Diseño de programa de seguridad y salud ocupacional en riesgo químico por gases producto de la voladura en la pequeña minería: caso de estudio empresa minera Bursal. Guayaquil, Ecuador. Obtenido de http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/21121

De la Rosa, J. (2008). Contaminación Atmosférica de Material Particulado Provocada por la Extracción Minera. *Revista de la sociedad española de mineralogía*, 85-88.

GSIA. (2016). *Global sustainable investment review.* Obtenido de USSIF (The forum for Sustainable and Responsible Investment: https://www.ussif.org/files/Publications/GSIA_Review2016.pdf

Indumil. (2016). *Fabrica de explosivos antonio ricaurte INDUSTRIA MILITAR DE COLOMBIA.* Obtenido de Indumil Colombia: https://www.indumil.gov.co/wp-content/uploads/2016/02/Productos-Fexar.pdf

Itten, F. &. (2014). Life Cycle Inventories of Electricity Mixes and grid.

Kurczewski, Lewandowska, & Witczak. (2017). *Green marketing today – a mix of trust, consumer participation and life cycle thinking.* Obtenido de Walter de Gruyter: https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/manment.2017.21.issue-2/manment-2017-0003/manment-2017-0003.pdf

Lillo, J. (sf). *Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas.* Castilla: GEMM.

Londoño, P., Muñoz, F., & Londoño, L. (2016). LOS RIESGOS DE LOS METALES PESADOS EN LA SALUD HUMANA Y ANIMAL. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustria*, *14*(2), 145-153.

Lubin, & Esty. (2010). The sustainability imperative: Lessons for leaders from previous game-changing megatrends. Harvard Business Review.

McCartney, C. (1995). The design and application of propsetter in underground coal mines. In: Proceedings of the 14th international conference on ground control in mining. Morgantown. *WV: West Virginia University*, 1-13.

MinAgricultura. (Enero de 2015). *COLOMBIA: Potencial de Reforestación Comercial.* Obtenido de MinAgricultura: https://vuf.minagricultura.gov.co/Documents/5.%20Estadisticas%20Sector%20Forestal/Potencial%20de%20Reforestacio%CC%81n%20Comercial%20en%20Colombia.pdf

MinAmbiente. (2016). *Estudio de estimación y caracterización del consumo de madera en los sectores de vivienda y grandes obras de infraestructura.* Obtenido de http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Gobernanza_forestal_2/11._Estudio_de_Estimacion_y_caracterizacion_del_consumo_de_madera.pdf

Novazo, N. &. (2003). *CARACTERIZACIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES ATMOSFÉRICOS EN ÁREAS INDUSTRIALES.* Bilbao: Universidad del país Vasco.

OMS. (Abril de 2016). *Radiaciones ionizantes: efectos en la salud y medidas de protección*. Obtenido de Centro de prensa: http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs371/es/

Orica. (2018). *Orica Mining Services*. Obtenido de eDev II - The Next Generation: http://www.oricaminingservices.com/cu/es/page/products_and_services/electronic_blasting_systems/product_type_edev_ii/edev_ii/edev_ii_-_the_next_generation

PRé Consultants. (2014). *What's new in SimaPro 8.0.4* . Obtenido de Pre-sustainability.com: https://www.pre-

sustainability.com/download/SimaPro804WhatIsNew.pdf

REXCO. (Marzo de 2013). *PLAN DE EXPORTACIÓN DE MADERA PLÁSTICA HACIA EL PERÚ PRODUCTO DE LA EMPRESA REXCO S.A.S.* Obtenido de https://bdigital.uniquindio.edu.co/bitstream/001/2120/1/Plan%20exportadorde%20REXCO%20II.pdf

Sangwan, Bahkar, & Andrat, N. &. (2014). Life Cycle Assessment of Incandescent, Fluorescent, Compact Fluorescent and Light Emitting Diode Lamps in an Indian Scenario. *21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, 467- 472.

Silva, Lahr, & &, P. (2014). LCA case study of sugarcane bagasse addition to particle board manufacturing. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1767-1778.

Steyn, A. (2017). The Benefits of using electronic detonators in both opencast and undergrounds mines . En Pradeep, Singh, Singh, & K. &. Roy, *NexGen Technologies for Mining and Fuel Industries (Volume I and II)* (págs. 291-298). Johannesburg, South Africa: Allied Publishers.

