



El ambiente  
es de todos

Minambiente

---

# Evaluación nacional sobre la implementación de las mejores técnicas disponibles (MTD) y las mejores prácticas ambientales (MPA) en el proceso de producción de la industria siderúrgica y metalúrgica colombiana

---

2022

# *Evaluación nacional sobre la implementación de las mejores técnicas disponibles (MTD) y las mejores prácticas ambientales (MPA) en el proceso de producción de la industria siderúrgica y metalúrgica colombiana 2022*

---

## **República de Colombia**

Iván Duque Márquez  
PRESIDENTE

Carlos Eduardo Correa Escaf  
MINISTRO DE AMBIENTE Y DESARROLLO  
SOSTENIBLE

Francisco Cruz Prada  
VICEMINISTRO DE POLÍTICAS Y  
NORMALIZACIÓN AMBIENTAL

Andrea Corzo Álvarez  
DIRECTORA DE ASUNTOS AMBIENTALES,  
SECTORIAL Y URBANA

Diego Escobar Martínez Ocampo  
COORDINADOR DEL GRUPO DE SUSTANCIAS  
QUÍMICAS, RESIDUOS PELIGROSOS Y DE LA  
UNIDAD TÉCNICA OZONO (UTO)

## **Coordinador proyectos COP**

José Álvaro Rodríguez Castañeda

## **Equipo técnico**

Jonathan Alexander Romero Coca  
Andrés Felipe Cifuentes  
Brenda Natalia López Niño  
Edwin Camelo Martínez  
Emilio Gil Toro

## **Concepto editorial**

Consuelo Gauta  
GRUPO DE DIVULGACIÓN DE CONOCIMIENTO  
Y CULTURA AMBIENTAL  
MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO  
SOSTENIBLE (MINAMBIENTE)

## **.Punto aparte**

### **Diseño y diagramación**

Julieta Cruz  
Valeria Cobo

### **Corrección de estilo**

Nicole Bedoya

**CATALOGACIÓN EN LA PUBLICACIÓN:** Grupo Divulgación de Conocimiento y Cultura Ambiental. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

*Evaluación nacional sobre la implementación de las mejores técnicas disponibles (MTD) y las Mejores prácticas ambientales (MPA) en el proceso de producción de la industria siderúrgica y metalúrgica colombiana 2022 /* Textos: Romero Coca, Jonathan Alexander, Gil Toro, Emilio; Cifuentes, Andrés. — Bogotá, D.C.: Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022.

108 p. : il.

ISBN: 978-958-5551-87-9

Publicado en: [www.minambiente.gov.co](http://www.minambiente.gov.co)

<https://gestionsustanciasquimicas.co/sitioweb/cop/>

1. sector industrial    2. industria metalúrgica    3. contaminación    4. metales  
5. gestión ambiental    6. gestión integral de residuos    I. Tit.    II. Ministerio de Ambiente y Desarrollo

CDD: 342.02

© Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022

*Todos los derechos reservados. Se autoriza la reproducción y divulgación de material contenido en este documento para fines educativos u otros fines no comerciales sin previa autorización del titular de los derechos de autor, siempre que se cite claramente la fuente. Se prohíbe la reproducción total o parcial de este documento para fines comerciales.*

No comercializable - Distribución gratuita



# Tabla de contenido

## 1 Introducción Pág. 6

## 2 Análisis de la producción nacional Pág. 9

### 2.1 Descripción del proceso de producción

#### 2.1.1 Producción de acero

##### 2.1.1.1 Producción primaria de acero

###### 2.1.1.1.1 Producción de sínter

###### 2.1.1.1.1.1 Mezclado de materiales

###### 2.1.1.1.1.2 Semifundición de sínter

###### 2.1.1.1.1.3 Enfriamiento

###### 2.1.1.1.1.4 Emisión de contaminantes al ambiente en la producción de sínter

###### 2.1.1.1.2 Fundición en alto horno

###### 2.1.1.1.2.1 Preparación de la carga

###### 2.1.1.1.2.2 Carga y transporte de materias primas

###### 2.1.1.1.2.3 Procesamiento de alto horno

###### 2.1.1.1.2.4 Operación de la estufa caliente

###### 2.1.1.1.2.5 Fundición

###### 2.1.1.1.2.6 Enfriamiento y procesamiento de escorias

###### 2.1.1.1.2.7 Emisión de contaminantes al ambiente en la producción de alto horno

#### 2.1.1.2 Producción secundaria de acero

##### 2.1.1.2.1 Fundición en horno de arco eléctrico

###### 2.1.1.2.1.1 Manejo y almacenamiento de materias primas

###### 2.1.1.2.1.2 Precalentamiento de la chatarra

###### 2.1.1.2.1.3 Carga de material al horno

###### 2.1.1.2.1.4 Fundición y refinamiento

###### 2.1.1.2.1.5 Golpes de acero y escoria

###### 2.1.1.2.1.6 Metalurgia secundaria

###### 2.1.1.2.1.7 Manejo y procesamiento de escorias

###### 2.1.1.2.1.8 Emisión de contaminantes al ambiente en la producción de horno de arco eléctrico

#### 2.1.2 Producción de aluminio

##### 2.1.2.1 Producción secundaria de aluminio

###### 2.1.2.1.1 Pretratamiento

###### 2.1.2.1.2 Fundición

###### 2.1.2.1.3 Fundentes

###### 2.1.2.1.4 Afinado y colada

###### 2.1.2.1.5 Emisión de contaminantes en la producción de aluminio secundario

#### 2.1.3 Producción de cobre

##### 2.1.3.1 Producción secundaria de cobre

###### 2.1.3.1.1 Fundición bajo condiciones de reducción

###### 2.1.3.1.2 Procesos de conversión

###### 2.1.3.1.3 Refinación térmica

###### 2.1.3.1.4 Refinación electrolítica

###### 2.1.3.1.5 Fundición

###### 2.1.3.1.6 Colado

###### 2.1.3.1.7 Producción de lingotes de cobre y sus aleaciones

###### 2.1.3.1.8 Aleaciones maestras

###### 2.1.3.1.9 Emisión de contaminantes al ambiente en la producción secundaria de cobre

### 2.2 Aspectos económicos de los metales

#### 2.2.1 Acero

#### 2.2.2 Aluminio

#### 2.2.3 Cobre

### 2.3 Aspectos ambientales en la producción de metales

## 3

Estimación de liberación de contaminantes orgánicos persistentes no intencionales en el sector de producción de metales

Pág. 43

## 4

Evaluación de la aplicación de las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales

Pág. 46

4.1 Descripción de las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales de acuerdo con el Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes

4.1.1 Mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales en la producción del acero

4.1.1.1 Producción primaria

4.1.1.2 Producción secundaria

4.1.2 Mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales en la producción secundaria del aluminio y el cobre

4.2 Nivel de implementación de las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales en el país

4.2.1 Industria del acero

4.2.2 Industria del aluminio

4.2.3 Industria del cobre

## 5

Conclusiones

Pág. 63

## 6

Anexos

Pág. 65

Anexo 1. Identificación y cuantificación de flujos de masa de los metales

## 7

Bibliografía

Pág. 105

## Lista de tablas

## Lista de gráficas

Gráfica 1. Producción mundial de acero	Pág. 28
Gráfica 2. Distribución de la producción mundial de acero	Pág. 28
Gráfica 3. Comportamiento de los precios internacionales de las barras de acero y chatarra	Pág. 29
Gráfica 4. Producción mundial de aluminio	Pág. 30
Gráfica 5. Distribución de la producción mundial de aluminio	Pág. 30
Gráfica 6. Precios internacionales del aluminio	Pág. 31
Gráfica 7. Producción mundial de cobre en mina	Pág. 32
Gráfica 8. Distribución de la producción mundial de cobre en mina	Pág. 32
Gráfica 9. Precios internacionales del cobre	Pág. 33
Gráfica 10. Distribución de la liberación nacional de PCDD y de PCDF en el sector metales, 2018	Pág. 44
Gráfica 11. Destino de la liberación nacional de PCDD y de PCDF en el sector metales	Pág. 45

## Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Diagrama de materiales en la producción de sinter	Pág. 11
Ilustración 2. Diagrama de materiales en la producción de acero primario	Pág. 13
Ilustración 3. Diagrama de materiales en la producción de acero secundario	Pág. 16
Ilustración 4. Flujo de masa según ciclo de vida del acero, 2019	Pág. 17
Ilustración 5. Diagrama de materiales en la producción de aluminio secundario	Pág. 22
Ilustración 6. Flujo de masa según ciclo de vida del aluminio, 2019	Pág. 23
Ilustración 7. Diagrama de materiales en la producción de cobre secundario	Pág. 26
Ilustración 8. Flujo de masa según ciclo de vida del cobre, 2019	Pág. 27

Tabla 1. Evaluación de desempeño según tipo de horno de fundición de aluminio	Pág. 20
Tabla 2. Aspectos regulados en la normatividad colombiana	Pág. 34
Tabla 3. MTD y MPA recomendadas por el Convenio de Estocolmo en la producción de sinter	Pág. 48
Tabla 4. MTD y MPA recomendadas por el Convenio de Estocolmo para la producción secundaria de acero	Pág. 51
Tabla 5. MTD y MPA recomendadas por el Convenio de Estocolmo para la producción secundaria de cobre y aluminio	Pág. 53
Tabla 6. Evaluación de la implementación de las MTD y las MPA en la producción de acero primaria nacional	Pág. 56
Tabla 7. Evaluación de la implementación de las MTD y las MPA en la producción de acero secundario nacional	Pág. 58
Tabla 8. Evaluación de la implementación de las MTD y las MPA en la producción de aluminio secundaria nacional	Pág. 59
Tabla 9. Evaluación de la implementación de las MTD y las MPA en la producción de cobre secundario nacional	Pág. 61

1.

Introducción



Colombia firmó el Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes (COP) en mayo de 2001 y lo ratificó mediante la Ley 1196 de 2008. En julio de 2010, el Plan Nacional de Implementación (PNI) fue aprobado y enviado a la Secretaría del Convenio de Estocolmo. Desde la firma del Convenio, Colombia ha hecho progresos sustanciales para alcanzar los objetivos que este ha previsto, relacionados con la identificación, prevención, reducción y eliminación de los COP y sus residuos.

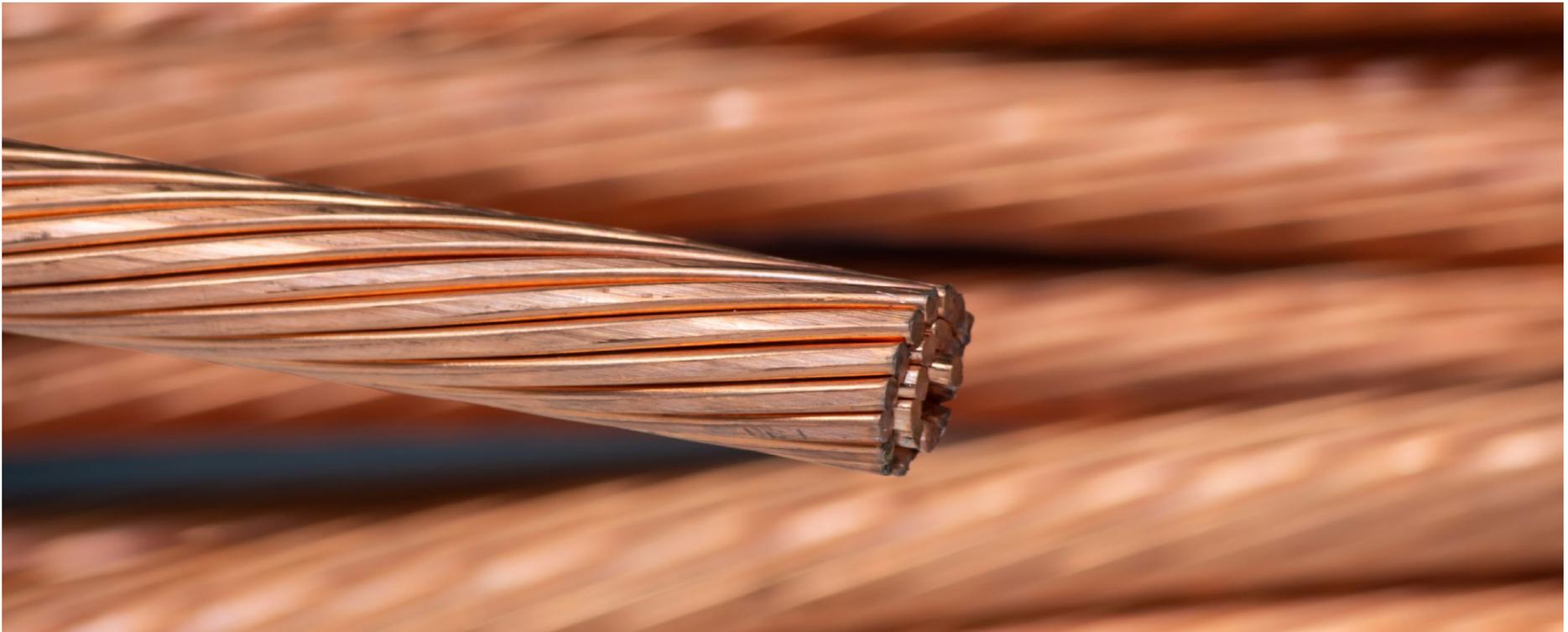
Con el fin de identificar y cuantificar las fuentes que pueden emitir estos contaminantes, el Convenio

desarrolló el kit de herramientas para la identificación de la liberación de dibenzodioxinas policloradas (PCDD) y de dibenzofuranos policlorados (PCDF) y otros COP no intencionales<sup>1</sup>. Basado en esta herramienta, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente) desarrolló el primer inventario de PCDD y de PCDF tomando como base datos de producción del 2002. Este inventario fue recalculado durante el 2015 tomando en cuenta la actualización de los factores de emisión considerados en el kit de herramientas enunciado antes. Durante el 2021 se publicó la actualización del inventario con datos del 2018, año en el que se encontró una emisión de 276 gramos de concentración de equivalentes tóxicos (EQT) al año

en todo el país, la cual ubicó la producción de metales ferrosos y no ferrosos como la tercera fuente de emisión de estas sustancias (Minambiente, 2021).

Los metales son los elementos más abundantes de la corteza terrestre y se caracterizan por ser buenos conductores de electricidad y calor, entre otras propiedades. Debido a sus características, han servido a la humanidad desde sus inicios, en especial para la fabricación de herramientas y estructuras de todo tipo. En la actualidad, la industria mundial requiere de metales para diferentes procesos, como construcción, transporte, producción de insumos, transmisión de energía,

1. Los COP no intencionales, como su nombre lo indica, nunca han sido usados como productos comerciales ni han sido fabricados intencionalmente. Estos contaminantes se producen principalmente en procesos de combustión, a temperaturas entre 200 °C y 900 °C, cuando están presentes sustancias químicas como carbono, oxígeno, hidrógeno y cloro. Estas condiciones se pueden presentar en la producción de acero, aluminio, cobre, entre otros metales.



entre otros. Entre los metales más utilizados sobresalen el acero, el aluminio y el cobre. Estos metales no se encuentran en estado puro en la naturaleza, por lo que se deben realizar procesos térmicos y químicos para refinarlos y aprovechar al máximo sus características.

Estos procesos térmicos y químicos se desarrollan en industrias llamadas siderúrgicas o metalúrgicas, las cuales se diferencian por realizar dos formas de producción: primaria a partir de minerales, por lo general óxidos, y secundaria a partir de chatarra; esta última es más eficiente en términos de energía. Dichos procesos pueden generar impactos al ambiente

dependiendo del nivel tecnológico y las prácticas productivas implementadas, como la liberación de COP no intencionales regulados por el Convenio de Estocolmo; por ejemplo, PCDD y PCDF, entre otros contaminantes. A pesar de que la gran mayoría de industrias utilizan el mismo principio para producir estos metales, existen mejores técnicas disponibles (MTD) y mejores prácticas ambientales (MPA) — identificadas por el Convenio de Estocolmo— que se deben implementar en este tipo de industrias para evitar la liberación de sustancias consideradas como contaminantes. Además, estas medidas están dirigidas a cumplir los estándares de la normativa ambiental y reducir los impactos a la salud y al ambiente.

El objetivo de este documento es presentar un primer acercamiento a las técnicas de producción de metales en el país, a la generación de COP no intencionales en este sector y a un diagnóstico nacional sobre el nivel de implementación de las MTD y las MPA en las empresas que producen acero, aluminio y cobre. El presente documento se basó en la recopilación de información en bases de datos de entidades públicas y privadas, así como en regulación existente, información presente en los expedientes de los permisos de emisión de las autoridades ambientales a nivel nacional e información de las empresas productoras.

# 2.

## Análisis de la producción nacional

---

En este capítulo se presenta una descripción del proceso de producción del acero, aluminio y cobre; una compilación de los requerimientos ambientales para su producción, y un análisis económico del comportamiento del precio de la chatarra de acero, aluminio y cobre.

## 2.1 Descripción del proceso de producción

Estas descripciones fueron recopiladas a partir de los documentos *Best Available Techniques (BAT): Reference Document for Iron and Steel Production 2012* y *Best Available Techniques (BAT): Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries 2017* de la European Commission's science and knowledge service, los cuales se recomienda consultar para ampliar la información y perspectiva sobre las diferentes plantas productoras de estos insumos en el país.

### 2.1.1 PRODUCCIÓN DE ACERO

El acero se forma a partir del hierro con un porcentaje de carbono entre 0,03 % y 1,07 %, componente que mejora la dureza del hierro e incrementa las propiedades de compresibilidad, ductilidad y maleabilidad. Este metal es utilizado principalmente en construcción, industria automotriz, elaboración de objetos de consumo masivo, comunicaciones y producción energética. Existen dos procesos industriales para producir acero: fundición en alto horno a partir de mineral de hierro (producción primaria) y fundición de chatarra mediante el uso de hornos de arco eléctrico (producción secundaria); este último es mucho más eficiente en términos energéticos.

#### 2.1.1.1 PRODUCCIÓN PRIMARIA DE ACERO

El proceso de producción primaria a nivel mundial se desarrolla en plantas denominadas «integradas», ya que realizan los procesos de producción de sinter —mezcla de mineral de hierro, coque y fundente— y de fundición en alto horno en línea.

##### 2.1.1.1.1 PRODUCCIÓN DE SÍNTER

El proceso de sinterización consiste en el calentamiento de mineral de hierro fino con fundentes y finos de coque o carbón para producir una masa semifundida que se solidifica en piezas porosas de sinter con las características de tamaño y fuerza necesarias para servir de alimento de alto horno (PNUMA, 2008). Este proceso se puede subdividir en tres etapas: mezclado de materiales, semifundición y enfriamiento.

##### 2.1.1.1.1.1 Mezclado de materiales

Consiste en mezclar de manera homogénea los materiales que van a pasar a la cadena de sinterizado, entre los cuales se puede tener hierro mineral, hierro reciclado de procesos posteriores, cal, olivino o polvo recolectado de los sistemas de control de emisiones en los procesos de fundición. Entre los combustibles utilizados para el proceso posterior, el más utilizado es el coque. En las plantas donde no se posee este combustible, el uso de antracita ha funcionado como una alternativa económica; no obstante, como consecuencia se ha visto un aumento de emisión de hidrocarburos al aire. Finalmente, la mixtura de minerales y el combustible son mezclados por completo en un tambor de mezcla que es llevado al siguiente proceso.



##### 2.1.1.1.1.2 Semifundición de sinter

El proceso de sinterizado consiste en un largo viaje a través de una banda transportadora resistente al calor. El material se pone encima, alrededor de 30 a 50 mm, del sinter reciclado. Esta capa inferior evita que la mezcla pase a través de las ranuras de la rejilla y protege la rejilla del calor directo de la mezcla ardiente. Desde el comienzo de la rejilla diferentes quemadores encienden el coque para iniciar el proceso de sinterizado mediante temperaturas entre 1.300 a 1.800 °C. Así se crea el material poroso llamado sinter, materia prima para el proceso en el alto horno.

Durante el proceso en el alto horno ocurre:

- Evaporación de la humedad.
- Precalentamiento y calcinación de compuestos básicos, ignición de coque y reacción entre carbón, pirita, cloruros, compuestos fluorados y oxígeno.
- Descomposición de hidratos y carbonatos.

- Reacción entre óxido de calcio y óxidos de hierro para producir silicato fundido e incrementar la proporción de las fases fundidas.
- Formación de compuestos de sulfuro de calcio y compuestos con fluoruros, cloro y metales.
- Reducción de óxido de hierro a hierro metálico en las zonas de altas temperaturas.
- Formación de hundimientos y canales por combustión de coque y ausencia de humedad.
- Procesos de oxidación y recalcinación y efectos de contracción, engranaje y endurecimiento durante el enfriamiento sinterizado.

- Formación de grietas debido a la tensión térmica durante el enfriamiento del sinterizado y defectos en la microestructura del sinterizado.

Los gases generados durante este proceso están entre los 1.500 a 2.500 Nm<sup>3</sup>/tonelada producida. Estos gases pueden contener metales pesados, principalmente hierro, como plomo, cloruros, óxidos de azufre, óxidos nitrosos, fluoruros, hidrocarburos, monóxido de carbono y algunas trazas significativas de compuestos aromáticos organohalogenados, como PCDD, PCDF y bifenilos policlorados (PCB). Al final del proceso, el coque es quemado por completo y la torta de sinter cae en una mesa de quiebre donde es triturada y llevada al siguiente proceso.

#### 2.1.1.1.3 Enfriamiento

En algunos casos, antes de que el sinter sea descargado en la mesa de triturado, este es enfriado mediante corrientes de aire para lograr temperaturas de 300 °C.

#### 2.1.1.1.4 Emisión de contaminantes al ambiente en la producción de sinter

Como muchos procesos industriales, la producción de sinter genera impactos al ambiente, los cuales dependen del estado de la materia prima y del nivel tecnológico del proceso. En la ilustración 1 se enuncian las posibles emisiones al aire y al agua y los residuos que se pueden generar durante el proceso.

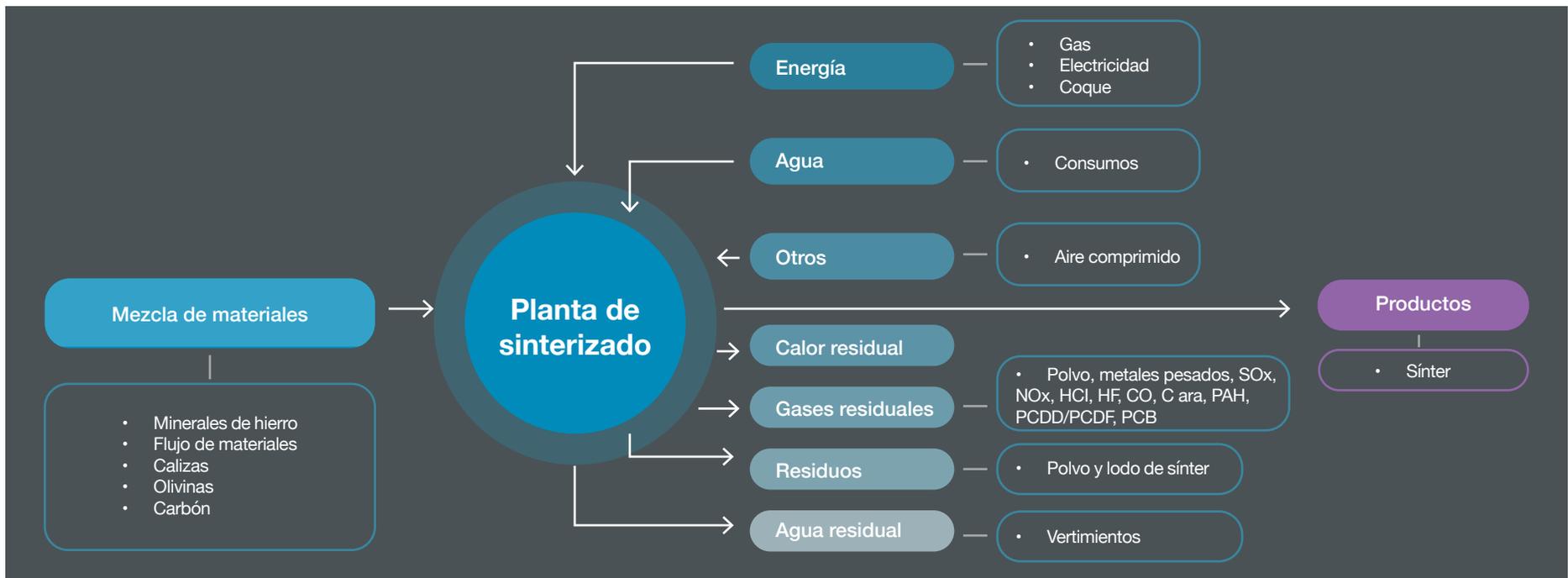


Ilustración 1. Diagrama de materiales en la producción de sinter

Fuente: European Commission (2012) y Minambiente (2022).

