

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE QUÍMICA
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL



Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería
Ambiental

**“Trazabilidad de la Varilla de Acero para Construcción #3 como base para la
elaboración de la Declaratoria Ambiental del Producto
en ArcelorMittal Costa Rica”**

Alberto Vásquez Granados

Cartago, Noviembre 2016

“Trazabilidad de la Varilla de Acero para Construcción #3 como base para la elaboración de la Declaratoria Ambiental del Producto en ArcelorMittal Costa Rica”

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura

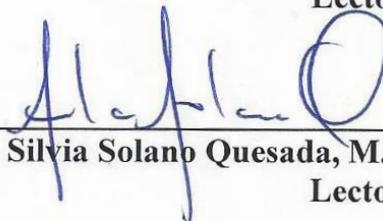
Miembros del tribunal



Lilliana Abarca Guerrero, Ph.D.
Director



Ing. Amb. Melissa María Díaz Segura
Lector 1



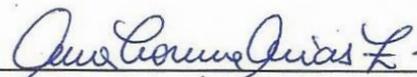
Silvia Solano Quesada, M.Sc.
Lector 2



Diana Zambrano Piamba, M.Sc.
Coordinador COTRAFIG



Floría Roa Gutiérrez, Ph.D.
Directora Escuela de Química



Ana Lorena Ariás Zúñiga, M.Sc.
Cordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental

DEDICATORIA

A mis padres, por el esfuerzo que han realizado para facilitar mi formación moral y académica.

*“He participado en una noble competición,
he llegado a la meta en la carrera, he conservado la fe”
2^{da} Epístola a Timoteo 4,7*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a Dios. Por su amor, por regalarme la vida y la oportunidad de prepararme profesionalmente.

A mi familia. Por estar atentos a mis necesidades, preocupaciones y apoyarme amorosamente en todo momento.

A mi profesora, colega y amiga, la Ph.D Lilliana Abarca. Por su paciencia y disposición, por lo mucho que me ayudó a crecer con su apoyo y motivación.

A las ingenieras Melissa Díaz y Natalia Bonilla. Por su amistad, profesionalismo y enseñanzas durante este proceso.

A la profesora Ana Grettel Leandro del CIVCO y al Arquitecto Víctor Montero. Por su guía y consejos durante la realización de este proyecto.

A la Msc. Silvia Solano, por su apoyo durante la etapa final de mi proyecto.

Al señor Mario Brenes y ArcelorMittal Costa Rica. Por brindarme la oportunidad de generar conocimiento y colaborar arduamente en este proceso.

A la Sra. Claudia Peña del EPD Latin America. Por su gran contribución y apoyo que permitió enriquecer mucho el estudio.

A mis grandes amigas, Fabianna Cambronero, Kenia Calvo y Carolina Rojas. Por sus consejos, llamadas de atención, sus chistes, las estudiadas juntos y demás situaciones que me ayudaron a crecer como persona.

A mis amigos Hernán Federico Chávez, Juan Francisco Catalán y Enrique Calvo, presbíteros. Por su guía espiritual y amistad, que apaciguaron mis tristezas en tiempos difíciles.

También a los hermanos y hermanas de la cuarta comunidad neocatecumenal de la Parroquia Catedral de Santiago Apóstol de Cartago. Por el apoyo incondicional, sus oraciones, caridad y compañía durante estos años.

Al programa IntegraTEC. Por facilitar el desarrollo de mis habilidades de liderazgo y permitirme conocer personas grandiosas. Además extendiendo un particular agradecimiento a Adriana Mata, psicóloga y asesora de IntegraTEC, quien me ayudó a superar una crisis importante durante la tesis.

A los profesores, profesoras y personal administrativo de la Carrera de Ingeniería Ambiental y de la Escuela de Química. Por su amistad, confianza y apoyo durante mis estudios en el TEC.

A aquellas personas que conocí en la Escuela de Biología. Silvana Alvarenga, Tatiana Salazar, Karol Jiménez y demás personas que me dieron la oportunidad de trabajar durante seis años en el CIB y que me brindaron amistad y apoyo.

A las familias Gómez Rojas y Salazar Quesada. Por la caridad que tuvieron conmigo en tiempos difíciles, por la confianza y hospitalidad.

Al profesor Roberto Azofeifa “sensei”. Por su amistad durante tantos años en el TEC y su apoyo incondicional.

A mi gran amigo Agustín Vásquez (quién estará en la Gloria de Dios). Por haberme enseñado los caminos de la superación, la inspiración y la motivación para alcanzar mis sueños.

A mis demás compañeros y compañeras de la carrera de Ingeniería Ambiental, amistades y familiares que no mencioné en esta sección. Por su apoyo desde que inicié esta aventura para convertirme en Ingeniero Ambiental.

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

A. C	Antes de Cristo
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
AHMSA	Altos Hornos de México Sociedad Anónima
AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
ALCALA	Association for Life Cycle Assessment in Latin America
CADIS	Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sostenible
CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
CR	Costa Rica
CRNCOP	Centro Nacional de Referencia sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes
CILCA	Certificate in Local Council Administration
DAP	Declaración Ambiental de Producto
DAPc	Declaración Ambiental de Producto de la Construcción
EICV	Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida
EN	European Norm
FIFCO	Florida Ice and Farm Co
GAMMA	Ganadería y Manejo del Medio Ambiente
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GBC-CR	Green Building Council Costa Rica
ICE	Instituto Costarricense de Electricidad
ICV	Inventario de Ciclo de Vida
ISO	International Standards Organization
ONG	Organización No Gubernamental
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
RCP	Reglas de Categoría del Producto
RoW	Rest of the World
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry
UNE	Una Norma Española
UNEP	United Nations Environment Programme
US	United States

LISTA DE SÍMBOLOS

1,4-DB	Diclorobenceno
°C	Grados Celsius
C ₂ H ₄	Etileno
C	Carbono
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CFC	Clorofluorocarbono
CFC-11	Triclorofluorometano
Cu	Cobre
eq	Equivalente
Fe	Hierro
H ₂	Hidrógeno diatómico
Hg	Mercurio
g	Gramo
GJ	Gigajoules
kg	Kilogramo
kg/m ³	Kilogramo entre metro cúbico (densidad)
km	Kilómetro
kWh	Kilowatt hora
l	Litros
m ²	Metro cuadrado
m ³	Metro cúbico
MJ	Megajoules
Mn	Manganeso
PM ₁₀	Material Particulado menor a 10 micrómetros
PM _{2,5}	Material Particulado menor a 2,5 micrómetros
n.º	Número (posición)
Ni	Níquel
NMVOC	Compuestos Orgánicos No Volátiles
NO ₂	Dióxido de Nitrógeno

NO _x	Óxidos de Nitrógeno
Oil	Hidrocarburo
O ₂	Oxígeno
O ₃	Ozono
P	Fósforo
PO _x	Óxidos de Fósforo
Sb	Antimonio
SO ₂	Dióxido de Azufre
SO _x	Óxidos de Azufre
tkm	Tonelada kilómetro
ton	Tonelada
Tm	Tonelada Métrica
µm	Micrómetro

LISTA DE CUADROS

Cuadro 2-1. Algunas categorías de impacto ambiental y sus respectivos factores de caracterización	31
Cuadro 4-1. Composición de 1 kWh proporcionado por el ICE en el año 2015 para la etapa de producción de la varilla de acero.....	61
Cuadro 4-2. Análisis de Contribución para todas las etapas del ACV de la varilla de acero.....	67
Cuadro 4-3. Resumen de los resultados de la EICV de todas las etapas evaluadas en el ACV de la Varilla de Acero #3 para Construcción	69
Cuadro 4-4. Composición química de la varilla de acero #3.....	73
Cuadro 4-5. Características técnicas de la varilla de acero #3	73
Cuadro 4-6. Impactos Ambientales de 1 tonelada de varilla de acero para construcción #3	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Esquema Tradicional de un ACV	28
Figura 2-2. Etapas del ACV	29
Figura 3-1. Diagrama de flujo del ACV de la varilla	41
Figura 4-1. EICV para la Etapa de Producción del Lingote de Acero	49
Figura 4-2. Análisis de Contribución para la Categoría Agotamiento de los Minerales para la Producción del Lingote de Acero a Partir de Material Virgen	50
Figura 4-3. Análisis de Contribución de la Categoría Ecotoxicidad Terrestre para la ...	52
Figura 4-4. EICV para la Etapa de Transporte del Lingote de Acero	54
Figura 4-5. EICV para la Etapa de Producción de la Varilla de Acero	58
Figura 4-6. Análisis Comparativo de las Etapas de Producción del Lingote, Transporte del Lingote, Producción de la Varilla y Transporte de la Varilla.	65

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	13
ABSTRACT	14
1 INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 OBJETIVOS.....	17
1.1.1 Objetivo General	17
1.1.2 Objetivos Específicos.....	17
2 MARCO DE REFERENCIA	18
2.1 GENERALIDADES DEL ACERO	18
2.1.1 Antecedentes	18
2.1.2 Propiedades del acero.....	19
2.1.3 Tipos de acero	20
2.1.4 Ventajas y desventajas del acero estructural	20
2.1.5 Proceso productivo del acero estructural	21
2.2 GENERALIDADES DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	24
2.2.1 Antecedentes del Análisis de Ciclo de Vida	24
2.2.2 Aplicaciones de los Análisis de Ciclo de Vida	25
2.2.3 Aplicaciones del Análisis de Ciclo de Vida en Costa Rica.....	26
2.2.4 Estructura del Análisis de Ciclo de Vida	27
2.2.5 Etapas del Análisis de Ciclo de Vida	28
2.2.6 Softwares para la evaluación.....	34
2.3 GENERALIDADES DE LAS DECLARACIONES AMBIENTALES DE PRODUCTOS	35
2.3.1 Antecedentes de las Eco-etiquetas Medioambientales.....	35
2.3.2 Tipos de etiquetado medioambiental	35
2.3.3 Características de las DAP	36
2.3.4 Programas para las DAP	37
2.3.5 Pasos para obtener una DAP	38
3 METODOLOGÍA	39
3.1 DEFINICIÓN DEL PLANTEAMIENTO Y ALCANCE DEL ACV.....	39

3.2 ELABORACIÓN DEL INVENTARIO DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	45
3.3 EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE CICLO DE VIDA DEL PRODUCTO	47
3.4 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	47
3.5 VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	48
3.6 FORMULACIÓN DE LA ESTRATEGIA A SEGUIR PARA OBTENER LA DECLARATORIA AMBIENTAL DEL PRODUCTO	48
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
4.1 ETAPA DE PRODUCCIÓN DEL LINGOTE DE ACERO	49
4.2 ETAPA DE TRANSPORTE DEL LINGOTE DE ACERO	54
4.3 ETAPA DE PRODUCCIÓN DE LA VARILLA DE ACERO	58
4.4 ETAPA DE TRANSPORTE DE LA VARILLA DE ACERO	64
4.5 ANÁLISIS COMPARATIVO	65
4.6 RESUMEN DE LOS RESULTADOS	67
4.7 FORMULACIÓN DE LA ESTRATEGIA PARA LA OBTENCIÓN DE LA DECLARATORIA AMBIENTAL DEL LA VARILLA DE ACERO PARA CONSTRUCCIÓN #3	71
5 CONCLUSIONES	79
6 RECOMENDACIONES	82
7 REFERENCIAS	83
8 APÉNDICES	89
APÉNDICE 1: ICV DE ETAPA DE PRODUCCIÓN DEL LINGOTE DE ACERO	90
APÉNDICE 2: ICV DE ETAPA DE TRANSPORTE DEL LINGOTE DE ACERO	90
APÉNDICE 3: ICV DE ETAPA DE PRODUCCIÓN DE LA VARILLA DE ACERO	92
APÉNDICE 4: ICV DE ETAPA DE TRANSPORTE DE LA VARILLA DE ACERO	95
APÉNDICE 5: ICV DE ETAPA DE TRANSPORTE DE LA VARILLA DE ACERO	97

RESUMEN

La industria constructiva tiene como finalidad transformar las materias primas en productos elaborados o semielaborados. Dentro de ésta se encuentra la industria del acero, a la cual se le atribuyen grandes impactos ambientales debido a la intensidad en el uso de recursos (materiales y energéticos) durante sus procesos productivos. Para determinar dichos impactos existen hoy día metodologías como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), el cual permite cuantificar y evaluar los impactos ambientales potenciales asociados a procesos, productos o servicios durante todas las etapas de su existencia. Además sirve como base para obtener certificaciones ambientales internacionales como las Declaraciones Ambientales de Productos (DAP), las cuales proporcionan información cuantificada y verificable sobre el desempeño ambiental de un producto. El presente estudio pretende determinar la trazabilidad de la Varilla de Acero para Construcción #3 en la empresa ArcelorMittal Costa Rica, en las etapas de producción y transporte del lingote de acero y la producción y transporte de la varilla de acero; como base para su DAP. Se creó un inventario de las entradas y salidas de cada etapa del ciclo de vida y éste se evaluó mediante el software SimaPro 8.2.3, empleando las bases de datos de Ecoinvent. Al efectuar la evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV), los resultados obtenidos revelaron que los mayores impactos ambientales potenciales se produjeron en la etapa de producción del lingote de acero, esto como consecuencia del uso de materias primas vírgenes. Durante la etapa de transporte del lingote se determinó que el transporte en tren genera más impacto que el transporte en buque por kilómetro recorrido transportando una tonelada del material. Para la etapa de producción de la varilla los mayores impactos se asocian a la emisión de gases desde la chimenea del horno. En la etapa de transporte de la varilla existe una proporcionalidad entre el combustible consumido y el peso transportado de producto. Para solventar la brecha de información para alcanzar la DAP de la varilla de acero, es necesario actualizar el inventario de ciclo de vida con información más precisa y vigente en las etapas del ciclo de vida correspondientes para dicha certificación y realizar el ACV con una licencia SimaPro profesional que facilite una mejor evaluación del sistema en estudio.

Palabras clave: Análisis de Ciclo de Vida, Declaración Ambiental de Producto, Trazabilidad, Acero Estructural.

ABSTRACT

The construction industry aims to transform raw materials into semi-finished or finished products. Within this is the steel industry to which major environmental impacts are attributed due to the intensity of use of resources (materials and energy) during their raw material extraction, production processes and alike. To determine those impacts some methodologies are available such as Life-Cycle Assessment (LCA), which allows quantifying and assessing the potential environmental impacts associated with processes, products or services during all stages of its existence. LCA also serves as a basis for obtaining international environmental certifications such as Environmental Product Declaration (EPD), which provide quantified and verifiable information on the environmental performance of a product. The present study aims to determine the traceability of construction steel rod # 3 in the company ArcelorMittal Costa Rica for the stages of production and transportation of raw material and production and transportation of the steel rod; as a basis for DAP. An inventory of inputs and outputs of each stage of the life cycle was created which was evaluated by SimaPro 8.2.3 software, using the Ecoinvent databases. The results of the life cycle impact assessment (LCIA), revealed that the greatest potential environmental impacts of the entire system occurred at the stage of steel ingots production due to the raw materials. It was also determined that during the transport stage, the use of the train generates more impacts than the transport by boat per kilometer transporting a ton of material. For the rod production phase the biggest impacts associated are related to the gas emission from the furnace chimney. In the transport of the steel rod phase, it was demonstrated that there is a proportionality between the fuel consumed and the weight of product transported. Finally, it was determined that to address the information gap to reach the DAP of the steel rod, it is necessary to update the life cycle inventory with more accurate and updated information for the different life cycle stages in accordance with the certification process and perform a LCA with SimaPro professional license to provide a better assessment of the system under study.

Keywords: Life Cycle Assessment, Environmental Product Declaration, traceability, structural steel rod.

1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial en un territorio puede facilitar la reactivación de la economía y mejorar la calidad de vida de la población. Sin embargo, tiene el potencial de modificar significativamente el entorno y causar efectos negativos sobre el agua, suelo, aire y los seres vivos. A partir de ello se define que cualquier alteración ocasionada por la actividad humana sobre el medio ambiente se conoce como *impacto ambiental* (Gómez & Gómez, 2013).

Una de las industrias a las que se le asocian muchos impactos ambientales en la actualidad es la *industria constructiva*. El sector constructivo involucra actividades como la extracción y procesamiento de materias primas vírgenes (desde la naturaleza), transporte de los materiales, construcción de infraestructura (edificios, puentes, carreteras, etc), operación, demolición y disposición final de los residuos que se generan en cada actividad. Dichas actividades consumen grandes cantidades de recursos, tanto materiales como energéticos. Se estima que la industria constructiva es responsable de al menos la tercera parte de las emisiones mundiales de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera y que genera aproximadamente el 40% de los residuos sólidos producidos por la humanidad (Starke, 2007). Además se le atribuye el consumo del 40% de la energía producida y del 12% del agua potable disponible en el mundo. Específicamente en Costa Rica este sector contribuye anualmente con 283 000 toneladas de CO₂ eq (unidad comparable para medir impacto ambiental) (Araujo, Coto, Guzmán & Herrera, 2016).

En la industria de la construcción existen dos materiales a los que se les atribuyen los mayores impactos ambientales debido a la intensidad en el consumo de recursos durante su producción: el cemento y el acero. Por su parte, el acero es considerado como un material indispensable para la construcción y del mismo depende gran parte de la economía mundial. Está constituido por una aleación de hierro, carbono y otros elementos. No obstante, su uso se encuentra muy diversificado, pues para el año 2014 el 51% de la producción mundial de acero se usó en la construcción de viviendas e infraestructura, el 15% en maquinaria, el 13% en productos metálicos y el 12% en la industria automotriz (Marín, 2014). Particularmente en Costa Rica, se reportó que para enero/febrero del 2016 hubo un incremento del 40% en las importaciones de aceros laminados y derivados desde China, con respecto a enero/febrero del año 2015, siendo el país centroamericano con el mayor aumento (Alacero, 2016).

En el país no se produce este material, sin embargo existen empresas como ArcelorMittal Costa Rica que manufacturan los *lingotes de acero* importados desde otros países, para producir y colocar en el mercado nacional e internacional productos acabados como las *varillas de acero para la construcción #3*.

Dadas las implicaciones ambientales que poseen productos como la varilla de acero, es oportuno aplicar metodologías que permitan medir su desempeño ambiental con base en sus impactos ambientales potenciales. Para ello existen hoy día metodologías como el *Análisis de Ciclo de Vida* (ACV), el cual constituye el mejor marco disponible para evaluar los impactos ambientales potenciales de cualquier producto o actividad. En el caso del acero, el ACV ofrece la ventaja de examinar todo su sistema productivo, desde la extracción de las materias primas, hasta la disposición final del producto (Muñoz, Zaror, Saelzer & Cuchí, 2012).

En el caso de Costa Rica la aplicación de los ACV en los diferentes sectores industriales es aún incipiente. Particularmente en el ámbito constructivo aún se desconocen los impactos ambientales generados directa o indirectamente a lo largo del ciclo de vida sus productos (Díaz, 2016).

El ACV ofrece la posibilidad de certificar sus productos mediante las llamadas “*Eco-etiquetas*”; siendo una de éstas la *Declaratoria Ambiental de Producto* (DAP), también llamadas *Eco-etiqueta tipo III*. Una DAP describe a un producto de forma científica, transparente y confiable, con todas sus propiedades a lo largo del sistema. También ofrece al proyectista y al contratista facilidad en la toma de decisiones por criterios ambientales. Las DAP se basan en las normas ISO y están precedidas por los ACV, además proporcionan datos comparables sobre el impacto ambiental del producto contra otros productos que cumplan su misma función (Rheinziink, 2009).

En este marco, se realizó este proyecto con el fin de generar un diagnóstico sobre la trazabilidad de la varilla de acero para construcción #3 producida en una empresa ubicada en Costa Rica llamada ArcelorMittal Costa Rica, dado que este producto es uno de los que más se emplea en Costa Rica como refuerzo para el concreto durante la construcción. (Leandro, 2015). El propósito fue crear una línea base de conocimiento con el objetivo de que la empresa pueda en el futuro obtener la DAP del producto bajo estudio.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo General

Determinar la trazabilidad de la Varilla de Acero para Construcción #3 en las etapas de producción y transporte del lingote de acero, así como la producción y transporte de la varilla de acero; como base para la Declaración Ambiental del Producto en la empresa ArcelorMittal Costa Rica.

1.1.2 Objetivos Específicos

Determinar y priorizar los impactos ambientales potenciales asociados las etapas de producción y transporte del lingote de acero y producción y transporte de la Varilla de la Acero para Construcción #3 producida en ArcelorMittal Costa Rica empleando la herramienta SimaPro 8.2.3.

Determinar las causas vinculadas a los resultados obtenidos en el Análisis de Ciclo de Vida en las etapas de producción y transporte del lingote de acero y producción y transporte de la Varilla de Acero para Construcción #3.

Establecer la brecha de información existente para alcanzar la Declaración Ambiental de Producto de la Varilla de Acero para Construcción #3 en Costa Rica.