Thornton, L. (1996). Impacts of mining on the environment; some local, regional and global issues. *Applied Geochemistry*, 351-361.

TMFB. (2014). *Dureza de la Madera, Metodo Monnin.* Obtenido de https://tmolduras-fbermejo.es/pdfmaderas/p_dureza.pdf

Torres, F., Gozales, C., & Tapia, W. (2009). Aplicación del sistema electrónico eDev II en voladuras subterraneas: En Minera Suyamarca Unidad Pallancata. *Seguridad Minera*, 48-56. doi:ISBN 978-987-24878-9-8

Tovar. (2013). *ANÁLISIS PRELIMINAR DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES Y SOCIALES GENERADOS POR LA MINERÍA DE ARCILLAS A CIELO ABIERTO EN LA VEREDA EL MOCHUELO BAJO, CIUDAD BOLÍVAR, BOGOTÁ D.C., ESTUDIO DE CASO.* Obtenido de javeriana.edu.co: https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/12467/GarzonTovarLigiaNathalya2013.pdf;sequence=1

UPME. (2016). *PROYECCIÓN DE DEMANDA COMBUSTIBLES LÍQUIDOS EN COLOMBIA.* Obtenido de sipg.gov.co: http://www.sipg.gov.co/sipg/documentos/Proyecciones/2016/Proyeccio%CC%81nDemandaL%C3%ADquidos-Rev2016.pdf

Watanabe. (2013). *Explosivos - tipos y propiedades.* Obtenido de UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA, Escuela Académico Profesional De Ingeniería Geológica: http://www.monografias.com/trabajos83/explosivos-tipos-y-propiedades/explosivos-tipos-y-propiedades.shtml

AFP & CONtexto ganadero. (21 de 10 de 2015). *Las esmeraldas de Colombia limpian su reputación*. Obtenido de Contextoganadero: http://www.contextoganadero.com/regiones/las-esmeraldas-de-colombia-limpian-su-reputacion

Álvarez, B. (2014). Análisis de ciclo de vida social en la exploración aurífera a cielo abierto: estudio de caso en el proyecto la Colosa-Cajamarca, (Tolima). *Universidad El Bosque, Bogotá, Colombia.*

Andrews, K. R. (1971). *The Concept of Corporate Strategy, Burr Ridge, IL: Dow-JonesIrwin.*

AnglogoldAshanti; Gramalote- Colombia Limited. (2015). Obtenido de http://www.anglogoldashanti.com.co/saladeprensa/Reportes/Estudio%20de%20impacto%20ambiental%202015%20Proyecto%20Minero%20Gramalote.pdf

Aniés, J., & Perramón, T. (2017). *Seguridad y salud frente a las radiaciones ionizantes.* Madrid: Asepeyo.

Antero, J., & Ramírez, V. (2013). Evolución de la Normatividad Ambiental Colombiana en Función de las Tendencias Mundiales de Desarrollos Sostenible. Revista NOOS.Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. *Facultad de Ciencias Exactas, Vol. 3, 3*.

Aragón, A., & Sharma, S. (2004). *Gestión Medioambiental Proactiva: Validación de un Intrumento de Medida.* Obtenido de http://www.pymesonline.com/uploads/tx_icticontent/R01668_proactiva.pdf

Arana, G., Arbulo, P., Basurto, P., & Landeta, B. (2013). *Análisis de los efectos de la adopción de estándares de ecodiseño en el rendimiento empresarial de los estudios de Arquitectura.* España: ISSN: 0012-7353.

Aranda, J., & Zabalza, I. (2010). Ecodiseño y análisis de ciclo de vida. En *Prensas Universitarias de Zaragoza.* (págs. 17-18). Zaragoza: ISBN: 978-84-92774-951.

Arango Aramburo, M., & Olaya, Y. (2012). Problemática de los pasivos ambientales mineros en Colombia. . *Gestión y Ambiente* , 125-133.

Austinpowder . (2017). *Electric & Electronic Detonators Safety Data Sheet.* Obtenido de COMPOSITION / INFORMATION ON INGREDIENTS : http://www.austinpowder.com/blasters_guide/4-SDS_Catalog.pdf

Avellaneda, J. (2013). *Aproximación a la historia ambiental de la minería en Boyacá.* .