### 2.1.1.1.2 FUNDICIÓN EN ALTO HORNO

El proceso de fundición en alto horno es un sistema cerrado en el que se introducen materiales con alto contenido de hierro —como minerales, sinter, *pellets*, aditivos y agentes reductores— por la parte superior del horno mediante un sistema que evita la salida del gas de alto horno (European Commission, 2012). En este proceso la mezcla de aire caliente rico en oxígeno y agentes auxiliares reductores inyectados en la mitad del horno proporciona una contracorriente de gases reductores, los cuales reaccionan con los agentes reductores para producir, principalmente, monóxido de carbono, que a su vez reduce los óxidos de hierro a hierro metálico. Este hierro es recogido al fondo del horno en tolvas junto con la escoria para continuar el proceso siderúrgico. Este proceso se puede dividir en seis etapas.

#### 2.1.1.1.2.1 Preparación de la carga

La producción de metal caliente requiere gran cantidad de ingredientes, los cuales deben cumplir con un tamaño apto, que se logra mediante el tamizaje de la carga, para lograr un proceso óptimo. Además, para almacenar la mezcla que va a ingresar al horno es necesario tener instalaciones techadas o silos con el fin de evitar ingreso de humedad a la carga, ya que esta puede afectar las condiciones óptimas de operación del horno.

#### 2.1.1.1.2.2 Carga y transporte de materias primas

La mezcla, llamada «carga», es puesta en la parte superior del horno a través de contenedores o cintas transportadoras. Este sistema es capaz de aislar los gases del horno de la atmósfera debido a la diferencia de presión.

#### 2.1.1.1.2.3 Procesamiento de alto horno

En la medida en la que la carga va bajando por el horno, el hierro mineral se va reduciendo y convirtiéndose en hierro metálico fundido. Este sale por la parte inferior junto con la escoria, mientras que los gases residuales se recogen por la parte superior y mantienen la temperatura del horno.

Estos hornos poseen seis zonas de temperatura que son refrigeradas con agua, aceite o aire:

1. **Parte superior:** donde se carga y se evapora el gas.
2. **Eje:** donde el gas caliente le da calor a la carga sólida, se registran temperaturas de 950 °C, y se reduce parte del óxido de hierro.
3. **Vientre:** donde se reduce en mayor medida el óxido de hierro, las temperaturas pasan de 950 °C a 1.250 °C, y comienza la reacción con el coque.
4. **Cuba:** donde continúa la reacción con el coque y se genera la escoria del proceso.
5. **Tragante:** donde se introduce el gas quemador, las temperaturas alcanzan los 2.000 °C, y los óxidos se reducen por completo.
6. **Corazón:** donde se recoge el metal fundido y la escoria.

Los materiales diferentes a hierro —como fósforo, azufre, magnesio y silicio— se convierten en metal fundido, mientras que otros —como titanio, aluminio, calcio, magnesio, mayor parte de silicio y azufre— se convierten en escoria como óxidos o metaloides. También es posible que variedades de elementos —como zinc, plomo y subproductos de la planta de



sinterización— se volatilicen y depositen en diferentes partes del horno, por ello en algunos países se restringen los contenidos de estos metales<sup>2</sup>. Por otra parte, el gas generado durante este proceso posee la siguiente composición: 20-28 % CO, 1-2 % H<sub>2</sub>, 50-55 % N<sub>2</sub>, 17-25 % CO<sub>2</sub> y algunos compuestos de sulfurados y cianuros, importantes durante la purga del horno. Se estima que la generación de gas durante este proceso puede estar de 1.200 a 2.000 Nm<sup>3</sup>/tonelada de metal fundido.

#### 2.1.1.1.2.4 Operación de la estufa caliente

La onda de calor generada durante la operación del horno es producida por las estufas del horno. El aumento de temperatura produce una reducción de los requisitos del carbono, así como la reducción de los óxidos de hierro. Ese tipo de estructuras funcionan de forma cíclica. El proceso inicia con el quemado de los gases hasta que el domo se encuentra entre 1.100 a 1.500 °C. En ese punto se permite el ingreso de aire del ambiente en dirección opuesta al gas, para inyectarlo al alto horno hasta llegar a una temperatura entre 950 a 1.350 °C. Este proceso continúa hasta que la estructura no puede generar la temperatura adecuada, por lo cual el ciclo inicia de nuevo. Este tipo de estructuras pueden ser internas o externas.

2. La eliminación de zinc se puede controlar manteniendo el horno por encima de 400 °C, ya que es más probable que se convierta en óxido de zinc y sea retenido por los sistemas de control de emisiones.

### 2.1.1.1.2.5 Fundición

El horno es movido de forma periódica para remover la escoria y el metal fundido. Este proceso se hace mediante grifos que se abren en las paredes laterales. Durante este proceso, el metal y la escoria salen juntos; sin embargo, son separados de forma mecánica por medio de un desespumante. El metal luego es vertido en cucharones o bandas transportadoras de materiales refractarios, ya que se encuentra alrededor de 1.440 a 1.500 °C. Por lo general, la escoria es conducida a una plata de granulación para aprovechar la gran cantidad de minerales y metales que posee.

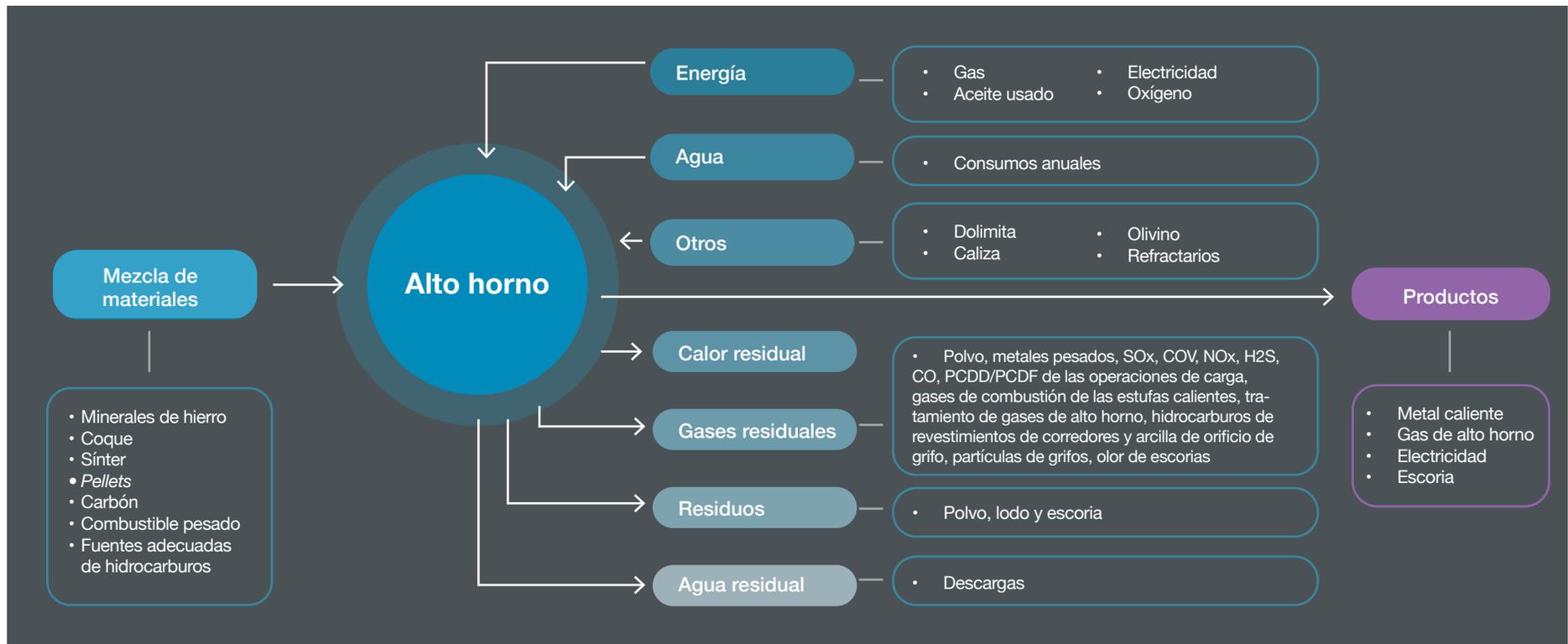
### 2.1.1.1.2.6 Enfriamiento y procesamiento de escorias

La cantidad de escoria producida depende de la cantidad de minerales dentro del horno, la carga ferrosa, la ceniza de coque y el material de inyección. Para que la escoria cumpla ciertos usos se deben garantizar unas condiciones físicas y químicas específicas. Entre los usos que se le da a este material está la construcción de carreteras, el agregado de concreto, el aislamiento térmico y como sustituto de clínker. Existen tres procesos de tratamiento de escoria: granulación de escoria con agua, el más utilizado en la actualidad, peletización de escoria y enfriamiento con aire, técnica

poco utilizada por problemas de ruido, entre otros. Todos los procesos generan sulfuro de hidrógeno, por lo que pueden causar problemas de olor.

### 2.1.1.1.2.7 Emisión de contaminantes al ambiente en la producción de alto horno

Como muchos procesos industriales, la producción de acero en alto horno genera impactos al ambiente, los cuales dependen del estado de la materia prima y del nivel tecnológico del proceso. En la ilustración 2 se enuncian las posibles emisiones al aire y al agua y los residuos que se pueden generar durante el proceso.



**Ilustración 2.** Diagrama de materiales en la producción de acero primario

**Fuente:** European Commission (2012) y Minambiente (2022).

## 2.1.1.2 PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ACERO

El proceso de producción secundaria a nivel mundial se caracteriza por la refundición de chatarra metálica proveniente de infraestructuras, parques automotores, entre otros. Este proceso se realiza, principalmente, en hornos de arco eléctrico.

### 2.1.1.2.1 FUNDICIÓN EN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO

Este proceso se caracteriza por realizar la fundición directa de chatarra de acero y hierro en hornos de arco eléctrico, los cuales son ampliamente utilizados en las siderúrgicas a nivel mundial. La principal materia prima que ingresa a los hornos es chatarra ferrosa, la cual debe comprimirse y cortarse dentro del proceso interno de la planta. Dentro de la chatarra ferrosa pueden existir altos contenidos de materiales no deseados para el proceso de fundición —como metales no ferrosos, plásticos y otros—, los cuales llevan a una mayor generación de escoria durante la colada. Posterior al proceso de refundición de chatarra y de vaciado de escoria, se adicionan ferroaleaciones para obtener las propiedades que se requieren según las especificaciones del acero que se quiere proveer. El proceso de fundición se puede dividir en siete etapas.

#### 2.1.1.2.1.1 Manejo y almacenamiento de materias primas

Por lo general, la chatarra metálica es almacenada en patios pavimentados y techados. Esta es comprada directamente por la empresa a

proveedores a nivel nacional. Una vez en el patio, la chatarra es puesta en cestas, mediante pinzas magnéticas, para hacer una primera separación de los materiales no ferrosos. Dependiendo de los niveles de materia prima procesada se pueden generar grandes cantidades de contaminantes como polvos, aceites, entre otros; así mismo, esta operación puede generar ruido que supere los límites permisibles.

La clasificación de chatarra puede llevar a reducir el riesgo de generación de sustancias peligrosas durante el proceso de fundición. Además, durante este proceso se realizan procesos de oxicorte para reducir su tamaño y facilitar el transporte y cargue a los hornos. Es recomendable realizar una separación exhaustiva de estos materiales en el patio de chatarra, ya sea de manera manual o mediante fragmentadoras, para generar menor cantidad de escoria y emisiones peligrosas durante el proceso de fundición. Finalmente, debido a que a estos sitios llegan residuos de diferente variedad, es necesaria una gestión adecuada de estos por medio de gestores especializados.

#### 2.1.1.2.1.2 Precalentamiento de la chatarra

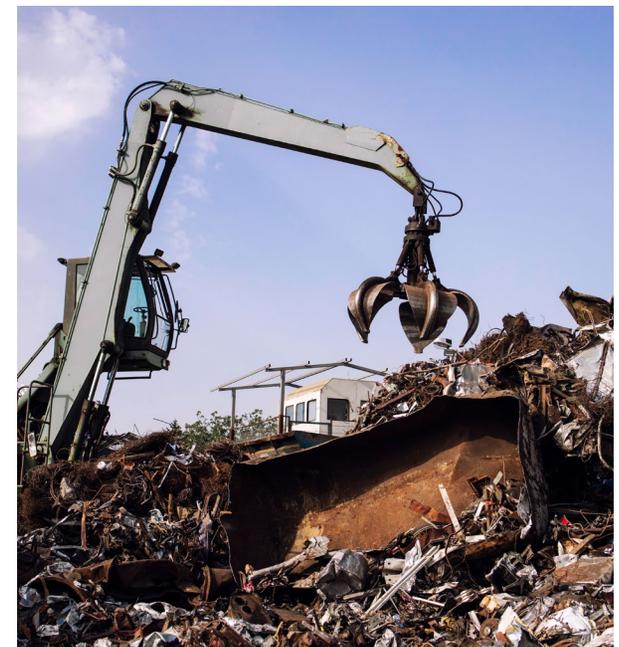
En años anteriores, los hornos de arco eléctrico tenían sistemas de precalentamiento de chatarra, los cuales redirigían los gases provenientes del proceso de fundición a la chatarra que iba a ingresar al horno para ahorrar energía en la planta. Este proceso no es aplicado por las plantas del país.

#### 2.1.1.2.1.3 Carga de material al horno

La chatarra es cargada al horno a través de canastas con cal o dolomita, utilizados como fundentes en la formación de escoria. Usualmente, se aplican componentes con carbón para mejorar el proceso metalúrgico. La carga de los hornos

es introducida al horno por la parte superior después de levantar los electrodos. Después de la primera carga, que equivale a 50 o 60 % de la capacidad del horno, los electrodos bajan, se tapa el horno y se realiza la fundición. Cuando la carga inicial está parcialmente derretida, se ingresa la segunda y tercera carga.

En la actualidad, se encuentran en el mercado dos variaciones de estos sistemas de fundición. Una es los hornos de eje, los cuales constan de un horno vertical en el que la carga es introducida de manera vertical y es fundida a medida que cae; este tipo de hornos poseen techos fijos, lo cual reduce los tiempos de fundición. Otra es los Costeel, en los cuales la chatarra ingresa a los hornos de manera continua y es precalentada, mediante los gases de salida, en la medida en la que se acerca a los electrodos; esta tecnología es utilizada principalmente en Estados Unidos y China.





#### 2.1.1.2.1.4 Fundición y refinamiento

Durante el proceso inicial de fundición se aplica poca energía para evitar daños causados por radiación en las paredes y los techos del horno. Una vez los electrodos van perforando la chatarra, la potencia aumenta para completar la fundición. Para realizar una fundición mucho más rápida se ha popularizado el uso de oxicorte en chatarra pesada con el fin de reducir su tamaño. Además, se puede llevar oxígeno al acero líquido mediante boquillas dentro de los hornos para aumentar la productividad.

Entre los beneficios de este último proceso están:

- La inyección de oxígeno y carbono granular genera escoria espumosa gracias a la generación de monóxido de carbono. Esta técnica es ampliamente utilizada en la fabricación de acero al carbón, ya que mejora el blindaje de las paredes del horno contra la radicación del arco y la transferencia de energía.

- El oxígeno se utiliza como descarburizador de la masa fundida y ayuda a la eliminación de elementos no deseados, como fósforo y silicio.
- La aplicación de oxígeno en la parte superior ayuda a la poscombustión del monóxido de carbono y otros hidrocarburos antes de que los gases salgan del horno, así como a mantener el calor del horno el mayor tiempo posible. Sin embargo, aumenta las emisiones de dióxido de carbono.

También se puede inyectar argón y otros gases inertes en la masa fundida para proporcionar agitación del baño y tener equilibrio de temperatura, el equilibrio metal-escoria también se mejora con esta técnica. Los gases generados durante este proceso deben entrar en un sistema de control de emisiones debidamente diseñado para la capacidad de los hornos.

#### 2.1.1.2.1.5 Golpes de acero y escoria

Durante el proceso de calentamiento se puede generar escoria —oxidación del metal— que debe eliminarse para lograr el nivel de pureza deseado. Para ello, se debe inclinar el horno hacia atrás permitiendo que esta pueda salir por la puerta de la escoria o eliminarse rastrillando la parte superior de la colada. Este proceso puede generar polvos y emisiones que deben ser recolectados por el sistema de control de emisiones. Por razones del proceso metalúrgico, la escoria de aceros especiales, como acero aleado, se golpea con el acero líquido en el cucharón.

#### 2.1.1.2.1.6 Metalurgia secundaria

Este proceso se realiza después de la refundición de la chatarra en cucharones. Existen tres tipos de acero que se producen mediante este procedimiento: acero al carbón, acero inoxidable y aleaciones de acero.

Acero al carbón: consiste en la adición de agentes desoxidantes y elementos de aleación para ajustar la composición química del acero terminado. En algunos casos, las unidades de tratamiento al vacío se utilizan para lograr requerimientos especiales en cuanto a la concentración de elementos como hidrógeno, nitrógeno y oxígeno en el acero terminado. Para lograr una buena homogenización, se han utilizado gases inertes, como argón o nitrógeno, inyectados en el cucharón.

Acero inoxidable: se puede realizar mediante dos tipos de sistemas en cucharones al vacío. Uno es el proceso de descarburación por oxígeno al vacío (proceso VOD, por sus siglas en inglés) y otro es en un recipiente metalúrgico separado, llamado convertidor descarburador por oxígeno con argón (convertidor AOD, por sus siglas en inglés).

Dependiendo del tipo de producto final, estos dos procesos se pueden hacer en simultáneo.

Aleaciones de acero: en este proceso, además de carbono, se adicionan elementos que no se clasifican en la categoría de inoxidable. Este proceso se puede realizar en cucharones o al vacío y las escorias se utilizan para capturar los elementos que no son metálicos.

#### 2.1.1.2.1.7 Manejo y procesamiento de escorias

La escoria generada durante el proceso es retirada de la masa fundida en cucharones para su proceso de enfriamiento y solidificación, el cual se puede mejorar con el uso de agua. En algunas

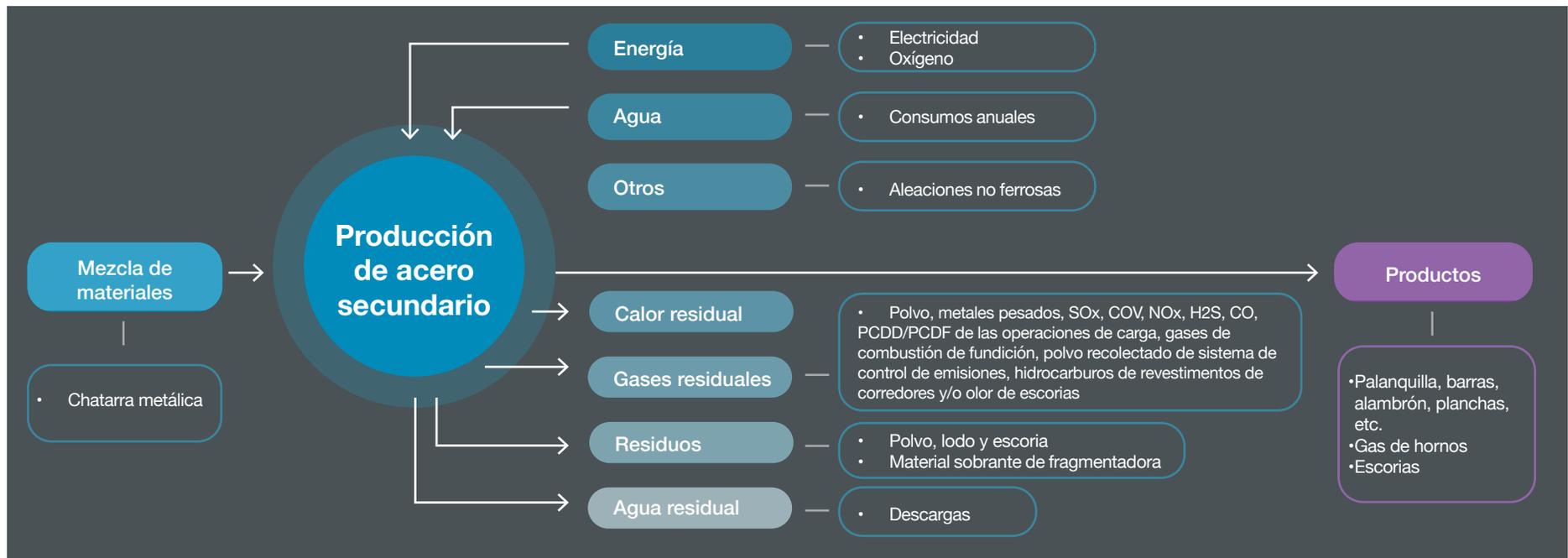
plantas, la escoria se trabaja en caliente en fase líquida —agregando sílice, alúmina boro, entre otros— para mejorar su calidad y lograr una estabilidad dimensional. En las plantas en las que la escoria es vertida al suelo, esta debe triturarse después del proceso de solidificación de manera manual o con máquinas.

El principal uso que se le da a la escoria a nivel mundial es en construcción, debido a la gran cantidad de elementos que contiene. En algunos casos, esta es molida y tamizada para la extracción de metales ferrosos mediante magnetización, los cuales pueden reciclarse en el proceso de producción de acero. Los tipos de escoria que se pueden generar se dividen en dos: escoria negra,

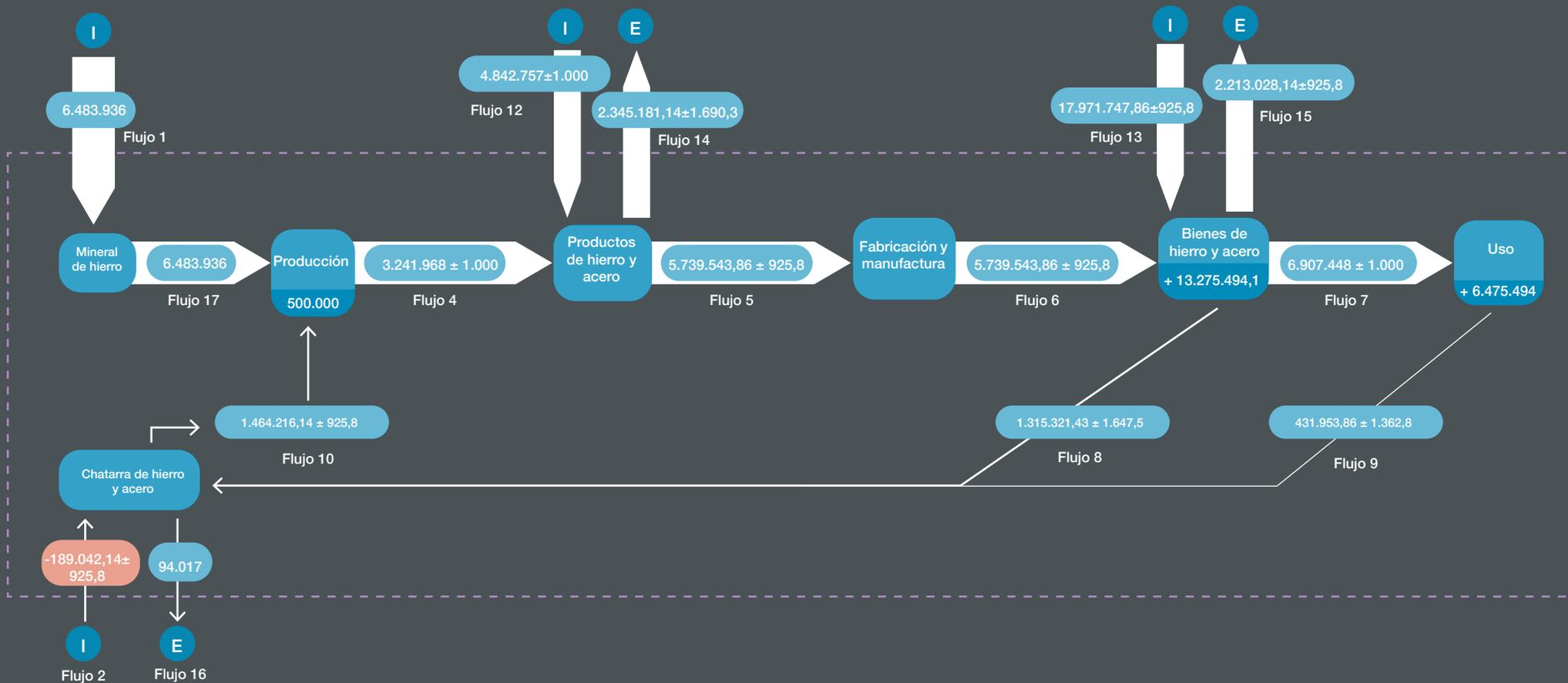
que se puede utilizar en construcción de calles y carreteras, y escoria blanca, que se puede utilizar como fertilizante teniendo en cuenta los requerimientos de la regulación nacional.

#### 2.1.1.2.1.8 Emisión de contaminantes al ambiente en la producción de horno de arco eléctrico

Como muchos procesos industriales, la producción de acero en horno de arco eléctrico genera impactos al ambiente, los cuales dependen del estado de la chatarra, del nivel tecnológico del proceso y de los sistemas de control de emisiones instalados. En la ilustración 3 se enuncian las posibles emisiones al aire y al agua y los residuos que se pueden generar durante el proceso.