2 MARCO DE REFERENCIA

2.1 GENERALIDADES DEL ACERO

2.1.1 Antecedentes

Los primeros artefactos encontrados fabricados con mineral de hierro datan del año 3000 A.C. en Egipto, según afirman estudios arqueológicos. Con el paso del tiempo se fueron perfeccionando las técnicas siderúrgicas y años después se descubrieron las primeras aleaciones que hoy se conocen como hierro forjado. En 1855, Henry Bessemer ideó el proceso de refinado del arrabio mediante chorros de aire, desarrollando el horno o convertidor que lleva su nombre, siendo éste el invento que permitiría la fabricación de acero a nivel industrial a partir de esa fecha (Concha, 2010).

Se conoce como acero al producto de la aleación de hierro, carbono y pequeñas cantidades de elementos como silicio, fósforo, azufre, oxígeno, etc., que le añaden características específicas convirtiéndolo en el metal más importante empleado para la construcción de viviendas, edificios industriales y comerciales, puentes, muelles, entre otros (AHMSA, 2013). Su uso específico en la construcción nos permite referirnos al mismo como *Acero Estructural*.

En Costa Rica las tendencias comerciales para hierro y acero tomaron relevancia a partir del último tercio del siglo XIX, generándose en tres fases o periodos. En la primera fase (1850-1870) el hierro forjado y colado se usó con fines ornamentales en edificios y espacios públicos de las principales ciudades del país para satisfacer los anhelos de modernización de la nueva república. En el segundo periodo (1871-1888) se introdujeron cubiertas de hierro galvanizado en edificios públicos y eclesiales de la capital, así como estructuras de hierro en puentes y edificios utilitarios. Para la tercera fase (1888-1914) se emplearon componentes de hierro y acero en edificios, para contrarrestar los efectos causados por los terremotos de la época. El auge del hierro y acero se vio favorecido gracias a la presencia de numerosas casas comerciales que importaban materiales para la construcción desde Estados Unidos y Europa (Sanou, 2001).

2.1.2 Propiedades del acero

En los últimos años la producción de acero ha sufrido muchos cambios a nivel global debido a las necesidades derivadas de los avances tecnológicos en los distintos campos de la ingeniería (AHMSA, 2013).

A pesar de la dificultad para establecer las propiedades generales del acero ya que éstas varían según los ajustes en su composición y tratamientos durante su producción, se pueden citar algunas *propiedades físicas* (Flores & López, 2011):

- Su densidad media es de 7850 kg/m^3 (en función de la temperatura, el acero se puede contraer, dilatar o fundir)
- Sus puntos de fusión y ebullición son aproximadamente de $1.375 \text{ }^\circ\text{C}$ y $3.000 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente, aunque varían dependiendo del tipo de aleación y los porcentajes de sus componentes (aumentan cuanto mayor sea su porcentaje de carbono)

Las *propiedades mecánicas* del acero se describen en el Manual de Materiales para la Construcción por la Institución de Ingenieros Civiles (ICE, por sus siglas en inglés) (2009):

- Resistencia: Capacidad para soportar grandes esfuerzos, aportándole seguridad a la estructura cuando ésta sufre cargas accidentadas como sismos y viento
- Ductilidad: Capacidad de sufrir deformaciones importantes, incluso más allá del límite, sin fallar
- Soldabilidad: Características del material que garantizan la fusión del metal base con el metal del electrodo sin que se generen agrietamientos o imperfecciones
- Tenacidad: Consiste en la medida de la energía que se debe aplicar a un cuerpo por unidad de volumen para deformarlo hasta el momento de su fractura

Las *propiedades químicas* del acero dependen de la influencia de los elementos químicos en su composición, los cuales se adicionan en el proceso de fabricación con el fin de obtener determinadas propiedades para su aplicación (AHMSA, 2013): al aumentar el contenido de carbono (elemento principal que determina las propiedades del acero) se favorecen la resistencia mecánica y la dureza pero disminuye la ductilidad del material; conforme se incrementa el contenido de fósforo se atribuyen mejores

características anticorrosivas y de dureza pero la ductilidad y soldabilidad disminuirán; también el azufre perjudica estas dos últimas; el oxígeno y el nitrógeno deben ser controlados estrictamente durante la fabricación del acero, pues reducen la tenacidad y soldabilidad, además aceleran el envejecimiento; el silicio y el manganeso favorecen la resistencia mecánica y son usados como desoxidantes y desulfurantes al fabricar acero, pero perjudican la resistencia mecánica del mismo (Cházaro & Álvarez, s.f). El Centro de Tecnología de Petróleo y Marina (1996) describe que hay otras trazas de elementos que tienen importancia, como el cromo, níquel, cobre y molibdeno, que pueden aumentar la resistencia mecánica, además que el vanadio, niobio y aluminio favorecen la ductilidad y la tenacidad.

2.1.3 Tipos de acero

Los aceros estructurales se clasifican por tipo según su composición química y características de procesamiento, entre ellos se pueden mencionar (Subramanian, 2010):

- Aceros al carbono o al carbono-manganeso
- Alta resistencia, baja aleación
- Alta resistencia, apagados y templados (aceros aleados)
- Alta resistencia, apagados y auto-templados (aceros de aleación)
- Aceros de intemperie (Corten)
- Aceros resistentes al fuego

2.1.4 Ventajas y desventajas del acero estructural

Conocer las ventajas y desventajas de este producto facilita una correcta elección según su fin, entre ellas destacan (Flores & López, 2011):

Ventajas:

- Gran facilidad para unir diversos miembros por medio de varios tipos de conectores como son la soldadura, los tornillos y los remaches

- Posibilidad de prefabricar los miembros de una estructura y la rapidez de montaje
- Gran capacidad de laminarse y en gran cantidad de tamaños y formas
- Posible reúso después de desmontar una estructura y es 100 % reciclable

Desventajas:

- Susceptibles a la corrosión, ya que el hierro se oxida fácilmente incrementando su volumen y provocando grietas superficiales, sin embargo, existen aleaciones con resistencia a la corrosión
- Deben pintarse periódicamente, incidiendo en costos económicos, pues la mayor parte de los aceros son susceptibles a la corrosión al estar expuestos al agua y al aire
- Aunque algunos miembros estructurales son incombustibles, sus resistencias se reducen considerablemente durante los incendios, por lo que es necesario invertir en protección contra incendios
- Al utilizarse como columnas no resulta muy económico, ya que debe usarse mucho material solo para hacer más rígidas las columnas contra el posible pandeo

2.1.5 Proceso productivo del acero estructural

La fabricación de acero comienza con la conversión del mineral de hierro en hierro puro o metálico, mediante el proceso de reducción química del mineral (proceso inverso a la oxidación), usando un proceso de fabricación de acero integrado o un proceso de reducción directa (Cheremisinoff, Rosenfeld & Davletshin, 2008).

Dos de los sistemas más conocidos para obtener hierro son: el método del *Horno de Sinterización* y el método de *Reducción Directa*. En el primero, el mineral pasa por un proceso de sinterización, que consiste en calentar el mineral de hierro con fundente y coque o carbón, el coque se quema como combustible para calentar el horno, liberando monóxido de carbono, que se combina con los óxidos de hierro del mineral y los reduce a hierro metálico. Por último, se genera una masa semifundida que se solidifica en piezas porosas de sinterizado con las características de tamaño y fuerza necesarias para

servir de alimento de alto horno, (CRNCOP, s.f), donde se consigue hierro fundido o que se moldea en lingotes.

Por otra parte, en el método de Reducción Directa, interactúa directamente el mineral de hierro con una corriente del gas reductor (mezcla de H₂ y CO) que se inyecta al sistema, atravesando el mineral y calentándolo hasta reducirlo. Como resultado se obtiene esponja de hierro o pellets que será la materia prima para el horno de arco eléctrico. Este método reduce el capital requerido y el impacto ecológico en comparación con otros procesos (De Garmo, Black & Kohser, 2002).

Los dos tipos de tecnología de fabricación de acero en uso hoy en día son el *Horno de Oxígeno Básico* y el *Horno de Arco Eléctrico*. Aunque estas dos tecnologías utilizan diferentes materiales de entrada, la salida en ambos es acero fundido, que se forma posteriormente en productos de acero (Cheremisinoff, Rosenfeld & Davletshin, 2008).

El primer método requiere un Horno Básico de Oxígeno. En éste, se introduce el hierro fundido (obtenido del alto horno). La carga de este horno puede estar constituida por un 30% de chatarra, luego se incorporan las aleaciones y se inyecta oxígeno de alta pureza a presión, sufriendo una descarburización (oxidación del carbono) para remover las impurezas, obteniéndose el acero fundido. (Cheremisinoff, Rosenfeld & Davletshin, 2008).

En el otro método disponible se emplea un Horno de Arco Eléctrico. En éste, se introducen desechos de acero de alta calidad (chatarra), hierro de reducción directa o lingotes de hierro, que se funden y refinan haciendo pasar una corriente eléctrica de los electrodos a través de los materiales. Éstos equipos son los más empleados en industrias medianas y pequeñas, cuya producción de acero es para un fin determinado (Cheremisinoff, Rosenfeld & Davletshin, 2008).

En Costa Rica la producción de acero se ve encabezada por compañías como ArcelorMittal, cuyos procesos productivos son diversos para generar distintos productos. Estas compañías ofrecen en el mercado productos de aceros planos (láminas y tubería), aceros largos (perfiles y varillas), entre otros (alambres, mallas, etc).

Debido a que en el país no se extrae la materia prima desde la mina, el acero se importa en lingotes (palanquilla) desde países de todo el mundo. En el caso de ArcelorMittal Costa Rica, una vez que los lingotes han llegado a la empresa son clasificados y almacenados en bodegas. Para el proceso de laminación el acero se

somete a temperaturas promedio de 1160°C en un horno galopante, luego sufre reducciones sucesivas en un tren de laminación hasta lograr el producto deseado. Durante el proceso de calentamiento de la palanquilla se genera una capa superficial (cascarilla) que debe ser retirada con agua a presión antes de iniciar el proceso de laminación en el desbaste; para ello, una serie de cajas de laminación en continuo reducen la sección del lingote hasta en un 85%. Después el material pasa por un tren intermedio que contiene cajas de laminación donde se efectúan estiramientos del mismo y finalmente por un tren acabador que le da las dimensiones finales al producto. No obstante, el producto puede ser enfriado de manera controlada con agua para mejorar sus propiedades mecánicas, aunque también se puede reducir su temperatura de forma natural en una mesa de enfriamiento. Al final de esta última se encuentra la cizalla que le da el corte a la medida comercial a la varilla o perfiles que se estén laminando. Luego son atados y etiquetados, almacenados y por último distribuidos a los locales comerciales correspondientes (ArcelorMittal, 2016).

Por lo anterior, conociendo la alta demanda de recursos (materiales y energéticos) que conlleva la fabricación de acero, representa no solo un potencial gran impacto sobre medio ambiente, sino que también genera una gran oportunidad para realizar estudios con fundamentos científicos como lo es el Análisis de Ciclo de Vida de Productos, para determinar y analizar de manera objetiva y científica cuáles son esos impactos.

2.2 GENERALIDADES DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

2.2.1 Antecedentes del Análisis de Ciclo de Vida

Los antecedentes de lo que hoy conocemos como *Análisis de Ciclo de Vida* se remontan a finales de la década de los años 60 y principios de los 70, cuando se usaba como herramienta en estudios enfocados en la evaluación de ciertas etapas de los sistemas de producción extensiva, considerando el análisis de la eficiencia en el consumo de la energía y sus fuentes, el consumo de materias primas y la disposición final de los residuos generados (Glick, 2007).

El ACV es un proceso objetivo para evaluar las cargas ambientales asociadas con un proceso, producto o servicio, mediante la identificación y cuantificación de la energía, materiales consumidos y de los residuos generados al ambiente, con la finalidad de evaluar e implementar mejoras ambientales (SETAC, 2012).

El primer estudio considerado como un caso de ACV se hizo en 1969-70, para la Coca-Cola Company por el Midwest Research Institute, en los Estados Unidos. En éste se buscaba conocer qué material era el óptimo para la fabricación de envases para bebidas; además la compañía solicitó un estudio sobre el uso de energía, materiales e impactos ambientales a lo largo de toda su cadena productiva, desde la extracción de los recursos hasta su disposición final. Este tipo de estudios comenzaron a reproducirse en países como Alemania, Suecia, Dinamarca y el Reino Unido. Aunque empleaban distintas metodologías su fin era el ahorro de energía y conservación de los recursos. No obstante, se comenzaron a generar las primeras bases de datos, lo cual era muy importante para la posibilidad de realizar más estudios (Zbicinski, Stavenuiter, Kozłowska & Coevering, 2006).

La SETAC organizó en 1991 la primera conferencia científica en la que se establece el término “Análisis de Ciclo de Vida” y cuya metodología fue el tema central a discutir. Desde esa fecha, el ACV se considera como la herramienta más importante para la mejora ambiental (Zbicinski, Stavenuiter, Kozłowska & Coevering, 2006). Algunos años más tarde, en 1997, la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) dio a conocer la primera norma internacional que establecería los principios y estructura metodológica del ACV, la ISO 14040 (Kopffler, 2014). Posteriormente surgen las normas ISO 14041:1999, sobre el objetivo, alcance y

análisis del inventario, ISO 14042:2001, para evaluaciones del impacto del ciclo de vida, e ISO 14043:2001, respecto de la interpretación del impacto del ciclo de vida. Las anteriores han sido revisadas y reemplazadas por la ISO 14040:2006, refiriéndose a los principios y marco de referencia, y la ISO 14044:2006, con énfasis en los requisitos y directrices (Gallego, 2008).

2.2.2 Aplicaciones de los Análisis de Ciclo de Vida

Como lo enuncia la Pontificia Universidad Católica del Perú (2010), con el ACV se genera información de calidad para la toma de decisiones en los patrones de producción y consumo, políticas y estrategias de gestión, derivando aplicaciones en:

Industria:

- a. Para conocer el desempeño ambiental de un producto, servicio o tecnología
- b. Para conocer el efecto de los cambios en el proceso de producción en los impactos ambientales
- c. Para comparar productos/servicios/tecnologías

Gobierno:

- a. Para elaborar políticas gubernamentales con mayor equilibrio entre consumidores, productores, proveedores de materiales, minoristas y responsables de los residuos
- b. Para establecer prioridades a partir de la información sobre los ciclos de vida.
- c. Para identificar la necesidad de establecer legislación para el control de determinada industria
- d. Fomentar la fijación de precios que reflejen fielmente los costos (degradación ambiental, problemas de salud, impactos en otras etapas del ciclo de vida)

Nuestra vida cotidiana:

- a. Permite identificar los impactos involuntarios de nuestros actos para poder tomar acción y reducirlos o evitarlos

2.2.3 Aplicaciones del Análisis de Ciclo de Vida en Costa Rica

Las bases de la aplicación de ACV en Costa Rica datan del año 2002, específicamente para la formulación de políticas públicas sobre plaguicidas, cuando los costarricenses mostraron su preocupación por las repercusiones negativas de estas sustancias sobre la salud humana y ambiental. Diversas ONG nacionales e internacionales mostraron preocupación por los plaguicidas que se aplicaban a cultivos como banano, fresas, helechos y flores. No obstante, dichas inquietudes carecían de fundamentos científicos, lo cual motivó a la Contraloría General de la República a financiar un proyecto con enfoque de ciclo de vida para conocer el verdadero impacto de los plaguicidas en la salud humana y ambiental. La investigación dio como resultados que cinco de los veinticinco ingredientes activos analizados eran responsables de aproximadamente el 95% del impacto sobre la salud humana, y que tres de ellos respondían al 90% del impacto sobre el ambiente. Esta información permitió asesorar a otras entidades normativas en las características de los ingredientes activos (PNUMA, 2004).

En el año 2003, durante la Conferencia Internacional sobre ACV (CILCA) celebrada en San José, Costa Rica, se dio a conocer la Asociación Latino Americana para la Evaluación del Ciclo de Vida (ALCALA, por sus siglas en inglés). Esta entidad surge con el fin de promover el conocimiento y una cultura de sostenibilidad para crear un mejor desarrollo económico, político, legal, social y ambiental enfocado en el ciclo de vida, especialmente para Latinoamérica. Asimismo, colabora con el Green Building Council de Costa Rica (GBC-CR) para facilitar la aplicación de este concepto en la construcción sostenible (ALCALA, 2013).

Por su parte, algunas empresas en Costa Rica han implementado políticas basadas en el ACV, como en el caso de la empresa FLOREX, que en el desarrollo y producción de sus productos eco-amigables buscan generar el menor impacto posible

sobre el ambiente en cada fase de la vida útil del producto, desde la investigación, extracción, producción, transporte, uso y disposición final (FLOREX, 2013).

A su vez, el Programa GAMMA del CATIE auspició una investigación en el año 2013 sobre la medición de la huella de carbono para los productores de leche en la zona de Santa Cruz de Turrialba, mediante la metodología del análisis del ciclo de vida, explicando la importancia de definir los límites del análisis, alcances y las unidades funcionales. El estudio trataba de hallar una oportunidad para el diseño de políticas para una ganadería más sustentable, eficiente y climáticamente amigable (Guerra, 2013).

Otra organización a la cual se le atañe mérito por sus logros es Florida Ice and Farm Co (FIFCO), dedicada a la industria de alimentos, bebidas y bienes raíces, quienes han cambiado su modelo productivo gracias a un nuevo enfoque de gestión de ciclo de vida. Aunque éste no se aplica en su totalidad, el objetivo es implementar de lleno esta metodología. Con la certificación ISO 14001, la compañía implementó indicadores ambientales y de rendimiento en sus líneas productivas en el año 2004 (UNEP/SETAC, 2014).

El caso más reciente de éxito en la aplicación del ACV se atribuye a una investigación efectuada en el Edificio de Residencias Estudiantiles del Instituto Tecnológico de Costa Rica, cuya evaluación del ciclo de vida determinó cuáles procesos generan mayor impacto ambiental y los beneficios obtenidos al implementar las medidas ambientales respectivas en las etapas de producción de materias primas, construcción y ocupación del inmueble. En la primera etapa, se comprobó que los materiales que generaron un mayor impacto ambiental fueron los metales y los minerales, debido al fuerte impacto que genera su extracción y fabricación (Díaz, 2016).

2.2.4 Estructura del Análisis de Ciclo de Vida

En general, el ciclo de vida de un producto incluye las etapas de extracción, transformación, distribución, consumo y disposición final, cuyos impactos pueden ser recopilados, clasificados como entradas/salidas del sistema y cuantificables, lo que se conoce como el Inventario de Ciclo de Vida (ICV).

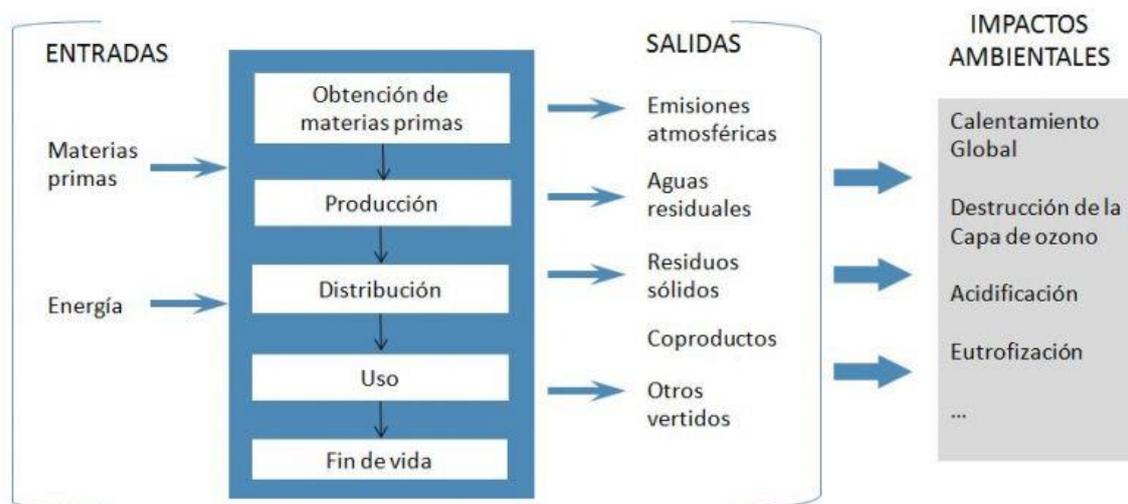


Figura 2-1. Esquema Tradicional de un ACV

Fuente: Gazulla (2013)

Actualmente, existen dos enfoques generales a la hora de referirse al ACV: “de la cuna a la tumba” cuando el producto pierde totalmente su valía útil, no es posible reciclarlo o reutilizarlo y debe ser dispuesto, en el mejor de los casos, en un relleno sanitario, y “de la cuna a la cuna” cuando el bien no genera residuos y su diseño permite integrar otra vez el producto al sistema de producción como materia prima (El Hagggar, 2007).