Azapagic, A., Lehtinen, H., Pitts, M. R., & Saarentaus, A. (2011). *A Review of LCA*

Methods and Tools and their Suitability for SMEs. . Europe INNOVA.

Azapagic, Lehtinen, Rouhiainen, P., & Saarentaus. (2011). *A Review of LCA Methods and Tools and their Suitability for SMEs.* Obtenido de biochem-project.eu: http://www.biochem-project.eu/download/toolbox/sustainability/01/120321%20BIOCHEM%20LCA_review.pdf

Banco de la República. (09 de 04 de 2018). *Boletín de Indicadores Económicos*. Obtenido de http://www.banrep.gov.co/sites/default/files/paginas/bie.pdf

Barczak, T. (2010). *A RETROSPECTIVE ASSESSMENT OF LONGWALL ROOF SUPPORT WITH A FOCUS ON CHALLENGING ACCEPTED ROOF SUPPORT CONCEPTS AND DESIGN PREMISES.* Obtenido de Center for desiase Control and Prevention (CDC): https://www.cdc.gov/niosh/mining/userfiles/works/pdfs/araol.pdf

Barón, M., & Gutiérrez, F. (2008). Órdenes subsidiarios: Coca, esmeraldas: la guerra y la paz. . *Colombia Internacional*,, 102-129.

Belmonte, L., Burgos, J., & Plaza, J. (2011). *Cuadernos de Economía y Dirección de la Empresa. Grupos de interés, gestión ambiental y resultado empresarial: una propuesta integradora.* . España: S.L.

Botín, J. (2010). La Responsabilidad Social Corporativa, su significado en minería y su integración en el día-a-día de las operaciones. 30-35.

Brown, C. (2018). Development process for a higher capacity Propsetter system. *International Journal of Mining Science and Technology 28*, 121-126.

Bundschuh, J., & Litter, M. (2008). Distribución del arsénico en las regiones Ibérica e Iberoamericana. En *Formas presentes de arsénico en agua y suelo* (págs. 5-27). Cyted.

Camargo, P., & Chiappetta, C. (2017). Information systems and sustainable supply chain management towards a more sustainable society: Where we are and where we are going. *International Journal of Information Management*, 241-249.

Carmona, E., & Magán, A. (2008). La Estrategia Ambiental: Definición y Tipologías. Managment.

Centro Australiano para Prácticas de Minería Sostenible & Austrade. (2011). *Guía para el Desarrollo Sostenible en Minería-. Sidney, New South Wales, Australia.* Obtenido de austrade.gov.au: https://www.austrade.gov.au/.../FINAL_SUSTAINABLE%20MINING_ESPANOL.pdf.

CEPAL. (2011). *La sostenibilidad del desarrollo a 20 años de la Cumbre para la Tierra.*

Recuperado el 12 de 12 de 2015, de Avances, brechas y lineamientos estratégicos para América Latina y el Caribe: http://www10.iadb.org/intal/intalcdi/PE/2011/08958.pdf

Chacón. (2008). Historia ampliada y comentada del análisis de ciclo de vida (ACV) Con una bibliografía selecta. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería, 72.*

Collis, D., & Montgomery, C. (2007). Estrategia corporativa: un enfoque basado en los recursos. En *Introducción a la Estrategia Corporativa* (págs. 3-10). Madrid: MCGRAW-HILL.

Colombia, E. (2016). *Esmeralda Colombia Beta Esmeraldifera del Mundo.* Obtenido de http://www.esmeraldacolombia.com/script/esmeraldas.php?lang=es

Constitución Política de Colombia. (1991). *Gaceta Constitucional número 114* . Obtenido de http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=4125

Contraloría General de la Nación. (07 de 2012). *Informe del estado de los Recursos Naturales y del Ambiente.* Obtenido de http://www.contraloriagen.gov.co

Córdova, J. (2015). Diseño de programa de seguridad y salud ocupacional en riesgo químico por gases producto de la voladura en la pequeña minería: caso de estudio empresa minera Bursal. Guayaquil, Ecuador. Obtenido de http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/21121

CORPOCHIVOR. (2014). *Manual para la Producción más Limpia de la Explotación de Esmeraldas.* Chivor, Oriente de Boyacá, Colombia: G. (Colombia), Ed. .