**Ilustración 3.** Diagrama de materiales en la producción de acero secundario  
Fuente: European Commission (2012) y Minambiente (2022).



**Ilustración 4.** Flujo de masa según ciclo de vida del acero, 2019

**Fuente:** Minambiente (2022).

Se estima que la producción nacional de acero es de 1.602.714 toneladas al año<sup>3</sup> y que la producción secundaria es el principal proceso industrial para producir acero. Sin embargo, esta no cubre los requerimientos nacionales; por ello, las importaciones

y exportaciones de producto terminado y de chatarra juegan un papel importante en la dinámica de estos materiales en el país. Para establecer las cantidades que ingresan en el sistema, el Minambiente realizó una consultoría en la que se identificaron y

cuantificaron los flujos de masa del acero, a partir de información secundaria, según su ciclo de vida (ver ilustración 4). Para ampliar la información sobre este tema, se invita a revisar el Anexo 1, *Identificación y cuantificación de flujos de masa de los metales*.

3. Dato promedio durante 2016 a 2019, basado en cifras de datos públicos de comercio y consumo de aceros. Información deducida de una base de datos con información de la Asociación Nacional de Industriales (ANDI), el Banco de Datos de Comercio Exterior (BACEX) del Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (MinCIT), la Agencia Nacional de Minería (ANM) y el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).

## 2.1.2 Producción de aluminio

El aluminio es un metal con gran variedad de aplicaciones, como transporte, construcción, industria de alimentos y sectores eléctrico, doméstico, mecánico y agrícola. Sus propiedades químicas lo hacen un metal liviano, buen conductor eléctrico y resistente a la corrosión. El aluminio es altamente reactivo en forma de polvo, por lo cual es usado en reacciones aluminotérmicas para la producción de otros metales (Cusano *et al.*, 2017). En la actualidad, es el segundo metal más importante en la industria del reciclaje, ya que sus desechos tienen un buen valor económico en el mercado y tan solo se necesita 5 % de la energía requerida en la producción primaria para su fundición. Además, este elemento tiene la ventaja de que su estructura atómica no es alterada durante el proceso de fundición, por lo que es posible reciclarlo por completo sin que exista pérdida de calidad o de valor económico (EAA, 2004). Debido a que en el país no existen plantas productoras de aluminio primario, este proceso no se describe en el documento.

### 2.1.2.1 PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE ALUMINIO

El aluminio secundario es producido a partir de la fundición de chatarra. Este proceso se caracteriza por la amplia variedad de la materia prima y de los hornos utilizados para realizarlo. Las características de la chatarra son: fuente de la chatarra, tamaño, contenido de óxidos e impurezas, densidad del

aluminio y pretratamiento (ALFED, 1998). El proceso de refundición de chatarra tiene cuatro etapas: pretratamiento, fundición o fusión, afinado y colado.

#### 2.1.2.1.1 PRETRATAMIENTO

El pretratamiento engloba todos aquellos procesos que se deben aplicar a la chatarra para eliminar residuos sólidos, líquidos o grasas y evitar contaminación en los procesos posteriores. La chatarra más común que se procesa en este tipo de plantas son envases, elementos de construcción, laminas, chatarra comercial y antiguo metal fundido. Además, el aluminio es recuperado de escorias y escorias de sal que son reincorporadas al proceso de fundición (Nordheim, 1998). La chatarra es clasificada según la aleación para evitar su reprocesamiento (ALFED, 1998).

Las técnicas utilizadas para el pretratamiento de la chatarra son:

- Limpieza manual: este método utiliza herramientas manuales y no eléctricas para eliminar impurezas que puedan removerse solo con esfuerzo humano. A través de este método no es posible remover por completo todas las impurezas presentes en el material de alimentación.
- Limpieza mecánica: este método utiliza instrumentación eléctrica o neumática para eliminar las impurezas que pueden removerse con estas herramientas. Su efectividad es mayor a la limpieza manual, pero no garantiza pureza total (PSM y Dupont, 2019).

- Pirometalurgia: este método consiste en pasar temperaturas medias-elevadas a alta velocidad sobre las superficies metálicas. Por lo general, se utiliza una flama de acetileno. Su fin es de naturaleza física, como el secado, y química, como la calcinación, tostación o volatilización de las diferentes impurezas (Universidad Técnica de Oriente, 2010).

- Hidrometalurgia: este método ocurre en medio acuoso y permite la extracción y obtención de metales o compuestos considerados impurezas para el proceso de fundición y refinación (Universidad de Santiago de Chile, 2003). Es el método más efectivo para el tratamiento del material de alimentación.

#### 2.1.2.1.2 FUNDICIÓN

La fundición secundaria consiste en la producción de aluminio a partir de productos desechados que fueron elaborados con este metal o de desechos de procesos. En la fundición se utilizan diferentes tipos de combustibles, fundentes y aleaciones (Cusano *et al.*, 2017). El proceso inicia con el cargue de la materia prima al horno.

Existen tres tipos de horno:

- Hornos rotatorios: usados para la fundición de una gran variedad de metales secundarios. Pueden incorporar un mecanismo de inclinación que, en algunos casos, aumenta la eficiencia de la fundición de los materiales que contienen bajas cantidades de aluminio, incluidas natas y escorias. Estos hornos disminuyen la cantidad de sales requeridas para el proceso (Boin *et al.*, 1998).
- Hornos de inducción: usados para aluminio en altos grados de pureza. Son hornos de cámara con un compartimiento de carga y sistema de bombeo. Puede aumentar el grado de escorias y natas, incluidos laminas y torneados, que pueden reincorporarse de nuevo al proceso. Estos hornos también pueden reducir la pérdida de metal por oxidación sin el uso de grandes cantidades de sales u otras coberturas (Laheye *et al.*, 1998; McLellan, 1998).
- Hornos de reverbero: también pueden usar inclinación en el área de alimentación, en la que grandes piezas de hierro pueden introducirse. En estos hornos el aluminio es fundido del sustrato del hierro, el cual permanece en el área de conservación, y la contaminación de la fundición por hierro es minimizada (Nordheim, 1998; ALFED, 1998).

Con la materia prima dentro del horno se adiciona un fundente, dependiendo del tipo de horno, para su posterior refundición a temperaturas superiores a 660 °C. Las características de los hornos que se pueden encontrar en la industria se resumen en la tabla 1.



**Tabla 1.** Evaluación de desempeño según tipo de horno de fundición de aluminio

Parámetro	Horno de tambor rotatorio	Horno basculante	Horno de reverbero		Hornos de eje	Hornos de crisol	Horno de inducción	
			Cámara única	Múltiples cámaras				
Aplicación preferida	Producción de aluminio secundario	Producción de aluminio secundario	Producción de aluminio secundario y fundidoras		Producción de aluminio secundario	Industrias de moldeo	Industrias de moldeo	Producción de aluminio secundario
Propósito	Fundición	Fundición	Fundición	Conservación y colado	Fundición	Fundición y conservación	Fundición y conservación	Fundición y conservación
Material de alimentación	Chatarra limpia y sucia, virutas y escoria	Chatarra sucia, virutas y escoria	Lingotes, chatarra limpia y sucia y escoria	Metal fundido	Chatarra y escorias	Lingotes y chatarra limpia	Lingotes y chatarra limpia	Lingotes y chatarra limpia y sucia
Tratamiento preferido del fundido	Cobertura de sales	Menor cantidad de sales comparada al horno de tambor rotatorio	Sin cobertura salina y cloración		Sin cobertura salina	Sin cobertura salina	Sin cobertura salina	Sin cobertura salina y cloración
Capacidad (t)	Mayor a 150	Mayor a 30	Mayor a 180		Mayor a 180	De 0,5 a 4	De 0,1 a 1,2	Aproximadamente 50
Eficiencia (t/h)	Mayor a 20	Mayor a 7	Mayor a 30	N. A.	3 a 28	Mayor a 2,5	De 0,075 a 0,43	Aproximadamente 7
Combustibles preferidos*	GN, AC y FO	GN y FO	GN y FO extra puro		GN y FO extra puro	GN y FO extra puro	GN, FO extra puro y E	E
Uso de energía (GJ/t)	2 a 4,7	2 a 2,5	2,5 a 4,4	Sin detalles	2,4 a 4,3	2,1 a 3,3	0,4 a 7,4	Aproximadamente 3,6 (M/H)

\*GN: gas natural, E: electricidad, AC: aceite y FO: *fuel oil*.

\*\*(+): bajo, (++): medio, (+++): alto y NR: no relevante.

**Fuente:** European Commission (2017) y Minambiente (2022). Durante este proceso los materiales fundentes se combinan con los contaminantes flotando y atrapando en la superficie del aluminio las impurezas, así actúan como una barrera que reduce la oxidación del aluminio fundido. Para disminuir la oxidación del aluminio en su fase líquida se aplican fundentes y métodos mecánicos (Cusano *et al.*, 2017).

Tasa de gas residual (m3/t)	9.000 a 18.000	9.000 a 13.000	5.000 a 13.000	Sin detalles	10.000 a 15.000	2.000 a 4.000	2.000 a 40.00	Máximo 14.500
Generación de polvos**	+++	+++	++	+	++	NR	NR	+
Óxidos de nitrógeno	+, asumiendo condiciones optimizadas de combustión, o ++, alimentado con combustóleo y oxígeno sin regular.						NR	NR
Dióxidos de azufre	NR							
Cloruros	++ (Cloración)							
Cloruro de hidrógeno	+++	++	+ y ++ (Cloración)	++ (Cloración)	++	NR	++ (Cloración)	++ (Cloración)
Fluoruro de hidrógeno	+++	++	+	+	+	NR	++	+
Carbono orgánico total	++	++	+	+	+	NR	NR	NR
PCDD/F	+++	++	++	NR	+	NR	NR	NR

\*GN: gas natural, E: electricidad, AC: aceite y FO: *fuel oil*.

\*\*(+): bajo, (++): medio, (+++): alto y NR: no relevante.

**Fuente:** European Commission (2017) y Minambiente (2022). Durante este proceso los materiales fundentes se combinan con los contaminantes flotando y atrapando en la superficie del aluminio las impurezas, así actúan como una barrera que reduce la oxidación del aluminio fundido. Para disminuir la oxidación del aluminio en su fase líquida se aplican fundentes y métodos mecánicos (Cusano *et al.*, 2017).

### 2.1.2.1.3 FUNDENTES

Los fundentes son, en su mayoría, sales que se aplican para asistir al proceso de fundición en múltiples formas; por ejemplo, sodio, potasio, cloruros y fluoruros para reducir la oxidación, absorber impurezas y aumentar la eficiencia térmica (Cusano *et al.*, 2017). Durante este proceso se crea una capa de óxido, conocida como escoria o nata, debido a que el aluminio se oxida fácil. Esta capa es retirada —de manera mecánica con una maquinaria que hace un barrido o de manera manual con el empleo de personal capacitado— y descargada en un horno circular eléctrico de menor tamaño en el que se realiza la recuperación de material aprovechable mediante enfriado, granulado y peletizado (Boin *et al.*, 1998). Las escorias y los sobrantes de sal son aprovechados aparte del metal. La cantidad de sal usada depende del horno

utilizado y el óxido contenido en el metal no procesado (VDI, 2008). Se ha observado que el pretratamiento del material de alimentación puede reducir el uso de sales y que el uso de sales no metalizas es mayor en hornos de tambor rotatorio (Boin *et al.*, 1998).

### 2.1.2.1.4 AFINADO Y COLADA

Con el material fundido se pasa a la cámara de colada, a través de un sistema de horno de acumulación en el que se agregan otros compuestos. El metal es refinado en la cámara de conservación o en un reactor en línea para remover gases y otros metales. Se ha encontrado que magnesio y otras impurezas pueden estar presentes en el proceso secundario de aluminio. Para remover estas impurezas, el metal fundido se trata con mezclas de

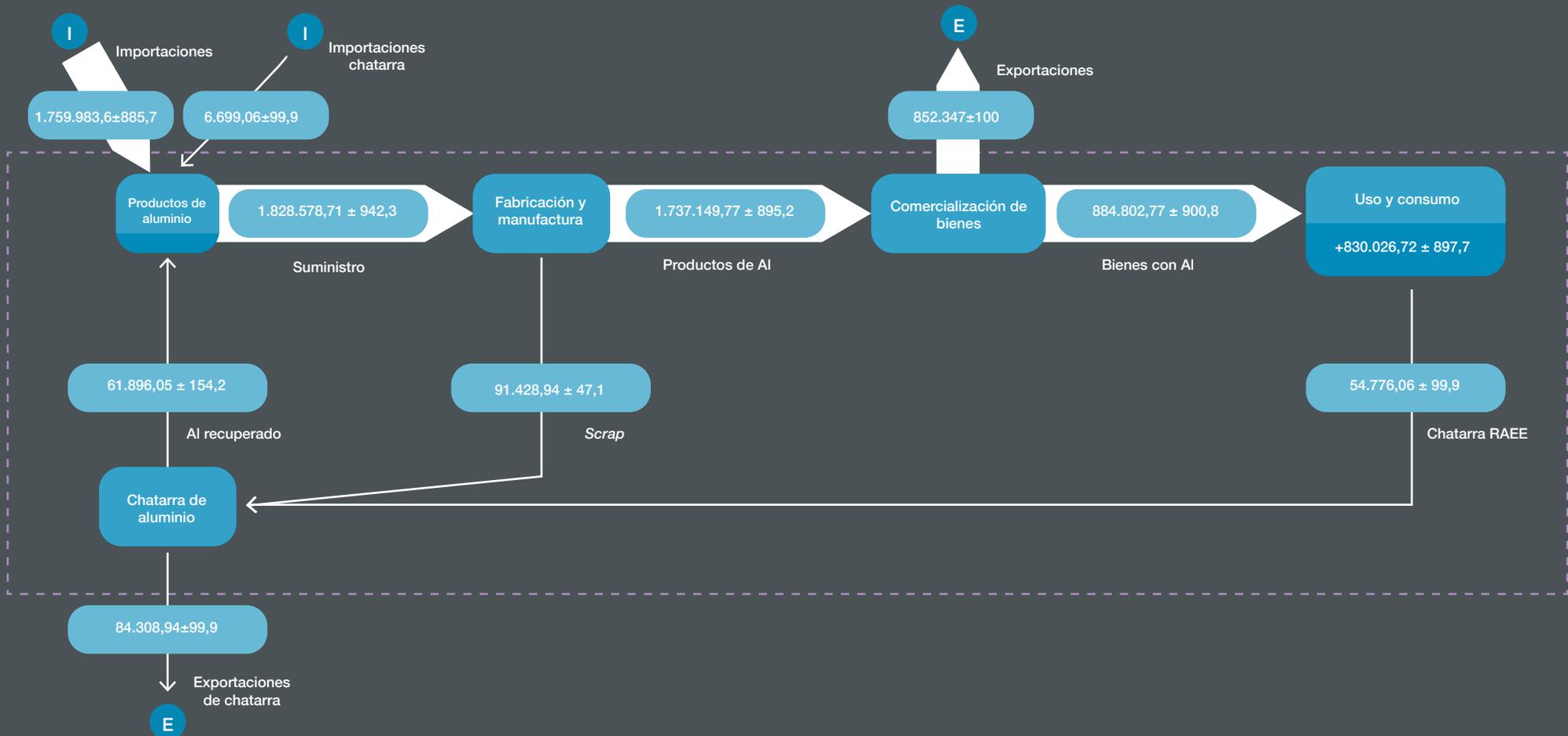
cloruros, fluoruro de sodio y aluminio y fluoruro de potásico de aluminio (ALFED, 1998). Finalmente, se utilizan moldes para formar los lingotes, perfiles, barras, entre otros, dependiendo de lo solicitado por el cliente.

### 2.1.2.1.5 EMISIÓN DE CONTAMINANTES EN LA PRODUCCIÓN DE ALUMINIO SECUNDARIO

Como muchos procesos industriales, la producción de aluminio en hornos de fundición genera impactos al ambiente, los cuales dependen del estado de la chatarra y del nivel tecnológico del proceso. En la ilustración 5 se enuncian las posibles emisiones al aire y al agua y los residuos que se pueden generar durante el proceso.



**Ilustración 5.** Diagrama de materiales en la producción de aluminio secundario  
**Fuente:** European Commission (2017) y Minambiente (2022).



**Ilustración 6.** Flujo de masa según ciclo de vida del aluminio, 2019  
**Fuente:** Minambiente (2022).

Finalmente, se estima que la producción nacional de aluminio es de 70.250 toneladas al año<sup>4</sup> y que el principal proceso industrial para producir aluminio es el de producción secundaria. Sin embargo, esta producción no alcanza a igualar el consumo nacional,

por ello las importaciones y exportaciones juegan un papel importante en la dinámica de estos materiales en el país. Para establecer las cantidades que ingresan en el sistema, el Minambiente realizó una consultoría en que se identificaron y cuantificaron, a

partir de información secundaria, los flujos de masa del aluminio según su ciclo de vida (ver ilustración 6). Para ampliar la información sobre este tema, se recomienda revisar el Anexo 1, *Identificación y cuantificación de flujos de masa de los metales*.

4. Dato promedio durante 2016 a 2019.

## 2.1.3 Producción de cobre

El cobre fue uno de los primeros metales usados por los humanos. Su utilidad se debe a la combinación de sus propiedades químicas, físicas y mecánicas, así como a sus propiedades eléctricas y su abundancia en la corteza terrestre (Greenwood, 1997). Este metal en estado puro se usa ampliamente en el sector de conducción eléctrica, como alambres, cables, contactos, entre otros. De la misma manera, se une con otros metales para producir latón, bronce y cobre-níquel, los cuales se utilizan en el sector automotriz, en radiadores de automóviles, intercambiadores de calor, entre otros. Debido a su capacidad para soportar la corrosión, también se encuentran usos importantes en tuberías, válvulas y conexiones en sistemas que transportan agua potable y diferentes fluidos líquidos o gases industriales (International Copper Association, 2014). Este metal puede reciclarse sin pérdida de calidad y es aleado con frecuencia con zinc, níquel, entre otros metales para producir una variedad de latones y bronce (COM, 1997). Debido a que en el país no existen plantas productoras de cobre primario, este proceso no se describe en el documento.

### 2.1.3.1 PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE COBRE

El cobre secundario es producido por procesos pirometalúrgicos en los que se sustrae o remueve por etapas dependiendo del contenido de cobre en el material de alimentación, su tamaño, distribución y otros componentes (Traulsen, 1998). Varias etapas son usadas para remover los componentes no deseados y recuperar la mayor cantidad de metal puro aprovechable a partir de los residuos entregados a la planta (Rentz *et al.*, 1999). Este proceso tiene ocho etapas.

#### 2.1.3.1.1 FUNDICIÓN BAJO CONDICIONES DE REDUCCIÓN

El proceso de fundición bajo condiciones de reducción, al igual que el tostado en el proceso primario de cobre, tiene como objetivo la eliminación de elementos no deseados en el material de alimentación. Por lo general, el material de alimentación está compuesto por chatarra eléctrica y electrónica, aleaciones de cobre, escorias ricas en cobre, virutas de cobre, polvo proveniente de filtros y ciclones, lodos de precipitación y cables cubiertos. Si estos materiales no son tratados antes del proceso de fundición y colados, generarán cobre de baja calidad y altas emisiones. Para la eliminación de los compuestos no deseados se emplean elementos como hierro, carbón y agentes fundentes en el proceso (UBA, 2004).

#### 2.1.3.1.2 PROCESOS DE CONVERSIÓN

El proceso de conversión en la fundición secundaria de cobre tiene como objetivo recuperar la fracción de cobre de aleaciones en un horno eléctrico. En el horno se agrega el material que se tratará junto con caliza, que ayuda a la escoriación del hierro y del plomo oxidado. Así mismo, para prevenir la oxidación del cobre se agrega una pequeña cantidad de coque al lote. Los ciclos de conversión tienen una duración mínima de ocho horas (Cusano *et al.*, 2017). El material obtenido después de realizar este proceso es cobre blíster, el cual pasa al proceso de refinación térmica.

#### 2.1.3.1.3 REFINACIÓN TÉRMICA

La refinación térmica tiene como objetivo oxidar las impurezas y remover las trazas de sulfuros del cobre blíster e involucra la adición de aire y agentes reductores. El proceso de refinación térmica es realizado en hornos cilíndricos rotatorios y, en ocasiones, en hornos de reverbero con inyección de aire. El proceso

inicia con la adición al horno de cobre blíster fundido, al que se le agrega un agente reductor, como gas natural o propano, para la remoción del oxígeno disuelto en la mezcla. También puede utilizarse como agente reductor el amonio, pero ese aumentará los niveles de óxidos de nitrógeno. La inyección de gas a través de boquillas permite que se dé una agitación del material fundido que optimiza el proceso (COM, 1991; OSPARCOM, 1996; Traulsen, 1998). Antes postes de madera o troncos eran empleados como agentes reductores (Kojo *et al.*, 2006).

#### 2.1.3.1.4 REFINACIÓN ELECTROLÍTICA

La refinación electrolítica es empleada para lograr la máxima pureza del cobre. Este proceso es realizado en una celda electrolítica en la que se ubican ánodos y planchas de cobre puro, cumpliendo la función de cátodo, sobre una solución de sulfato de cobre denominada electrolito. El proceso permite liberar cobre anódico hacia los cátodos de alta pureza y genera elementos que no se disuelven y que se depositan en el fondo de las celdas formando barro anódico, en el cual se encuentra oro, plata, selenio, platino y paladio que son aprovechados en otro proceso (COM, 1991). Para la remoción de los metales diferentes al cobre se emplean sistemas típicos de purificación que usan electrodeposición, evaporización, cristalización y posterior refinamiento, dependiendo del material a recuperar (OSPARCOM, 1996).



### 2.1.3.1.5 FUNDICIÓN

El proceso de fundición se realiza en un horno eléctrico o de inducción. Dependiendo de la tasa de fundición requerida, puede realizarse de manera continua en un horno alto o en hornos de crisol y rotatorios, los cuales, además de la fundición, permiten el proceso de refinación térmica (Cusano *et al.*, 2017). En hornos eléctricos, el gas es capturado y tratado mediante ciclones y filtros de manga. En los hornos cuyo combustible es gas, es indispensable el control de los quemadores para la reducción de monóxido de carbono (VDI, 2007).

### 2.1.3.1.6 COLADO

El metal fundido puede colocarse de manera continua o por lotes. El colado continuo usa sistemas horizontales y verticales, mientras que el colado por lotes usa un sistema vertical. Estos sistemas permiten la formación de tacos, placas o barras (Eurometaux, 1998).

### 2.1.3.1.7 PRODUCCIÓN DE LINGOTES DE COBRE Y SUS ALEACIONES

Las aleaciones de cobre son producidas mediante la mezcla con otros metales como níquel, estaño, zinc y aluminio (VDI, 2007). Las características deseadas de la aleación son logradas con adiciones controladas de ciertos metales y, en algunas ocasiones, aleaciones maestras. Este proceso de fundición para generar aleaciones puede realizarse en

hornos rotatorios o de inducción. Los hornos rotatorios son usados para chatarras sucias, ya que permiten la fácil adición de fundentes para separar componentes no deseados, como el hierro que es atrapado en las escorias, separado y aprovechado posteriormente (COM, 1998).

Para el ajuste de las aleaciones se muestrea la fundición, se analiza y realizan cálculos. Una vez obtenida la aleación deseada, el metal es transportado. Después, se realiza alimentación a una cadena de moldes tratados con un mineral para prevenir pegados y generaciones de humos a partir de aceites (Cusano *et al.*, 2017). Algunas plantas emplean aleaciones maestras para lograr propiedades específicas del material.