2.2.5 Etapas del Análisis de Ciclo de Vida

La metodología de aplicación del ACV se encuentra estructurada y estandarizada en las Normas ISO 14040: 2007 y en la ISO 14044: 2007, y sus etapas se presentan en el esquema de la Figura 2-2:

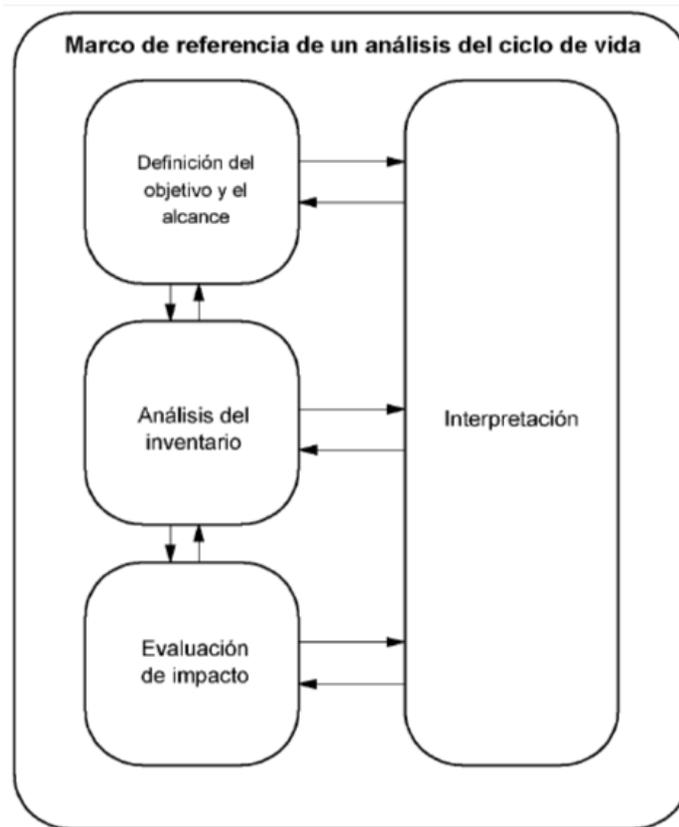


Figura 2-2. Etapas del ACV

Fuente: Norma ISO 14040 (2007)

Como se observa en la Figura 2-2, las etapas del ACV no son absolutamente independientes. El doble sentido de las flechas reflejan su enfoque holístico, es decir, que todas las propiedades del sistema no pueden ser determinadas o explicadas individualmente por sus componentes, por lo que es necesaria la integración total de todas las partes, de ahí se deriva el concepto de tener en cuenta todo el ciclo de vida del sistema (Ihobe, 2009).

De una manera más amplia se describen a continuación las etapas o fases del ACV:

Definición de objetivos y Ámbito de aplicación

Para definir los objetivos del ACV, la Norma ISO 14040 (2007), establece que es imprescindible considerar la aplicación prevista y las razones para realizar el estudio, así como el público meta. Por su parte, esta norma dice que la definición del alcance del estudio depende directamente del tema y del uso previsto del estudio. Además, que el

alcance debería estar suficientemente bien definido para garantizar que la amplitud, la profundidad y el nivel de detalle del estudio permitan alcanzar el objetivo establecido. Asimismo, el alcance debe detallar: el sistema del producto, la unidad funcional, los límites del sistema, el flujo de referencia, las categorías de impacto, las suposiciones, las limitaciones y los requisitos iniciales de calidad de los datos. Es importante destacar que una definición correcta de la unidad funcional facilitará la comparación entre distintos sistemas, puesto que está involucrada en gran medida en el ICV y los impactos ambientales del estudio.

Análisis de Inventario de Ciclo de Vida (ICV)

Según enfatiza la Norma ISO 14040 (2007), en esta etapa se genera un inventario de los datos de entrada/salida en relación con el sistema en estudio, basado en balances de materia y energía entrantes y salientes, de modo que satisfagan los objetivos establecidos. Es importante tomar en consideración que durante la recopilación de los datos se pueden identificar nuevos requisitos o limitaciones, produciendo cambios en los procedimientos de recopilación de datos. Los datos que conforman el ICV están asociados a: las entradas de energía, de materia prima, entradas auxiliares, otras entradas físicas; los productos, coproductos y desechos; y las emisiones al aire, los vertidos al agua y al suelo.

Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida (EICV)

Esta fase se enfoca en conocer y evaluar la importancia de los impactos potenciales ambientales utilizando los recursos del análisis del ICV, seleccionando un conjunto de variables medioambientales mejor conocidas como *Categorías de Impacto* y utilizando *indicadores de categoría*, que sean coherentes con los objetivos del estudio, permitiendo agrupar y explicar los resultados del ICV (Aranda & Zabalza, 2010). En la Norma ISO 14044 (2007), se establece que la EICV es distinta a otras técnicas como la evaluación del desempeño ambiental, la evaluación de impacto ambiental y la evaluación del riesgo, ya que su enfoque es relativo a la unidad funcional definida para el estudio.

Basado en la Norma ISO 14040 (2007), la Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida está dividida en etapas que se describen a continuación:

- a. Selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización.

En la Norma ISO 14044 (2007), se afirma que las categorías de impacto, los indicadores de categoría y los modelos de caracterización deben justificarse y ser coherentes con el objetivo del estudio y el alcance del ACV, por lo que su selección se puede considerar subjetiva. Asimismo, las categorías de impacto y los indicadores de categoría reflejan los impactos ambientales de interés a los cuales se quieren asignar los resultados de la EICV, mientras que los modelos de caracterización expresan el mecanismo ambiental y describe la relación entre los resultados del ICV y los indicadores de categoría.

Existen muchas categorías de impacto ambiental, por esta razón, el Cuadro 2-1 presenta las principales categorías de impacto ambiental contempladas por la SETAC, a modo de ejemplo.

Cuadro 2-1. Algunas categorías de impacto ambiental y sus respectivos factores de caracterización

Fuente: Adaptado de Ihobe, (2009)

Categoría de Impacto Ambiental	Unidad de Referencia	Factor de Caracterización
Calentamiento Global	kg CO ₂ eq	Potencial de Calentamiento Global
Consumo de Recursos Energéticos	MJ	Cantidad Consumida
Reducción de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq	Potencial de Agotamiento de la Capa de Ozono

Eutrofización	Crecimiento excesivo de la población de algas, originado por el enriquecimiento artificial de las aguas de ríos y embalses como consecuencia del empleo masivo de fertilizantes y detergentes que provoca un alto consumo del oxígeno del agua.	kg P eq	Potencial de Eutrofización
Acidificación	Pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua, como consecuencia del retorno a la superficie de la tierra, en forma de ácidos, de los óxidos de azufre y nitrógeno descargados a la atmósfera.	kg SO ₂ eq	Potencial de Acidificación
Consumo de Materia Primas	Consumo de materiales extraídos de la naturaleza.	Tm	Cantidad Consumida
Formación de Oxidantes Fotoquímicos	Formación de los precursores que dan lugar a la contaminación fotoquímica. La luz solar incide sobre dichos precursores, provocando la formación de una serie de compuestos conocidos como oxidantes fotoquímicos (el ozono O ₃ es el más importante por su abundancia y toxicidad).	kg NMVOCs eq	Potencial de Formación de Oxidantes Fotoquímicos

- b. La asignación de los resultados del inventario a categorías de impacto: Clasificación.

Para esta etapa, los datos del ICV son asignados a la categoría de impacto correspondiente. En caso que una sustancia contribuya a varias categorías de impacto, debe tomarse en cuenta en todas esas categorías (Ihobe, 2009).

- c. Cálculo de resultados del indicador de categoría: Caracterización.

En esta fase, cada sustancia es multiplicada por su correspondiente factor de caracterización, así se pueden obtener valores con unidades equivalentes, que al ser sumados permiten medir la contribución de las sustancias a la categoría de impacto que fue asignada (Ihobe, 2009). Cada metodología de evaluación de impactos usa factores diferentes, dando la opción de analizar el efecto último del impacto ambiental (punto final o “endpoint”). Otra opción es considerar los efectos intermedios (puntos medios o “midpoint”).

Ésta última suele ser más viable, puesto que permite modelos de cálculo que se ajustan mejor a la intervención ambiental, proporcionando información más detallada de los efectos sobre el medio ambiente. No obstante, los “endpoint” resultan más eficientes para escalas globales, ya que son variables que afectan directamente a la sociedad (Ecoraae, 2013).

- d. Cuantificación del valor de los resultados del indicador de categoría con respecto a la información de referencia: Normalización.

Corresponde al cálculo de la magnitud de los resultados de indicadores relacionados con la información de referencia, facilitando su comprensión. Según la Norma ISO 14044 (2007), a pesar que éste es un elemento opcional, resulta útil para: verificar si existen incoherencias, proporcionar y comunicar la información sobre la importancia relativa de los resultados del indicador y preparar procedimientos adicionales, como la agrupación o la ponderación. El resultado de este cálculo puede ser un valor con escala global, regional, nacional, local, per cápita, etc.

- e. Conversión de los resultados de los indicadores de diferentes categorías de impacto mediante factores numéricos basados en opciones de valor: Ponderación.

Se entiende por ponderación a la conversión de los resultados de los valores ya caracterizados a una unidad común, multiplicándolos por su factor de ponderación correspondiente, para luego sumarlos y obtener un valor único del impacto ambiental del sistema (Ihobe, 2009). Por otra parte, una ponderación apoya la comparación final de resultados de los indicadores mediante las categorías de impacto y puede ser necesaria para concluir estudios donde existen traslapes entre los resultados de distintas categorías de impacto (Díaz, 2016).

Interpretación del Ciclo de Vida

Conforme a lo establecido en la Norma ISO 14040 (2007), ésta es la última etapa del ACV y emplea procedimientos sistematizados con el fin de identificar, calificar, verificar, evaluar y presentar las conclusiones basadas en los hallazgos del estudio de manera comprensible, completa y coherente, para cumplir con los requerimientos descritos en el objetivo y el alcance del ACV. En la Norma ISO 14044 (2007), se señala que esta evaluación considera las verificaciones de los análisis de integridad, sensibilidad y coherencia, lo cual ayuda a comprender la incertidumbre de los resultados.

2.2.6 Softwares para la evaluación

Según Ihobe (2009), para efectuar los ACV, actualmente se emplean varios softwares especializados en esta materia, siendo los más reconocidos: SimaPro, GaBi, Umberto y Quantis Suite, cuyo común denominador es la eficiencia y versatilidad durante la incorporación de la información, la disposición de base de datos actualizadas y la fácil interpretación de los resultados. No obstante, cada software también presenta características particulares, por lo que la elección depende de las necesidades específicas del usuario.

Cuando un análisis de ciclo de vida es elaborado para una empresa y éste cumple con ciertos requisitos, se abre la posibilidad de iniciar un nuevo proceso hacia la certificación ambiental del producto o servicio.

2.3 GENERALIDADES DE LAS DECLARACIONES AMBIENTALES DE PRODUCTOS

2.3.1 Antecedentes de las Eco-etiquetas Medioambientales

Los antecedentes de lo que hoy conocemos como eco-etiquetado medioambiental tiene sus orígenes en la Unión Europea en el año 1988, cuando la Directiva de Productos de Construcción se propuso como objetivo impulsar la armonización técnica para eliminar barreras al libre comercio y potenciar el mercado interno. Específicamente en el ámbito de los productos para la construcción se establecieron seis requisitos esenciales, uno de ellos (el n.º 3) enmarcaba el tema de la salud, higiene y medio ambiente, aspectos que eran requeridos para tener consideración dentro de esa industria. Desde ese momento surgió una gran inquietud por recopilar y hacer pública la información relativa al comportamiento ambiental de los productos de la construcción. De esa manera el consumidor, intermedio o final, tendría acceso a la información sobre las características/comportamiento medioambiental de los productos que estén en el mercado, para que finalmente mediante su elección destine su demanda hacia productos eco-amigables (Zubiaga, Pradera, Sánchez & Bonilla, 2002).

2.3.2 Tipos de etiquetado medioambiental

En la actualidad, los criterios ambientales van en aumento a la hora que los consumidores desean adquirir productos, generando un nuevo auge de consumo sostenible facilitado por distintos mecanismos, como lo son las etiquetas ambientales. La ISO ha desarrollado un marco general básico de etiquetado y declaración medioambiental. Existen tres tipos de etiquetado ambiental (Pacheco, Cabeza, Labrincha & Magalhães, 2014):

- **Tipo I.** Sistema voluntario de etiquetas ecológicas verificadas por terceros en base a unas especificaciones/requisitos, que normalmente abarcan el ciclo de vida del producto. Van dirigidas normalmente al consumidor final.
- **Tipo II.** Autodeclaraciones medioambientales de los fabricantes (brindados bajo la responsabilidad de cumplimiento del contenido de la información) no sujetas

a verificación ni certificación por terceras partes. Normalmente se utilizan también para productos de uso final. En general tienen una baja credibilidad.

- **Tipo III.** Declaraciones medioambientales verificadas (y en su caso, certificadas) por terceros, que están basadas en cuantificaciones ambientales sobre el análisis del ciclo de vida.

La Declaración Ambiental de Producto (EPD, por sus siglas en inglés), consiste en una manifestación de datos ambientales cuantificados relacionados a una o más etapas del ciclo de vida de un producto. Su finalidad es comunicar y mejorar el desempeño ambiental de productos, servicios y empresas, fomentando la demanda y producción de aquellos productos que causan un menor impacto sobre el medio ambiente (Pacheco, Cabeza, Labrincha & Magalhães, 2014).

2.3.3 Características de las DAP

Algunas características de las DAP son (Gómez, 2014):

- a. Permiten la comparación entre productos que cumplan la misma función
- b. Se proporcionan por una o más organizaciones, que verifican de manera independiente los datos del ACV y del ICV, de acuerdo a las Normas ISO 14025-40-44
- c. Son multicriterio, ya que proporcionan información sobre diferentes indicadores de Impacto y de ICV
- d. Ayudan y dan soporte a las organizaciones en la comunicación del desempeño ambiental de productos y servicios de forma científica, creíble, comprensible y verificable
- e. Facilitan la toma de decisiones de manera objetiva y transparente en base al impacto ambiental del ciclo de vida de bienes y servicios
- f. Reflejan la mejora continua del desempeño ambiental de productos y servicios, favoreciendo una imagen de compromiso ambiental en aquellas empresas que la desarrollan
- g. Incluyen la Huella de Carbono, como indicador de impacto a calcular o como un documento separado

- h. Son de índole neutral, puesto que permite certificar cualquier tipo de producto o servicio, ya sea “ecológico” o no
- i. Son de carácter voluntario, puesto que no son obligatorias

2.3.4 Programas para las DAP

En la actualidad, a nivel internacional se han desarrollado diferentes programas de DAPs, para las cuales se presenta una breve descripción de los principales exponentes en este tema (Gómez, 2014):

AENOR Global EPD

Este programa es usado en España y es operado por AENOR. Dispone de 3 Reglas de Categoría de Producto (RCP) (conjunto de reglas, requisitos y guías específicas para el desarrollo de las DAPs) publicadas en el tema del acero, cemento y recubrimiento cerámico. Éste ha establecido un Memorándum de Entendimiento con el Consejo Sueco de Gestión Ambiental (ENVIRONDEC, por sus siglas en inglés) y con el Instituto de la Construcción y Medio Ambiente alemán. No obstante, AENOR busca crear acuerdos con otros programas en Europa.

DAPc

Este programa es de uso en España y dispone de 22 DAP. Es utilizado exclusivamente para productos de la construcción. Se basa en la RCP UNE-EN 15804 “Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones Ambientales de Productos”.

The International EPD® System (Suecia)

Es el programa pionero a nivel internacional en DAP y actualmente es el de mayor reconocimiento, con más de 500 DAP publicadas en más de 15 países diferentes y dispone de más de 100 RCP. El programa es operado por el Consejo Sueco de Gestión Ambiental (SEMCo, por sus siglas en inglés).

Hub Latin America International EPD® System

Corresponde a una plataforma regionalizada para Latinoamérica que facilita la comunicación del desempeño ambiental de productos y que funciona alineada con el International EPD® System. El programa es operado desde Chile por el ADDERE y desde México por CADIS, cubriendo así las necesidades de comunicación ambiental tipo III, verificada, de toda la región y reconocidos a nivel mundial (Hub Latin America International EPD® System, 2015).

2.3.5 Pasos para obtener una DAP

Éstos son los pasos generales que deben seguir las empresas que desean crear una Declaración Ambiental de Producto en el International EPD® System (Hub Latin America International EPD® System, 2015):

- a. Contactar Administrador del Programa y encontrar o crear los documentos con la PCR pertinente según la categoría de producto.
- b. Realizar el estudio de ACV del producto basado en las PCR correspondientes.
- c. Redactar un borrador de la DAP basado en la compilación de la información ambiental obtenida con el ACV, en el formato de presentación de informes de DAP.
- d. Verificar los datos mediante un verificador independiente acreditado e iniciar el proceso de certificación.
- e. Registrar y publicar la DAP en el registro oficial del Programa. Una DAP tiene una validez de tres o cinco años, después de ese período la declaración debe ser necesariamente revisada y reeditada.
- f. Pagar la cuota de inscripción y la cuota anual.

3 METODOLOGÍA

3.1 DEFINICIÓN DEL PLANTEAMIENTO Y ALCANCE DEL ACV

El alcance del proyecto se definió respetando que la profundidad y amplitud del ACV concuerden con los objetivos propuestos, de acuerdo con lo estipulado en las Normas ISO 14040 y 14044.

a) Unidad Funcional

La unidad funcional empleada para este estudio se definió como:

“Producir una tonelada de Varilla de Acero para Construcción #3 en la empresa ArcelorMittal Costa Rica.”

b) Flujo de Referencia

El flujo de referencia (FR) se planteó de manera que pudiera satisfacer la unidad funcional en cada etapa del ACV y que en el sistema del producto se cumpliera la función contemplando los recursos (las entradas y salidas de la materia, energía o emisiones recopiladas en el ICV).

$$FR = \text{Cantidad de Recursos} \times \text{Peso unitario}$$

c) Sistema de Producto

El sistema de producto en estudio es el de la varilla de acero para construcción #3 producida por la empresa ArcelorMittal Costa Rica. La función de este material es ser empleado como refuerzo en la construcción con concreto.

d) Límites del Sistema

En éste se abarcaron cuatro etapas del ACV del producto: *producción del lingote de acero* (materia prima del estudio), *transporte del lingote de acero*, *producción de la varilla* y *transporte de la varilla*. No obstante, no se evaluaron los impactos ambientales potenciales de cada proceso unitario dentro de las etapas del sistema, si no que dichos impactos se consideraron de manera general en cada etapa.

Se han excluido las etapas de producción de materias primas (carbón, piedra caliza y mineral de hierro, etc) usadas para producción del lingote, construcción y uso, demolición y reprocesamiento del producto, puesto que la falta información en estas etapas y la consecuente utilización de datos genera mucha incertidumbre.