Corrie, C., Jmenez, A., & Nava, V. (2002). ISO 9000:2000 : estrategias para implantar la norma de calidad para la mejora continua. Mexico: Mexico: Limusa. Retrieved from ISO 9000:2000 : estrategias para implantar la norma de calidad para la mejora continua.

Curran. (2012). Lyfe Cycle Assesmet Handbook. A guide for environmentally sustainable products. . *USA.*

DANE. (2005). *Boletín Censo General. Perfil Muzo-Boyacá.* Obtenido de Departamento Administrativo Nacional de Estadística : http://www.dane.gov.co/files/censo2005/perfiles/boyaca/muzo.pdf

DANE. (2005). *Boletín, Censo General 2005. Perfil Quípama-Boyacá.* Obtenido de Departamento Administrativo Nacional de Estadística: http://www.dane.gov.co/files/censo2005/perfiles/boyaca/quipama.pdf

De la Rosa, J. (2008). Contaminación Atmosférica de Material Particulado Provocada por la Extracción Minera. *Revista de la sociedad española de mineralogía*, 85-88.

Díaz, M. (2014). *Análisis de Ciclo de Vida. La ecología industrial. Teoría, concepto y herramientas. Retrieved* . Obtenido de Universidad Autónoma Metropolitana: http://148.206.107.15/biblioteca_digital/capitulos/4235758djj.pdf

Drielsma, J., Drnek, T., RusselL, A., & Weihed, P. (2016). Mineral resources in life cycle impact assessment—defining the path forward. *The International Journal of Life Cycle Assessment, 21,* , 85-105.

Du, G., & Karoumi, R. (2014). Life cycle assessment framework for railway bridges: literature survey and critical issues. *Structure and Infrastructure Engineering*, *10*.

Ehrhardt, M., & Brigham, E. (2007). Finanzas Corporativas. En *Principios básicos de la presupuestación de capital:Evaluación de los flujos de efectivo* (págs. 313-318). Mexíco D.F.: Cengage Learning.

Erkayaoglu, M., & Demirel, N. (2016). A comparative life cycle assessment of material handling systems for sustainable mining. *Journal of Environmental Management 174* , 1-6.

FEDESAROLLO. (18 de 06 de 2014). *MINERÍA Y MEDIO AMBIENTE EN COLOMBIA.* Obtenido de Repositorio Institucional Fedesarrollo: http://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/335/Repor_Junio_2014_Martinez.pdf?sequence=3

FEDESARROLLO. (04 de 2008). *La minería en Colombia: impacto socioeconómico y fiscal.* Obtenido de Biblioteca virtual Repositorio Institucional Fedesarrollo: http://www.repository.fedesarrollo.org.co/handle/11445/893

Fedesarrollo. (2012). *Impacto socioeconómico de la minería en Colombia. Bogotá: Fedesarrollo-Centro de investigación económica y social.* .

FEDESMERALDAS. (2015). *Federación Nacional Colombiana de Esmeraldas.* Obtenido de http://www.fedesmeraldas.com.co/Institucional/

FEDESMERALDAS. (2015). Simposio Mundial y Marca Esmeralda. Esmeralda. *6*, 22-25.

FEDESMERALDAS. (25 de 04 de 2016). *Producción y exportación de esmeraldas se proyecta al alza.* Obtenido de http://fedesmeraldas.com.co: http://fedesmeraldas.com.co/produccion-y-exportacion-de-esmeraldas-se-proyecta-al-alza/

Fraguela, J., Carral, L., Iglesias, G., Castro, A., & Rodriguez, J. (2011). *La integración de los sistemas de gestión. Necesidad de una nueva cultura empresarial* . Medellín, Colombia. : ISSN 0012-7353, 44-49. (S. Direct, Ed.).

Friedman, A. L. (2006). *Stakeholders: Theory and Practice. New York: Oxford University Press.* .

Fuente, J., & Accinelli, E. (2012). Responsabilidad social corporativa, actividades empresariales y desarrollo sustentable Modelo matemático de las decisiones en la empresa. 227-248.