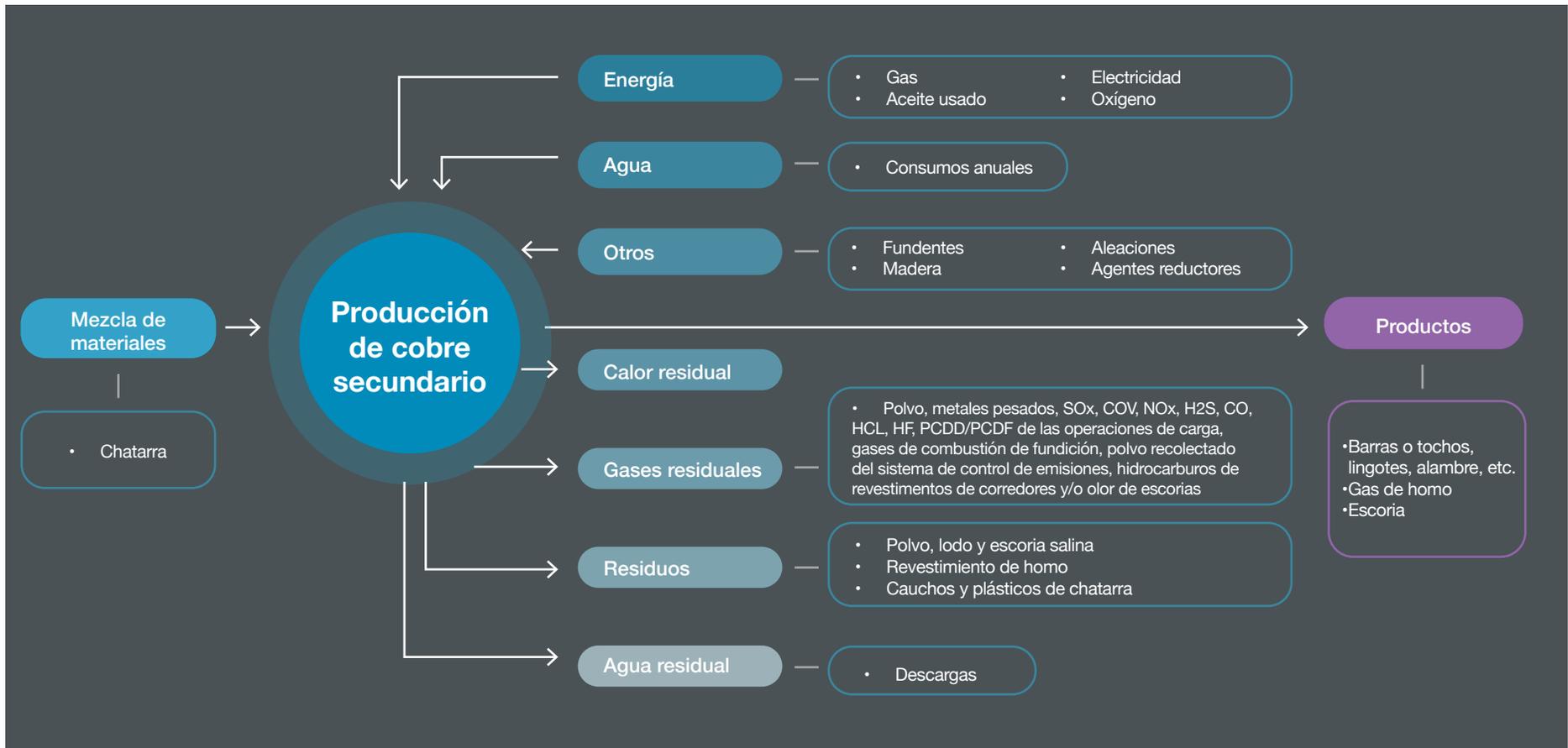
### 2.1.3.1.8 ALEACIONES MAESTRAS

La aleación maestra es un material en estado sólido con una elevada cantidad de elementos de aleación diseñado para mezclarse con la fundición actuando como vehículo para la introducción de diferentes elementos que traen beneficios, como reducción de la oxidación y modificación de las propiedades logrando la fundición deseada. Las aleaciones maestras son producidas en hornos a los que se les aplican sistemas de reducción y tratamiento rigurosos, ya que se utilizan materiales extremadamente peligrosos, como berilio, o materiales reactivos para la producción (Sicre, 2009). Por lo general, las aleaciones maestras son cobre y fósforo (CuP), cobre y níquel (CuNi), cobre, zinc y plomo (CuZnPb) y cobre berilio (CuBe) (Sicre, 2009).

### 2.1.3.1.9 EMISIÓN DE CONTAMINANTES AL AMBIENTE EN LA PRODUCCIÓN SECUNDARIA DE COBRE

Como muchos procesos industriales, la producción de cobre secundario genera impactos al ambiente, los cuales dependen del nivel tecnológico del proceso. En la ilustración 7 se enuncian las posibles emisiones al aire y al agua y los residuos que se pueden generar durante el proceso.





**Ilustración 7.** Diagrama de materiales en la producción de cobre secundario

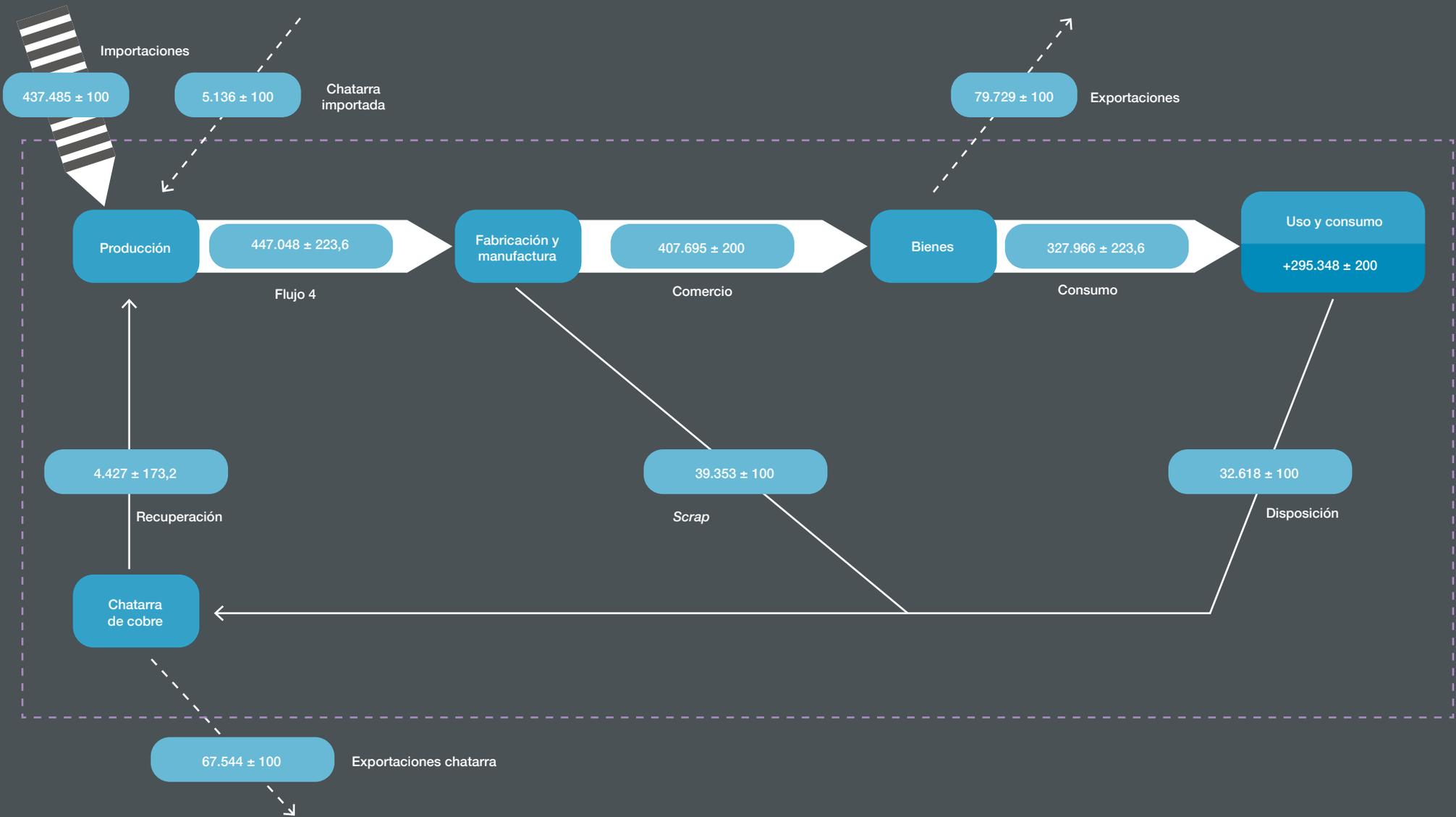
**Fuente:** European Commission (2017) y Minambiente (2022).

Finalmente, se estima que la producción nacional de cobre es de 10.464 toneladas al año<sup>5</sup> y que el principal proceso industrial para producir cobre es la producción secundaria. Sin embargo, esta producción no alcanza a igualar el consumo nacional, por ello

las importaciones y exportaciones juegan un papel importante en la dinámica de estos materiales en el país. Para establecer las cantidades que ingresan en el sistema, el Minambiente realizó una consultoría en la que se identificaron y cuantificaron, a partir

de información secundaria, los flujos de masa del cobre según su ciclo de vida (ver ilustración 8). Para ampliar la información sobre este tema se invita a revisar el Anexo 1, *Identificación y cuantificación de flujos de masa de los metales*.

5. Dato promedio durante 2016 a 2019.



**Ilustración 8.** Flujo de masa según ciclo de vida del cobre, 2019  
**Fuente:** Minambiente (2022).

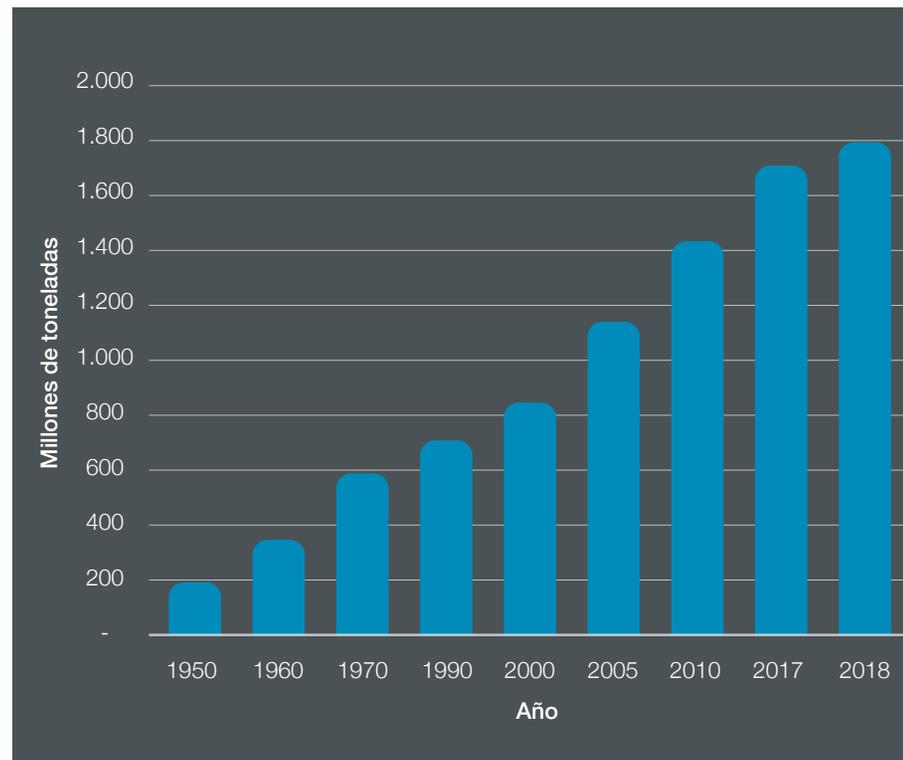
## 2.2 Aspectos económicos de los metales

### 2.2.1 Acero

La producción mundial de acero ha venido en aumento. En el 2018 se estimó que esta llegó a 1.780 millones de toneladas (ANDI, 2018a), de las cuales China era el principal productor mundial, seguido por India (ver gráfica 1).

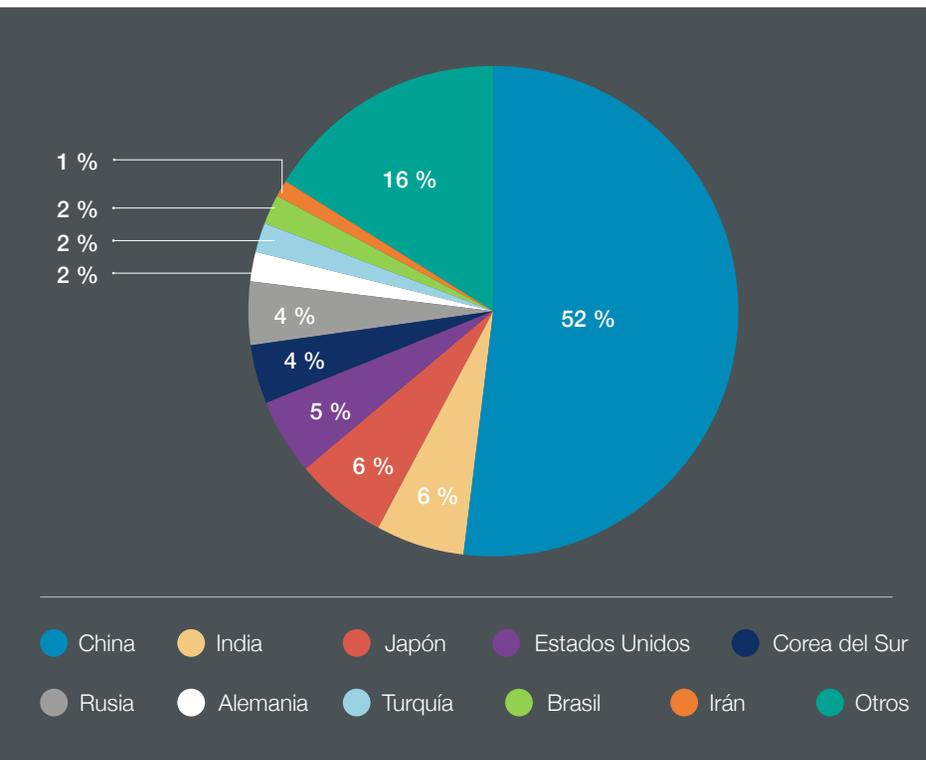
Gráfica 1. Producción mundial de acero

Fuente: ANDI (2018a).



Gráfica 2. Distribución de la producción mundial de acero

Fuente: ANDI (2018a).



Diferentes estudios indican que la demanda de este metal seguirá creciendo a un ritmo más lento que en los últimos años. De acuerdo con datos de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), la capacidad mundial de la industria siderúrgica se ha visto más que duplicada desde el 2000. Según el reporte del Global Forum of Steel Excess Capacity del G-2, este exceso de capacidad es un problema que afecta gravemente al sector y Colombia no es ajena a esta realidad (ANDI, 2018a). La sobrecapacidad ha generado efectos negativos en los precios, la rentabilidad y el empleo, además de distorsiones comerciales

que ponen en riesgo la existencia de la industria, crean desequilibrios regionales y desestabilizan las relaciones comerciales (ANDI, 2018a). Se estima que la diferencia entre la producción de acero y la demanda mundial es de 577 millones de toneladas (ANDI, 2018a).

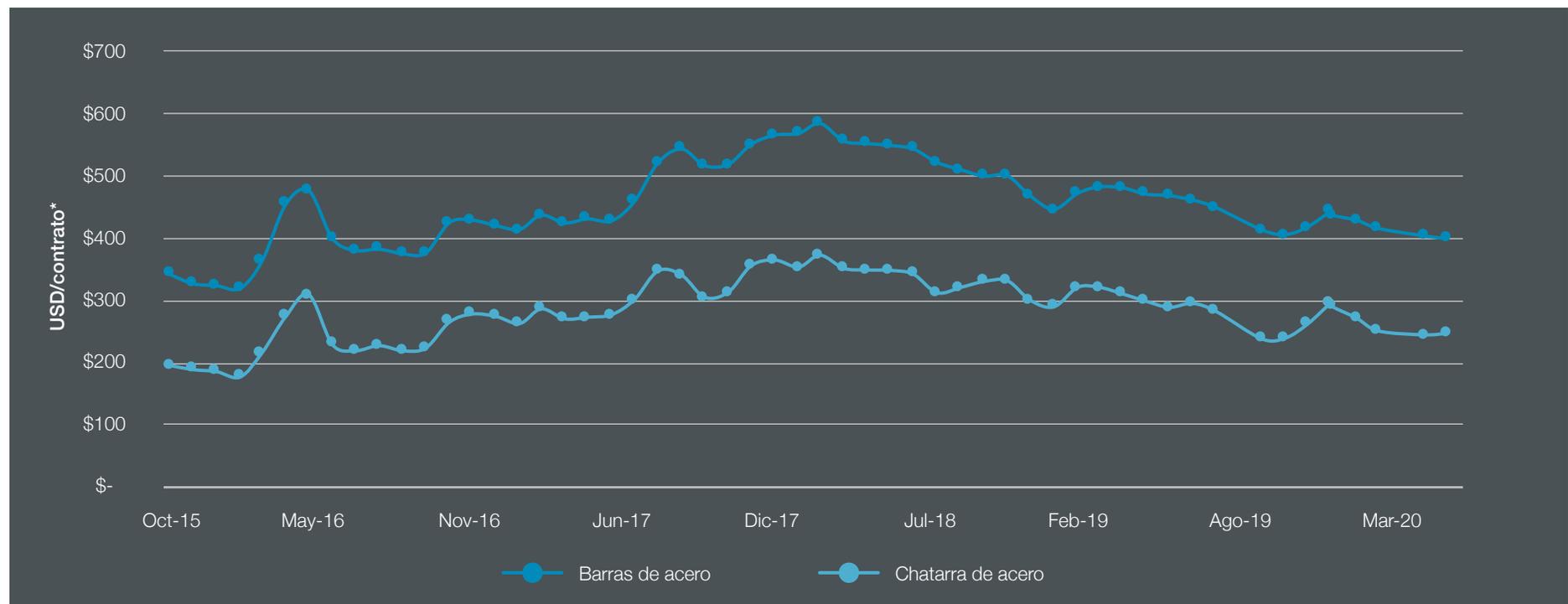
Por otra parte, los insumos necesarios para producir este metal se han visto en aumento, como carbón, ferroaleaciones y electrodos. China, principal productor, ha puesto restricción en la oferta de algunos de estos insumos (ANDI, 2018a). A su vez, los precios internacionales de la chatarra han

aumentado a causa de una mayor producción de acero a partir de chatarra en hornos de arco eléctrico (ANDI, 2018a). Estos incrementos han generado impactos directos en el precio internacional del acero, cerca de 65 % del costo total del producto. Contratos del London Metal Exchange (LME) exponen el comportamiento de los precios de las barras de acero y la chatarra desde el 2015. La chatarra de acero presentó valores entre \$372 y \$177 USD, con un promedio de \$285 USD, mientras las barras de acero presentaron valores entre \$584 y \$318 USD, con un promedio de \$456 USD.

**Gráfica 3.** Comportamiento de los precios internacionales de las barras de acero y chatarra

\*Para estos insumos, el contrato equivale a 10 toneladas.

Fuente: LME (2020).

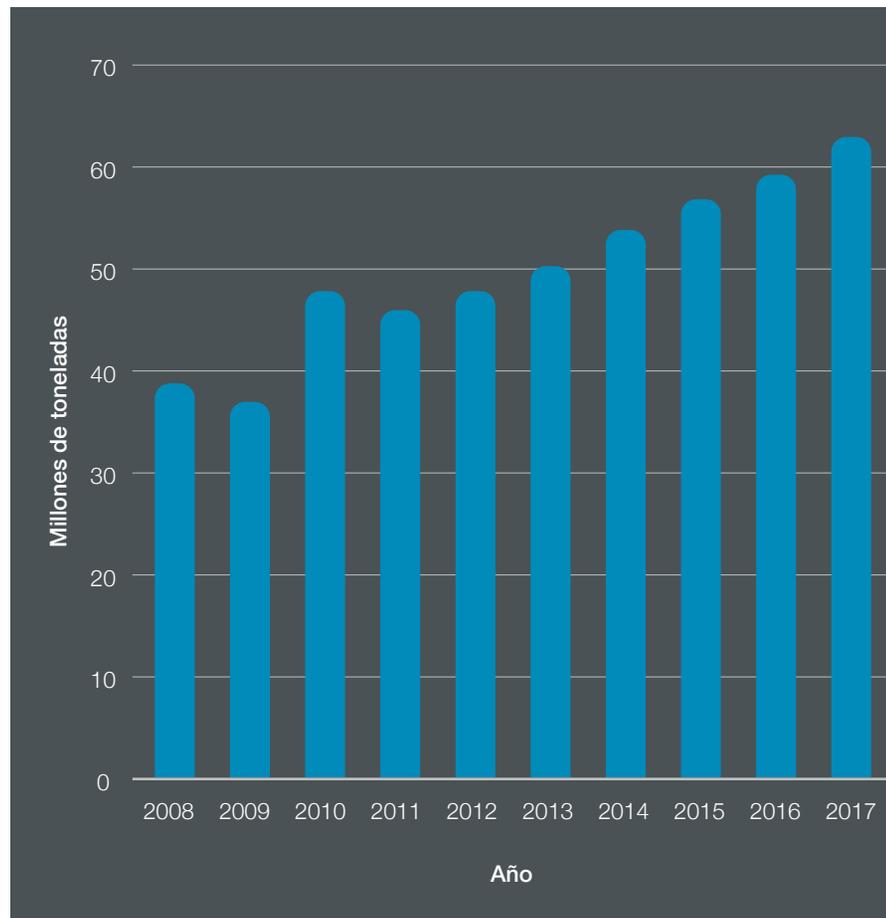


## 2.2.2 Aluminio

La producción mundial de aluminio ha venido en aumento. En el 2017 se estimó que esta había llegado a 63 millones de toneladas (UPME, 2018a), de las cuales China es el principal productor mundial, seguido por Rusia.

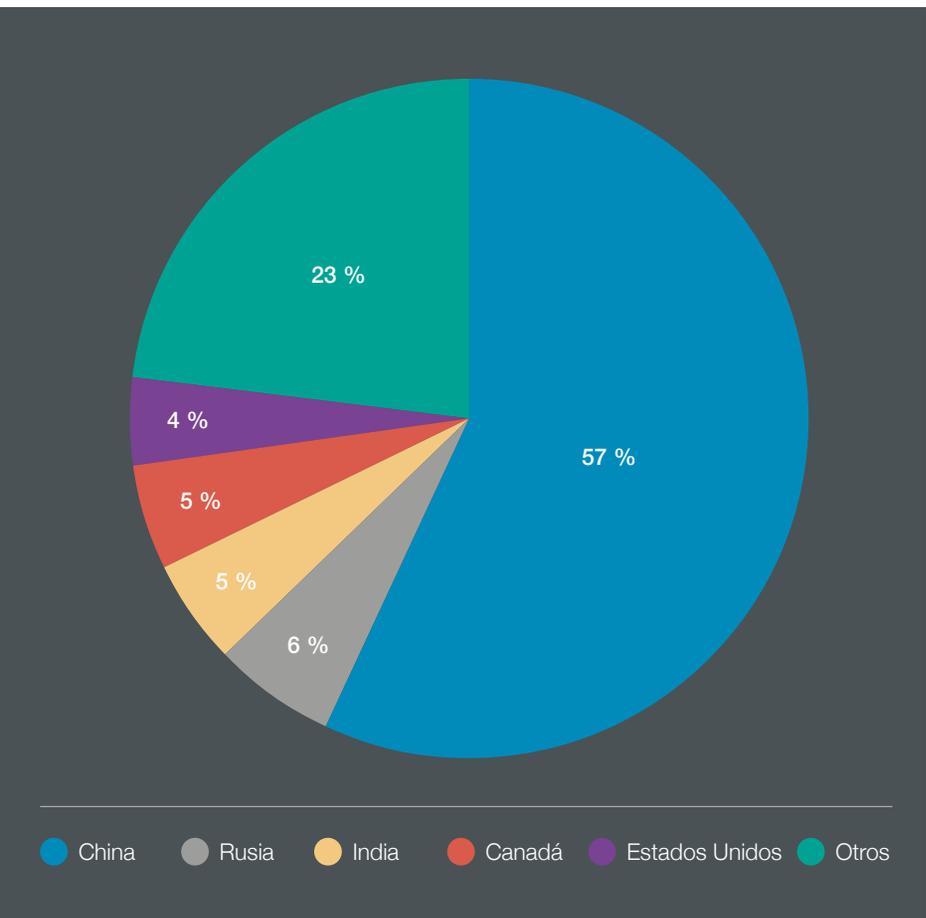
**Gráfica 4.** Producción mundial de aluminio

Fuente: UPME (2018a).



**Gráfica 5.** Distribución de la producción mundial de aluminio

Fuente: UPME (2018a).



Se estimó que el consumo mundial de aluminio en el 2017 fue de 87 millones de toneladas, de las cuales aproximadamente 72 % provinieron de fuentes primarias y el restante, de metal reciclado. Más de 60 % de este metal se utiliza para la producción

de extrusiones, cintas y cables. Según los precios de contratos del LME, los precios internacionales del aluminio en los últimos diez años presentaron valores entre \$2.797 y \$1.432 USD, con un promedio de \$1.950 USD<sup>6</sup>.

Finalmente, la demanda del aluminio se ha visto impulsada por China como principal consumidor, seguido por Estados Unidos. El balance del mercado del aluminio proyecta un déficit a mediano plazo, lo que llevaría sus precios al alza (UPME, 2018a).

**Gráfica 6.** Precios internacionales del aluminio

\*Para este insumo, el contrato equivale a 25 toneladas.

Fuente: LME (2020).