El sistema en estudio se denota en la Figura 3-1. En ésta se distinguen claramente las etapas con sus respectivas entradas y salidas de recursos (*variables*), así como los límites del sistema:

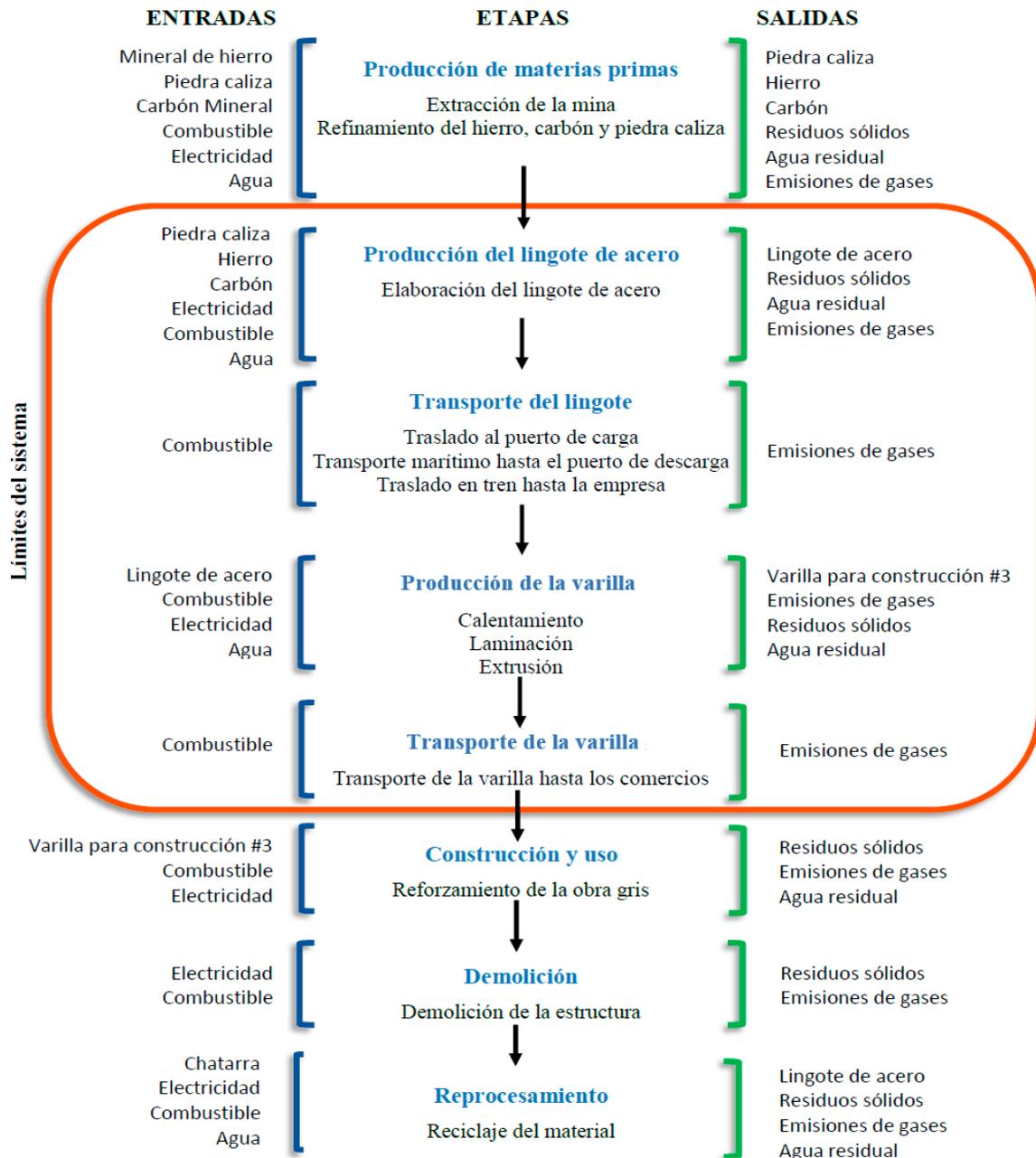


Figura 3-1. Diagrama de flujo del ACV de la varilla

e) Procedimientos de Asignación

Se efectuó con relación a las cantidades en términos de masa y a las entradas significativas de energía en todo el sistema. Para esto se utilizaron los datos aportados por la empresa según el último corte de información del año 2015.

f) Criterios de Corte

Se utilizaron solamente las distancias inferiores al 100 km para obtener la distancia promedio en la etapa de distribución de la varilla de acero, puesto que el 80% de su producción anual se distribuyó en distancias inferiores a los 100 km.

g) Categorías de Impacto Seleccionadas y Metodología de Evaluación de Impacto

El método empleado para la evaluación de impacto fue *ReCiPe* (combina las ventajas de dos métodos de evaluación de impacto, CML 2001 y Eco-Indicator99) y la ponderación *ReCiPe Midpoint (H)*. Ya que es el método más comúnmente hallado en la literatura y el recomendado por el Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable (CADIS) para Latinoamérica. Los factores de caracterización utilizados proceden del método de evaluación seleccionado. En esta sección se consideraron las etapas de clasificación y caracterización.

De las 18 categorías de impacto “*midpoints*” que ofrece este método, se han seleccionado 14:

- Cambio climático
- Disminución de la capa de ozono
- Acidificación terrestre
- Eutrofización de agua dulce
- Toxicidad humana
- Formación de oxidantes fotoquímicos
- Formación de material particulado
- Ecotoxicidad terrestre
- Ecotoxicidad de agua dulce
- Ecotoxicidad marina
- Transformación de suelo natural
- Agotamiento del agua
- Agotamiento de minerales
- Agotamiento de combustibles fósiles.

h) Requisitos Iniciales de la Calidad de los Datos

Para la recopilación de la información se consideró lo siguiente:

- Los datos aportados por la empresa provienen del último corte de información en el año 2015.
- Los datos están debidamente respaldados con fichas técnicas e informes emitidos por evaluadores contratados por la empresa previo a este estudio.
- Las bases de datos empleadas en el estudio son las de Ecoinvent versión 3 (reportada en la bibliografía como la más empleada a nivel global para los ACV) y provienen de la última actualización del Software SimaPro 8.2.3 bajo una licencia académica.
- Para el cálculo de las distancias recorridas por tierra (en camión) para la etapa de transporte de la varilla, se usó la herramienta Google Maps; para el caso del recorrido marítimo se usó la página web *Sea Rates*, con su aplicación “*Port Distances*” y para la distancia recorrida en tren se consultó al maquinista directamente.

i) Suposiciones

Durante el estudio se supuso lo siguiente:

- La distancia entre la planta de producción del lingote y el puerto de embarque del mismo es despreciable, ya que el puerto está contiguo a la planta.
- El término *materia prima* hace referencia al lingote de acero, conocido también como *palanquilla*.
- Las cantidades de recursos empleados para la producción del lingote de acero son establecidas por defecto a partir de las bases de datos de Ecoinvent, por lo que los impactos de la etapa de producción de materias primas presentada en la Figura 3-1 se encuentran implícitos en la de producción de la palanquilla.
- El término *la empresa* se hace referencia a ArcelorMittal Costa Rica.
- El transporte de la materia prima vía marítima se realizó en un buque de carga a base de combustible gasóleo pesado, con un factor de carga de 80% y para una distancia corta (menor a 5000 km).

- El transporte de la materia prima en tren es tipo carga a base de diésel de Estados Unidos, modelo 2000. Puesto que es el único encontrado en las bases de datos que se asemeja al empleado en el caso real (tren tipo General Electric U11B, modelo 1979).
- Se utiliza un transporte de carga de 16 a 32 toneladas métricas, según la normativa EURO 3 para el transporte de la varilla desde la empresa hasta los comercios.
- Las pérdidas de agua por evaporación durante la producción de la varilla de acero son despreciables, en relación a los volúmenes manejados de este recurso.

j) Limitaciones

Las limitaciones encontradas en este estudio se enuncian a continuación:

- La obtención de datos para la etapa de producción de la materia prima desde su origen no pudo realizarse, ya que la fábrica donde anteriormente se producía el lingote actualmente no existe.
- La información exacta del medio de transporte encargado de traer el lingote hasta el puerto de desembarque. Por ejemplo, información del peso total de la carga, especificaciones técnicas del navío, tipo de combustible, etc.
- Para el transporte de la materia prima en tren no se encontró un modelo en las bases de datos que se ajustara totalmente al usado en el caso real.
- Análisis de emisiones de gases en chimenea más recientes, por lo que se usó el del año 2013 como referencia.
- La licencia usada para emplear el software SimaPro 8.2.3 fue de tipo académica, lo cual presentó limitaciones en algunos tipos de análisis como Ponderación y Montecarlo. Además impidió la manipulación de las gráficas y la importación de los resultados hacia programas como Excel.
- En las bases de datos no existen elementos relacionados a los tratamientos de aguas residuales que emplea la empresa, ni el tipo de residuos que se generan durante la producción de la varilla de acero. Por esa razón no fue posible analizar su efecto durante la EICV.

- No fue posible conocer los tratamientos post-vida útil que se le dan a los residuos sólidos generados, ya que éstos son enviados por medio de intermediarios para su reciclaje a otros países o como materia prima para la producción de cemento.

3.2 ELABORACIÓN DEL INVENTARIO DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Se recopilaron los datos de las entradas y salidas para cada etapa del ciclo de vida dentro de los límites del sistema establecidos. Los métodos de recolección de dichos datos o variables se detallan a continuación:

a) Etapa de Producción del Lingote de Acero

La información necesaria para esta etapa no fue posible obtenerla desde su fuente (Planta donde se elabora el lingote de acero). La empresa proporcionó la información sobre la composición de la materia prima, siendo ésta un 10,3% de material reciclado y un 89,7% de material virgen. Las entradas para simular esta etapa en SimaPro 8.2.3 fueron obtenidas de la base de datos de Ecoinvent versión 3, en contraste con las especificaciones técnicas dadas por la empresa.

b) Etapa de Transporte del Lingote de Acero

La distancia marítima recorrida por la materia prima desde la planta de producción hasta el puerto de descarga se determinó mediante del sitio web *Sea Rates*, con la herramienta *Port Distantes*. No obstante se omitieron los recursos empleados en la carga y descarga de la materia prima en los puertos.

Para conocer el tipo de combustible, modelo del transporte marítimo y peso promedio total de la carga del navío, se buscó en la base de datos de Ecoinvent versión 3, basado en el tipo de navío más común usado para este fin reportado en la bibliografía.

c) Etapa de Producción de la Varilla de Acero para Construcción #3

Para una mejor comprensión del sistema en estudio se realizó una visita guiada a la planta de producción de la empresa en Guápiles. Adicionalmente, la empresa facilitó

los datos de cantidades y tipo de recursos (materiales y energéticos) vinculados a la unidad funcional. Asimismo, proporcionó las especificaciones técnicas de la varilla, certificaciones y protocolos del lingote, estudios y análisis previamente realizados a las emisiones, vertidos y residuos sólidos.

Para la variable de energía (electricidad) se creó un modelo en el software, el cual consiste en una matriz energética mixta para Costa Rica y está basada en el Plan de Expansión de la Generación Eléctrica Periodo 2014-2035 proporcionada por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Dicha matriz está compuesta por un 75,53% de fuentes hidroeléctricas, 12,88% de origen geotérmico, 9,81% eólicas, 1,05% por hidrocarburos, 0,72% a partir de biomasa y el restante 0,01% solar (Arias, 2015). No obstante, de la generación hidroeléctrica para ese año el 53,7% provenía de embalses y el 43,7% de plantas tipo filo de agua (ARECEP, 2015).

d) Etapa de Transporte de la Varilla de Acero para Construcción #3

La información con respecto a modelo de los camiones, las rutas de envío y las cantidades anuales de material distribuido dentro del territorio nacional, fue suministrada por la empresa. Además, empleando la herramienta de *Google Maps* se determinó la distancia recorrida en cada ruta desde la empresa hasta los comercios.

Se empleó una plantilla de Excel para trabajar estadísticamente los datos y con esta información se ejecutó el siguiente cálculo:

$$T = P \times D$$

Donde: T =Transporte de la varilla (tkm)

P =Peso de la carga (ton)⁽¹⁾

D =Distancia recorrida (km)⁽²⁾

⁽¹⁾ El peso de la carga está en relación a la unidad funcional (1 tonelada).

⁽²⁾ La distancia recorrida se tomó como el promedio de las distancias, para las $d < 100$ km, ya que en estas condiciones se presenta el 80% del peso total anual de varilla de acero distribuido.

3.3 EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE CICLO DE VIDA DEL PRODUCTO

Con el objetivo de efectuar la EICV se utilizó el software SimaPro 8.2.3, el cual cumple con las características necesarias para realizar el ACV, por su alto nivel de confiabilidad y practicidad.

En el Software se crearon cuatro procesos: producción del lingote, transporte del lingote, producción de la varilla y transporte de la varilla, en concordancia con los límites del sistema establecidos anteriormente. También se crearon algunos subprocesos para ser usados en las etapas como: matriz energética mixta 2015 y agua para producción de varilla.

En cada proceso se incorporaron los datos obtenidos en el ICV, definidos en términos de entradas/salidas y debidamente convertidos a las unidades requeridas por el software. Se asoció cada elemento (entrada/salida) del ICV a elementos de las bases de datos de los inventarios internacionales disponibles en el software para simular el sistema en estudio. La base de datos usada fue Ecoinvent versión 3, ya que su información presenta referencias geográficas específicas. Para este estudio se asignaron los datos a la designación “Resto del Mundo” (ROW, por sus siglas en inglés), Ya que ésta designación aplica para países que no cuentan con bases de datos propias como Costa Rica.

3.4 INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

En esta sección se analizó la inferencia de las variables del ACV sobre las categorías de impacto seleccionadas. También se logró determinar y analizar, basado en la bibliografía consultada, cuáles etapas del ciclo de vida del producto se generaron los principales impactos ambientales potenciales. El análisis de los resultados también permitió explicar el efecto de las limitaciones y suposiciones del estudio. Además, en base a dicha interpretación se generaron las conclusiones y recomendaciones.

3.5 VERIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Para corroborar los resultados del estudio fue necesario aplicar un *Análisis de Contribución* de los datos, el cual está integrado en el software SimaPro 8.2.3. Dicho análisis identificó cuáles procesos o etapas del ciclo de vida contribuyeron en mayor o menor medida sobre las entradas/salidas del sistema bajo estudio. Con esto se verificó si la información obtenida durante la EICV era suficiente para llegar a conclusiones coherentes.

3.6 FORMULACIÓN DE LA ESTRATEGIA A SEGUIR PARA OBTENER LA DECLARATORIA AMBIENTAL DEL PRODUCTO

Se desarrolló tomando como referencia lo que se estipula en la Norma ISO 14025, las reglas de categoría de productos *RCP 2012:01 Productos de la Construcción y Servicios de la Construcción*, las Instrucciones Generales del Programa International EPD System ® y algunas DAP para productos de acero semejantes al evaluado en este estudio declaradas por ese mismo programa. Además se consultó el sitio web del Hub EPD Latin America y se contactó directamente a la señora Claudia Peña, quien es co-directora del programa, miembro del Comité Técnico del International EPD System y asesora internacional en sustentabilidad. Con el fin de conocer más específicamente el procedimiento a seguir en Costa Rica una vez efectuado el ACV del producto bajo estudio.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ETAPA DE PRODUCCIÓN DEL LINGOTE DE ACERO

La Figura 4-1 muestra los resultados de la EICV para la etapa de producción del lingote de acero. Ésta presenta valores positivos para las categorías de impacto, lo que significa que sí existen impactos perjudiciales potenciales al ambiente en todas las evaluadas durante la producción de una tonelada de acero en un horno de arco eléctrico.

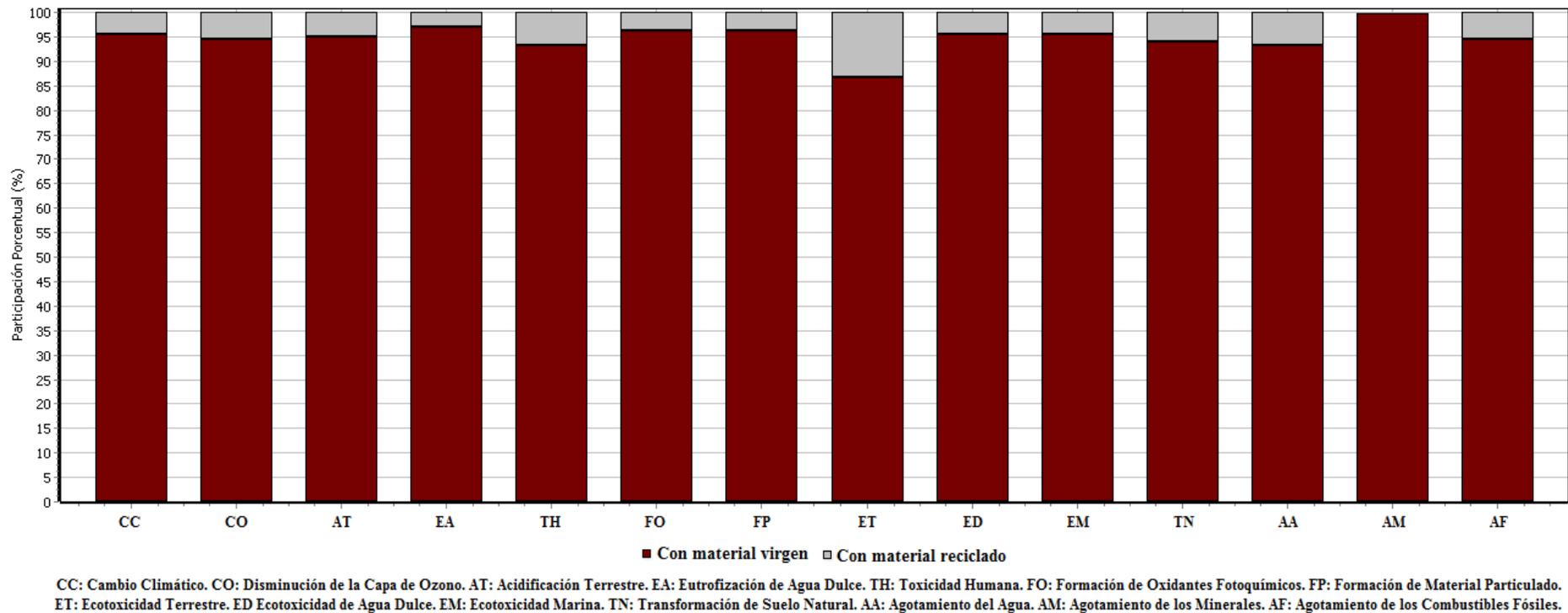


Figura 4-1. EICV para la Etapa de Producción del Lingote de Acero

Los resultados del ICV y el modelo utilizado en el software para esta etapa se pueden consultar en el Apéndice 1, Cuadro A.1. No obstante, se puede apreciar que para todas las categorías seleccionadas el tipo de fabricación del lingote de acero que presenta mayor carga ambiental es la que emplea material virgen como materia prima en el proceso. El material virgen se obtiene directamente de la naturaleza y se le suman los procesos previos a la fabricación del *hierro esponja*, los cuales consisten en la extracción y el refinamiento del mineral de hierro, el coque y la piedra caliza. Esto conlleva a una alta demanda de energía eléctrica, un gran consumo de combustibles fósiles, la generación de aguas residuales especiales, residuos peligrosos, la emisión de GEI y material particulado a la atmósfera. Este resultado concuerda con lo que asegura la World Steel Association (2014), que indica que para producir una tonelada de *acero virgen* (a partir de material virgen) se requieren 1,5 toneladas de mineral de hierro y 450 kg de coque. Excluyendo las otras materias primas, solamente estas dos generan casi una tonelada de residuos.

En la Figura 4-1, también se denota que al usar material virgen como materia prima se afecta en mayor medida a la categoría de agotamiento de los minerales (97,7%), seguido por la eutrofización de agua dulce, la formación de material particulado y la formación de oxidantes fotoquímicos.

En la Figura 4-2 se presenta el desglose de la participación porcentual de los distintos elementos que generan impacto sobre el agotamiento de los minerales.

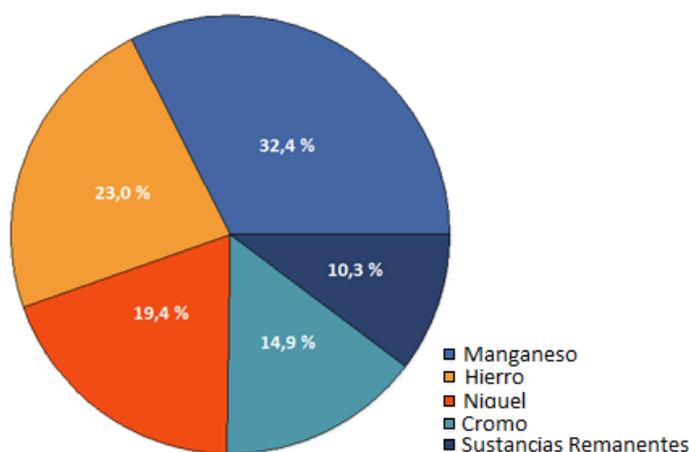


Figura 4-2. Análisis de Contribución para la Categoría Agotamiento de los Minerales para la Producción del Lingote de Acero a Partir de Material Virgen

En la Figura 4-2, se denota que el manganeso es el elemento con mayor contribución. Esto se debe a la extracción de manganeso desde la naturaleza para ser usado como potenciador de la resistencia mecánica del acero, también para aprovechar sus propiedades desoxidantes y desulfurantes al fabricar dicho material. Además, según la ficha técnica de la composición química del lingote empleado en la empresa, después del hierro el elemento de mayor concentración es el manganeso.

En la Figura 4-1 se puede apreciar que hay impactos importantes en la eutrofización de agua dulce. Lo cual se le atribuye a los fosfatos generados durante la fabricación del acero, ya que el fósforo es agregado para aumentar su límite de resistencia, darle mayor dureza y concederle propiedades anticorrosivas (Cházaro & Álvarez, s.f). Además, el protocolo técnico de la palanquilla reveló hay un porcentaje de fósforo en su composición química. Por otra parte, se sabe que el fósforo genera fosfatos al combinarse con oxígeno, convirtiéndose en una de las formas más ubicuas del deterioro de la calidad del agua y que puede acelerar la eutrofización del agua dulce (Abid & Sarvajeet, 2013).