Fundación Avina. (2010). *Elementos diagnósticos para una caracterización de la minería en Colombia-Gestión Ambiental Estratégica. Bogotá, Colombia.* Obtenido de Gestión Ambiental Estratégica: http://mesadedialogopermanente.org/wpcontent/uploads/2013

Fundación Museo Internacional de la Esmeralda. (2015). *Formas de las esmeraldas.* Obtenido de http://www.museodelaesmeralda.com.co/esmeraldas.php

Garraín, D., Vida, R., & Franco, V. (2016). *Análisis del ciclo de vida del reciclado del polietileno de alta densidad.* Obtenido de Repositori Universitat Jaume I: http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/30030/29497.pdf?sequence=1

Gemfields. (2013). Zambia: Kagem o el milagro verde. *Revista Esmeralda (4)*, 18-21.

GEMSELECT. (02 de 2011). *La esmeralda.* Obtenido de Gemselect: http://www.gemselect.com/spanish/gem-info/emerald/emerald-info.php

Giuliani, G., Marshall, D., & Groat, L. (2008). Emerald deposits and occurrences: A review. . *Ore Geology Reviews* , 87-112, doi:10.1016 / j.oregeorev.2007.09.003.

Gobernación de Boyacá . (29 de 05 de 2012). *Localización y ubiación geográfica de Boyacá.* Obtenido de http://www.boyaca.gov.co

Gobernación de Boyacá. (21 de 10 de 2008). *Departamento de Boyacá, División provicial.* Obtenido de http://www.boyaca.gov.co

Gómez, R. (2014). *Del desarrollo Sostenible según Brundtland a la sostenibilidad como Biomímesis.* . Obtenido de https://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/U0686956.pdf

Gónzales. (2015). *Propuesta de un modelo para medir activos intangibles en empresas de software a partir de una herramienta multicriterio.* Obtenido de Universidad ICES, Colombia: http://www.redalyc.org/pdf/212/21237092006.pdf

Grammling. (2008). Análisis e Información sobre Comercio y Desarrollo Sostenible para América Latina. *El comercio y el desarrollo sostenible: hacia un nuevo consenso*, 9(2).

GSIA. (2016). *Global sustainable investment review.* Obtenido de USSIF (The forum for Sustainable and Responsible Investment: https://www.ussif.org/files/Publications/GSIA_Review2016.pdf

Gutiérrez, J. (2012). Matemáticas Financiera: con formulas, calculadora financiera y Excel.

En *Indicadores de Conveniencia Económica* (págs. 299-309). Bogotá: ECOE Ediciones.

Habermas, J., & McCarthy, h. (1985). *The Theory of Communicative Action: Reason and the rationalization of society. Beacon Press.*

Heijungs, R., & Guinée, J. B. (2012). An Overview of the Life Cycle Assessment Method - Past, Present, and Future. In M. A. . En L. C. Curran. Cincinnati: Scrivener Publishing LLC. .

Helena, M. (2008). *APORTE CRÍTICO AL ANÁLISIS DE LA NORMATIVIDAD AMBIENTAL*. Obtenido de http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n27/n27a08

Hélio, F., & García, M. (2015). A Life Cycle Assessment study of iron ore mining. *Elsevier Ltd*.

Hernández, A., & Rieznik, N. (2015). Ciudades para un Futuro más Sostenible. En *Análisis del ciclo de vida.* Madrid, España.

Herrera, C., & Van Hoof, B. (2007). La evolución y el futuro de la producción más limpia en Colombia. *Revista de ingeniería (26)*, 101-117, ISSN. 0121-4993.

Indumil. (2016). *Fabrica de explosivos antonio ricaurte INDUSTRIA MILITAR DE COLOMBIA.* Obtenido de Indumil Colombia: https://www.indumil.gov.co/wp-content/uploads/2016/02/Productos-Fexar.pdf

Ingeominas. (2004). *Estado del conociemiento de la exploración de esmeraldas en Colombia.* Obtenido de http://aplicaciones1.ingeominas.gov.co

Ingeominas. (05 de 2004). *Estado del conocimiento de la exploración de esmeraldas en Colombia.* Obtenido de http://aplicaciones1.ingeominas.gov.co

Ingwersen, W. (2010). *Advances in life cycle assessment and emergy evaluation with case studies in gold mining and pineapple production.* Florida, USA.