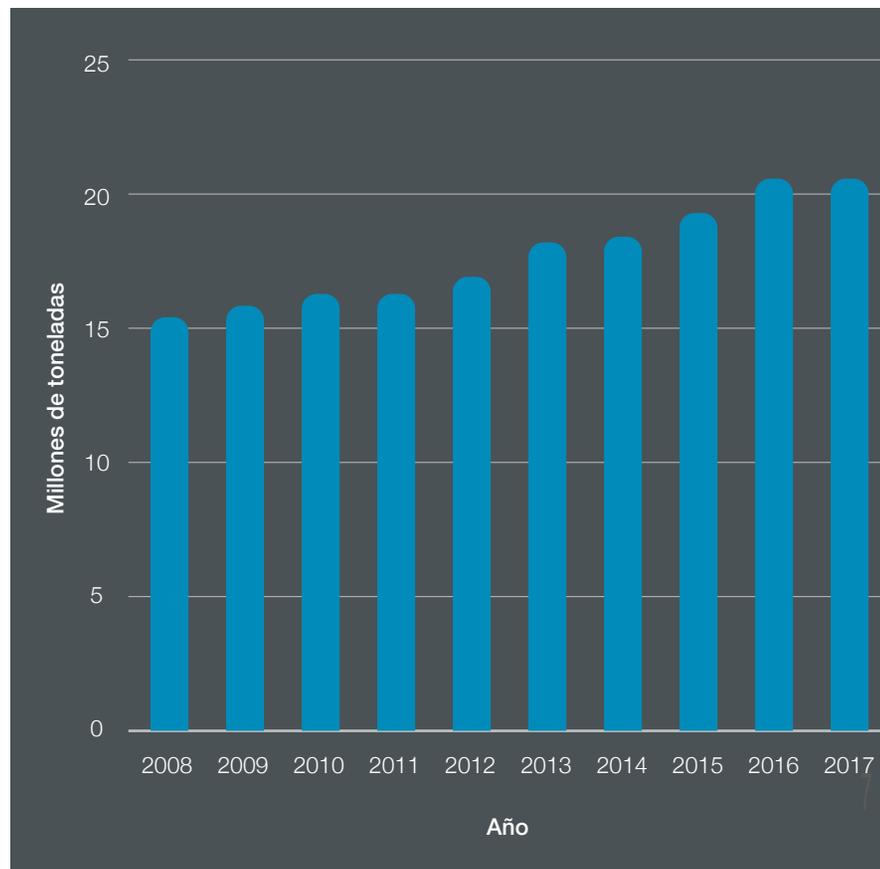


6. Análisis desde el 1 de enero del 2010 hasta el 1 de enero del 2020.

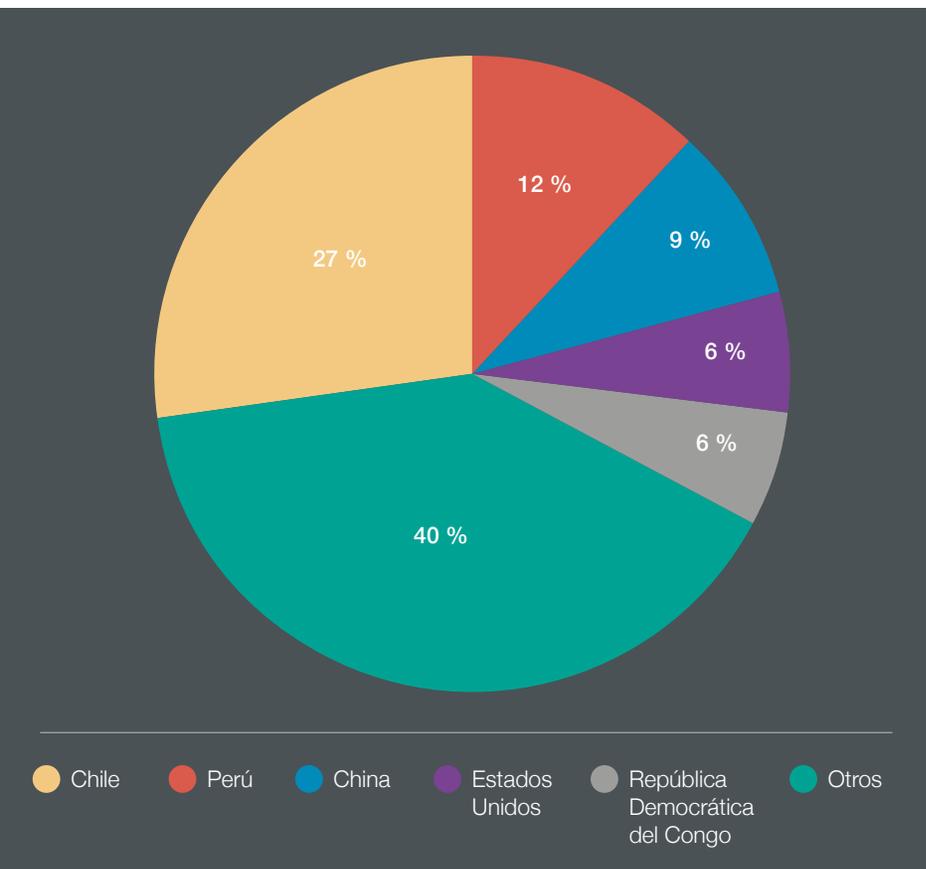
## 2.2.3 Cobre

La producción mundial de cobre en mina ha venido en aumento. En el 2017 se estimó que llegó a 20 millones de toneladas (UPME, 2018c), de las cuales Chile es el principal productor mundial, seguido por Perú (ver gráfica 8). China es el principal productor de cobre secundario.

**Gráfica 7.** Producción mundial de cobre en mina  
Fuente: UPME (2018a).



**Gráfica 8.** Distribución de la producción mundial de cobre en mina  
Fuente: UPME (2018a).



Se estimó que el consumo mundial de cobre en el 2017 fue de 22,9 millones de toneladas, de las cuales 73 % se utilizó para la producción de alambroón utilizado en la fabricación de conductores eléctricos usando la técnica de trefilación (UPME, 2018c). China es el principal consumidor de cobre refinado, seguido por Estados Unidos; sin embargo, se ha observado

que países en vía de desarrollo tienden a tener consumos altos de este metal debido a que están desarrollando procesos de industrialización y aumento de redes eléctricas (UPME, 2018c). Según los precios de contratos del LME, los precios internacionales del cobre en los últimos diez años presentaron valores entre \$4.625 y \$1.937 USD, con un promedio de \$3.068 USD<sup>7</sup>.

Finalmente, el balance del mercado del cobre proyecta un déficit a largo plazo, lo que llevaría a aumentos en el precio para incentivar nuevas inversiones (UPME, 2018c).

**Gráfica 9.** Precios internacionales del cobre

\*Para este insumo, el contrato equivale a 25.000 libras.

**Fuente:** LME (2020).



7. Análisis desde 1 de enero de 2010 hasta el 1 de enero de 2020.

## 2.3 Aspectos ambientales en la producción de metales

En la actualidad, las empresas dedicadas a la producción de metales a partir de chatarra deben cumplir con un marco legal ambiental, el cual se puede agrupar en cuatro grandes temáticas: aire, agua, suelo y residuos.

Para cada una de estas temáticas existen una serie de normas, su cumplimiento es controlado por las autoridades ambientales. La tabla 2 presenta *grosso modo* una recopilación de la normativa ambiental vigente.



**Tabla 2.** Aspectos regulados en la normatividad colombiana

Tema	Disposición	Descripción
Aire	Decreto 1076 de 2015 (antes Decreto 948 de 1995)	Por el cual se reglamentan, parcialmente, la Ley 23 de 1973; los artículos 33, 73, 74, 75 y 76 del Decreto-Ley 2811 de 1974; los artículos 41, 42, 43, 44, 45, 48 y 49 de la Ley 9 de 1979; y la Ley 99 de 1993, relacionados con la prevención y control de la contaminación atmosférica y con la protección de la calidad del aire.
	Resolución 909 de 2008	Por la cual se establecen las normas y los estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas, y se dictan otras disposiciones.
	Resolución 1111 de 2013	Por la cual se modifica la Resolución 910 de 2008.
	Ley 769 de 2002	Por la cual se expide el Código Nacional de Tránsito Terrestre y se dictan otras disposiciones.
	Resolución 5600 de 2006	Por la cual se establecen las características del formato uniforme de los resultados de la revisión técnico mecánica y de gases, y las del certificado de la revisión técnico mecánica y de gases, de conformidad con el artículo 53 de la Ley 769 de 2002.
	Ley 1383 de 2010	Por la cual se reforma la Ley 769 de 2002, <i>Código Nacional de Tránsito</i> , y se dictan otras disposiciones.
	Decreto 1697 de 1997	Por el cual se modifica, parcialmente, el Decreto 948 de 1995, que contiene el Reglamento de Protección y Control de la Calidad del Aire.

Tema	Disposición	Descripción
Aire	Resolución 1807 de 2012	Por la cual se modifica el último párrafo del numeral 4.4 del capítulo 4 del Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas, adoptado a través de la Resolución 760 de 2010 y ajustado por las Resoluciones 2153 de 2010 y 0591 de 2012, y se adoptan otras disposiciones.
	Resolución 1632 de 2012	Por la cual se adiciona el numeral 4.5 al capítulo 4 del Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas, adoptado a través de la Resolución 760 de 2010 y ajustado por la Resolución 2153 de 2010, y se adoptan otras disposiciones.
	Resolución 935 de 2011	Por la cual se establecen los métodos para la evaluación de emisiones contaminantes por fuentes fijas y se determina el número de pruebas o corridas para la medición de contaminantes en fuentes fijas.
	Resolución 1377 de 2015	Por la cual se modifica la Resolución 909 de 2008 y se adoptan otras disposiciones.
	Resolución 2153 de 2010	Por la cual se adopta el Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas.
	Resolución 760 de 2010	Por la cual se adopta el Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas.
	Resolución 1309 de 2010	Por la cual se modifica la Resolución 909 del 5 de junio de 2008.
	Resolución 0591 de 2012	Por la cual se modifica el último párrafo del numeral 4.4 del capítulo 4 del Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas, adoptado a través de la Resolución 760 de 2010 y ajustado por la Resolución 2153 de 2010, y se adoptan otras disposiciones.
	Ley 306 de 1996	Por la cual se aprueba la Enmienda de Copenhague al Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono, suscrito en Copenhague el 25 de noviembre de 1992.
	Ley 29 de 1992	Por la cual se aprueba el Protocolo de Montreal relativo a las sustancias agotadoras de la capa de ozono, suscrito en Montreal el 16 de septiembre de 1987, con sus enmiendas adoptadas en Londres el 29 de junio de 1990 y en Nairobi el 21 de junio de 1991.
Resolución 2749 de 2017	Por la cual se prohíbe la importación de las sustancias agotadoras de la capa de ozono listadas en los grupos II y III del anexo C del Protocolo de Montreal, se establecen medidas para controlar las importaciones de las sustancias agotadoras de la capa de ozono listadas en el grupo I del anexo C del Protocolo de Montreal y se adoptan otras disposiciones.	
Resolución 2120 de 2006	Por la cual se prohíbe la importación de las sustancias agotadoras de la capa de ozono listadas en los grupos II y III del anexo C del Protocolo de Montreal, y se establecen medidas para controlar las importaciones de las sustancias agotadoras de la capa de ozono listadas en el grupo I del anexo C del Protocolo de Montreal.	

Tema	Disposición	Descripción
Aire	Resolución 301 de 2008	Por la cual se adoptan medidas tendientes a prohibir el uso de los clorofluorocarbonos (CFC).
	Ley 1196 de 2008	Por la cual se aprueba el Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes (COP), suscrito en Estocolmo el 22 de mayo de 2001; la corrección al artículo 1.º del texto original en español, del 21 de febrero de 2003; y el Anexo G al Convenio de Estocolmo, del 6 de mayo de 2005.
	Resolución 2254 de 2017	Por la cual se adopta la Norma de Calidad del Aire Ambiente y se dictan otras disposiciones.
	Resolución 898 de 1995	Por la cual se regulan los criterios ambientales de calidad de los combustibles líquidos y sólidos utilizados en hornos y calderas de uso comercial e industrial y en motores de combustión interna de vehículos automotores.
	Decreto 1228 de 1997	Por el cual se modifica, parcialmente, el Decreto 948 de 1995 que contiene el Reglamento de Protección y Control de la Calidad del Aire.
	Resolución 623 de 1998	Por la cual se modifica, parcialmente, la Resolución 898 de 1995 que regula los criterios ambientales de calidad de los combustibles líquidos y sólidos utilizados en hornos y calderas de uso comercial e industrial y en motores de combustión interna.
	Resolución 447 de 2003	Por la cual se modifica, parcialmente, la Resolución 898 del 23 de agosto de 1995 que regula los criterios ambientales de calidad de los combustibles líquidos y sólidos utilizados en hornos y calderas de uso comercial e industrial y en motores de combustión interna.
	Resolución 627 de 2006	Por la cual se establece la Norma Nacional de Emisión de Ruido y Ruido Ambiental.
	Decreto 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

Tema	Disposición	Descripción
Agua	Resolución 631 de 2015	Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, y se dictan otras disposiciones.
	Resolución 2659 de 2015	Por la cual se modifica el artículo 21 de la Resolución 631 de 2015.
	Decreto 1076 de 2015 (Decreto 3930 de octubre 25 de 2010)	Por el cual se reglamenta, parcialmente, el título I de la Ley 9.ª de 1979, así como el capítulo II del título VI, parte III, libro II, del Decreto-Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos, y se dictan otras disposiciones.
	Decreto 2667 de 2012	Por el cual se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones.
	Decreto 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.
	Ley 9 de 1979	Por la cual se dictan medidas sanitarias.
	Decreto 4728 de 2010	Por el cual se modifica, parcialmente, el Decreto 3930 de 2010.
	Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA) y se dictan otras disposiciones.
	Ley 373 de 1997	Por la cual se desarrolla el artículo 87 de la Constitución Política.
	Decreto 3102 de 1997	Por el cual se reglamenta el artículo 15 de la Ley 373 de 1997 en relación con la instalación de equipos, sistemas e implementos de bajo consumo de agua.

Tema	Disposición	Descripción
Agua	Decreto 1076 de 2015 (Decreto 155 de 2004)	Por el cual se reglamenta el artículo 43 de la Ley 99 de 1993, sobre tasas por utilización de aguas, y se adoptan otras disposiciones.
	Decreto 1076 de 2015 (Decreto 303 de 2012)	Por el cual se reglamenta, parcialmente, el artículo 64 del Decreto-Ley 2811 de 1974 en relación con el Registro de Usuarios del Recurso Hídrico y se dictan otras disposiciones.
	Decreto 1076 de 2015 (Decreto 1541 de 1978)	Por el cual se reglamenta la parte III del libro II del Decreto-Ley 2811 de 1974, <i>De las aguas no marítimas</i> , y parcialmente la Ley 23 de 1973.
	Resolución 491 de 2010	Por la cual se presenta el proyecto de resolución <i>Por la cual se adoptan de manera transitoria medidas tarifarias para incentivar el uso eficiente y de ahorro del agua y desestimular su uso excesivo</i> , y se inicia el proceso de discusión con la ciudadanía.
	Decreto 1575 de 2007	Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano.
	Resolución 1207 de 2014	Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas.
	Decreto 1155 de 2017	Por el cual se modifican los artículos 2.2.9.6.1.9., 2.2.9.6.1.10. y 2.2.9.6.1.12. del libro 2, parte 2, título 9, capítulo 6, sección 1 del Decreto 1076 de 2015, <i>Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible</i> , en lo relacionado con la tasa por utilización de aguas, y se dictan otras disposiciones.
	Decreto 075 de 2017	Por el cual se modifican el literal h del artículo 2.2.9.3.1.2, el párrafo del artículo 2.2.9.3.1.3., el artículo 2.2.9.3.1.8 y el numeral 4 del artículo 2.2.9.3.1.17 del Decreto 1076 de 2015 en lo relacionado con la inversión forzosa por la utilización del agua tomada directamente de fuentes naturales, y se toman otras determinaciones.

Tema	Disposición	Descripción
Suelo	Decreto 1076 de 2015	Por el cual se reglamenta el título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales.
	Ley 388 de 1997	Por la cual se modifica la Ley 9.ª de 1989 y la Ley 3.ª de 1991, y se dictan otras disposiciones.
	Decreto Ley 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.
	Decreto 3600 de 2007	Por el cual se reglamentan las disposiciones de las Leyes 99 de 1993 y 388 de 1997 relativas a las determinantes de ordenamiento del suelo rural y al desarrollo de actuaciones urbanísticas de parcelación y edificación en este tipo de suelo, y se adoptan otras disposiciones.
Residuos	Resolución 1446 de 2005	Por la cual se modifica, parcialmente, la Resolución 415 del 13 de marzo de 1998 que establece los casos en los cuales se permite la combustión de aceites de desecho o usados y las condiciones técnicas para realizar la misma.
	Decreto Ley 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.
	Ley 9 de 1979	Por la cual se dictan medidas sanitarias.
	Decreto 2981 de 2013	Por el cual se reglamenta la prestación del servicio público de aseo.
	Resolución 472 de 2017	Por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición (RCD) y se dictan otras disposiciones.
	Decreto 1077 de 2015	Por el cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio.
Ley 1259 de 2008	Por el la cual se instaura en el territorio nacional la aplicación del comparendo ambiental a los infractores de las normas de aseo, limpieza y recolección de escombros, y se dictan otras disposiciones.	

Tema	Disposición	Descripción
Residuos	Ley 1466 de 2011	Por el cual se adicionan el inciso 2.º del artículo 1.º (objeto) y el inciso 2.º del artículo 8.º de la Ley 1259 del 19 de diciembre de 2008, por medio de la cual se instauró en el territorio nacional la aplicación del comparendo ambiental a los infractores de las normas de aseo, limpieza y recolección de escombros, y se dictan otras disposiciones.
	Ley 253 de 1996	Por medio de la cual se aprueba el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, suscrito en Basilea el 22 de marzo de 1989.
	Decreto 1076 de 2015 (Decreto 4741 de 2005)	Por el cual se reglamenta, parcialmente, la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral.
	Resolución 1362 de 2007	Por la cual se establecen los requisitos y el procedimiento para el Registro de Generadores de Residuos o Desechos Peligrosos, al que hacen referencia los artículos 27 y 28 del Decreto 4741 del 30 de diciembre de 2005.
	Ley 1252 de 2008	Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones.
	Resolución 1402 de 2006	Por la cual se desarrolla, parcialmente, el Decreto 4741 del 30 de diciembre de 2005 en materia de residuos o desechos peligrosos.
	Decreto 780 de 2016 (Decreto 351 de 2014)	Por el cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en la atención en salud y otras actividades.
	Resolución 1164 de 2002	Por la cual se adopta el Manual de Procedimientos para la Gestión Integral de los Residuos Hospitalarios y Similares.
	Decreto 1079 de 2015 (Decreto 1609 de 2002)	Por el cual se reglamenta el manejo y transporte terrestre automotor de mercancías peligrosas por carretera.
	Decreto 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

Tema	Disposición	Descripción
Residuos	Resolución 90874 de 2014	Por la cual se establecen los requisitos y procedimientos para la expedición de autorizaciones para el empleo de fuentes radiactivas y de las inspecciones de las instalaciones radiactivas.
	Resolución 180005 de 2010	Por la cual se adopta el Reglamento para la Gestión de los Desechos Radiactivos en Colombia.
	Ley 1672 de 2013	Por la cual se establecen los lineamientos para la adopción de una política pública de gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y se dictan otras disposiciones.
	Resolución 222 de 2011	Por la cual se establecen requisitos para la gestión ambiental integral de equipos y desechos que consisten, contienen o están contaminados con bifenilos policlorados (PCB).
	Resolución 1741 de 2016	Por la cual se modifica la Resolución 222 de 2011 y se adoptan otras disposiciones.
	Resolución 1297 de 2010	Por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de residuos de pilas y/o acumuladores, y se adoptan otras disposiciones.
	Resolución 2246 de 2017	Por la cual se modifica el artículo 10 de la Resolución 1297 de 2010 y se dictan otras disposiciones.
	Resolución 372 de 2009	Por la cual se establecen los elementos que deben contener los planes de gestión de devolución de productos posconsumo de baterías usadas plomo-ácido, y se adoptan otras disposiciones.
	Resolución 1738 de 2009	Por la cual se suprime el requisito establecido en el párrafo 2.º del artículo 11 de la Resolución 372 de 2009.
	Resolución 1326 de 2017	Por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de llantas usadas y se dictan otras disposiciones.

Tema	Disposición	Descripción
Residuos	Resolución 1511 de 2010	Por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de residuos de bombillas y se adoptan otras disposiciones.
	Resolución 1512 de 2010	Por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de residuos de computadores y/o periféricos, y se adoptan otras disposiciones.
	Resolución 1675 de 2013	Por la cual se establecen los elementos que deben contener los planes de gestión de devolución de productos posconsumo de plaguicidas.
	Resolución 0407 de 2014	Por la cual se modifica la Resolución 1086 del 18 de diciembre de 2012, modificada parcialmente por la Resolución 0122 del 5 de febrero de 2013, por la cual se fijan las tarifas para el cobro de los servicios de evaluación y seguimiento de licencias, permisos, autorizaciones y demás instrumentos de control y manejo ambiental, y se dictan otras disposiciones
	Resolución 2309 de 1986	Por la cual se dictan normas para el cumplimiento del título III de la parte 4.ª del libro 1.º del Decreto-Ley 2811 de 1974 y de los títulos I, II y XI de la Ley 09 de 1979 en cuanto a residuos especiales.
	Ley 1623 de 2013	Por la cual se aprueba la enmienda al Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos y su eliminación, del 22 de marzo de 1989, adoptada por la Tercera Reunión de la Conferencia de las Partes en Ginebra, el 22 de septiembre de 1995.

# 3.

Estimación de liberación de contaminantes orgánicos persistentes no intencionales en el sector de producción de metales

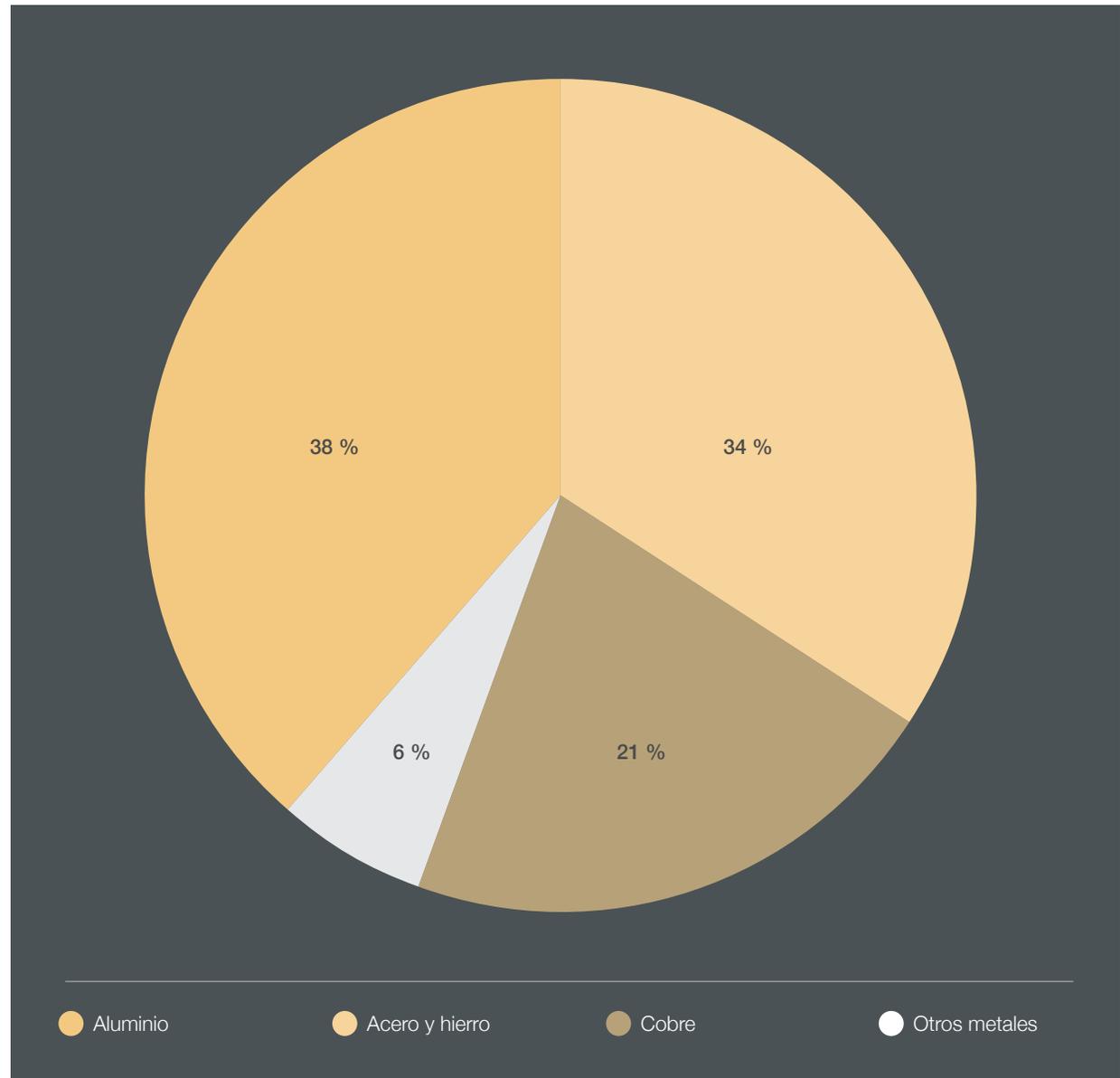
**Gráfica 10.** Distribución de la liberación nacional de PCDD y de PCDF en el sector metales, 2018

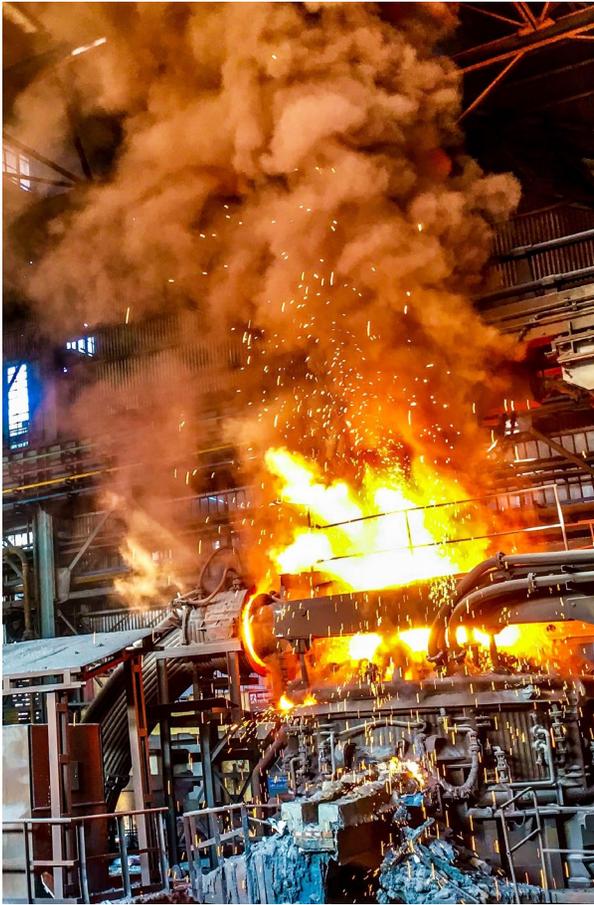
**Fuente:** Minambiente (2021).