La afectación sobre la categoría de formación de material particulado se deriva de las operaciones preliminares de la fabricación del lingote. El análisis de contribución para esta categoría reveló que las partículas que más influyen son las menores a $2,5 \mu\text{m}$. Operaciones como la descarga del mineral de hierro, el almacenamiento, triturado y tamizado, provocan considerables emisiones de polvo relativamente grueso y material particulado a la atmósfera (Parker, 2001). Además, la quema de combustible (bunker y carbón) generan cenizas y hollín.

En cuanto a la formación de oxidantes fotoquímicos, hay investigaciones que mencionan que la fabricación de acero produce emisiones de óxidos de nitrógeno, que a su vez juega un papel importante en la formación del smog fotoquímico y la lluvia ácida. La mayor parte de los óxidos de nitrógeno son el resultado de la oxidación a elevadas temperaturas del nitrógeno durante el proceso de producción de acero, dichas oxidaciones pueden ocurrir en hornos de recalentamiento, hornos básicos de oxígeno y hornos de arco eléctrico (Chakrabarti, 2006). Este último es el que se usó para fabricar el lingote de acero evaluado en esta etapa.

Las emisiones de material particulado, oxidantes fotoquímicos, GEI y metales pesados en el proceso de producción del lingote de acero, son precursores de efectos adversos sobre otras categorías de impacto, para ello se realizó un análisis más detallado

de las demás categorías, lo cual mostró las principales sustancias que afectaron en mayor medida a cada categoría evaluada.

Los resultados muestran además que con respecto al impacto de cambio climático la sustancia con mayor participación fue el CO₂; en disminución de la capa de ozono correspondió a los CFCs y sustancias halogenadas; para la acidificación terrestre se le atribuyó a los SO_x y los NO_x, que llegan al suelo por efecto de la gravedad o por medio de la lluvia ácida; la transformación del suelo natural se asoció a la alteración producida por la introducción de maquinaria para la explotación de las materias primas vírgenes desde la naturaleza; el agotamiento del agua se atribuyó a su uso en el proceso de lavado de las materias primas y en el enfriamiento del metal; el agotamiento de los combustibles fósiles se relacionó con su uso como combustible en el proceso de acería; se comprobó la presencia mayoritaria de metales pesados para las categorías de toxicidad humana, ecotoxicidad terrestre, agua dulce y marina. Para la ecotoxicidad marina se encontró una relación directa por el hecho de que la planta de producción del lingote en Point Lisas, Trinidad y Tobago, se encontraba justo al lado de la costa.

En la Figura 4-1 también se puede observar que en el proceso de fabricación del acero a partir de material reciclado se produce mayor impacto sobre la categoría de ecotoxicidad terrestre (13,4%). Esto se debe a que el horno de arco eléctrico empleado en esta etapa puede emitir gases y polvo con metales pesados como cadmio, mercurio, plomo, níquel, etc., (Moffit, 2001). La distribución porcentual de las principales sustancias que generan el impacto en esta categoría se presenta en la Figura 4-3.

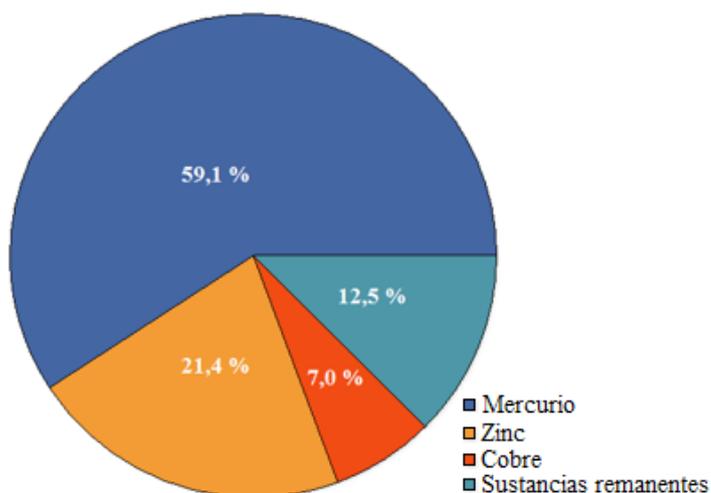
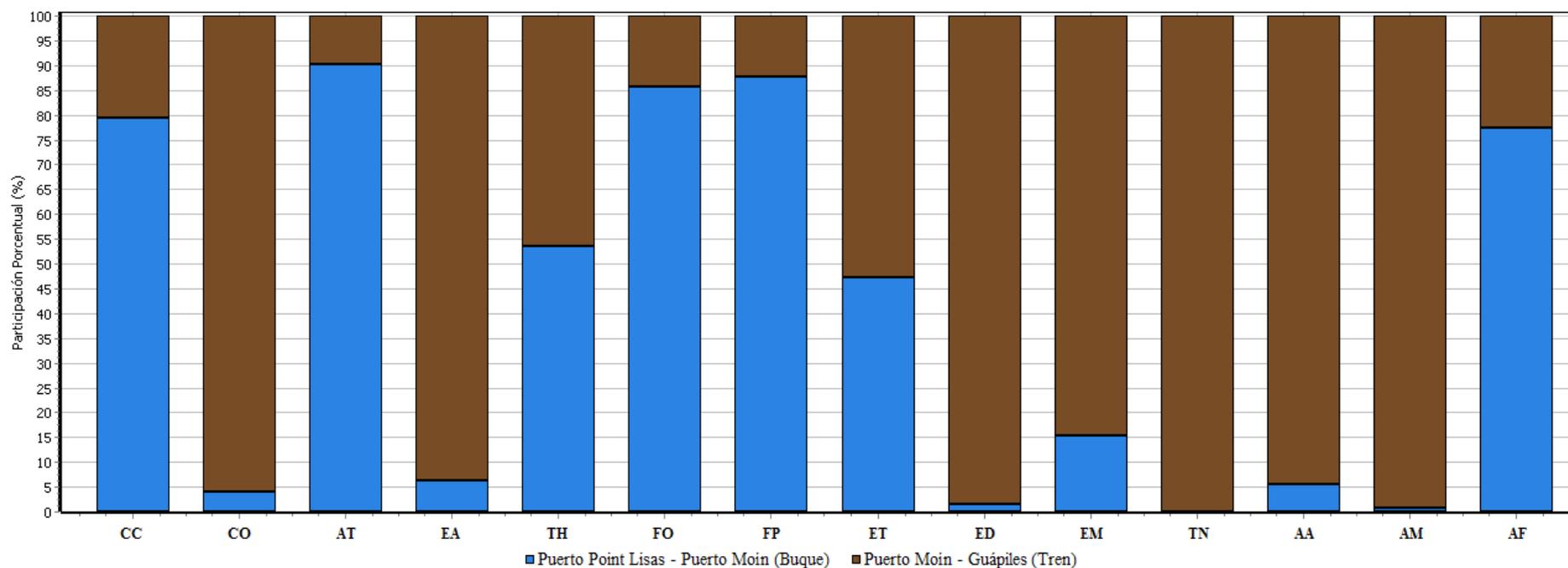


Figura 4-3. Análisis de Contribución de la Categoría Ecotoxicidad Terrestre para la Producción del Lingote de Acero a Partir de Material Reciclado

La Figura 4-3 revela que la sustancia que genera mayor impacto sobre esta categoría es el mercurio y su participación es de 59,1%. Dado que el mercurio aparece de manera natural en el carbón y demás combustibles fósiles, cuando éste se quema para producir energía o se usa como materia prima en la producción del lingote de acero, puede quedar suspendido en la atmósfera, cayendo a la tierra al ser arrastrado por la lluvia u otras partículas más pesadas, o simplemente por efecto de la gravedad, fenómeno conocido como *deposición atmosférica*. La quema de mineral de hierro, coque y piedra caliza en hornos de arco eléctrico son una fuente de emisión importante de mercurio a la atmósfera (EPA, 2016).

4.2 ETAPA DE TRANSPORTE DEL LINGOTE DE ACERO

La Figura 4-4 muestra los resultados de la EICV para la etapa de transporte de una tonelada de lingote de acero desde Point Lisas, Trinidad y Tobago hasta la planta de producción de ArcelorMittal en Guápiles, Costa Rica. Dicho transporte se realizó en dos etapas, el transporte marítimo fue mediante un buque de carga y el transporte terrestre en tren.



CC: Cambio Climático. CO: Disminución de la Capa de Ozono. AT: Acidificación Terrestre. EA: Eutrofización de Agua Dulce. TH: Toxicidad Humana. FO: Formación de Oxidantes Fotoquímicos. FP: Formación de Material Particulado. ET: Ecotoxicidad Terrestre. ED Ecotoxicidad de Agua Dulce. EM: Ecotoxicidad Marina. TN: Transformación de Suelo Natural. AA: Agotamiento del Agua. AM: Agotamiento de los Minerales. AF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles.

Figura 4-4. EICV para la Etapa de Transporte del Lingote de Acero

Los resultados del ICV y el modelo utilizado en el software para esta etapa se pueden consultar en el Apéndice 2, Cuadro A.2.1. La Figura 4-4 muestra que el transporte marítimo del lingote de acero presenta impactos potenciales importantes sobre cinco de las categorías evaluadas: acidificación terrestre (90,1%), formación de material particulado (87,8%), formación de oxidantes fotoquímicos (85,8%), cambio climático (79,4%) y agotamiento de los combustibles fósiles (77,4%).

El efecto sobre la categoría de acidificación terrestre es causado por la deposición atmosférica del NO_x, SO_x, y otras sustancias. Los buques usan combustibles a base de petróleo con elevado contenido de azufre para alimentar sus motores y dichas sustancias se liberan durante la combustión. La deposición de esas sustancias en la tierra se ve favorecida por dos situaciones: primero, que el lingote provenía desde Trinidad y Tobago, así que la ruta marítima recorrida se encontraba relativamente cerca de la costa, y segundo, que la rotación terrestre desvía los vientos alisios hacia la costa este del continente, arrastrando las emisiones del buque. Además, la acidificación terrestre está asociada a las actividades terrestres en zonas portuarias que pueden conducir a la contaminación del suelo y de los sedimentos (Miola, Ciuffo, Giovine & Marra, 2010). Cabe rescatar que durante la combustión de los hidrocarburos se emiten a la atmósfera material particulado, oxidantes fotoquímicos y GEI que favorecen al cambio climático, además el 80% del comercio mundial se transporta vía marítima, constituyendo un 4% de las emisiones de GEI a nivel mundial (ONU, 2009) y en particular el 2,1% de las emisiones de CO₂ en el mundo.

Para el transporte terrestre en tren desde puerto Moín hasta las instalaciones de la planta de producción de la empresa en Guápiles, se destacan siete impactos importantes distribuidos en tres niveles de relevancia, según se muestra en la Figura 4-4. En el primer nivel se encuentran las categorías de transformación de suelo natural (100%), agotamiento de los minerales (99,3%) y ecotoxicidad de agua dulce (98,4%); en el segundo están la disminución de la capa de ozono (96%), el agotamiento del agua (94,6%) y eutrofización de agua dulce (93,8%); y en el tercero se encuentra la categoría de ecotoxicidad marina (84,8%).

La participación del transporte en tren tiene un 100% de influencia sobre la categoría de transformación de suelo natural, puesto que el transporte vía marítima no tiene efecto sobre la transformación del suelo. No obstante, ese efecto es consecuencia de los procesos relativos a la instalación de la vía ferroviaria, como la tala de bosque,

desplazamiento de tierra para la nivelación del terreno y la construcción de puentes sobre ríos. Dichas actividades generan pérdida de la cobertura vegetal, modifica los drenajes naturales, cambia el nivel freático y erosiona el suelo.

Realizando un análisis de contribución en esta categoría, se determinó que el impacto sobre el agotamiento de los minerales y del agua se debe a que para efectuar los cálculos de la EICV, el software incluye los datos de la producción de la locomotora, el vagón y la vía del tren, que demandan grandes cantidades de minerales procedentes de la naturaleza como hierro, manganeso, níquel, entre otros. Asimismo, el software suma los procesos de mantenimiento de la locomotora y el vagón, que involucra el uso de agua.

La categoría de disminución de la capa de ozono se ve afectada por el consumo de diésel en el motor de la locomotora. Este tipo de motor emite compuestos químicos gaseosos (óxidos de nitrógeno, hidrocarburos, etc) y materiales particulados (hollín), que agotan la capa de ozono (Chamarra & Saavedra, 2013). Un análisis más detallado de esta categoría de impacto reveló que los principales productos gaseosos emitidos son CFCs (clorofluorocarbonos) y halones (hidrocarburos halogenados).

Los efectos sobre la categoría de eutrofización de agua dulce son consecuencia de los procesos de mantenimiento (específicamente la limpieza y lavado) de la locomotora y el vagón, que son sumados por el software por defecto. La sustancia que tuvo mayor participación en esta categoría fue el fosfato, ya que los productos de limpieza como los detergentes, pueden contener altos niveles de fosfatos en su composición química. Cuando los fosfatos tienden a acumularse potencian la eutrofización de las aguas superficiales y en algunas subterráneas (Capó, 2007).

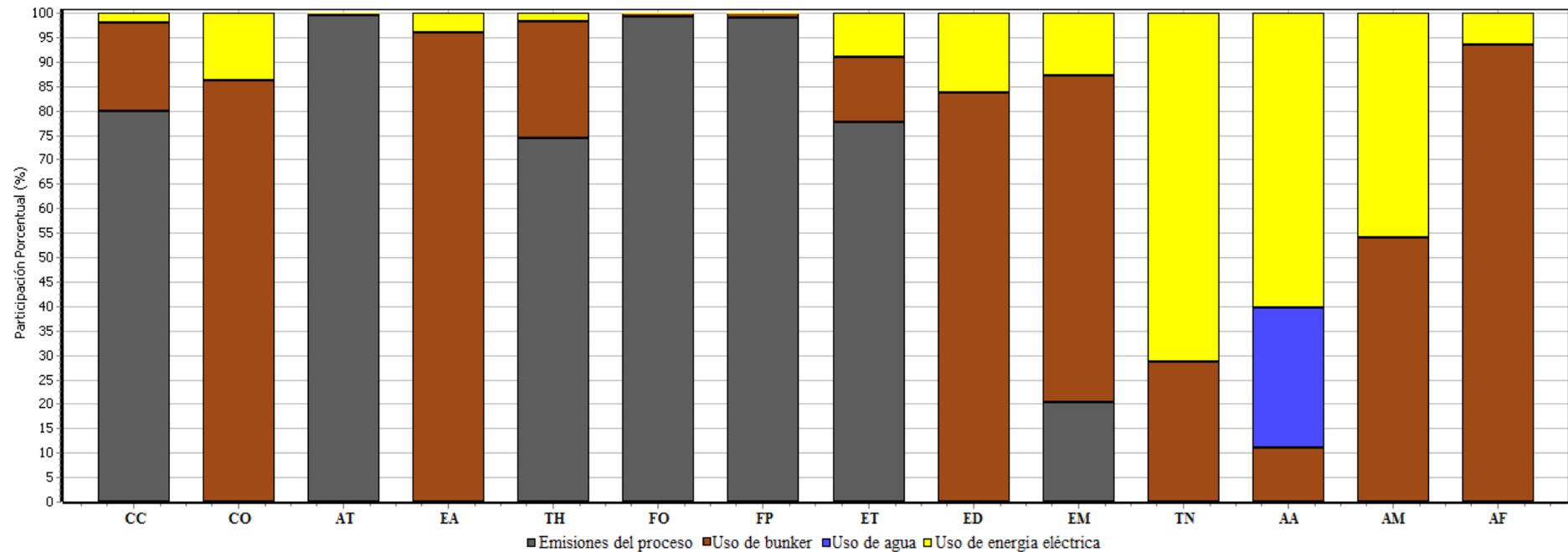
Para las categorías de ecotoxicidad de agua dulce y marina se logró determinar mediante un análisis más detallado que las sustancias con mayor influencia son los metales pesados. Durante la construcción de las infraestructuras ferroviarias puede presentarse algún derrame accidental de sustancias que pueden caer directamente al agua superficial o infiltrarse por el suelo hasta llegar a las aguas subterráneas, también puede ocurrir que, al excavar el terreno se movilizan sustancias como los metales pesados que inicialmente se encontraban inmovilizadas en determinadas zonas del suelo (Hernández, 2015). Una vez que las sustancias llegan a un río éstas pueden ser transportadas por la corriente hasta el mar, tomando en consideración que los ríos

alrededor de la línea del tren en Limón desembocan en el Mar Caribe y están relativamente cerca de éste.

Como se ha mencionado, los resultados anteriores están basados en el transporte de una tonelada de lingote de acero en buque y tren en sus respectivas distancias, esto se puede apreciar en el Apéndice 2, Cuadro A.2.1. No obstante, los valores numéricos de los impactos ambientales potenciales generados al transportar una tonelada de lingote de acero en un sólo kilómetro en buque y tren varían, de manera que se produce mayor impacto durante el transporte en tren. Este resultado se puede apreciar en el Apéndice 2, Cuadro A.2.2.

4.3 ETAPA DE PRODUCCIÓN DE LA VARILLA DE ACERO

En la Figura 4-5 se muestran los resultados de la EICV de la producción de una tonelada de acero para construcción #3 en la empresa ArcelorMittal Costa Rica:



CC: Cambio Climático. CO: Disminución de la Capa de Ozono. AT: Acidificación Terrestre. EA: Eutrofización de Agua Dulce. TH: Toxicidad Humana. FO: Formación de Oxidantes Fotoquímicos. FP: Formación de Material Particulado. ET: Ecotoxicidad Terrestre. ED Ecotoxicidad de Agua Dulce. EM: Ecotoxicidad Marina. TN: Transformación de Suelo Natural. AA: Agotamiento del Agua. AM: Agotamiento de los Minerales. AF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles.

Figura 4-5. EICV para la Etapa de Producción de la Varilla de Acero

Los resultados del ICV y el modelo creado en el software para esta etapa se pueden encontrar en el Apéndice 3, Cuadro A.3.1.

Cuando se introdujeron los datos en el software para la EICV de la producción de la varilla de acero, fue necesario incluir elementos como el uso de bunker como combustible para el horno galopante (calentamiento), el consumo de agua para enfriamiento, el consumo de energía eléctrica y las emisiones de gases generados en el proceso. Los impactos asociados a dichos elementos sí generan impacto ambiental potencial directamente en Costa Rica.

En la Figura 4-5 se muestra el efecto del uso de bunker (*fuel oil*) como combustible primario para el horno, el cual presenta una influencia importante sobre cuatro de las categorías evaluadas.

Su mayor participación porcentual ocurre en la categoría de eutrofización de agua dulce (95,9%) y se debe a los procesos implícitos de mantenimiento de las maquinarias utilizadas en la quema del combustible, que involucran a su vez la limpieza de las mismas empleando sustancias como detergentes que contienen fosfatos (Capó, 2007). En la categoría de agotamiento de los combustibles fósiles, el bunker presenta una influencia de 93,3% y es debido a que el bunker es un combustible fósil derivado del petróleo y su uso ocasiona el agotamiento del mismo. La participación sobre la categoría de disminución de la capa de ozono es de 86,2% y ocurre como consecuencia de la emisión de CFCs y sustancias halogenadas a la atmósfera durante la combustión del bunker. Otra categoría afectada es la de ecotoxicidad de agua dulce con un 83,6%. El bunker contiene metales pesados (RECOPE, 2015) los cuales pueden liberarse a la atmósfera durante su combustión y precipitar por efecto de deposición atmosférica hasta los cuerpos de agua dulce, propiciando su toxicidad.

En la Figura 4-5 se puede apreciar que el consumo de agua únicamente genera impacto positivo sobre la categoría de agotamiento del agua, con una participación del 28,7%. La razón de este impacto se le atribuye al uso del agua para el enfriamiento del lingote de acero durante el proceso de laminación. El lingote es calentado en el horno para aumentar su maleabilidad, una vez que sale del horno es preciso rociarle agua para remover la *cascarilla* y pasar el material por los rodillos donde se le da forma a la varilla. Cabe mencionar que el agua que se utiliza en el proceso proviene de pozo (2%) y de la recolección de agua de lluvia (98%). Cuando el agua es usada para enfriar el metal el 10% se evapora por el contacto con la superficie caliente del acero, mientras

que el resto del agua es transportada por un sistema de tuberías hasta una planta de tratamiento para ser tratada y luego reincorporada al proceso. El tratamiento inicia al separar el aceite y las grasas del agua por decantación, luego se le aplica floclulantes y los flóculos formados se separan por sistemas de filtración de arena. Finalmente el agua es enfriada en unas torres de enfriamiento antes de regresar al proceso productivo (el 100% del agua tratada es reutilizada). Al existir una pérdida del 10% de agua por evaporación, significa que el 100% del agua (entrada en el ACV) debe sustituirse cada 10 toneladas de varilla de acero producida. Es evidente que se tiene un ahorro sobre el impacto en la categoría de agotamiento del agua sobre el medio ambiente, no obstante, dicho ahorro no se mostró en la gráfica (debía observarse como un porcentaje negativo en el eje Y) por la ausencia de una modelación correcta de esta etapa en el software. Cuando se seleccionó la entrada de “consumo de agua” no fue posible encontrar un sistema de tratamiento que coincidiera con el que se aplica en ArcelorMittal Costa Rica, es por esa razón que el agua muestra un impacto como si hubiera sido tomada desde el sistema de agua potable del suministro público. Para la entrada del agua se creó un proceso aparte llamado “Consumo de agua” el cual se puede observar en el Apéndice 3, Cuadro A.3.2. Según un análisis de contribución realizado a dicha entrada, su impacto potencial en la etapa de producción de la varilla procede del uso de agua de pozo. Además, si el 10% del agua se pierde por evaporación, por cada metro cúbico de agua empleada en enfriamiento un 0,1 m³ debe ser sustituida y un 0,9 m³ debe ser tratada.