ISO 14040. (2007). *Iso.org.* Obtenido de https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en

Kurczewski, Lewandowska, & Witczak. (2017). *Green marketing today – a mix of trust, consumer participation and life cycle thinking.* Obtenido de Walter de Gruyter: https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/manment.2017.21.issue-2/manment-2017-0003/manment-2017-0003.pdf

Lavandaio, E. (2008 de 2008). *Conozcamos más sobre Minería.* Argentina: ISSN 0328-2317.

Leiteritz, R., & Riaño, M. (2015). *Tras el corazón verde: los vaivenes del conflicto en la región esmeraldera de Colombia. In Diferentes recursos, conflictos diferentes: La*

economía política del conflicto armado y la criminalidad en las regiones de Colombia.

Ligiaes. (2003). *Antecedentes históricos de la gestión ambiental* . Recuperado el 13 de 12 de 2015, de manuelrodriguezbecerra.com: http://www.manuelrodriguezbecerra.com/bajar/gestion/capitulo4.pdf

Lillo, J. (sf). *Peligros geoquímicos: arsénico de origen natural en las aguas.* Castilla: GEMM.

Londoño, P., Muñoz, F., & Londoño, L. (2016). LOS RIESGOS DE LOS METALES PESADOS EN LA SALUD HUMANA Y ANIMAL. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustria, 14*(2), 145-153.

Lubin, & Esty. (2010). The sustainability imperative: Lessons for leaders from previous game-changing megatrends. Harvard Business Review.

Mancini, L., Recchioni, M., Pennington, D., & Sala, s. (2014). Potential of life cycle assessment for supporting the management of critical raw materials. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20.

Mangena, S., & Brent, A. (2006). Application of a Life Cycle Impact Assessment framework to evaluate and compare environmental performances with economic values of supplied coal products. *Journal of Cleaner Production, 14, 1071e1084*.

Mastre, V. (2013). *La necesidad de normas para la convivencia social. Retrieved 10 29, 2015.* Obtenido de http://suite101.net/article/la-necesidad-de-normas-para-la-convivencia-social-a19093#.VjKoBW7LKDU

MAVDT. (2002). *Guía Minero Ambiental. Retrieved 10 12, 2015.* Obtenido de http://www.siame.gov.co

McCartney, C. (1995). The design and application of propsetter in underground coal mines. In: Proceedings of the 14th international conference on ground control in mining. Morgantown. *WV: West Virginia University*, 1-13.

Mina de Piedras. (s.f.). *Mina de Piedras- Las mejores Piedras de Colombia. Retrieved from* . Obtenido de Yacimiento de esmeraldas: http://www.minadepiedras.com/es/laesmeralda/yacimientos-de-esmeraldas.html

MinAgricultura. (Enero de 2015). *COLOMBIA: Potencial de Reforestación Comercial.* Obtenido de MinAgricultura: https://vuf.minagricultura.gov.co/Documents/5.%20Estadisticas%20Sector%20Forestal/Potencial%20de%20Reforestacio%CC%81n%20Comercial%20en%20Colombia.pdf

MinAmbiente. (2016). *Estudio de estimación y caracterización del consumo de madera en*

los sectores de vivienda y grandes obras de infraestructura. Obtenido de http://www.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadyServiciosEcosistemicos/pdf/Gobernanza_forestal_2/11._Estudio_de_Estimacion_y_caracterizacion_del_consumo_de_madera.pdf

MinMinas. (2016). *POLÍTICA MINERA DE COLOMBIA Bases para la minería del futuro.* Obtenido de minminas.gov.co: https://www.minminas.gov.co/documents/10180/698204/Pol%C3%ADtica+Minera+de+Colombia+final.pdf/c7b3fcad-76da-41ca-8b11-2b82c0671320

Monterroso, E. (2015). *Normas ISO-GENERALIDADES | NORMAS ISO 9000 | NORMAS ISO 14000 . Retrieved 11 03, 2015, from Universidad Nacional de Luján.* Obtenido de http://www.unlu.edu.ar/~ope20156/normasiso.htm

Morillo, M. (2001). Rentabilidad Financiera y Reducción de Costos. *Actualidad Contable FACES*, 35-48.

Norgate, T., & Haque, N. (2015). Life cycle assessment of iron ore mining and processing, In Iron Ore. *Woodhead Publishing*, 615-630.