Las sustancias consideradas como COP no intencionales son PCDD, PCDF, PCB, hexaclorobenceno (HCB), hexaclorobutadieno (HCBd), naftalenos policlorados (PCN) y pentaclorobenceno (PeCB) (UNEP, 2009). Además de tener un alto nivel de toxicidad, estas sustancias se bioacumulan en los seres vivos, se transportan grandes distancias y no se degradan con facilidad en el ambiente, por lo que se consideran persistentes. Estos contaminantes suelen ser solubles en grasas y acumularse en los niveles tróficos superiores; en particular, en los seres humanos. Igualmente, por sus características semivolátiles, experimentan evaporación y condensaciones en el ambiente, lo que las hace móviles (PNUMA, 2007).

De acuerdo con la actualización del Inventario Nacional de Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP) No Intencionales, desarrollada por el Minambiente, el país tiene una liberación anual de 276 gramos de concentración de equivalentes tóxicos al año, de la cual la industria de producción de metales (grupo 2) aporta, aproximadamente, 36,3 gramos de concentración de equivalentes tóxicos al año, lo que corresponde a 12,1 % de la emisión total del país<sup>8</sup>. Las principales causas de esta situación es que están llegando al proceso de fundición sustancias que son precursoras de COP no intencionales —como carcasas, aceites, entre otras— en la chatarra que alimenta los hornos, y la ausencia de sistemas de control de emisiones que tengan como objetivo la destrucción de los COP no intencionales —como *hot quenching towers* (HQT)—. Estos fenómenos también se dan en la producción de acero, aluminio y cobre.

8. En este grupo se incluye la producción de acero, aluminio, cobre, bronce, latón, entre otros metales.

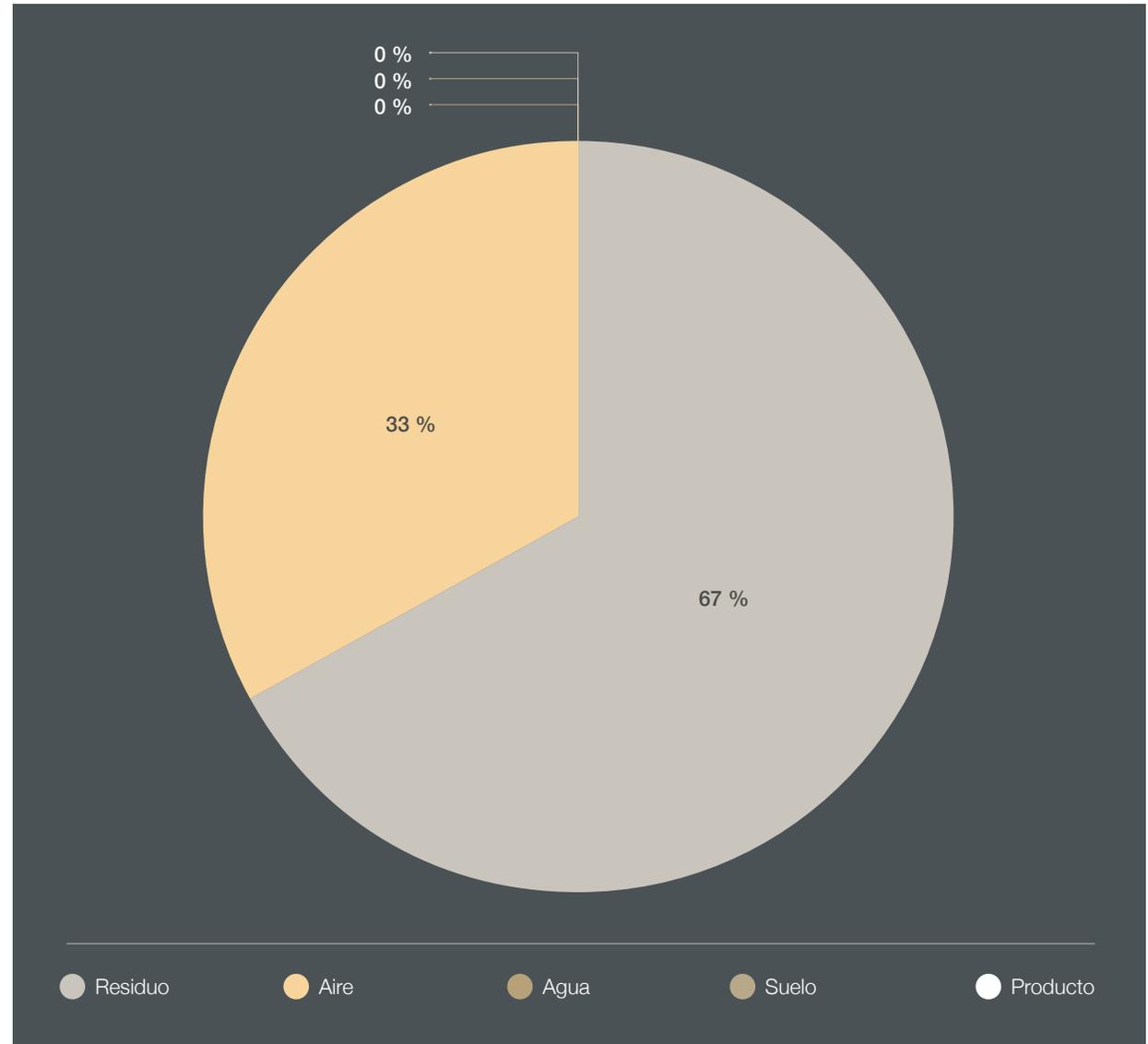




De acuerdo con el Inventario, al analizar las matrices ambientales —agua, aire, residuo, producto y suelo— a las cuales son enviadas estas sustancias, se encuentra que estas en su mayoría van a los residuos en forma de escoria de procesos o polvo retenido por el sistema de control de emisiones cuando este no está diseñado para evitar la formación de COP no intencionales, o por las liberaciones al aire en forma de emisiones.

**Gráfica 11.** Destino de la liberación nacional de PCDD y de PCDF en el sector metales

Fuente: Minambiente (2021).



# 4.

## Evaluación de la aplicación de las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales

---

A continuación se presentan las MTD y las MPA recopiladas de los documentos *Directrices sobre mejores técnicas disponibles y orientación provisional sobre mejores prácticas ambientales conforme al artículo 5 y Anexo C del Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes*, publicado por la UNEP, *Best Available Techniques (BAT): Reference Document for Iron and Steel Production 2012* y *Best Available Techniques (BAT): Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries 2017* de la European Commission's science and knowledge service. La evaluación de implementación de las MTD y las MPA se basó en revisiones de expedientes de emisiones atmosféricas de las autoridades ambientales y en visitas realizadas a diferentes plantas del país.

## 4.1 Descripción de las mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales de acuerdo con el Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes

El concepto de MTD no está dirigido a la prescripción de una técnica o tecnología específica, sino a tener en cuenta las características técnicas de la instalación, su ubicación geográfica y las condiciones ambientales locales. Al determinar las MTD se debe prestar especial atención a los costos y beneficios probables de la puesta en marcha, así como a las consideraciones de precaución y prevención.

Las medidas para evaluar la viabilidad son:

### **a. Consideraciones generales**

Se evalúa la naturaleza, los efectos y la masa de las emisiones, las cuales pueden variar según el tamaño de la fuente.

**i.** Fechas de puesta en servicio de las instalaciones nuevas o existentes.

**ii.** Tiempo necesario para incorporar la MTD.

**iii.** Consumo y naturaleza de las materias primas utilizadas en el proceso y su eficiencia energética.

**iv.** Necesidad de evitar o reducir al mínimo el impacto general de las liberaciones al ambiente y los peligros que representan.

**v.** Necesidad de evitar accidentes y reducir al mínimo sus consecuencias para el ambiente.

**vi.** Necesidad de proteger la salud ocupacional y la seguridad en los lugares de trabajo.

**vii.** Procesos, instalaciones o métodos de funcionamiento comparables que se han ensayado con resultados satisfactorios a escala industrial.

**viii.** Avances tecnológicos y comprensión en el ámbito científico.

### **b. Medidas de reducción de las liberaciones de carácter general**

Al examinar las propuestas de construcción o de modificación de instalaciones existentes que utilicen procesos que liberan COP no intencionales, deberán considerarse de manera prioritaria los procesos, las técnicas o las prácticas de carácter alternativo que tengan similar utilidad, pero que eviten la formación y liberación de esos contaminantes.

Se recomienda considerar las siguientes medidas de reducción:

**i.** Empleo de sistemas de control de emisiones, como la oxidación térmica o catalítica, la precipitación de polvos, el uso de filtros de mangas o la adsorción con carbón activado.

**ii.** Tratamiento de residuos, aguas residuales, desechos y lodos de alcantarillado; por ejemplo, tratamiento térmico o mediante procesos químicos que les quiten la toxicidad.

**iii.** Cambios de los procesos que den lugar a la reducción o eliminación de las liberaciones, tales como la adopción de sistemas cerrados.

**iv.** Modificación del diseño de los procesos para mejorar la combustión y evitar la formación de estos contaminantes mediante el control de parámetros, como temperatura de incineración o tiempo de residencia.

Estas medidas se pueden dividir en dos de acuerdo con su efectividad en reducir los impactos al ambiente. Por una parte, las medidas primarias son aquellas medidas de prevención de la contaminación que evitarán y reducirán la formación y liberación de sustancias COP no intencionales<sup>9</sup>, algunas veces se las denomina medidas de optimización o integración de procesos. Por otra parte, las medidas secundarias son tecnologías o técnicas para controlar la contaminación, denominadas también como tratamientos de final de proceso. El proceso ideal es la aplicación en conjunto de las MTD y las MPA para asegurar la mayor disminución y reducción de emisiones.

## 4.1.1 Mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales en la producción del acero

Existen dos métodos de producir acero que son llevados a cabo en el país y que utilizan técnicas diferentes.

### 4.1.1.1 PRODUCCIÓN PRIMARIA

Se recomienda implementar las siguientes MTD y MPA en cadenas de sinterizado en la producción de acero a partir del mineral hierro.

**Tabla 3.** MTD y MPA recomendadas por el Convenio de Estocolmo en la producción de sinter

Tipo de medida	Acción	Características
Generales	Eliminación del MP de los gases de la sinterización	Una eliminación efectiva del polvo puede ayudar a reducir las emisiones de PCDD y de PCDF, ya que las partículas finas en los gases de escape del sinterizado tienen una superficie extensa para la adsorción y condensación de contaminantes gaseosos (Hofstadler <i>et al.</i> , 2003). La MTD para eliminar el material particulado (MP) es el uso de filtros de mangas, que en plantas de sinterización se asocian a emisiones de MP en concentraciones entre 10 y 30 mg/m <sup>3</sup> (UNECE, 1998; IPPC, 2001). Otras opciones de uso común para el control de MP en los gases residuales de plantas de sinterización son los precipitadores electrostáticos y, en ocasiones, depuradores húmedos, aunque sus eficiencias para la eliminación de partículas no son tan altas como las de los filtros de mangas. Un buen desempeño de los precipitadores electrostáticos y de los depuradores de gas húmedos de alta eficiencia se asocia a concentraciones de MP en concentraciones entre 30 y 50 mg/m <sup>3</sup> (UNECE, 1998).
	Recubrimiento de la cadena de sinterizado	El uso de campanas en la cadena de sinterizado reduce las emisiones fugitivas del proceso y permite aplicar otras técnicas, como la recirculación de gases residuales (PNUMA, 2008).

9. La prevención de la contaminación se define como el «empleo de procesos, prácticas, materiales, productos o energía que impiden o reducen la creación de contaminantes y desechos, y reducen el riesgo general para la salud humana y el ambiente».

Tipo de medida	Acción	Características
Primaria	Funcionamiento estable y uniforme de la cadena de sinterizado	<p>Los PCDD y los PCDF se forman en el mismo lecho de sinterizado, es probable que esto ocurra inmediatamente delante del frente de la llama y a medida que los gases calientes se aspiran a través del lecho. Se ha demostrado que las alteraciones en el frente de la llama, condiciones no estabilizadas, generan mayores emisiones de PCDD y de PCDF (PNUMA, 2008). Las cadenas de sinterizado deberían operar de forma que el proceso se mantenga en condiciones estables y uniformes —es decir, operaciones estabilizadas y pocas alteraciones en el proceso— para disminuir la formación y liberación de PCDD, PCDF y otros contaminantes. Las condiciones operativas que requieren una gestión uniforme son velocidad de la cadena, composición del lecho —mezcla uniforme de los materiales de rechazo y disminución de la entrada de cloro—, altura del lecho, uso de aditivos —por ejemplo, agregar cal quemada puede ayudar a reducir la formación de PCDD y de PCDF—, disminución del contenido de aceite en la cascarilla, reducción de la infiltración de aire a través de la cadena, sistemas de acondicionamiento para la red de tuberías y gases residuales, y reducción de interrupciones en la cadena. Este método generará mejoras en el desempeño operativo, como productividad, calidad del sínter y eficiencia energética (European Commission, 2000).</p>
	Vigilancia continua de parámetros	<p>Debería emplearse un sistema de vigilancia continua de los parámetros para asegurar un funcionamiento óptimo de la cadena de sinterizado y de los sistemas de acondicionamiento para gases residuales. Durante las pruebas de emisiones se miden varios parámetros para determinar la correspondencia entre el valor del parámetro y las emisiones de chimenea. Luego, los parámetros determinados se monitorean de manera constante y se comparan con sus valores óptimos. Las variaciones en los valores de los parámetros pueden notificarse para que se tomen las medidas correctivas con el fin de mantener un funcionamiento óptimo de la cadena de sinterizado y del sistema para control de emisiones (PNUMA, 2008). Los parámetros operativos que hay que vigilar pueden referirse a ajustes del regulador de tiro, caídas de presión, caudal del agua del depurador, opacidad promedio y velocidad de la cadena. Los operadores de plantas de sinterización deberían preparar un plan para el sistema de vigilancia continua de parámetros que abarque instalación, desempeño, operación y mantenimiento, garantía de calidad y registros, así como disponer de procedimientos de notificación. Los operadores deberían tener registros que documenten la conformidad con los requisitos de vigilancia determinados y el plan de mantenimiento y operación (EPA, 2003).</p>
	Recircular gases residuales	<p>El reciclaje de los gases residuales disminuye las emisiones de contaminantes y reduce la cantidad de gases residuales que necesitan tratamiento al final del proceso. La recirculación de una parte de los gases residuales derivados de toda la cadena de sinterizado o la recirculación por secciones puede disminuir la formación y liberación de contaminantes (ECSC, 2003). Reciclar los gases residuales de la sinterización de hierro puede reducir las emisiones de PCDD y de PCDF, óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre. No obstante, esta alternativa también puede provocar una disminución en la producción, afectar la calidad del sínter, una mayor exposición al polvo en el lugar de trabajo y, por ende, un incremento en la frecuencia de mantenimiento. Cualquiera de estas medidas se debe poner en práctica con precaución tomando en consideración su potencial para afectar otros aspectos del funcionamiento de la planta (PNUMA, 2008).</p>

Tipo de medida	Acción	Características
Primaria	Preparar el material de alimentación	Se deben reducir al mínimo las sustancias no deseadas en el alimento para la cadena de sinterizado; en especial, los COP y otros elementos asociados con la formación de PCDD, PCDF, HCB y PCB, como cloro o cloruros, carbono, precursores y aceites. Un control deficiente del material entrante también puede perjudicar el funcionamiento del alto horno. Por ello, debería efectuarse un examen de los materiales de alimentación para determinar su composición, estructura y concentración de sustancias asociadas a COP y su formación. Así mismo, deberían definirse las opciones para eliminar o reducir las sustancias no deseadas en el material de alimentación (PNUMA, 2008). Algunas son: eliminar los contaminantes del material, por ejemplo al desaceitar la cascarilla de laminación; sustituir el material, por ejemplo al reemplazar el coque fino por antracita; evitar el uso de material contaminado, por ejemplo, al evitar procesar los polvos de sinterizados derivados de los precipitadores electrostáticos que, según se ha demostrado, aumentan la formación y liberación de PCDD y de PCDF (Kasai, 2001); especificar los límites de las concentraciones admisibles de sustancias no deseadas, por ejemplo el límite de aceite en el alimento debería ser menor a 0,02 % (EPA, 2003); y formular y aplicar los procedimientos documentados para efectuar los cambios apropiados.
	Inyección de urea	En el Reino Unido se han realizado pruebas que utilizan la inyección de urea para suprimir la formación de PCDD y de PCDF en una planta de sinterización de hierro agregando cantidades controladas de gránulos de urea a la cadena de sinterizado. Se considera que esta técnica previene o reduce tanto los PCDD y los PCDF como las emisiones de dióxido de azufre. Los ensayos indicaron que la formación de PCDD y de PCDF se redujo en 50 % aproximadamente. Se estima que una reducción de 50 % en los PCDD y los PCDF obtendría una concentración de emisiones de 0,5 ng EQT-l/m <sup>3</sup> (PNUMA, 2008).
Secundaria	Inyectar agentes de adsorción/absorción, como carbón activado, al conducto del gas residual	Esta técnica implica la adsorción de PCDD y de PCDF en un material, como carbón activado, junto con un control efectivo del MP (desempolvamiento). En la tecnología para la regeneración de carbón activado se utiliza un precipitador electrostático para reducir la concentración de polvo en los gases de escape antes de su ingreso en la unidad de carbón activado (William Lemmon and Associates Ltd., 2004). El gas residual pasa a través de un lecho móvil lento con gránulos de carbón vegetal que actúa como medio de filtro/adsorción. El carbón usado se descarga y transfiere a un regenerador en el que se lleva a altas temperaturas. Los PCDD y los PCDF adsorbidos al carbón se descomponen y destruyen dentro de la atmósfera inerte del regenerador. Se ha demostrado que esta técnica reduce las emisiones de 0,1 a < 0,3 ng EQT-l/m <sup>3</sup> (PNUMA, 2008).
	Tener un mecanismo de desempolvamiento de alta eficiencia	El sistema de depuración Airfine, de Voest Alpine Industries, Austria, reduce de manera eficaz las concentraciones de emisiones entre 0,2 a 0,4 ng EQT-l/m <sup>3</sup> . El sistema de depuración utiliza un flujo de agua a contracorriente de gas residual en ascenso para depurar las partículas gruesas y los compuestos gaseosos, por ejemplo dióxido de azufre, y enfriar rápido el gas de desecho. También puede usarse un precipitador electrostático corriente arriba para el pre-desempolvamiento y agregarse soda cáustica para mejorar la absorción del dióxido de azufre. Luego un depurador fino, que aplica un chorro de niebla a alta presión de manera simultánea a la corriente de gas, elimina impurezas. Unas toberas de doble flujo expulsan agua y aire comprimido creando gotas microscópicas para eliminar partículas finas de polvo, PCDD y PCDF. Esta técnica debe combinarse con un tratamiento efectivo de las aguas residuales del depurador. Además, los fangos de las aguas residuales deben eliminarse en rellenos sanitarios seguros (European Commission, 2000).

### 4.1.1.1 PRODUCCIÓN SECUNDARIA

Se recomienda implementar las siguientes MTD y MPA en el proceso de producción de acero a partir de chatarra.

**Tabla 4.** MTD y MPA recomendadas por el Convenio de Estocolmo para la producción secundaria de acero

Tipo de medida	Acción	Características
Primarias	Calidad de la materia prima	La materia prima principal que se utiliza en el proceso de fabricación secundaria de acero es chatarra de hierro o acero. En la chatarra suelen encontrarse contaminantes como petróleo, plásticos y otros hidrocarburos. Las prácticas de prevención de la contaminación para evitar o disminuir el ingreso de contaminantes en los hornos para fabricación de hierro y acero implican cambios en las especificaciones del material, mejores programas de control de calidad, cambios en los tipos de materia prima — como controlar el uso de chatarra impregnada de aceites o limpiar este tipo de chatarra— y programas para evitar el ingreso de contaminantes (PNUMA, 2008).
	Operación del horno	Los últimos cambios en las prácticas operativas de hornos de arco eléctrico que se han adoptado para mejorar la eficiencia operativa y energética parecen conllevar beneficios colaterales para reducir los PCDD y los PCDF o, en determinadas condiciones, para dechlorarlos. Las prácticas para prevenir la contaminación que parecen disminuir las emisiones de PCDD y de PCDF consisten en reducir el tiempo de apertura del techo para la carga, reducir la infiltración de aire en el horno y evitar o disminuir los retrasos en la operación. La condensación de PCDD y de PCDF aumenta rápido con temperaturas inferiores a 125 °C, comenzando con las PCDD más cloradas (PNUMA, 2008).
	Diseño del sistema de acondicionamiento de gases residuales	El acondicionamiento de gases residuales consiste en su recolección, enfriamiento y canalización antes de su limpieza en una cámara de filtros. Las condiciones del sistema de acondicionamiento de gases residuales pueden propiciar la formación de PCDD y de PCDF por síntesis de Novo a menos de que se tomen medidas para evitar estas condiciones. Las técnicas de prevención de la contaminación consisten en un sistema bien dimensionado, la maximización de la mezcla de los gases residuales, el enfriamiento rápido de gases residuales por debajo de 200 °C y el establecimiento y ejecución de buenas prácticas de operación y mantenimiento (PNUMA, 2008).
	Sistema de monitoreo continuo de parámetros	Con un sistema de monitoreo continuo de parámetros, concebido para optimizar los parámetros adecuados para el funcionamiento del sistema de acondicionamiento de gases residuales, y mediante procedimientos documentados de operación y mantenimiento, se debería reducir la formación de PCDD y de PCDF por síntesis de Novo en el sistema de acondicionamiento de gases (PNUMA, 2008).