El uso de la energía eléctrica en la producción de la varilla de acero incide en mayor medida sobre tres categorías de impacto. Según los resultados de la Figura 4-5, la participación para la categoría de transformación de suelo natural es de 71,5%, para el agotamiento del agua es de 60,4% y en agotamiento de los minerales es de 45,9%.

La matriz eléctrica del año 2015 en Cosa Rica era mixta y casi 100% renovable. Basado en el plan de expansión de la generación eléctrica para el periodo 2014-2035 del ICE, se creó la entrada de energía para la etapa de producción de la varilla, la cual se muestra en el Cuadro 4-1 y el modelo creado en el software para la matriz energética se puede encontrar en el Apéndice 3, Cuadro A.3.2.

Cuadro 4-1. Composición de 1 kWh proporcionado por el ICE en el año 2015 para la etapa de producción de la varilla de acero

Tipo de generación	Porcentaje de participación (%)	kWh / 1 kWh Mixta
Hidroeléctrica Filo de Agua	34,97	0,3497
Hidroeléctrica Embalse	40,56	0,4056
Térmica (Fuel Oil)	1,05	0,0105
Geotérmica	12,88	0,1288
Eólica	9,81	0,0981
Biomásica	0,72	0,0072
Fotovoltaica	0,01	0,0001
Total	100	1,000

Al efectuar un análisis de contribución para las categorías en la que el uso de energía eléctrica tiene mayor significancia (ver Figura 4-5), se determinó que en la transformación de suelo natural el impacto se debe a que la construcción de una represa hidroeléctrica o de cualquier central de generación eléctrica (independientemente su tamaño) conlleva a una invasión del área natural, movilización de tierra y otros materiales y como consecuencia también se alteran los ecosistemas terrestres. Para la categoría de agotamiento del agua se encontró que dicho impacto se debe al uso del agua en las turbinas generadoras de electricidad en el tipo de generación hidroeléctrica, principalmente por el cambio en el uso del agua y la disminución del caudal natural.

Un análisis de contribución para la categoría de agotamiento de los minerales a reveló que la afectación sobre esta categoría es generada por el uso de materiales como hierro, níquel, etc., en la fabricación de las distintas máquinas y estructuras empleadas para la obtención o transformación de la energía eléctrica.

La Figura 4-5 muestra el impacto de las emisiones del proceso productivo de la varilla de acero y en el Cuadro A.3.1 del Apéndice 3, se pueden visualizar la cantidad y tipo de gases emitidos. En mayor medida se genera afectación sobre la categoría de acidificación terrestre, exactamente un 99,6%. El análisis de contribución efectuado a esta categoría en relación a los gases reveló que el efecto principal es provocado por el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Según el informe del análisis de gases en la chimenea proporcionado por la empresa, el NO₂ y el SO₂ son lo que se encuentran en mayor concentración. La acidificación terrestre hace referencia a los cambios en las

propiedades químicas del suelo. Cuando el NO_2 y el SO_2 en el aire reaccionan con radicales hidroxilos y vapor de agua de la atmósfera pueden generar ácido nítrico y sulfúrico respectivamente, que pueden disolverse en las gotas de agua de la atmósfera y llegar a la superficie terrestre por precipitaciones que producen la lluvia ácida, también dichas sustancias pueden llegar al suelo por efecto de la deposición atmosférica, aumentando su potencial de acidificación (Azevedo *et al*, 2015).

Las emisiones del proceso también afectan en las categorías de formación de oxidantes fotoquímicos (99,4%) y en formación de material particulado (99%). El análisis de contribución arrojó que para ambas categorías el NO_2 y el SO_2 son las sustancias que causan mayor impacto. La afectación sobre la primera categoría se debe a la presencia del NO_2 en la atmósfera, que luego de haber sido expulsado desde la chimenea puede reaccionar con los fotones de luz generando oxidantes fotoquímicos como el ozono (OMS, 2006).

Para el caso de la formación del material particulado, existen partículas $\text{MP}_{2,5}$ que pueden formarse por reacciones químicas entre contaminantes gaseosos como el NO_2 , el SO_2 y otros compuestos. A las $\text{MP}_{2,5}$ se les conoce como material particulado secundario y se puede formar por dos mecanismos: en el primero, por la condensación de los gases luego de su emisión, que se adhieren a otras partículas para formar conglomerados de mayor tamaño y precipitar hasta el suelo por gravedad; en el segundo, mediante el arrastre en gotas de lluvia o neblina, para las cuales los gases condensados sirven de núcleos (Ministerio del Medio Ambiente, 2011).

En la Figura 4-5 se puede apreciar que la emisión de gases también genera impacto sobre la categoría de cambio climático (79,9%) cuyo mayor contribuyente y precursor es el CO_2 (Amestoy, 2010), liberado durante la quema de combustible en el horno galopante. También existe impacto sobre la categoría de ecotoxicidad terrestre (77,6%) y dicho impacto se asocia con la deposición atmosférica de los metales pesados, luego de haber sido liberados a la atmósfera a través de la chimenea del horno galopante durante la combustión del bunker. Otra categoría afectada es la de toxicidad humana, con una participación porcentual de 74,3%. Los gases producidos por la combustión de hidrocarburos se asocian a intoxicaciones pulmonares y otras enfermedades del árbol traqueobronquial (Amestoy, 2010).

Por otra parte, cabe agregar que la suma (en kg) de los gases emitidos es mayor que la cantidad de bunker empleada (considerando que de éste proceden los gases

emitidos) (ver Cuadro A.3.1), ya que en el encendido y el tiempo para lograr la temperatura necesaria para la producción de la varilla se necesitan aproximadamente 11000 litros de bunker (unos 10300 kg) y gran parte de los gases que se generan quedan como remanentes en el horno, lo cual se asocia con una alta concentración de sustancias en la chimenea. Para producir una tonelada de varilla se requiere una fracción muy pequeña (para mantener el calor interno) de la requerida para alcanzar la temperatura óptima de producción.

En la etapa de producción de la varilla de acero se generan residuos sólidos procedentes de dos fuentes. La primera fuente es cuando el lingote de acero es rociado con agua después del proceso de calentamiento en el horno galopante, para lograr desprender la *cascarilla*. Según el análisis químico de la cascarilla proporcionado por la empresa, su composición química es un 98,77% óxido de hierro (III) y trazas de otros compuestos como óxidos de silicio, calcio, entre otros. La segunda fuente es en el proceso de corte de la varilla para obtener las dimensiones conforme el perfil del producto en el mercado. Sin embargo, estos subproductos reciben tratamiento después de su producción. La cascarilla puede ser empleada como materia prima en la producción de cemento debido a su alto contenido de óxido de hierro (III) (Kalpakjian & Schmid, 2002). La empresa la vende a un intermediario que a su vez la revende a una cementera dentro del territorio nacional. Los recortes de varilla son 100% reciclables, así que son acopiados como chatarra para luego ser vendidos a un intermediario, que los revende en Ecuador o China para su reciclaje. Para el modelo creado en el software no fue posible encontrar dichas variables dentro de las bases de datos disponibles, razón por la cual se omitieron en el ACV de la varilla de acero.

Sin embargo, al producir una tonelada de varilla de acero se generan 16,1 kg de recorte de varilla, lo cual implica que para obtener una tonelada de chatarra de acero se deben producir 62 toneladas de varilla aproximadamente. Reciclar acero genera un ahorro en los impactos sobre el medio ambiente. Según la World Steel Association, al reciclar una tonelada de acero se evita el consumo de 1,4 toneladas de mineral de hierro, de 0,74 toneladas de carbón y de 0,12 toneladas de piedra caliza, además se dejan de liberar 1,5 toneladas de CO₂ a la atmósfera y se ahorran 13 GJ de energía (World Steel Association, 2016). Lo anterior sugiere que al reciclar los recortes de la varilla de acero se está minimizando el impacto en el proceso de fabricación del acero.

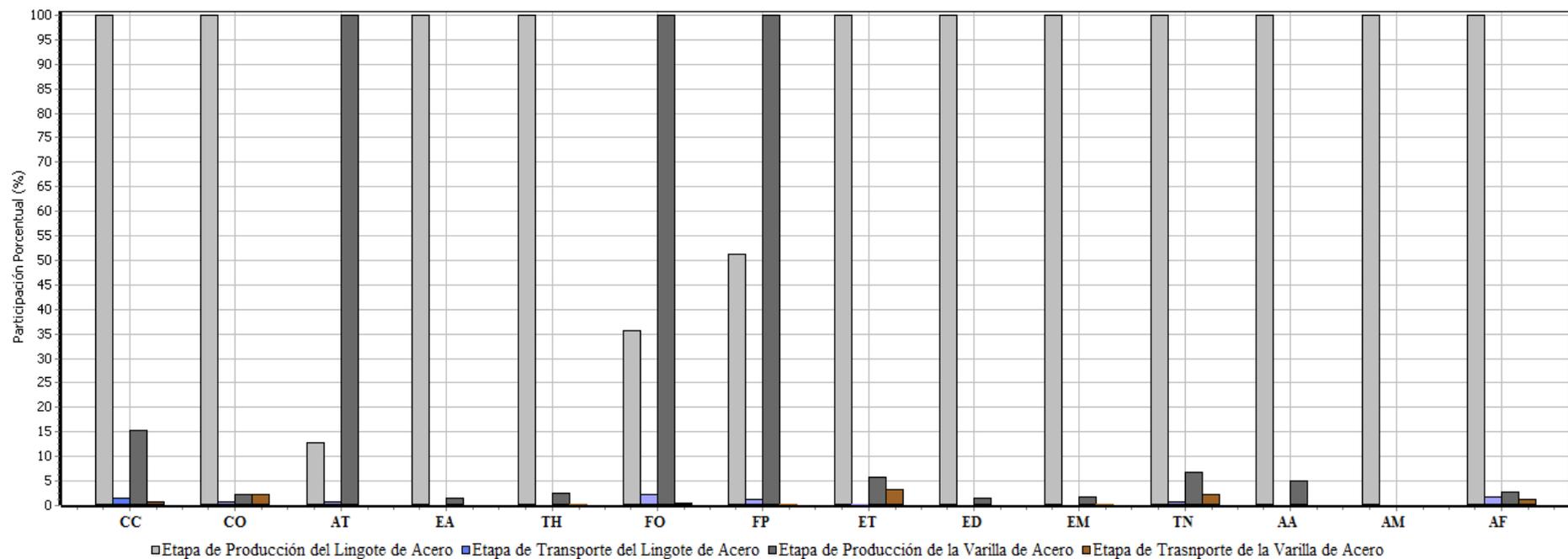
4.4 ETAPA DE TRANSPORTE DE LA VARILLA DE ACERO

Esta etapa consta de una sola variable (transporte en camión). Para la selección de dicha entrada fue necesario usar un criterio de distribución entre las toneladas de varilla (producto terminado) transportadas y la distancia recorrida por dicho producto. Dicho criterio se puede apreciar en el Apéndice 4, Cuadro A.4.2. Por otra parte, puesto que en las categorías de impacto seleccionadas el 100% de la participación en cada una de ellas corresponde a la única entrada evaluada, se omitirá la EICV individual para esta etapa.

Los resultados del ICV y el modelo usado en el software se pueden observar en el Apéndice 4, Cuadro A.4.1.

4.5 ANÁLISIS COMPARATIVO

Se realizó un análisis comparativo de las cuatro etapas definidas para éste estudio, de modo que permitiera comprender la participación de cada etapa en un contexto global en relación a cada categoría de impacto. Dicho análisis se presenta en la Figura 4-6.



CC: Cambio Climático. CO: Disminución de la Capa de Ozono. AT: Acidificación Terrestre. EA: Eutrofización de Agua Dulce. TH: Toxicidad Humana. FO: Formación de Oxidantes Fotoquímicos. FP: Formación de Material Particulado. ET: Ecotoxicidad Terrestre. ED Ecotoxicidad de Agua Dulce. EM: Ecotoxicidad Marina. TN: Transformación de Suelo Natural. AA: Agotamiento del Agua. AM: Agotamiento de los Minerales. AF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles.

Figura 4-6. Análisis Comparativo de las Etapas de Producción del Lingote, Transporte del Lingote, Producción de la Varilla y Transporte de la Varilla.

En la Figura 4-6 se puede apreciar que la etapa de producción del lingote de acero genera el mayor impacto ambiental potencial, siendo de 100% en once de las catorce categorías de impacto evaluadas. La fabricación de acero primario (materias vírgenes) y secundario (reciclado) produce gran variedad de efectos perjudiciales en el medio ambiente. Dichos efectos se asocian al uso intensivo de energía y materias primas, que se traducen en emisiones de CO₂, SO_x, NO_x, material particulado, así como el uso de agua y sus emisiones asociadas (Cadavid, 2014).

En el análisis comparativo de la Figura 4-6 se puede apreciar una leve participación del transporte del lingote en las categorías de formación de oxidantes fotoquímicos, cambio climático y en agotamiento de los combustibles fósiles. Estos efectos se asocian al uso de combustible en el buque y la locomotora, y a sus respectivas emisiones a la atmósfera.

Los impactos potenciales procedentes de las etapas de transporte del lingote (desde Moín hasta Guápiles), producción de la varilla y transporte de la varilla, si tienen efecto directo sobre Costa Rica. Por otra parte, la etapa de producción del lingote acarrea cargas ambientales pero éstas fueron generadas y tienen efecto en Trinidad y Tobago.

La etapa de producción de la varilla de acero tiene una participación mayoritaria (100%) en las categorías de acidificación terrestre, formación de oxidantes fotoquímicos y formación de material particulado, cuyo impacto procede de las emisiones de gases a la atmósfera desde la chimenea. Dichos gases también presentan mayor influencia sobre estas tres categorías y fueron discutidas detalladamente en la sección 4.3 del presente documento.

El transporte de la varilla genera un consumo de combustible proporcional a las toneladas de varilla transportadas en camión, como se puede apreciar en el Apéndice 4, Figura A4. No obstante, la combustión de los combustibles libera a la atmósfera sustancias halogenadas, material particulado y GEI, generando impacto sobre las categorías de cambio climático y agotamiento de la capa de ozono. Dichas sustancias tienen potencial de acidificación terrestre si llegan hasta el suelo. El efecto sobre la transformación de suelo natural se debe a la movilización de tierra durante la construcción de la carretera. Por otra parte, la afectación sobre la categoría de agotamiento de los combustibles fósiles procede del consumo de diésel durante el transporte.

4.6 RESUMEN DE LOS RESULTADOS

Para una mejor comprensión de los resultados de la EICV de todas las etapas, se presenta un resumen cualitativo y cuantitativo en los cuadros 4-2 y 4-3 respectivamente.

Cuadro 4-2. Análisis de Contribución para todas las etapas del ACV de la varilla de acero

Categoría de impacto	Producción del Lingote	Transporte del Lingote	Producción de la Varilla	Transporte de la Varilla
Cambio Climático	Emisión de CO ₂ del horno	Emisión de CO ₂ del buque	Emisión de CO ₂ del horno	Emisión de CO ₂ del camión
Disminución de la Capa de Ozono	Emisión de Bromotrifluorurometano	Emisión de Bromotrifluorurometano	Emisión de Bromotrifluorurometano	Emisión de Bromotrifluorurometano
Acidificación Terrestre	Emisión de SO ₂	Emisión de NO _x	Emisión de SO ₂	Emisión NO _x
Eutrofización de Agua Dulce	Emisión de fosfatos	PO _x (mantenimiento)	Emisión de fosfatos	PO _x (mantenimiento)
Toxicidad Humana	Mn (aleación)	Emisión de acroleína	Emisión de Hg	Antimonio
Formación de Oxidantes Fotoquímicos	Emisión de NO _x	Emisión de NO _x	Emisión de NO ₂	Emisión de NO _x
Formación de Material Particulado	Emisión de PM < 2,5 µm	Emisión de NO _x	Emisión de SO ₂	Emisión de NO _x
Ecotoxicidad Terrestre	Emisión de Hg	Emisión de acroleína	Emisión de Hg	Emisión de Cu

Ecotoxicidad de Agua Dulce	Ni (aleación)	Ni (procesos de infraestructura)	Emisión de Cu	Emisión de Cu
Ecotoxicidad Marina	Ni (aleación)	Ni (procesos de infraestructura)	Emisión de Cu	Emisión de Cu
Transformación de Suelo Natural	Tala de bosque para extracción de minerales	Tala de bosque para vía del tren	Tala de bosque para instalaciones	Tala de bosque para carretera
Agotamiento del Agua	Agua para generación eléctrica	Agua para generación eléctrica	Agua para generación eléctrica	Agua para generación eléctrica
Agotamiento de los Minerales	Mn (aleación)	Fe (procesos de infraestructura)	Fe (procesos de infraestructura)	Fe (procesos de infraestructura)
Agotamiento de los Combustibles Fósiles	C (aleación)	Uso de combustible	Uso de bunker	Uso de combustible

Cuadro 4-3. Resumen de los resultados de la EICV de todas las etapas evaluadas en el ACV de la Varilla de Acero #3 para Construcción

Categoría de impacto	Unidad de referencia	Producción del lingote	Transporte del lingote	Producción de varilla	Transporte de varilla	Total
Cambio Climático	kg CO ₂ eq	1,78E+03	26,6	272	13,3	2,09E+03
Disminución de la Capa de Ozono	kg CFC-11 eq	1,07E-04	8,62E-07	2,3E-06	2,48E-06	1,13E-04
Acidificación Terrestre	kg SO ₂ eq	7,92	0,457	62,2	7,06E-02	7,06E+01
Eutrofización de Agua Dulce	kg P eq	1,58	9,56E-04	2,35E-02	1,07E-03	1,61E+00
Toxicidad Humana	kg 1,4-DB eq	2,64E+03	2,34	69,2	5,57	2,72E+03
Formación de Oxidantes Fotoquímicos	kg NMVOC eq	7,72	0,505	21,7	0,106	3,00E+01
Formación de Material Particulado	kg PM10 eq	7,39	0,174	14,4	3,89E-02	2,20E+01
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DB eq	0,3	6,63E-04	1,73E-02	9,86E-03	3,28E-01
Ecotoxicidad de Agua Dulce	kg 1,4-DB eq	82,9	3,39E-02	1,23	9,99E-02	8,43E+01
Ecotoxicidad Marina	kg 1,4-DB eq	80	3,85E-02	1,38	0,155	8,16E+01
Transformación de Suelo Natural	m ²	0,233	1,95E-03	1,56E-02	5,25E-03	2,56E-01
Agotamiento del Agua	m ³	44,8	2,89E-02	2,3	4,37E-02	4,72E+01
Agotamiento de los Minerales	kg Fe eq	2,66E+03	0,622	1,26	0,464	2,66E+03
Agotamiento de los Combustibles Fósiles	kg oil eq	424	7,66	12	4,84	4,49E+02

Según los cuadros 4-2 y 4-3, en la etapa de producción del lingote de acero, los efectos sobre el medio ambiente están directamente relacionados a las emisiones atmosféricas producto de la transformación de las materias primas vírgenes en acero y al uso de diversas sustancias de aleación para darle características específicas.

En las etapas relacionadas al transporte, tanto del lingote como de la varilla, los efectos más influyentes son los vinculados a las emisiones producidas por la combustión de los hidrocarburos y los procesos de infraestructura, en especial para la locomotora (construcción y mantenimiento del tren, y construcción de las vías).

Finalmente, en la etapa de producción de la varilla, la mayor contribución proviene del uso de bunker para el calentamiento del horno galopante y sus respectivas emisiones a la atmósfera.

Visto desde una perspectiva general, la extracción y procesamiento de los minerales (carbón, piedra caliza, mineral de hierro y elementos para aleación) implican una invasión en el suelo natural, se consume gran cantidad de energía y agua, y se generan residuos sólidos, líquidos y gaseosos. Estos últimos pueden ser GEI, sustancias halogenadas, metales pesados y partículas de distinto tamaño.