Novazo, N. &. (2003). *CARACTERIZACIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES ATMOSFÉRICOS EN ÁREAS INDUSTRIALES.* Bilbao: Universidad del país Vasco.

NTC ISO 14041. (2000). *Gestión Ambiental- Análisis de Ciclo ed Vida- Definición del Objetivo y alcance y análisis del Inventario.* Obtenido de http://archives.valoryempresa.com/archives3/14041txt.pdf.pdf

NTC-ISO 14040. (2007). *Gestión ambiental análisis de ciclo de vida. Principios y marco referencial.* Obtenido de http://files.control-ambiental5.webnode.com.co: http://files.control-ambiental5.webnode.com.co/200000127-a0991a28c5/NTC-ISO14040-2007%20Analisis_CicloVida.pdf

Olivero, J. (2014). *Efectos de la minería en Colombia sobre la salud humana.* Obtenido de http://concienciaciudadana.org/wp-content/uploads/2017/06/Efectos-de-la-Miner%C3%ADa-en-Colombia-sobre-la-Salud-Humana-Jes%C3%BAs-Olivero-Verbel.pdf

OMS. (Abril de 2016). *Radiaciones ionizantes: efectos en la salud y medidas de protección*. Obtenido de Centro de prensa: http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs371/es/

Parrado, Á., & Robinson, P. (2012). *Diseño plan de manejo ambiental para la mina de esmeraldas en Guaquimay, municipio de Yacopí (Cundinamarca).* Obtenido de http://www.umng.edu.co

PBI. (2011). Minería en Colombia ¿A qué precio? (Boletín Informativo no. 18). .

Colombia: Editorial CÓDICE Ltda. ISSN 1908 - 3489.

Peña, R., & Rosas, I. (12 de 10 de 2015). *Metodología de evaluación del impacto del ciclo de vida para la minería.* Obtenido de Ministerio de minería de Chile: http://www.tecnologiaslimpias.cl/chile/docs/2004-est-met-evalimpactovida.pdf Pierre, F., & P

Porter. (1987). *Competitive Advantage to Corporate Strategy.* . Obtenido de Harvard Business Review, 43-59: From https://hbr.org/1987/05/from-competitive-advantage-to-corporate-strategy

PRé Consultants. (2014). *What's new in SimaPro 8.0.4* . Obtenido de Pre-sustainability.com: https://www.pre-sustainability.com/download/SimaPro804WhatIsNew.pdf

Quijano, & Pardo. (12 de 2010). *Elementos Diagnósticos para una caracterización de la minería en Colombia.* Obtenido de Mesa de dialogo permanente: https://www.mesadedialogopermanente.org/wp-content/uploads/2013/05/ELEMENTOS-DIAGNOSTICO-MINERIA-COLOMBIA-GAE-AVINA.pdf

Republíca Nacional de Colombia. (1989). *Informe relativo al levantamiento de los planos y mesura de los terrenos de las minas de esmeralda.* Bogotá: Imprenta Nacional.

República, L. (26 de 04 de 2013). *Así quedó el mercado de las esmeraldas.* . Obtenido de http://www.larepublica.co

Rivera, H. (2009). The Concept of Corporate Strategy-Kenneth R. Andrews. . En *Innovar* (págs. 19(35), 197-169).

Roca, M. (2014). *Comparativa de Análisis de Ciclo de Vida de dos tipos de puente de carretera: puente de hormigón y puente metálico. Barcelona, UPC BARCELONA TECH.* Obtenido de http://upcommons.upc.edu/

Romero, T. (2008). Análisis de Ciclo de Vida (ACV) Herramienta de Gestión Ambiental. . *Revista tendencias tecnológicas, 91-97. ISSN 2174-6850.* .

Rubiano, S. (2012). *La regulación ambiental y social de la minería en Colombia: comentarios al proyecto de ley de reforma al Código de Minas.* Obtenido de http://library.fes.de/pdf-files/bueros/kolumbien/09382.pdf

SAIC. (2006). Life Cycle Assessment: Principles and Practice. *Scientific Applications International Corporation (SAIC),. (M. A. Curran, Ed.) OHIO 4526: EPA.*

Sampieri, H., Collado, F., & Baptista, L. (2010). *Estudios de caso.La metodología de la investigación (Capítulo 4).* México: McGraw-Hill Interamericana.