Tipo de medida	Acción	Características
Secundarias	Recolección de polvo mediante filtros de mangas o cámara de filtros	Algunos PCDD y PCDF en los gases residuales de hornos de arco eléctrico se adsorben en MP fino. En la medida en la que la temperatura del gas disminuye con la temperatura de condensación de los distintos congéneres de PCDD y de PCDF, una mayor cantidad de PCDD y de PCDF se adsorbe en las partículas finas o se condensa formando partículas finas. Filtros de mangas bien diseñados y operados logran emisiones de menos de 5 mg de polvo/Nm <sup>3</sup> . Al disminuir los niveles de polvo también disminuyen las emisiones de PCDD y de PCDF.
	Sistema de poscombustión externa en conjunto con enfriamiento rápido del agua	Esta fue la primera técnica de control de emisiones de PCDD y de PCDF que se aplicó a la fabricación de acero con hornos de arco eléctrico. En principio, los sistemas de poscombustión externa se crearon para quemar el monóxido de carbono (CO) y el hidrógeno (H <sub>2</sub> ) presentes en los gases residuales del horno en una cámara de combustión con revestimiento refractario, por lo general con combustible complementario. Posteriormente, varias acerías con hornos de arco eléctrico adoptaron la tecnología de poscombustión externa para declorar las emisiones de PCDD y de PCDF manteniendo la temperatura de poscombustión por encima de 800 °C (PNUMA, 2008). Con esta técnica de control de emisiones no se puede cumplir en todos los casos la norma pancanadiense de 100 pg EQT-I/Nm <sup>3</sup> (0,1 ng EQT-I/Nm <sup>3</sup> ). Puede que para algunas plantas sea difícil instalar cámaras de poscombustión externas y efectuar mejoras en los sistemas de acondicionamiento de gases por problemas de espacio propios del lugar. En algunos hornos, la poscombustión realizada dentro del horno puede contribuir a prevenir emisiones de PCDD y de PCDF (PNUMA, 2008).
	Inyección adsorbente	En principio, esta técnica de control fue creada para controlar las emisiones de PCDD y de PCDF de incineradoras de desechos. La tecnología de inyección de coque de lignito calibrado —el carbón activado es un adsorbente similar— se utiliza en varias acerías europeas con hornos de arco eléctrico para complementar la tecnología de cámara de filtros y obtener bajas concentraciones de PCDD y de PCDF en forma constante. Esta técnica también reduce las emisiones de mercurio (PNUMA, 2008). Los resultados de pruebas de emisiones registrados de acerías con hornos de arco eléctrico en Europa indican que esta técnica, en conjunto con una cámara de filtros de alta eficiencia, permite lograr de manera sistemática concentraciones de PCDD y de PCDF de menos de 0,1 ng EQTI/Nm <sup>3</sup> . No obstante, otras técnicas también pueden ser efectivas para reducir las emisiones a estos niveles. El coque de lignito calibrado se inyecta en los gases residuales antes de la cámara de filtros. El coque, o carbón activado, adsorbe los PCDD y los PCDF presentes en los gases residuales (PNUMA, 2008). Una buena mezcla del coque con los gases residuales y la calibración apropiada del coque —a un tamaño similar a las partículas del flujo de gas— son primordiales para la eliminación óptima de PCDD y de PCDF. La producción de coque de lignito calibrado y el carbón activado no liberan los PCDD ni los PCDF capturados a las temperaturas en las que el producto se almacena y deposita en vertederos, y son resistentes a la lixiviación (PNUMA, 2008).

## 4.1.2 Mejores técnicas disponibles y mejores prácticas ambientales en la producción secundaria del aluminio y el cobre

En el país solo existe producción de aluminio y cobre a partir de chatarra. Se recomienda implementar las siguientes MTD y MPA en las plantas productoras de estos metales.

**Tabla 5.** MTD y MPA recomendadas por el Convenio de Estocolmo para la producción secundaria de cobre y aluminio

Tipo medida	Acción	Característica
Primarias	Pretratamiento de chatarras	<p>Exigencias de calidad al proveedor de chatarra para ingreso a la planta: implementación de estándares de alta calidad al proveedor de chatarra antes del ingreso a la planta, lo que evita compra de chatarra «sucia» por precios económicos atractivos. Esta es una técnica que ha funcionado en diferentes sectores a partir de bonificaciones monetarias que le dan los fundidores a sus proveedores por el cumplimiento de estos estándares, los cuales incentivan a la valorización de elementos presentes en la chatarra de aluminio, como plástico, metales ferrosos, entre otros.</p> <p>Limpieza de chatarra en planta: esta se puede dividir en seis métodos.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Limpieza manual Utiliza herramientas manuales y no eléctricas para eliminar impurezas que puedan removerse solo con esfuerzo humano. A través de este método no es posible remover por completo todas las impurezas presentes en el material de alimentación.</li> <li>2. Limpieza mecánica Utiliza instrumentación eléctrica o neumática para eliminar las impurezas que pueden removerse con estas herramientas. Aunque su efectividad es mayor a la limpieza manual, este método no garantiza pureza total.</li> <li>3. Pirometalurgia Consiste en pasar sobre las superficies metálicas temperaturas medias-elevadas a alta velocidad. Por lo general, se utiliza una flama de acetileno. Su fin es de naturaleza física, como el secado, y química, como la calcinación, tostación o volatilización de las diferentes impurezas (Universidad Técnica de Oruro, s. f.).</li> <li>4. Hidrometalurgia Ocurre en medio acuoso y permite la extracción y obtención de metales o compuestos considerados impurezas para el proceso de fundición y refinación (Universidad de Santiago de Chile, s. f). Es el método más efectivo para el tratamiento del material de alimentación.</li> <li>5. Separación magnética Después del triturado, los trozos son transportados por cintas y el hierro es removido por dispositivos magnéticos; tecnologías modernas, como corriente de Eddy y Foucault, permiten separar los materiales ferrosos y no ferrosos del resto de materiales.</li> <li>6. Separación por densidad relativa Separa el aluminio de otros metales no ferrosos y consiste en el movimiento de los trozos a través de recipientes que contienen fluidos de diferentes densidades. Antes de ir al horno de fundición, durante el almacenamiento, es necesario realizar drenado y secado; de lo contrario, será necesario un proceso extra de secado y, por lo tanto, mayor consumo de energía.</li> </ol>

Tipo medida	Acción	Característica
Primarias	Remoción de aceite y componentes orgánicos de la viruta antes de la fundición	<p>Centrifugación: mediante este proceso a las virutas metálicas altamente contaminadas se les remueve la mayoría de aceites y contaminantes líquidos.</p> <p>Secador rotatorio: este proceso se da a temperaturas controladas entre 300 °C y 400 °C, lo cual logra pirolisis de componentes orgánicos y disminuye la oxidación del metal.</p>
	Control efectivo del proceso	<p>Mantener la estabilidad de los parámetros de operación en todo el proceso: procesos controlados de temperatura y adiciones medidas de fundentes disminuyen la generación de emisiones y reacciones como síntesis de Novo. Por ejemplo, bajar la temperatura durante el proceso de carga.</p> <p>Síntesis de Novo: conversión de macromoléculas de carbono en compuestos aromáticos. Se da en temperaturas entre 200 °C y 500 °C con presencia de carbono, metal traza (cobre, aluminio, hierro), cloro y exceso de oxígeno en la combustión.</p> <p>Presiones negativas dentro del horno: mediante una adecuada relación presión-volumen-temperatura se optimiza el proceso de fundición, ya que al aumentar la presión dentro del horno, la temperatura de fundición también aumenta; sin embargo, el tiempo para fundir se reducirá hasta 70 %. Para lograr esto se requieren sistemas de extracción eficientes que además capturen los gases generados y permitan que la presión interna del horno sea mayor a la atmosférica. Al restar la presión atmosférica con la presión absoluta al interior del horno, se dará un valor negativo, denominado presión negativa. La presión óptima en los hornos durante el proceso de fundición es de 50 pascales.</p>
Secundarias	Reducción de emisiones al aire	<p>Filtro de mangas: consiste en forzar el paso de la corriente de gas a través del medio filtrante. El tejido produce el efecto filtrante, aunque su principal misión consiste en servir de soporte para la capa de polvo, conocida como torta, que rápidamente se acumula sobre él. Esta capa de polvo es la responsable de la alta eficacia de filtración de partículas de pequeño tamaño.</p> <p>Posquemador: consiste en una cámara refractaria con uno o más quemadores. La cámara debe considerar el tiempo de retención de los gases y la composición del gas, en especial, el contenido de cloros.</p> <p>Sistema interno de quemado: el gas emitido es directamente depositado en la flama del quemador y el carbono orgánico se convierte en dióxido de carbono. Usualmente, se aplica en un horno de dos cámaras. En la primera cámara ocurre la pirólisis de materiales orgánicos, luego el humo se dirige a la segunda cámara en la que los componentes orgánicos se queman con oxígeno.</p> <p>Inyección de absorbentes como cal, bicarbonato o carbón activado: el filtro no puede remover compuestos gaseosos de la corriente, pero puede usarse para una reacción si los agentes absorbentes —como cal, bicarbonato de sodio, carbonato de calcio y carbono activado— se mezclan con el gas expulsado. Los absorbentes son inyectados para neutralizar componentes ácidos y cloros por reacción química y para absorber componentes orgánicos como PCDD y PCDF.</p> <p>Implementación de otros sistemas de control de emisiones: ciclones en combinación con filtros de manga, plantas de tratamiento de ácidos, plantas para tratamiento de dióxido de azufre, depuradores, adición de absorbentes, sistemas de remoción de mercurio, posquemadores y sistemas de enfriamiento son utilizados para disminuir la emisión de contaminantes al aire.</p>

Tipo medida	Acción	Característica
Secundarias	Reducción de emisiones difusas en la fundición	<p>Campana de succión y puerta de sellado: una puerta de horno sellada herméticamente está diseñada para mantener el calor en el interior y el aire frío en el exterior. Este sistema, junto con una campana, previene cualquier liberación de humos al ambiente cuando la puerta está abierta y recolecta las emisiones difusas.</p> <p>Sistema de recolección de vapores en diferentes procesos: puede diseñarse de manera que el extractor recolecte enfocado en cada uno de los ciclos (carga, fundición o colada). Esto puede lograrse mediante la instalación de compuertas automáticas conectadas a los sistemas de control del horno. Así mismo, se puede realizar control de la tasa de quema para asegurar el mínimo flujo de gas cuando la puerta está abierta.</p> <p>Confinamiento de la zona de fundición: busca hacer un encerramiento físico de toda la zona de fundición para que los dos sistemas enunciados antes recolecten todas las emisiones generadas durante el proceso.</p>
	Reducción de emisiones en el caso en el que se utilicen fundentes clorados	<p>Control del proceso de refinación y mezcla de cloro con gas inerte: el control de los fundentes usados es requerido, ya que si un exceso de cloro es usado, puede emitirse como cloruro de aluminio e hidrolizarse en contacto con el aire para producir ácido sulfúrico. Para prevenir o reducir esto, es fundamental un control adecuado del proceso, así como una mezcla de cloro con gas inerte en lugar de cloro puro.</p> <p>Control del proceso en hornos basculantes: el horno rotatorio basculante requiere menos sal que el horno rotatorio de tambor. El factor de sal usado por kilogramo de producto no metálico en el horno de tambor rotatorio es de 1,8, a diferencia del horno rotatorio basculante en el que este es de 0,1 a 0,5. La baja cantidad de sal es posible debido al modo de operación. En el horno de tambor rotatorio la escoria salina tiene que ser removida del horno mientras que en el horno basculante rotatorio la escoria es removida por la rotación del horno.</p>
	Reducción de emisiones en manejo de escorias	<p>Enfriamiento en contenedores sellados bajo gas inerte: el aislamiento de los gases generados por escorias en presencia de gas inerte genera una reacción en la que los compuestos orgánicos volátiles (COV) son capturados, así mismo inhibe la rápida oxidación de las moléculas de combustible.</p> <p>Prevención del humedecimiento de las espumas y escorias: la presencia de agua en las escorias aumenta las reacciones generadoras de gases.</p>

## 4.2 Nivel de implementación de las mejores técnicas disponibles y las mejores prácticas ambientales en el país

A continuación se presenta el resultado de la evaluación de implementación de las MTD y las MPA expuestas en el capítulo anterior para las industrias de acero, aluminio y cobre. La información que se

presenta es producto de visitas a diferentes plantas productoras, encuestas y revisión de permisos de emisiones disponibles en los archivos públicos de las diferentes autoridades ambientales.

### 4.2.1 Industria del acero

Para la producción primaria de acero solo existe una empresa en el país que posee una cadena de sinterizado de hierro.

**Tabla 6.** Evaluación de la implementación de las MTD y las MPA en la producción de acero primaria nacional

Tipo	Técnica	Impacto a la generación de COP no intencionales	Implementada (Sí/No)	Observación
Primarias	Funcionamiento estable y uniforme de la cadena de sinterizado	Alto	Sí	Se mantiene estable y no presenta alteraciones en la llama frontal.
	Vigilancia continua de parámetros	Medio	Sí	La planta incluye un sistema de control de vigilancia continua para asegurar el funcionamiento estable y reducir las interrupciones de la cadena de sinterizado, de la composición del lecho, de la altura del lecho, del uso de aditivos, de la disminución del contenido de aceite en la cascarilla, de la reducción de la infiltración de aire a través de la cadena, de los sistemas de acondicionamiento para la red de tuberías y gases residuales.
	Recirculación de gases residuales	Medio	No	La planta de sinterización no cuenta con reciclaje de gases residuales.
	Preparación del material de alimentación	Alto	Sí	Los materiales finos son aglomerados antes de colocarlos en la cadena de sinterizado.
	Inyección de urea	Alto	No	-

Tipo	Técnica	Impacto a la generación de COP no intencionales	Implementada (Sí/No)	Observación
Secundarias	Reducción de emisiones al aire	Medio	Sí	La planta elimina el MP de los gases de la sinterización.
	Mecanismo de desempolvamiento de alta eficiencia	Medio	Sí	La planta cuenta con mecanismos de adsorción/ absorción.
Generales	Eliminación del MP de los gases de la sinterización	Alto	Sí	La planta elimina el MP de los gases de la sinterización.
	Recubrimiento de la cadena de sinterizado	Medio	Sí	La planta cuenta con una campana en el área de sinterizado.

De acuerdo con la información de la tabla 6, la única planta en el país que realiza sinterización del mineral hierro ha implementado 6 de las 8 MTD y MPA; sin embargo, las dos medidas primarias no implementadas tienen impacto medio y alto en las emisiones. También se revisaron los expedientes de los permisos de emisiones de la autoridad ambiental. En ellos se encontraron mediciones en 16 fuentes fijas desde el 2009 al 2016, años en los

que se encontraron concentraciones de MP desde 4.600 a 11,4 mg/m<sup>3</sup> de óxidos de azufre desde 407,4 a 0 mg/m<sup>3</sup> y de óxidos de nitrógeno desde 43,1 a 1,7 mg/m<sup>3</sup>. Aunque el único parámetro que se excede el límite permisible es el de MP, desde el 2013 se observa una concentración por debajo de lo estipulado por la norma. Es pertinente señalar que en la actualidad no se encuentra reglamentado el parámetro de PCDD y de PCDF

para la producción primaria de acero, por lo cual no se encontraron resultados de mediciones en los expedientes disponibles.

En cuanto a la producción secundaria, en el país existen cinco empresas que producen acero secundario, las cuales reúnen 100 % de la producción nacional de acero.

**Tabla 7.** Evaluación de la implementación de las MTD y las MPA en la producción de acero secundario nacional

Tipo	Técnica	Impacto a la generación de COP no intencionales	Número de expedientes analizados (5 en total)	Observación
Primarias	Calidad de la materia prima	Alto	5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Las cinco plantas poseen sistema de fragmentación para materia ligera.</li> <li>Las cinco plantas poseen sistemas de oxicorte para chatarra pesada.</li> <li>En las cinco plantas no se realiza precalentamiento de la chatarra.</li> <li>En dos plantas existen guías o manuales sobre entrega de chatarra por parte de los proveedores y se realizan descuentos por mala calidad de la misma.</li> <li>En una planta no se recibe chatarra contaminada con aceites o hidrocarburos.</li> </ul>
	Operación del horno	Medio	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>Las plantas no proporcionaron información sobre este ítem.</li> </ul>
	Diseño del sistema de acondicionamiento de gases residuales	Alto	5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Las cinco plantas poseen campanas extractoras de gases primarios y secundarios sobre los hornos de fundición, los cuales dirigen los gases a los sistemas de control de emisiones que poseen planes de mantenimiento periódicos.</li> <li>Con la información provista no se establece si los sistemas descritos poseen maximización de mezcla de los gases residuales y si se logra un enfriamiento rápido por debajo de los 200 °C.</li> </ul>
	Sistema de monitoreo continuo de parámetros	Medio	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Las dos plantas poseen sistema de monitoreo continuo de parámetros de temperatura en tiempo real en diferentes partes del proceso.</li> <li>Se desconoce la información de las demás plantas.</li> </ul>
Secundaria	Recolección de polvo mediante filtros de mangas o cámara de filtros	Alto	5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Las cinco plantas poseen sistemas de control de emisiones provistos de filtros de mangas.</li> </ul>
	Sistema de poscombustión externa en conjunto con enfriamiento rápido de agua	Medio	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Una planta cuenta con sistemas de poscombustión y un sistema de enfriamiento rápido.</li> </ul>
	Inyección adsorbente	Alto	0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ninguna planta declaró utilizar inyección de adsorbente.</li> </ul>

De acuerdo con la información de la tabla 7, las MTD y las MPA más implementadas por las empresas que producen acero a partir de chatarra (acero secundario) son la limpieza de la chatarra liviana mediante el uso de fragmentadoras, que se encuentran instaladas y operando en todas las plantas del país, y los sistemas de control de emisiones compuestos por ciclones, ductos de enfriamiento de gases con agua, sistemas antichispas y filtros de mangas. Sin embargo, es necesario señalar que no se somete a fragmentación 100 % de la chatarra liviana —incluidos enredos, chatarra cizallada y pacas— que ingresa a los hornos. Del total de chatarra que se lleva a la colada, solo 30 % y 60 % corresponde a chatarra fragmentada, mientras que la chatarra restante puede incluir chatarra compactada o cizallada, tipos de chatarra que pueden contener objetos —como cables de la electrónica de vehículos, plásticos, aceites, entre otros— precursores de PCDD y de PCDF que no son retirados en procesos equivalentes a la fragmentación.

Es claro que la implementación de sistemas de control de emisiones, como filtros de mangas, puede ayudar a reducir las emisiones de PCDD y de PCDF al aire. Por ello, estos sistemas deberían operarse en conjunto con sistemas que monitoreen las temperaturas en el proceso, con sistemas que reduzcan rápido la temperatura de las emisiones —como HQT— o con la aplicación de absorbentes —como carbón activado— para evitar la formación de COP. Así mismo, es necesario prestar especial atención a los polvos recolectados por los sistemas de control de emisiones, ya que estos pueden tener cantidades importantes de PCDD y de PCDF.

También se realizaron revisiones de los expedientes de los permisos de emisión de las autoridades ambientales en las cinco plantas que realizan fundición de chatarra mediante hornos de arco eléctrico. Se encontraron mediciones en 30 fuentes fijas desde el 2004 al 2018, años en los que se encontraron concentraciones de MP desde 8,131 a 2,7 mg/m<sup>3</sup>, de óxidos de azufre desde 77 a 2,4 mg/m<sup>3</sup> y de dióxidos

de nitrógeno desde 152,1 a 3,6 mg/m<sup>3</sup>. Desde 2011, las empresas presentan cumplimiento en emisión de estos contaminantes. Por otra parte, se encontraron 19 mediciones de PCDD y de PCDF realizadas durante el periodo de 2004 a 2018. Estos valores cumplieron la norma establecida de 0,5 ng EQT/m<sup>3</sup>; sin embargo, una de las plantas del país no ha monitoreado este parámetro y, por lo tanto, no se puede inferir si las medidas que ha tomado en realidad evitan la generación de PCDD y de PCDF.

### 4.2.3 Industria del aluminio

En el país existen, aproximadamente, siete empresas de producción de aluminio, las cuales representan 80 % de la participación en el mercado nacional. Sin embargo, solo dos empresas de estas realizan fundición de chatarra mientras cinco de ellas se dedican a la extrusión de aluminio, actividad no contemplada como generadora de COP no intencionales.

**Tabla 8.** Evaluación de la implementación de las MTD y las MPA en la producción de aluminio secundaria nacional

Tipo	Técnica	Impacto a la generación de COP no intencionales	Número de expedientes analizados (3 en total)	Observación
Primarias	Pretratamiento de chatarras	Alto	3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dos plantas poseen sistemas de retiro de material diferente al aluminio, como plástico, papel, otros metales, entre otros.</li> <li>Una planta no posee infraestructura para realizar limpieza de chatarra, pero posee un control en el patio que asegura la calidad de la chatarra.</li> </ul>

Tipo	Técnica	Impacto a la generación de COP no intencionales	Número de expedientes analizados (3 en total)	Observación
Primarias	Remoción de aceite y componentes orgánicos de la viruta antes de la fundición	Medio	0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ninguna planta implementa sistemas de remoción de aceites en la chatarra.</li> </ul>
	Control efectivo del proceso	Medio	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Una planta lleva el control de la temperatura dentro de los hornos; sin embargo, no lleva el control de presión y volumen en el proceso de fundición.</li> </ul>
Secundarias	Reducción de emisiones al aire	Alto	0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ninguna planta posee sistema de control de emisiones compuesto por filtro de mangas, posquemador, sistema interno de quemado o inyección de absorbentes como cal, bicarbonato o carbón activado.</li> </ul>
	Reducción de emisiones difusas en la fundición	Alto	0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ninguna planta posee sistemas de captación de emisiones difusas en el proceso de fundición.</li> </ul>
	Reducción de emisiones en el caso en el que se utilicen fundentes clorados	Bajo	0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Una planta utiliza fundente clorado.</li> </ul>
	Reducción de emisiones en manejo de escorias	Bajo	0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ninguna planta posee sistema de reducción de emisiones en el manejo de la escoria.</li> </ul>

De acuerdo con la información de la tabla 8, la MTD y MPA más utilizada en las plantas que producen aluminio es la limpieza de la chatarra; en especial, de materiales como metales ferrosos, plásticos y cauchos. Esto se debe a que el retiro de metales diferentes al aluminio les permite llegar mucho más rápido a la temperatura óptima de fundición y a que el retiro de materiales —como plásticos, cauchos, entre otros— reduce las emisiones de MP, óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno, sustancias reguladas en la actualidad por la normativa ambiental para esta actividad. Se observa que la mayoría de las demás medidas están por implementar; en especial,

los sistemas de control de emisiones y captura de emisiones difusas en la nave del horno.

Sobre la generación de PCDD y de PCDF en el sector, en las empresas no se evidencia un conocimiento general sobre cómo se pueden formar estas sustancias durante los procesos que desarrollan. Así mismo, este parámetro no se encuentra regulado para esta industria, por lo cual no se poseen mediciones en los expedientes de las autoridades ambientales. Sin embargo, de acuerdo con los resultados de la actualización del Inventario Nacional de COP No Intencionales,

la fabricación de aluminio puede llegar a ser un sector relevante en la generación de estas sustancias. También se evidenciaron diferentes puntos de mejora para la implementación de las MTD y las MPA.

En la revisión de los expedientes de los permisos de emisión de las autoridades ambientales, se encontraron mediciones en 3 fuentes fijas desde el 2015 al 2017, años en los que se encontraron concentraciones de MP desde 43,2 a 16,5 mg/m<sup>3</sup>, lo que cumple con lo establecido en norma para este parámetro.

### 4.2.3 Industria del cobre

En el país existen pocas empresas dedicadas a la fundición de chatarra de cobre. En la información consultada a las autoridades ambientales se encontraron dos expedientes, aunque solo una empresa desarrolla esta actividad en la actualidad. Sin embargo, al igual que en la producción de aluminio, existen empresas dedicadas a trefilería del metal, actividad que no está contemplada como generadora de COP no intencionales.

**Tabla 9.** Evaluación de la implementación de las MTD y las MPA en la producción de cobre secundario nacional

Tipo	Técnica	Impacto a la generación de COP no intencionales	Número de expedientes analizados (2 en total)	Observación
Primaria	Pretratamiento de chatarras	Alto	2	Dos plantas poseen sistemas de retiro de materiales diferentes al cobre, como caucho o plástico de cables de telecomunicaciones.
	Remoción de aceite y componentes orgánicos de la viruta antes de la fundición	Medio	0	Ninguna planta implementa sistemas de remoción de aceites en la chatarra.
	Control efectivo del proceso	Medio	0	Ninguna planta posee un control de las temperaturas, presión y volumen en el proceso.

Tipo	Técnica	Impacto a la generación de COP no intencionales	Número de expedientes analizados (2 en total)	Observación
Secundarias	Reducción de emisiones al aire	Alto	2	Dos plantas poseen sistemas de control de emisiones provistos de ciclones y filtros de mangas.
	Reducción de emisiones difusas en la fundición	Alto	1	En una planta el proceso de fundición se realiza en un lugar cerrado por completo y provisto de un sistema de captación de emisiones difusas dirigido al sistema de control de emisiones.
	Reducción de emisiones en el caso en el que se utilicen fundentes clorados	Bajo	-	-
	Reducción de emisiones en manejo de escorias	Bajo	0	Ninguna planta posee sistema de reducción de emisiones en el manejo de la escoria.

De acuerdo con la información de la tabla 9, las MTD y las MPA más utilizadas en las plantas productoras de cobre son la limpieza de la chatarra —en especial la remoción de materiales plásticos y cauchos— y los sistemas de control de emisiones compuestos de ciclones y filtros de mangas. Estas prácticas permiten cumplir con los estándares de emisiones de MP, óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno, sustancias reguladas en la actualidad por la

normativa ambiental para esta actividad. Otra MTD y MPA que se puede implementar en este sector es el control efectivo al proceso de producción —por ejemplo, de temperaturas, presión, entre otros—, el cual puede ayudar a mejorar su competitividad en temas de producción, económicos y ambientales.

En la revisión de los expedientes de los permisos de emisión de las autoridades ambientales en

este sector, se encontraron mediciones en 2 fuentes fijas desde el 2013 al 2014, años en los que se encontraron concentraciones de MP desde 125 a 34 mg/m<sup>3</sup>, lo que cual cumple con lo establecido en norma para este parámetro. No se encontraron mediciones de PCDD ni de PCDF en los expedientes de permiso de emisiones. La gran mayoría de la chatarra de cobre generada en el país se exporta, por lo cual existen pocas plantas en el país que realizan este proceso.