Las emisiones gaseosas también proceden de la quema de combustibles fósiles para el transporte (buque, tren y camiones) y para generar calor en el horno durante la producción de la varilla. Dichas sustancias estando en su fase gaseosa tienen potencial para disminuir la capa de ozono y contribuir al efecto invernadero, produciendo a largo plazo cambio climático. Además pueden caer a la superficie terrestre por deposición atmosférica, al adherirse a otras partículas y ganar peso, o por arrastre de la neblina o la lluvia. Si llegan al suelo (dependiendo de las sustancias) tienen potencial de provocar eutrofización de agua dulce, acidificación y ecotoxicidad terrestre, ecotoxicidad en cuerpos de agua dulce, en el mar y en los seres humanos.

Por otra parte, la transformación de suelo natural es producida en la construcción de centrales eléctricas, la construcción de carreteras y vías del tren, puesto que se debe invadir la naturaleza con materiales y maquinaria.

4.7 FORMULACIÓN DE LA ESTRATEGIA PARA LA OBTENCIÓN DE LA DECLARATORIA AMBIENTAL DEL LA VARILLA DE ACERO PARA CONSTRUCCIÓN #3

Latinoamérica posee el Programa EPD Latin America que es la sede regional del Programa International EPD System. Una de sus miembros fue consultada sobre el proceso de obtención de una DAP e indicó que se requieren una serie de pasos específicos antes de lograrla. En el caso particular de la Varilla de Acero para Construcción #3 producida en ArcelorMittal Costa Rica, su ACV es la línea base de las DAP en Costa Rica. Parte del proceso para alcanzarla se describe a continuación.

4.7.1 Contactar al Administrador del Programa para DAP

El programa que mejor aplica para la DAP de los productos de acero para construcción en Costa Rica es International EPD® System.

4.7.2 Efectuar un ACV conforme a la RCP vigente

La RCP que aplica para la varilla de acero para construcción estudiada es:

“RCP 2012: 01 Productos de la Construcción y Servicios de la Construcción.”

Basado en dicha RCP, se definen los siguientes términos para el ACV:

a) Información sobre la metodología:

- El enfoque de ACV es **“De la cuna a la puerta.”**
- El alcance de la DAP contempla las etapas A1, A2 y A3 (ver Apéndice 5, Figura A.5), correspondientes a los procesos de fabricación de la materia prima (lingote), transporte de la materia prima hasta la planta de transformación y producción de la varilla de acero, respectivamente. Según la RCP 2012: 01, las etapas de construcción, uso, fin de vida y la recuperación, son opcionales para el tipo de enfoque escogido. Sin embargo,

la etapa de transporte del producto terminado (A4) fue calculada, con una distancia de 75,65 km.

- La Clasificación Central de Productos de las Naciones Unidas (UN CPC, por sus siglas en inglés) corresponde al Código de Grupo “CPC 412” para productos de hierro y acero. Más específicamente se puede considerar la CPC con Clase “CPC 4124” para barras y varillas laminadas en caliente de hierro y acero.

Nota: Según las Instrucciones Generales del Programa, la DAP puede aplicar para un grupo de productos similares, siempre y cuando la diferencia entre los indicadores de impacto sean inferiores al $\pm 10\%$. Para ese caso, se pueden presentar los impactos de un producto representativo. Si la diferencia entre los indicadores excede al $\pm 10\%$, se pueden incluir todos los productos similares dentro de la misma DAP pero usando columnas o tablas separadas para cada producto. Otra opción es la DAP de Sector, en la que se promedian los resultados para un sector de productos.

- El Análisis de Ciclo de Vida se realizó con el Software SimaPro 8.2.3. Usando principalmente las bases de datos de Ecoinvent Versión 3. Y se consideraron todos los procesos de infraestructura y emisiones a largo plazo.
- Se define como unidad funcional “**Producir una tonelada de varilla de acero #3 para construcción en ArcelorMittal Costa Rica**”

b) La información relacionada al producto:

- La función del producto es ser empleado en:
 - Refuerzo en estructuras de concreto
 - Anclajes soldados para estructuras mixtas (acero-concreto)
 - Armaduras para concreto presoldadas

- La composición química del producto se presenta en el Cuadro 4-4:

Cuadro 4-4. Composición química de la varilla de acero #3

Elemento	Composición "X" (%)
Hierro	$X > 97,36$
Manganeso	$1,15 < X < 1,25$
Carbono	$0,26 < X < 0,3$
Silicio	$0,15 < X < 0,25$
Otros	$0,77 < X < 0,84$

Nota: Según la RCP 2012:01 se debe incluir una declaración de contenido de sustancias químicas incluyendo la información sobre sus propiedades peligrosas, según se especifica en las Instrucciones Generales del Programa.

- El producto cumple con las normas:
 - ASTM A-615 y ASTM A-706
 - INTE 06-09-01 e INTE 06-09-02
 - Código Sísmico de Costa Rica.
- Características técnicas del producto.

Cuadro 4-5. Características técnicas de la varilla de acero #3

Número Designación	Diámetro Nominal	Diámetro	Perímetro	Peso Nominal	Área	Altura Mínima Corrugación	Ancho Máximo Cordón	Paso Máximo Corrugación	Unidades Por Paquete
Varilla	mm	pulgadas	mm	kg/m	cm ²	mm	mm	mm	(6-9-12)m
3	9,520	3/8	29,9	0,560	0,71	0,38	3,6	6,7	420

Fuente: Sitio Web de ArcelorMittal Costa Rica (2016)

c) Información relacionada a la planta:

- Producción Anual de Varilla #3: 33674 toneladas para el año 2015.
- Tratamiento de gases en chimenea: No se cuenta con uno. La normativa nacional regula solamente los hornos tipo indirectos y el de la planta es directo. No obstante, por responsabilidad ambiental la empresa usa como base el reglamento vigente para hornos indirectos.
- Tratamiento de aguas: Las aguas del proceso son tratadas con floculantes y sistemas de filtros, luego es enfriada y enviada nuevamente al proceso. El origen del agua es 98% de lluvia y 2% de pozo.
- Tratamiento de residuos del proceso: Existen tres protocolos. Los recortes de varilla son acopiados como chatarra y se venden a un intermediario que luego los revende en el mercado internacional. La cascarilla es acumulada durante 6 meses en un patio para este fin y se vende a un intermediario que lo revende a una cementera nacional. Si algún cliente desea devolver material sobrante, la empresa lo recibe y lo pasa a chatarras, pues la empresa cumple ante el Ministerio de Salud como Unidad de Cumplimiento.

d) Información sobre el proceso:

- La información recolectada del proceso corresponde a la del año 2015.
- La producción de la materia prima (lingote) se situó en Trinidad y Tobago, específicamente en la planta de ArcelorMittal en Point Lisas (actualmente cerrada).
- El transporte de la materia prima se realizó en barco desde Point Lisas, Trinidad y Tobago, hasta puerto Moín, Costa Rica. Luego fue transportada en una locomotora modelo GE U11B desde puerto Moín hasta la planta de ArcelorMittal en Guápiles.
- La producción de la varilla se realizó en la planta de acero de ArcelorMittal en Guápiles del cantón de Pococí, Limón.
- El transporte del producto terminado se efectuó en múltiples rutas nacionales. No obstante se usó como base aquella distancia con mayor representatividad (promedio de las rutas menores a 100 km).

e) Categorías de impacto ambiental seleccionadas y resultados del ACV.

Las categorías de impacto que aplican para la DAP de la varilla de acero según la Norma ISO 14025 y el Programa, se presentan en el Cuadro 4-6 con sus respectivos indicadores de impacto. Además, se agregan los resultados del ACV.

Cuadro 4-6. Impactos Ambientales de 1 tonelada de varilla de acero para construcción #3

Impactos Ambientales					
Parámetro	Unidad	A1	A2	A3	A4 ⁽¹⁾
PCC	kg CO ₂ eq	1,78E+3	26,6	272	13,3
PCO	kg CFC-11 eq	1,07E-4	8,62E-7	2,30E-06	2,48E-6
PA	kg SO ₂ eq	7,92	0,457	62,2	7,06E-2
PE	kg PO ₄ ³⁻ eq	1,58	9,56E-4	2,35E-02	1,07E-3
POF ⁽²⁾	kg NMVOC eq	7,72	0,505	21,7	0,106
PAM ⁽³⁾	kg Fe eq	2,66E+3	0,622	1,26	0,464
PAF ⁽⁴⁾	kg oil eq	424	7,66	12	4,84
PCC = Potencial de calentamiento global		POF = Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos			
PCO = Potencial de disminución de la capa de ozono		PAM = Potencial de agotamiento de recursos abióticos (minerales)			
PA = Potencial de acidificación		PAF = Potencial de agotamiento de recursos abióticos (fósiles)			
PE = Potencial de eutrofización					

⁽¹⁾ Esta etapa es opcional

⁽²⁾ Según el Programa se debería medir en kg C₂H₄ eq

⁽³⁾ Según el Programa se debería medir en kg Sb eq

⁽⁴⁾ Según el Programa se debería medir en MJ

Nota: Las categorías de potencial de formación de oxidantes fotoquímicos y agotamiento de los recursos abióticos, deben ser sometidas a una evaluación más detallada según los criterios del verificador (se detalla más adelante), debido a que las unidades de los indicadores de impacto no coinciden con las propuestas por el Programa.

f) Reglas de calidad de datos

Se especifican los datos de obtención de la energía:

- La energía eléctrica para la etapa A3 se obtuvo de un proveedor nacional, Instituto Costarricense de Electricidad. Cuya matriz energética para el año 2015 era mixta y casi 100% de fuentes renovables.

Nota: Si la energía empleada en la etapa A3 representa más del 30% de la energía total entre las etapas A1-A3, se debe presentar la información del impacto generado por la energía eléctrica en la DAP, en términos de **g CO₂ eq / kWh**.

Existe más información y especificaciones que se deben recabar para completar lo que solicita el programa de la DAP, según los documentos de RCP 2012:01, las Instrucciones Generales del Programa y la ISO 14025. Sin embargo, en esta sección se presentó solamente la información disponible para este estudio conforme a lo que establecen dichos documentos.

4.7.3 Redactar el borrador de la DAP según el formato establecido por el Programa

El documento borrador compila toda la información solicitada por el programa. Es necesario que una vez que la empresa decida iniciar el proceso de la DAP, solicite al administrador del programa el formato de redacción o lo descargue desde el sitio web del programa.

De acuerdo a la Norma ISO 14025, la DAP estará compuesta de manera general por las siguientes secciones y tendrá que contener la siguiente información:

- Información de la empresa: identificación y descripción.
- Información del producto: identificación, descripción y caracterización.
- Información del programa: nombre y dirección del administrador, logotipo y sitio web.

- Información de la metodología: RCP, CPC, enfoque, fases y etapas, software para ACV, base de datos utilizada y la unidad declarada.
- Información de la validez de la DAP: fecha de publicación y período de validez.
- Información del ACV: datos del ACV, ICV, módulos de información y resultados de las categorías de impacto solicitadas por la norma.
- Información ambiental adicional: resultados de impactos ambientales potenciales sobre otras categorías que especifica la norma, desempeño ambiental del producto, otras actividades ambientales de la empresa, manejo de residuos sólidos, líquidos y gaseosos, entre otros.
- Información de referencia: lugar o sitio donde se puede obtener más información y material explicativo de lo descrito anteriormente.

4.7.4 Contratar la verificación por parte de un verificador acreditado por el Programa International EPD System

El verificador del programa debe estar con su licencia de verificador activa para procesos de DAP. Se contactó directamente a la Sra. Claudia Peña, quien es Co-Directora del Programa Hub EPD Latin America y ofreció sus servicios profesionales para el proceso de la DAP de la varilla de acero. No obstante, existe otro verificador de Argentina, el Dr. Pablo Arena, recomendado por la Sra. Claudia Peña.

4.7.5 Contestar las preguntas del verificador y modificar lo necesario según las recomendaciones del verificador

Según el criterio del verificador, éste podrá realizar las preguntas que considere necesarias para corroborar la información y proponer las modificaciones (si es que llegaran a haber). Si durante el proceso la información que está en proceso de evaluación cambia, por ejemplo los datos de alguna etapa del ciclo de vida, debe reportarse al verificador para que se pueda recomendar los ajustes pertinentes.

4.7.6 Enviar el Documento de la DAP al administrador del Programa junto al informe del verificador

Se contacta nuevamente al administrador del programa y se le hace llegar el Documento Final de la DAP con las actualizaciones y correcciones realizadas según haya recomendado el verificador. Aunado a este documento se envía el informe del verificador.

4.7.7 Inscripción oficial de la DAP

- Registrar y publicar la DAP en el registro oficial del Programa. Una DAP tiene una validez de tres o cinco años, después de ese período la declaración debe ser necesariamente revisada y reeditada.
- Pagar la cuota de inscripción y la cuota anual.

5 CONCLUSIONES

El desempeño ambiental de la varilla de acero para construcción #3 muestra resultados semejantes a los reportados en las DAP del Programa International EPD System en Europa para productos similares. En el caso evaluado, la etapa de producción de la materia prima es la responsable del 85% del impacto en la mayoría de las categorías evaluadas.

En la etapa de producción del lingote de acero, el uso de materias primas vírgenes genera más del 85% del impacto ambiental potencial. Éste se podría haber reducido utilizando mayor cantidad de material reciclado en el horno de arco eléctrico, pero afectaría las propiedades mecánicas del material.

En la etapa de transporte del lingote de acero, no se puede señalar a uno de los dos medios de transporte, buque o tren, como el más influyente sobre los impactos ambientales potenciales producidos, puesto que cada uno influye de manera distinta sobre las categorías analizadas. No obstante, considerando que las distancias recorridas en buque y en tren son distintas, al comparar ambos durante el transporte de una tonelada de acero en un sólo kilómetro recorrido, se determinó que el transporte en tren tiene mayor influencia que el transporte en buque, ya que el primero produce más del 73% del impacto ambiental potencial asociado a esta categoría en dichas condiciones.

En la etapa de producción de la varilla de acero, el 43% de los impactos ambientales potenciales son generados por la emisión de gases a la atmósfera desde la chimenea, vinculado al hecho de que ésta no cuenta con un sistema de tratamiento de emisión de gases. Otro 43% procede del uso de bunker como combustible para el horno galopante; mientras que el restante 14% se asocia al uso de energía eléctrica. Sin embargo, al haber obtenido la energía para esta etapa desde una matriz casi 100% renovable, se concluye que este porcentaje de impacto no es realmente significativo.

La etapa de transporte de la varilla de acero, genera un impacto ambiental potencial menor al 3% en todo el sistema evaluado. Éste se atribuye a las emisiones producidas por los vehículos de carga (única entrada evaluada) durante la combustión del diésel. Además, se comprobó que existe una proporcionalidad entre el consumo de combustible y las toneladas de varilla transportadas, de modo que a mayor peso transportado se consume más combustible.

La estrategia para la DAP de la varilla de acero para construcción #3 involucra una serie de pasos, para la cual los resultados mostraron que existe una brecha de información relacionada con el paso dos (ACV), que también es considerado como el punto crítico de este estudio. Dicha brecha de información se debe principalmente a dos razones: la primera está vinculada al ICV, ya que requiere datos actualizados y vigentes respecto a la producción del lingote de acero (recursos consumidos y residuos producidos), mejores especificaciones técnicas del buque para el transporte marítimo del lingote, así como análisis más recientes de emisiones de gases en chimenea y de los residuos sólidos generados durante la producción de la varilla. La segunda razón está relacionada con la EICV, ya que los resultados dependen en gran medida de la asignación de las variables evaluadas a elementos de las bases de datos, y en éstas últimas no se encontraron subprocesos como el tratamiento de aguas y los residuos sólidos y consecuentemente dichos impactos no pudieron contabilizarse.

Los resultados generados en la EICV del presente estudio pueden ser empleados como línea base para comparar futuros ACV de productos de acero para Costa Rica. No obstante, debido a las limitaciones encontradas durante la evaluación y sus consecuentes incertidumbres, se concluye que dichos valores no concuerdan con la realidad costarricense.

La trazabilidad de la varilla de acero para construcción #3 sólo pudo ser determinada parcialmente en las áreas donde existe información disponible en el país: producción y transporte del lingote de acero y producción y transporte de la varilla de acero. Con dicha información se puede obtener una DAP con un enfoque de la cuna a la puerta. Ésta permitiría comparar la calidad ambiental de productos de acero dentro de la misma RCP.

Este estudio muestra que el ACV realizado a la varilla de acero para construcción #3 producida en ArcelorMittal Costa Rica, es el primero en su tipo en el país y representa la línea base para próximas investigaciones. Asimismo, es un paso importante hacia la creación de bases de datos y Reglas de Categoría de Productos propias para Costa Rica y útiles para Latinoamérica.

6 RECOMENDACIONES

Se recomienda a las empresas que trabajan con acero permitir una mayor apertura a la investigación del ACV de sus productos. Así se pueden desarrollar de manera conjunta las bases de datos y RCP nacionales para obtener ACV más precisos y a su vez sean útiles a nivel latinoamericano.

Para generar ICV más veraces, es necesario que las empresas mantengan actualizados los análisis de emisiones de gases, aguas residuales y de residuos sólidos. Además crear puentes de comunicación asertiva entre los actores de todas las etapas del ciclo de vida del producto dentro del enfoque determinado para la DAP.

Realizar nuevamente el ACV de la varilla de acero con el software SimaPro 8.2.3 pero utilizando una licencia profesional, para superar las limitaciones encontradas por el uso de la licencia académica. Algunas de ellas son: la manipulación de las gráficas, análisis de ponderación, análisis Montecarlo, entre otros.

Se recomienda a ArcelorMittal Costa Rica realizar un ACV de sus productos usando datos vigentes en todas las etapas del ciclo de vida correspondientes, si desean optar por una DAP.

El país debe invertir más en investigación y capacitación de profesionales en ACV y DAP, especialmente desde las universidades públicas en las que se imparten carreras de índole ambiental, para competir por la vanguardia en estos temas a nivel latinoamericano.

7 REFERENCIAS

- Abid, A., Sarvejeet, G. (2013). *Eutrophication: causes, consequences and control* (Vol, 2). New York: Springer
- AHMSA. (2013). *Manual de Diseño para Construcción con Acero*. Recuperado el 12 Mayo de 2015, de http://www.ahmsa.com/Acero/Complem/Manual_Construccion_2013/MANUAL_AHMSA_2013.pdf
- Alacero. (2015). *América Latina en Cifras 2015*. Recuperado el 15 Mayo de 2016, de http://www.alacero.org/sites/default/files/publicacion/america_latina_en_cifras_2015.pdf
- Alacero. (2016). *Importaciones desde China*. Recuperado el 15 Mayo de 2016, de <http://www.alacero.org/es/page/en-cifras/importaciones-desde-china>
- ALCALA. (2013). *ALCALA*. Recuperado el 19 de Agosto de 2016, de <http://www.alcalacr.org/alianzas.html>
- Amestoy, J. (2010). *El planeta Tierra en peligro: calentamiento global, cambio climático, soluciones*. Alicante: Editorial Club Universitario.
- Aranda, A., & Zabalza, I. (2010). *Eficiencia Energética: Ecodiseño Y Análisis de Ciclo de Vida*. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza.
- Araujo, D., Coto, C., Guzmán, D., & Herrera, M. (2016). *Metodología e instrumentos para la medición de huella de carbono*. Recuperado el 20 de Abril de 2016, de <http://www.bienalcostarica.com/e-0201.html>
- ArcelorMittal. (2016). *Planta y Procesos*. Recuperado el 4 de Setiembre de 2016, de http://www.arcelormittalca.com/plantas_y_procesos.htm
- ARESEP. (2015). *Boletín Informativo: Mercado Eléctrico Regional y Sistema Eléctrico Nacional*. San José, Costa Rica.
- Arias, J. (2015). *Costa Rica cierra 2015 con 99% de energía renovable*. Recuperado el 2 de setiembre de 2016, de <http://www.crhoy.com/costa-rica-cierra-2015-con-99-de-energia-renovable/>
- Azevedo, L., Roy, P., Verones, F., Van Zelm, R., Huijbregts, M., Chaudhary, A., Cosme, N., Fantke, P., *et al.* (2015). *LC-Impact: Terrestrial Acidification*. Recuperado el 6 de Octubre de 2016, de http://www.lc-impact.eu/downloads/documents/Overall_report_Batch_1_FINAL.pdf