Sangwan, Bahkar, & Andrat, N. &. (2014). Life Cycle Assessment of Incandescent, Fluorescent, Compact Fluorescent and Light Emitting Diode Lamps in an Indian Scenario. *21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, 467- 472.

Sharma, S., & Vredenburg, H. (1998). Proactive Corporate Strategy and tehe Development of Competitively Valuable Organizational Capabilities. En S. M. Journal.

Silva, Lahr, & &, P. (2014). LCA case study of sugarcane bagasse addition to particle board manufacturing. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1767-1778.

SIMCO. (2015). *Informe Sectorial Minero-Sistema de Información Minero Colombiano.* Obtenido de https://www.sectorial.co/minero/item/.../90_41c8743318e70b270dcc7c922555a835

Siñuela, D. A. (2012). *Diseño de un sistema de control producción para la minería de esmeraldas. Tesis de pregrado, Universidad de Chile, Santiago de Chile.* . Obtenido de http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2012/cf-sinuela_dp/html/index-frames.html

Steyn, A. (2017). The Benefits of using electronic detonators in both opencast and undergrounds mines . En Pradeep, Singh, Singh, & K. &. Roy, *NexGen Technologies for Mining and Fuel Industries (Volume I and II)* (págs. 291-298). Johannesburg, South Africa: Allied Publishers.

Strata. (05 de 04 de 2018). Propsetter® Yielding support system. USA.

Thiebault, C. (. (2010). *Design of railway bridges considering LCA. KTH- Science, art & engineers* . Stockholm, Sweden: Vincent Thiebault. Royal Institute of Technology (KTH). ISSN 1103-4297.

Thornton, L. (1996). Impacts of mining on the environment; some local, regional and global issues. *Applied Geochemistry*, 351-361.

Tovar. (2013). *ANÁLISIS PRELIMINAR DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES Y SOCIALES GENERADOS POR LA MINERÍA DE ARCILLAS A CIELO ABIERTO EN LA VEREDA EL MOCHUELO BAJO, CIUDAD BOLÍVAR, BOGOTÁ D.C., ESTUDIO DE CASO.* Obtenido de javeriana.edu.co: https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/12467/GarzonTovarLigiaNathalya2013.pdf;sequence=1

UNEP. (2003). Evaluation of Environmental Impacts in Life Cycle Assessment. *París, Francia: La Fenice Grafica. ISBN: 92-807-2144-5.* . Obtenido de París, Francia: La Fenice Grafica. ISBN: 92-807-2144-5.

UPME. (08 de 09 de 2004). *Unidad de Planeación Minero Energética: Plan de Infraestructura de Trasporte y Portuaria.* Obtenido de http://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/1276/5/RESUMEN%20EJECUTIVO.pdf

UPME. (2016). *PROYECCIÓN DE DEMANDA COMBUSTIBLES LÍQUIDOS EN COLOMBIA.* Obtenido de sipg.gov.co: http://www.sipg.gov.co/sipg/documentos/Proyecciones/2016/Proyeccio%CC%81nDemandaL%C3%ADquidos-Rev2016.pdf

Valdivia, S., & Ugaya, c. (2011). Life cycle inventories of gold artisanal and small-scale mining activities in Peru: Toward indicators for South America. (Y. University, Ed.) UNEP DTIE—SCP Branch, 15(6), . 922-936.

Van Hoof. (2008). La herramienta de análisis de ciclo de vida. In B. Van Hoof, N.Monroy , & A. Saer, Producción más limpia : paradigma de gestión ambiental. Bogotá: Alfaomega.

Van Hoof, B., & Herrera, C. (2007). La evolución y el futuro de la producción más limpia en Colombia. . *Revista de Ingeniería.Universidad de los Andes, 10(26),* , 101-119. .

Watanabe. (2013). *Explosivos - tipos y propiedades.* Obtenido de UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA, Escuela Académico Profesional De Ingeniería Geológica: http://www.monografias.com/trabajos83/explosivos-tipos-y-propiedades/explosivos-tipos-y-propiedades.shtml

Yañes, C. (2008). *Sistema de Gestió de Calidad en base a la Norma ISO 9001.* Obtenido de http://internacionaleventos.com/articulos/articuloiso.pdf