- Cadavid, M. (2014). *Análisis de ciclo de vida (ACV) del proceso siderúrgico*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Manizales.
- Capó, M. (2007). *Principios de ecotoxicología: Diagnóstico, tratamiento y gestión del medio ambiente*. Madrid: Tébar.
- Chakrabarti, A. (2006). *Steel making*. New Delhi: Meenakshi Art Printers.
- Chamarravi, O., & Saavedra, G. (2013). *Evaluación del impacto ambiental generado por la emisión de gases en motores que utilizan complementos lubricantes, en la ciudad de Bogotá D.C* (Tesis de Maestría). Universidad de Manizales, Bogotá.
- Cházaro, C., & Alvarez, O. (s.f). *Elección del tipo de acero para estructuras*. Recuperado el 14 de Marzo de 2015, de http://www.gerdaucorsa.com.mx/articulos/Eleccion_del_Tipo_de_Acero_para_Estructuras.pdf
- Cheremisinoff, N., Rosenfeld, P., & Davletshin, A. (2008). *Responsible Care: A New Strategy for Pollution Prevention and Waste Reduction through Environmental Management*. Houston: Gulf Publishing Company.
- Concha, A. (2010). *Historia del acero*. Recuperado el 10 de Marzo de 2016, de <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-44191/historia-del-acero>
- Corte, J. (1987). *Producción Siderúrgica*. México: LIMUSA S.A.
- CRNCOP. (s.f). *Plantas de Sinterización en la Industria de Hierro y Acero*. Recuperado el 15 Marzo de 2016, de <http://www.cnrkop.es/gc/iniciativas-no-gubernamentales/mejores-tecnicas-disponibles-mtd-y-mejores-practicas-ambientales-mpa/mejores-tecnicas-disponibles-mtd-y-mejores-practicas-ambientales-mpa/procesos-termicos-de-la-industria-metalurgica/plantas-de-sinterizacion-en-la-industria-del-hierro-y-el-acero/>
- De Garmo, E., Black, J., & Kohser, R. (2002). *Materiales y Procesos de Fabricación*. Barcelona: Reverté.
- Díaz, M. (2016). *Evaluación del desempeño ambiental del edificio de residencias estudiantiles del Instituto Tecnológico de Costa Rica en las etapas de producción de materias primas, construcción y ocupación* (Tesis de Licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago.
- Díaz, M. (s.f). *El sector de la construcción frente al cambio climático*. Recuperado el 15 de Marzo de 2016, de http://www.sustainlabour.org/IMG/pdf/m.diaz_uocra_articulo.pdf

- Ecoraae. (2013). *Ecoraae: Informe de resultados del ACV del proceso*. Recuperado el 18 de Agosto de 2016, de <http://www.life-ecoraae.eu/es/files/B1InformeResultadosACVProcesoCompleto.pdf>
- El Hagggar, S. (2007). *Sustainable Industrial Design and Waste Management: Cradle-to-Cradle for Sustainable Development*. California: Elsevier Academic.
- EPA. (2016). *Información básica sobre el mercurio*. Recuperado el 4 de Octubre de 2016, de <https://espanol.epa.gov/espanol/informacion-basica-sobre-el-mercurio>
- Flores, H., & López, A. (2011). *Acero*. Recuperado el 12 Febrero de 2016, de <https://es.scribd.com/doc/97232151/16/PROPIEDADES-FISICAS-DEL-ACERO>
- FLOREX. (2013). *Eco-Producto: Diseño Sostenible*. Recuperado el 12 de Agosto de 2016, de <http://www.florexcr.com/ecoamigable.html>
- Gallego, A. (2008). *Diferenciación espacial en la metodología de Análisis del Ciclo de Vida: Desarrollo de factores regionales para eutrofización acuática y terrestre* (Tesis de Doctorado). Universidad de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela.
- García. A., Alonso. J., & Mossi. R. (noviembre, 2014). *Ecodiseño en la gestión del ciclo de vida de los productos*. Trabajo presentado en el Congreso Nacional del Medio Ambiente, Madrid. Recuperado el 12 de Abril 2016, de http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2014/GTs%202014/15_final.pdf
- Gazulla, C. (2013). *Introducción al Análisis de Ciclo de Vida*. Recuperado el 20 Agosto de 2016, de <http://www.construction21.org/espana/community/pg/pages/view/549/>
- Glick, S. (2007). *Life-cycle Assessment and Life-cycle Costs: A Framework with Case Study Implementation Focusing on Residential Heating Systems* (Tesis de Doctorado). Colorado State University, Colorado.
- Gómez, D., & Gómez, M. (2013). *Evaluación de impacto ambiental* (3ª Ed). España: Mundi-Prensa.
- Gómez, M. (2014). Declaración Ambiental de Producto (DAP): herramienta para la comunicación y mejora del desempeño ambiental de productos y empresas. En M. Gómez, C. Rúa, M. Macías, N. Bermejo, P. García, S. Bailo..., A. Gil (Eds.), *Guía sobre declaración ambiental de producto y cálculo de huella de carbono* (cap. 4, pp. 63-85). Madrid: Gráficas Arias Montano.

- Green Building Council Costa Rica. (2015). Recuperado el 15 de Mayo de 2016, de <http://gbccr.org/#fines>
- Guerra, L. (2013). *Metodología para el análisis de la huella de carbono a través del análisis de ciclo de vida: Sistemas lecheros, Costa Rica*. Recuperado el 20 Agosto de 2016, de <http://gamma.catie.ac.cr/ecleds/wp-content/uploads/2013/04/Metodologia-de-HC-LCA140420131.pdf>
- Hernández, L. (2015). *Los impactos ambientales del ferrocarril*. Recuperado el 7 de Octubre de 2016, de <https://www.trenvista.net/descubre/el-tren-verde/los-impactos-ambientales-del-ferrocarril/>
- Hub Latin America International EPD® System. (2015). *EPD Latin America*. Recuperado el 20 de Agosto de 2016, de <http://www.epd-americalatina.com/>
- Ihobe. (2009). *Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y de la Huella de Carbono: Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto*. Recuperado el 15 de Febrero de 2016, de <http://www.euresp-plus.net/sites/default/files/resource/An%C3%A1lisis%20de%20Ciclo%20de%20Vida%20y%20Huella%20de%20Carbono.pdf>
- Institution of Civil Engineers. (2009). *ICE Manual of Construction Materials* (vol. 2, pp 546-548). London: Thomas Telford Liited.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. (4ª Ed). México: Pearson Educación de México.
- Kopffler, W. (2014). Introducing Life Cycle Assessment and its Presentation in LCA Compendium. En W. Kopffler, *Background and Future Prospects in Life Cycle Assessment* (pps 1-37). Alemania.
- INTE/ISO 14040: 2007, “Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Principios y marco de referencia”.
- INTE/ISO 14044: 2007, “Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Requisitos y directrices”.
- Leandro, A.G. (2015). Comunicación personal.
- Marín, C. (2014). *Análisis del Mercado del Hierro y Acero*. Recuperado el 15 de Octubre de 2016, de http://www.metalactual.com/revista/35/actualidad_analisis.pdf

- Ministerio del Medio Ambiente. (2011). *Informe del Estado del Medio Ambiente 2011*. Recuperado el 7 Octubre de 2016, de <http://www.mma.gob.cl/1304/w3-article-52016.html>
- Miola, A., Ciuffo, B., Giovine, E., & Marra, M. (2010). *Regulating Air Emissions from Ships: The State of the Art on Methodologies, Technologies and Policy Options*. Recuperado el 6 de Octubre de 2016, de https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/jrc_reference_report_2010_11_ships_emissions.pdf
- Moffit, A. (2001). *Hierro y acero*. En *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo*. (Vol. 3, pp. 14-17). Madrid: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales Subdirección General de Publicaciones.
- Muñoz, C., Zaror, C., Saelzer, G., & Cuchí, A. (Dic, 2012). Estudio del flujo energético en el ciclo de vida de una vivienda y su implicancia en las emisiones de gases de efecto invernadero, durante la fase de construcción Caso Estudio: Vivienda Tipología Social. Región del Biobío, Chile [versión electrónica]. *Revista de la Construcción*. 11(3), 125-145.
- OMS. (2016). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Suiza.
- ONU. (2009). *El transporte marítimo y el reto del cambio climático*. Recuperado el 6 de Octubre de 2016, de http://unctad.org/es/Docs/cimem1d2_sp.pdf
- Pacheco, F., Cabeza, L., Labrincha, J., & Magalhães, A. (2014). *Eco-Efficient Construction and Building Materials: Life Cycle Assessment (LCA), Eco- Labelling and Case Studies*. Cambridge: Head Publishing Limited.
- Parker, A. (2001). *Contaminación del aire por la industria*. Barcelona: Reverté.
- PNUMA. (2004). *¿Por qué adoptar un enfoque de ciclo de vida?* Recuperado el 20 de Agosto de 2016, de https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/1731Why_take_a_life_cycle_approach_ES.pdf
- Pontificia Universidad Católica del Perú. (2010). *Ciclo de Vida Ambiental*. Recuperado el 16 de Marzo de 2016, de <http://red.pucp.edu.pe/ciclodevida/index.php/es/pensamiento-ciclo-vida/analisis-de-ciclo-de-vida-ambiental.html>
- RECOPE. (2015). *Manual de Productos: Bunker C*. Recuperado el 2 de Diciembre de 2016, de <https://www.recope.go.cr/manual-de-productos/>

- Rheinzink. (2009). *Declaraciones de producto*. Recuperado el 13 de Mayo de 2016, de [xhttps://www.rheinzink.es/ecologia/declaraciones-de-producto/](https://www.rheinzink.es/ecologia/declaraciones-de-producto/)
- SETAC. (2012). 6th SETAC World Congress/SETAC Europe 22nd Annual Meeting: Abstract Book. Brussels.
- Starke, L. (2007). *La situación del mundo, 2007*. Barcelona: Icaria Editorial.
- Subramanian, N. (2010). *Steel Structures Design and Practice*. India: Oxford University Press.
- The Centre for Marine and Petroleum Technology. (1996). *Floating Structures: a guide for design and analysis* (vols. 1-2). Houston: N.D.P. Barltrop.
- UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. (2014). *Life Cycle Thinking in Latin America*. Recuperado el 19 de Agosto de 2016, de <http://www.lifecycleinitiative.org/wp-content/uploads/2015/01/LCA-LCM-company-case-studies-in-Latin-America.pdf>
- World Steel Association (2014). *Raw Materials*. Recuperado el 3 de Octubre de 2016, de <http://www.worldsteel.org/steel-by-topic/raw-materials.html>
- World Steel Association (2014). *Sustainability*. Recuperado el 7 de Octubre de 2016, de <http://www.worldsteel.org/steel-by-topic/sustainable-steel.html>
- Zbicinski, I., Stavenuiter, J., Kozłowska, B., & Coevering, H. (2006). *Product Design and Life Cycle Assessment*. Uppsala: Nina Tryckeri.
- Zhang, H. (2011). *Building Materials in Civil Engineering*. Beijing: Science Press.
- Zubiaga, R., Pradera, B., Sánchez, J., & Bonilla, A. (2002). *La Declaración medioambiental de productos de construcción: Situación actual y perspectivas futuras*. Recuperado el 19 Agosto de 2016, de http://www.cepcos.es/noticia.asp?id_rep=312

8 APÉNDICES

APÉNDICE 1: ICV DE ETAPA DE PRODUCCIÓN DEL LINGOTE DE ACERO

Cuadro A.1 Inventario de ciclo de vida para la etapa de producción del lingote de acero.

Entrada/Salida	Flujo de referencia	Unidad	Modelo utilizado en el software
Acero producido con materia prima virgen	0,1030	ton	Steel, Low-alloyed production, electric {RoW}
Acero producido con material de reciclaje	0,8970	ton	Steel, Low-alloyed, hot rolled, production {RoW}

APÉNDICE 2: ICV DE ETAPA DE TRANSPORTE DEL LINGOTE DE ACERO

Cuadro A.2.1 Inventario de ciclo de vida para la etapa de transporte del lingote de acero.

Entrada/Salida	Flujo de referencia	Unidad	Modelo utilizado en el software
Transporte en buque de carga	2413,156	tkm	Transport, sea ship, 35000 DWT, 80%LF, short
Transporte en tren	95	tkm	Freight train, diesel {US}

Cuadro A.2.2 Comparación de buque y tren durante el transporte de 1 tonelada de lingote de acero.

Categoría de impacto	Unidad de referencia	Valor del impacto total	Impacto parcial ⁽¹⁾				Impacto parcial para 1 ton en 1 km ⁽²⁾				
			Buque (%)	Tren (%)	Buque	Tren	Buque	Tren	Total	Buque (%)	Tren (%)
CC	kg CO ₂ eq	26,6000	80	20	21,2800	5,3200	8,82E-03	0,0560	6,48E-02	13,60	86,40
CO	kg CFC-11 eq	8,62E-07	4	96	3,45E-08	8,28E-07	1,43E-11	8,71E-09	8,73E-09	0,16	99,84
AT	kg SO ₂ eq	0,4570	90	10	0,4113	0,0457	1,70E-04	4,81E-04	6,51E-04	26,16	73,84
EA	kg P eq	9,56E-04	7	93	6,69E-05	8,89E-04	2,77E-08	9,36E-06	9,39E-06	0,30	99,70
TH	kg 1,4-DB eq	2,3400	54	46	1,2636	1,0764	5,24E-04	1,13E-02	1,19E-02	4,42	95,58
FO	kg NMVOC eq	0,5050	86	14	0,4343	0,0707	1,80E-04	7,44E-04	9,24E-04	19,47	80,53
FP	kg PM10 eq	0,1740	88	12	0,1531	0,0209	6,35E-05	2,20E-04	2,83E-04	22,40	77,60
ET	kg 1,4-DB eq	6,63E-04	47	53	0,0003	0,0004	1,29E-07	3,70E-06	3,83E-06	3,37	96,63
ED	kg 1,4-DB eq	3,39E-02	2	98	0,0007	0,0332	2,81E-07	3,50E-04	3,50E-04	0,08	99,92
EM	kg 1,4-DB eq	3,85E-02	15	85	0,0058	0,0327	2,39E-06	3,44E-04	3,47E-04	0,69	99,31
TM	m ²	1,95E-03	0	100	0,0000	0,0020	0,0000	2,05E-05	2,05E-05	0,00	100,00
AA	m ³	2,89E-02	6	94	0,0017	0,0272	7,19E-07	0,0003	0,0003	0,25	99,75
AM	kg Fe eq	0,6220	1	99	0,0062	0,6158	2,58E-06	0,0065	0,0065	0,04	99,96
AF	kg oil eq	7,6600	77	23	5,8982	1,7618	0,0024	0,0185	0,0210	11,64	88,36

CC: Cambio Climático. CO: Disminución de la Capa de Ozono. AT: Acidificación Terrestre. EA: Eutrofización de Agua Dulce. TH: Toxicidad Humana. FO: Formación de Oxidantes Fotoquímicos. FP: Formación de Material Particulado. ET: Ecotoxicidad Terrestre. ED Ecotoxicidad de Agua Dulce. EM: Ecotoxicidad Marina. TN: Transformación de Suelo Natural. AA: Agotamiento del Agua. AM: Agotamiento de los Minerales. AF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles.

¹ Ver Figura 4-4 y Cuadro 4-3

² Distancias para buque y tren: 2413,156 km y 95 km respectivamente

APÉNDICE 3: ICV DE ETAPA DE PRODUCCIÓN DE LA VARILLA DE ACERO

Cuadro A.3.1 Inventario de ciclo de vida para la etapa de producción de la varilla de acero.

Entrada/Salida	Flujo de referencia	Unidad	Modelo utilizado en el software
Consumo de Bunker	31,84	kg	Energy and auxiliary inputs, metal working machine, process heat from heavy fuel oil {RoW}
Consumo de agua	33	m ³	Modelo creado ¹
Consumo de electricidad	112,603	kWh	Modelo creado ¹
Dióxido de carbono	217,4723364	kg	Carbon dioxide
Oxígeno	671,0390791	kg	Oxygen
Dióxido de azufre	52,3102038	kg	Sulfur dioxide
Dióxido de nitrógeno	17,2480253	kg	Nitrogen dioxide
Monóxido de carbono	0,8680625	kg	Carbon monoxide
Plomo	0,0000377	kg	Lead

¹ Ver Cuadro A.3.2

Continuación del Cuadro A.3.1

Entrada/Salida	Flujo de referencia	Unidad	Modelo utilizado en el software
Cromo	0,0728418	kg	Chromium
Cadmio	0,0000566	kg	Cadmium
Arsénico	0,0001887	kg	Arsenic
Mercurio	0,0000755	kg	Mercury
Partículas suspendidas	30,9483168	kg	Suspended solids, unspecified

¹ Ver Cuadro A.3.2

Cuadro A.3.2 Modelos creados para el inventario de ciclo de vida para la etapa de producción de la varilla de acero.

Sub-Proceso	Cantidad	Entrada/Salida	Flujo de referencia	Unidad	Modelo utilizado en el software
Consumo eléctrico	1 kWh	Energía hidroeléctrica tipo embalse	0,4056	kWh	Electricity production, hydro reservoir, tropical region {RoW}
		Energía hidroeléctrica tipo filo de agua	0,3497	kWh	Electricity production, hydro, run of river {RoW}
		Energía térmica con hidrocarburos	0,0105	kWh	Electricity production, oil {RoW}
		Energía geotérmica	0,1288	kWh	Electricity production, deep, geothermal {RoW}
		Energía eólica	0,0981	kWh	Electricity production, wind, <1MW turbine, onshore {RoW}
		Energía biomásica	0,0072	kWh	Electricity production, treatment bagasse, sweet sorghum, in heat and power, co-generation unit {GLO}
		Energía solar	0,0001	kWh	Electricity production, photovoltaic, 570kWp, open ground installation, multi-Si {RoW}

Continuación del Cuadro A.3.2

Sub-Proceso	Cantidad	Entrada/Salida	Flujo de referencia	Unidad	Modelo utilizado en el software
Consumo de agua	1 m ³	Agua de pozo	0,02	m ³	Water, well, in ground {CR}
		Agua de lluvia	0,98	m ³	Water, rain

APÉNDICE 4: ICV DE ETAPA DE TRANSPORTE DE LA VARILLA DE ACERO

Cuadro A.4.1 Inventario de ciclo de vida para la etapa de transporte de la varilla de acero.

Entrada/Salida	Flujo de referencia	Unidad	Modelo utilizado en el software
Camión de transporte	79,65	km	Transport, freight, lorry 16-32 tm, EURO 3 {RoW}

Cuadro A.4.2 Distribución de peso transportado a distintas distancias para la etapa de transporte de la varilla de acero

Distancia (d)	Promedio de distancias	Promedio de peso transportado	Peso acumulado	Porcentaje del peso total
d > 200 km	252,09 km	286 ton	2.861 ton	6,81%
d > 100 km	209,94 km	512 ton	8.701 ton	20,71%
d < 100 km	79,65 km	1.850 ton	33.308 ton	79,29%
d < 50 km	68,64 km	1.362 ton	10.896 ton	25,94%

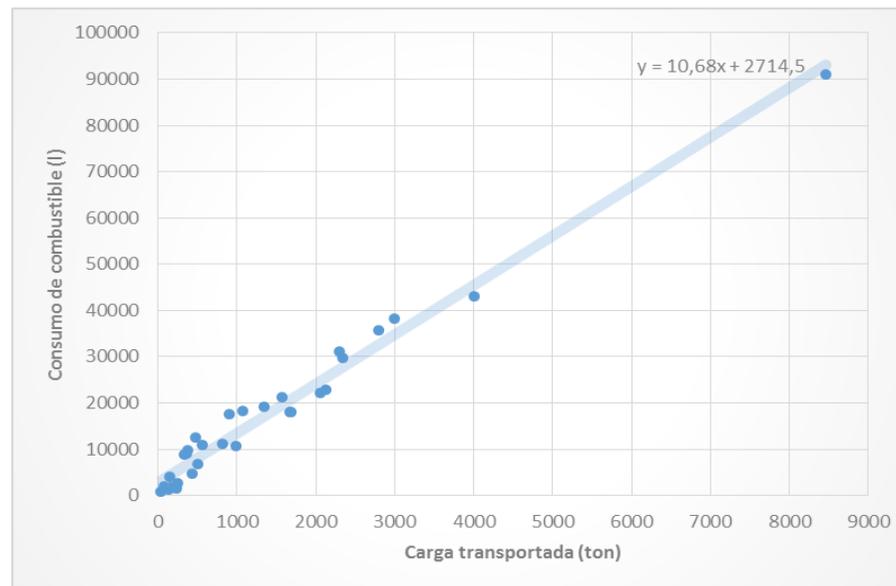


Figura A4 Consumo de combustible por toneladas de varilla transportada

APÉNDICE 5: ENFOQUE DE LA DAP

Cuadro A5 Alcance de la DAP para la varilla de acero.

Fuente: Adaptado de RCP 2012:01

Etapa de Producto			Etapa de Construcción		Etapa de Uso							Etapa de Fin de Vida				Etapa de Recuperación				
Materias Primas	Transporte	Fabricación	Transporte	Construcción de la Estructura	Uso	Mantenimiento	Reparación	Reemplazo	Restauración	Uso de energía	Uso de Agua	De-construcción	Demolición	Transporte	Tratamiento de Residuos	Disposición Final	Reutilización	Recuperación	Potencial de Reciclaje	
A1	A2	A3	A4*	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4		D			
X	X	X	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND	MND			MND

X = Módulo a declarar; MND = Módulo No Declarado.

Para A4, la distancia de transporte es 79,65 km, en transporte de carga de 16-32 tm, bajo normativa EURO 3