5.

Conclusiones



La industria de producción de metales en el país es un importante sector económico, el cual aporta más de 10 % del producto interno bruto (PIB) industrial. Esta actividad económica genera importantes fuentes de empleo en sus fases de producción, comercialización y, en especial, de recuperación de chatarra metálica. Esto la hace un claro ejemplo de economía circular en el país. Así mismo, más de 90 % de la industria de producción de metales utiliza chatarra en los procesos de fundición de acero, aluminio y cobre, principalmente por la alta eficiencia energética que representa en comparación con la extracción minera y refinación de estos metales. Como lo señaló el estudio *Identificación y cuantificación de flujos de masa de los metales*, Anexo 1, en el país se realiza recuperación de metales como acero, aluminio y cobre, siendo el acero el de mayor capacidad instalada en el país.

Las empresas de este sector se han visto afectadas en el suministro de chatarra debido a que la dinámica de los precios internacionales de este insumo hace que se exporte, generando desabastecimiento en la industria nacional; por ejemplo, en la del acero. Así mismo, las empresas nacionales han tenido que recurrir a la importación de chatarra para cumplir con sus necesidades productivas. Este fenómeno puede afectar la calidad de la chatarra disponible para las industrias nacionales, ya que muchos materiales adheridos al metal pueden contener cloro y ser precursores de PCDD y de PCDF, los cuales se generan durante el proceso de fundición. Por lo tanto, es necesario concientizar a todos los actores de la cadena de producción de metales sobre la importancia de suministrar y usar metales reciclados de buena calidad que estén libres de materiales que puedan ser precursores de dichos contaminantes.

Por otro lado, en el país se identifica la importación de una gran cantidad de insumos con aceros especiales, los cuales al final de su vida útil no se pueden aprovechar debido a que no existe la capacidad instalada nacional para aprovecharlos como chatarra de alto valor económico; por ejemplo, aceros especiales, cobre, entre otros. Por ello, el único destino que tienen estos insumos al final de su vida útil es la exportación, lo que evita su aprovechamiento en Colombia.

Las MTD y las MPA más utilizadas por estas industrias son la revisión de la calidad de la chatarra que ingresa a las plantas y a los hornos de fundición, lo que incluye actividades de retiro de materiales contaminantes — como cauchos, plásticos, entre otros— presentes en la chatarra, ya sea por ellos mismos o por sus proveedores, así como la implementación de sistemas de control de emisiones, en especial en los sectores productores de acero y cobre, lo que les permite cumplir con estándares de MP, óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre. Sin embargo, queda la duda sobre el cumplimiento de estándares como los niveles de PCDD y de PCDF.

Algunas oportunidades de mejora identificadas en la operación de las plantas son el monitoreo de temperaturas durante el proceso de fundición para evitar los rangos de temperatura que forman PCDD y PCDF, la implementación de sistemas de control de emisiones que eviten formación de los mismos, entre otros. A pesar de que varios de estos sectores deben medir diferentes parámetros en las fuentes fijas de acuerdo con la normatividad colombiana, parámetros como los niveles de PCDD y de PCDF poseen pocas mediciones en los expedientes de calidad de aire del país en el sector de fundición de chatarra. Esto se debe a excepciones que permite la misma norma, razón por la cual es necesaria una actualización de dicho instrumento con el fin de controlar de manera más eficiente este contaminante.

# 6.

## Anexos

---

### **Anexo 1. Identificación y cuantificación de flujos de masa de los metales**

Los materiales ferrosos y no ferrosos intrínsecamente han generado modelos de circularidad que permiten su ágil aprovechamiento. Comprender la dinámica de los volúmenes de los metales consumidos y transformados por tipo de industria, material y proceso, teniendo en cuenta consideraciones de tipo económico, técnico, social y ambiental, mejora el aprovechamiento de estos materiales. A continuación, se presenta el balance de metales —aceros, aluminio y cobre— del país construido a partir de bases de datos nacionales.

# 1. Definición metodológica

Mediante la recopilación de información se elaboró una base de datos para construir los balances de materiales para cada grupo de metales —acero, aluminio y cobre—. La variable masa resulta ser fundamental

para delinear el balance de materiales y sus residuos; por lo tanto, es necesario establecer las relaciones entre cantidades, organizaciones y procesos de transformación. La ilustración 1 presenta el procedimiento

para la recolección y validación de datos con el fin de conformar la base de datos que servirá como insumo principal para construir los balances de los metales de interés.



Ilustración 1. Procedimiento para la recolección y validación de datos

Fuente: Minambiente (2021).

La recolección de datos está orientada a captar la masa bajo esquemas estandarizados. En este caso, se hizo uso exhaustivo de los códigos y las nomenclaturas utilizados por los entes de comercio, como las subpartidas arancelarias<sup>10</sup>, la clasificación central de productos (CPC, por sus siglas en inglés)<sup>11</sup> y el número de identificación tributaria (NIT)<sup>12</sup>.

El método de recolección y consulta de la información utilizado para establecer el balance de materiales consistió en:

1. Consultas por estructura arancelaria en la plataforma MUISCA-DIAN del Ministerio de Hacienda y Crédito Público<sup>13</sup>.
2. Desglosar y segmentar el Decreto 4927 del 26 de diciembre de 2011 para la clasificación de productos:
  - i. Secciones
  - ii. Capítulos
  - iii. Partidas
  - iv. Subpartidas
  - v. Subpartidas clasificadas

10. Consultas realizadas en la plataforma BACEX del MinCIT.

11. Nomenclatura estandariza por el DANE.

12. Número único colombiano que asigna la Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales (DIAN) por una sola vez cuando el obligado se inscribe en el Registro Único Tributario (RUT).

13. <https://muisca.dian.gov.co/WebArancel/DefMenuConsultas.faces>.

3. Definir corolarios para la identificación de residuos potenciales y materias primas etiquetadas para empresas acotadas por el sector económico:

- i. C1. Residuo potencial: cualquier materia prima, equipo o sistema con un ciclo de vida definido y finito que termine como desecho.
- ii. C2: cualquier materia prima, equipo o sistema compuesto o que contenga materiales pertenecientes a los grupos acero, aluminio y cobre.

4. Delinear conceptualmente los flujos de materiales mediante diagramas de mapas de flujo de valor (VSM, por sus siglas en inglés) y de análisis del ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés).

5. Relacionar las subpartidas arancelarias con actividades económicas (código de Clasificación Industrial Internacional Uniforme de Todas las Actividades Económicas [CIIU]) y los agentes responsables (NIT); entre ellos, empresas, organizaciones y actores representativos en la comercialización, fabricación y recolección.

6. Reclassificar las subpartidas arancelarias relacionando material tipo y CPC.

Al realizar la depuración y clasificación de las partidas arancelarias consolidadas en el Decreto 4927 del 26 de diciembre de 2011 (versión de abril de 2020), útiles para establecer los balances de materiales, se llegó a la conclusión de que existen 1814 subpartidas arancelarias que constituyen el principal insumo para definir la masa —acero, aluminio y cobre— disponible en el territorio nacional.

**Tabla 1.** Catálogo de subpartidas basado en las primeras cuatro líneas

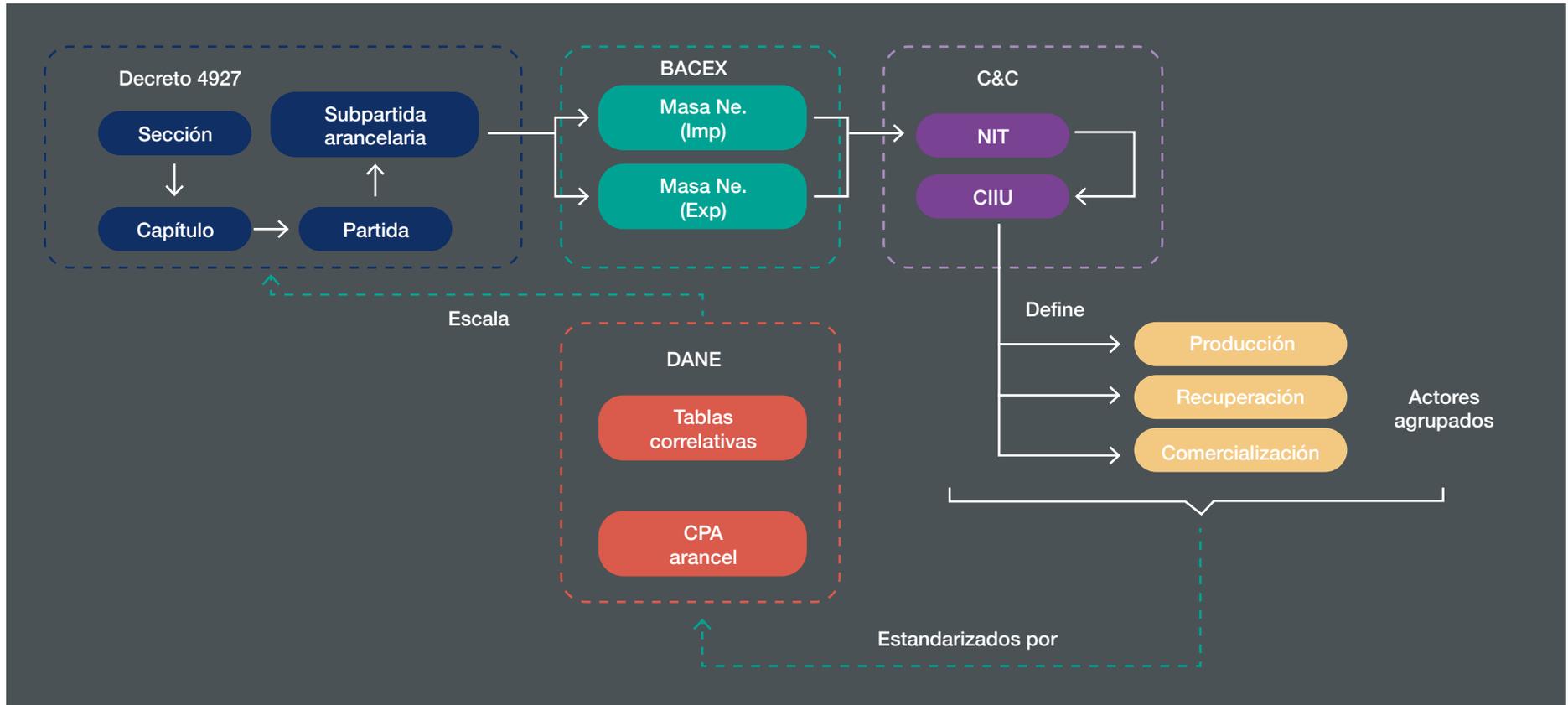
Fuente: Minambiente.

N.º	Acero	Aluminio	Cobre	Plástico	Hogar	Industrial
1	4012110000	7601100000	7401001000	3901100000	8402110000	8429110000
2	4012120000	7601200000	7401002000	3901200000	8402120000	8429190000
3	4012130000	7602000000	7402001000	3901300000	8402190000	8429200000
4	4012190000	7603100000	7402002000	3901400000	8402200000	8429300000

La identificación de estas partidas permite generar las relaciones pertinentes entre: i) flujo de masa a través del sistema, clasificado por cada subpartida

arancelaria; ii) tipología de materiales que se transforman, subclasificación de tipo de material; y iii) organizaciones que están involucradas y su clasificación.

La ilustración 2 muestra las relaciones encadenadas y un breve desglose de los datos más importantes partiendo de los códigos estandarizados.



**Ilustración 2.** Relacionamiento de datos\*

\*C&C: Cámara de Comercio de Bogotá, Medellín y Cali.

Fuente: Minambiente (2021).

Cabe resaltar que la agrupación y selección de códigos se realiza según la *Guía para la Clasificación de*

*Residuos* acorde con las categorías de la European Waste Classification for Statistics (EWC-Stat)<sup>14</sup>. A

continuación se presentan las bases de datos consultadas para el presente estudio.

14. Version 2 de 2010. *Supplement to the Manual for the Implementation of the Regulation (EC) No 2150/2002. Waste Statistics.*

# 1.1 Fuentes de información

La construcción de la base de datos está compuesta por series de datos, archivos y tablas que fueron suministrados, compartidos y facilitados por entidades gubernamentales, académicas y organizaciones

privadas o asociaciones. La correlación de la información mediante la estandarización de códigos permitió la formulación de consultas, *queries*, por cada grupo de material —acero, aluminio y cobre—. En la

tabla 2 se muestran las organizaciones más representativas que hasta el momento han aportado a la construcción de la base de datos.

**Tabla 2.** Fuentes de información del metabolismo

**Fuente:** Minambiente.

	Producidas/ Procesadas	Recicladadas	Consumidas	Importadas	Exportadas	Otros
Entidades	De partidas del grupo productos	De partidas del grupo chatarras y residuos	Balance general de masa	Balance por partida/ empresa	Balance por partida/ empresa	Repositorios
	Institución Universitaria EAM y DANE con CPC y NIT	DNP	BACEX y MinCIT	BACEX y MinCIT	BACEX y MinCIT	Universidad Nacional de Colombia
	BACEX y MinCIT	BACEX y MinCIT	DANE	DIAN	DIAN	Escuela Colombiana de Ingeniería
	Cámara de Comercio de Bogotá, Medellín y Cali	Tecnalia	Departamento Nacional de Planeación (DNP)	-	-	Empresas privadas
	-	EAM y DANE	DIAN	-	-	Datos abiertos (datos.gov.co)
	Agencia Nacional de Minería (ANM) y Silvana Habib	Aceros Asociación Nacional de Industriales (ANDI)	-	-	-	ANM
	Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME)	Acoplásticos	-	-	-	-
	Datos.gov.co	Secretaría de Movilidad	-	-	-	-
	Ministerio de Minas y Energía de Colombia	-	-	-	-	-

Las consultas realizadas a actores representativos no aportan a los balances generales de masa, ya que la distribución de las fuentes está altamente dispersa. Sin una visión general que acote el problema, puede incurrirse en la postulación de cantidades de poca fiabilidad. El presente

estudio se centró en las consultas referentes a las características organizacionales, los modelos de negocio, las cadenas de valor y las cadenas de suministro a empresas de gran envergadura que ayudaron a formular los flujos de materiales sobre las cantidades establecidas en este estudio. Este

tipo de consultas se concentra en grupos objetivo por medio del levantamiento de datos haciendo uso de encuestas y realizando un posterior tratamiento estadístico a la información para favorecer la significancia de estos datos.

## 1.2 Clasificación de actividades económicas

La clasificación se realizó mediante los códigos CIU que indican y clasifican las actividades económicas y relacionan el código NIT de cada organización con hasta cuatro actividades económicas. Para relacionar los datos y realizar un análisis con amplio horizonte —alrededor de veinte años— se utilizaron todas las versiones de códigos CIU<sup>15</sup>. La afinidad y semántica entre los datos se sustenta mediante las tablas correlativas provistas por el DANE, las cuales

relacionan y homologan las subpartidas arancelarias con la codificación estandarizada CPC. La clasificación de las actividades económicas se dividió en los grupos: comercialización, recuperación y producción de materiales ferrosos y no ferrosos.

Citando la clasificación de subpartidas arancelarias se espera una correlación fuerte entre las empresas que dinamizan estos productos y su actividad

económica. De este modo se acotan los actores más representativos en el metabolismo de materiales con cifras y tendencias. Así mismo, se realizó la revisión de las 495 clasificaciones de actividades económicas en los listados de códigos CIU, revisiones 1 y 4. Como resultado de ese ejercicio se encontró que en el país existen 69 actividades asociadas con la comercialización, producción y recuperación de materiales ferrosos y no ferrosos.

**Tabla 3.** Clasificación de actividades económicas basada en las primeras líneas

**Fuente:** Minambiente (2021).

Producción	Recuperación	Comercio	CIU	Descripción de la actividad económica
X	X		2410	Industrias básicas de hierro y de acero
X	X		2429	Industrias básicas de otros metales no ferrosos
X	X		2431	Fundición de hierro y de acero
X	X		2432	Fundición de metales no ferrosos
X	X		2511	Fabricación de productos metálicos para uso estructural

15. CIU revisiones V. 1.0, V. 2.0, V. 3.0 y V. 4.0.

Producción	Recuperación	Comercio	CIIU	Descripción de la actividad económica
X			2512	Fabricación de tanques, depósitos y recipientes de metal, excepto los utilizados para el envase o transporte de mercancías
X			2591	Forja, prensado, estampado y laminado de metal; pulvimetalurgia
X			2592	Tratamiento y revestimiento de metales; mecanizado
X			2593	Fabricación de artículos de cuchillería, herramientas de mano y artículos de ferretería
X			2599	Fabricación de otros productos elaborados de metal no clasificado previamente (NCP)
		X	2712	Fabricación de aparatos de distribución y control de la energía eléctrica
		X	2720	Fabricación de pilas, baterías y acumuladores eléctricos
		X	2750	Fabricación de aparatos de uso doméstico
		X	2790	Fabricación de otros tipos de equipo eléctrico NCP
		X	2811	Fabricación de motores, turbinas y partes para motores de combustión interna
		X	2822	Fabricación de máquinas formadoras de metal y de máquinas herramienta
		X	2823	Fabricación de maquinaria para la metalurgia
		X	4511	Comercio de vehículos automotores nuevos
		X	4530	Comercio de partes, piezas (autopartes) y accesorios (lujos) para vehículos automotores
		X	4541	Comercio de motocicletas y de sus partes, piezas y accesorios
		X	4649	Comercio al por mayor de otros utensilios domésticos NCP
		X	4651	Comercio al por mayor de computadores, equipo periférico y programas de informática
		X	4652	Comercio al por mayor de equipo, partes y piezas electrónicos y de telecomunicaciones
		X	4662	Comercio al por mayor de metales y productos metalíferos

Según las matrículas de las empresas inscritas en las cámaras de comercio de las distintas ciudades, una organización puede identificarse hasta con

cuatro actividades económicas distintas, siempre y cuando estas estén dentro de los lineamientos provistos por el Ministerio de Hacienda y Crédito

Público. Esta cualidad mejora el ejercicio de relación entre los movimientos de las subpartidas arancelarias y las actividades de las empresas.

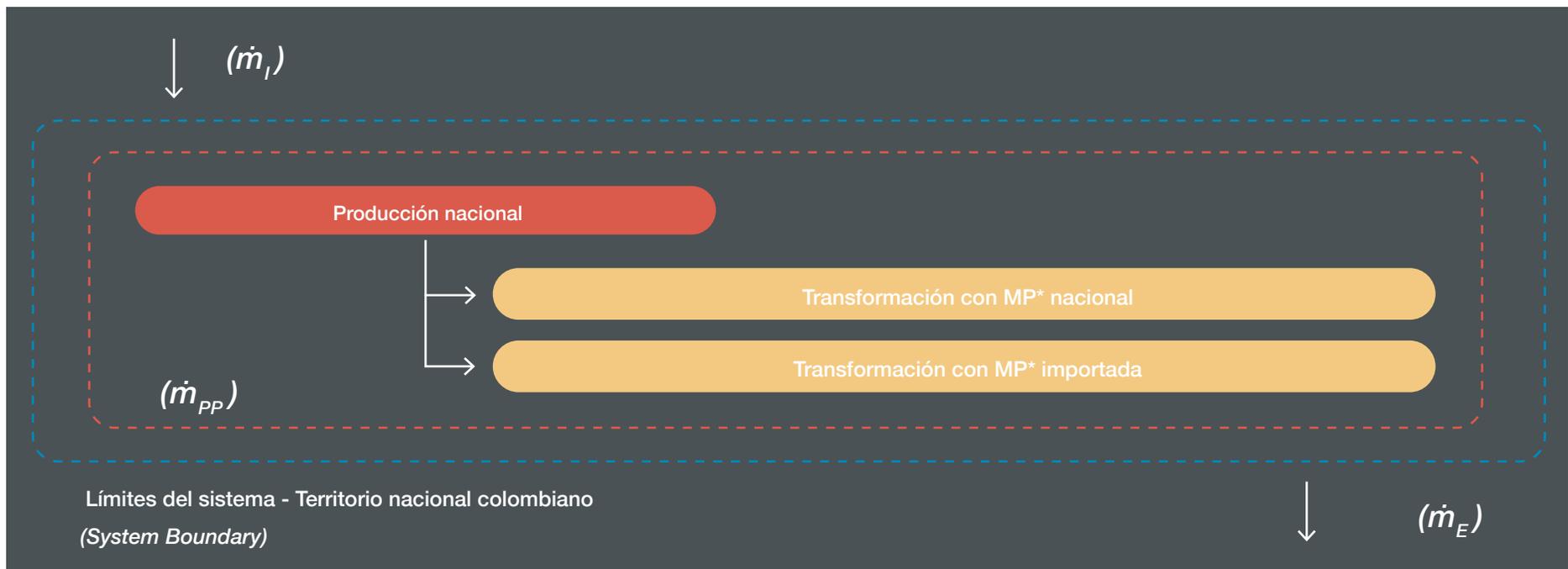
## 1.3 Balance total de masa

El balance de masa total corresponde al material que ingresa al sistema más los componentes que se generan y procesan en su interior menos las materias que salen del sistema. En este caso, el resultante es la masa existente dentro

del territorio nacional que corresponde a un potencial residuo.

La ilustración 3 muestra de manera esquemática el balance general de masa acotado por los

límites del sistema junto a una ecuación que permite estimar el balance de material de cada material:  $(\dot{m}_T) = (\sum \dot{m}_{PP}) + (\sum \dot{m}_I) - (\sum \dot{m}_E)$ . Donde:  $(\dot{m}_I)$  es el flujo de material importado,  $(\dot{m}_{PP})$  es el flujo de materia producida y procesada, y  $(\dot{m}_E)$  es el flujo de material exportado.



**Ilustración 3.** Balance general de masa

**Fuente:** Minambiente (2021).

Este sistema permite dimensionar las magnitudes que deben relacionarse en cada análisis; además, constituye el dato de entrada para calcular la sensibilidad y el ajuste de cada análisis. Cualquier relación

con este balance general permitirá establecer qué tan representativo es un ejercicio de trazabilidad sobre un agente o grupo de agentes seleccionado. De esta manera, es posible hacer proyecciones o

constatar hipótesis. A continuación se presentan los flujos a nivel nacional de materiales del acero, aluminio y cobre utilizando la metodología y fuentes de información mencionadas.

## 2. Flujo de masa del acero

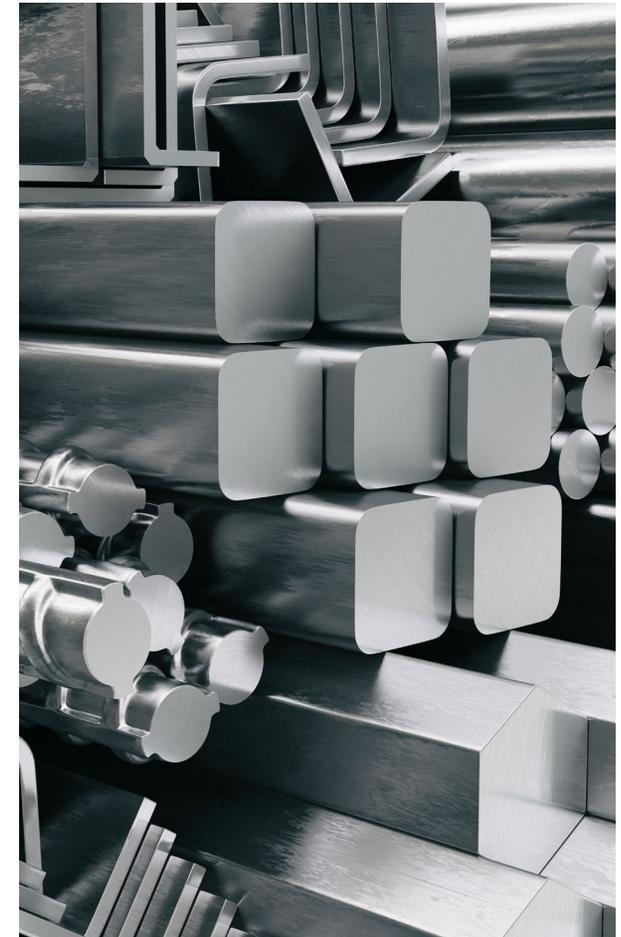
El presente flujo de masa busca estimar las cantidades provenientes del sector primario de la economía, relacionado con la minera; del sector secundario, dominado por los consumos y la transformación de materiales; y del sector terciario, correspondiente al comercio y consumo masivo de este metal. Luego de determinar este flujo de masa se hizo la clasificación de las cantidades, organizaciones y

estados del material —suministro, reciclado o producto—. Los datos suministrados en este informe están sustentados por las consultas realizadas sobre las bases de datos generadas a partir del desarrollo metodológico mencionado antes. A continuación se presentan las consultas relacionadas, así como el flujo de masa de materiales ferrosos en Colombia.

### 2.1 Metabolismos del acero (producción primaria)

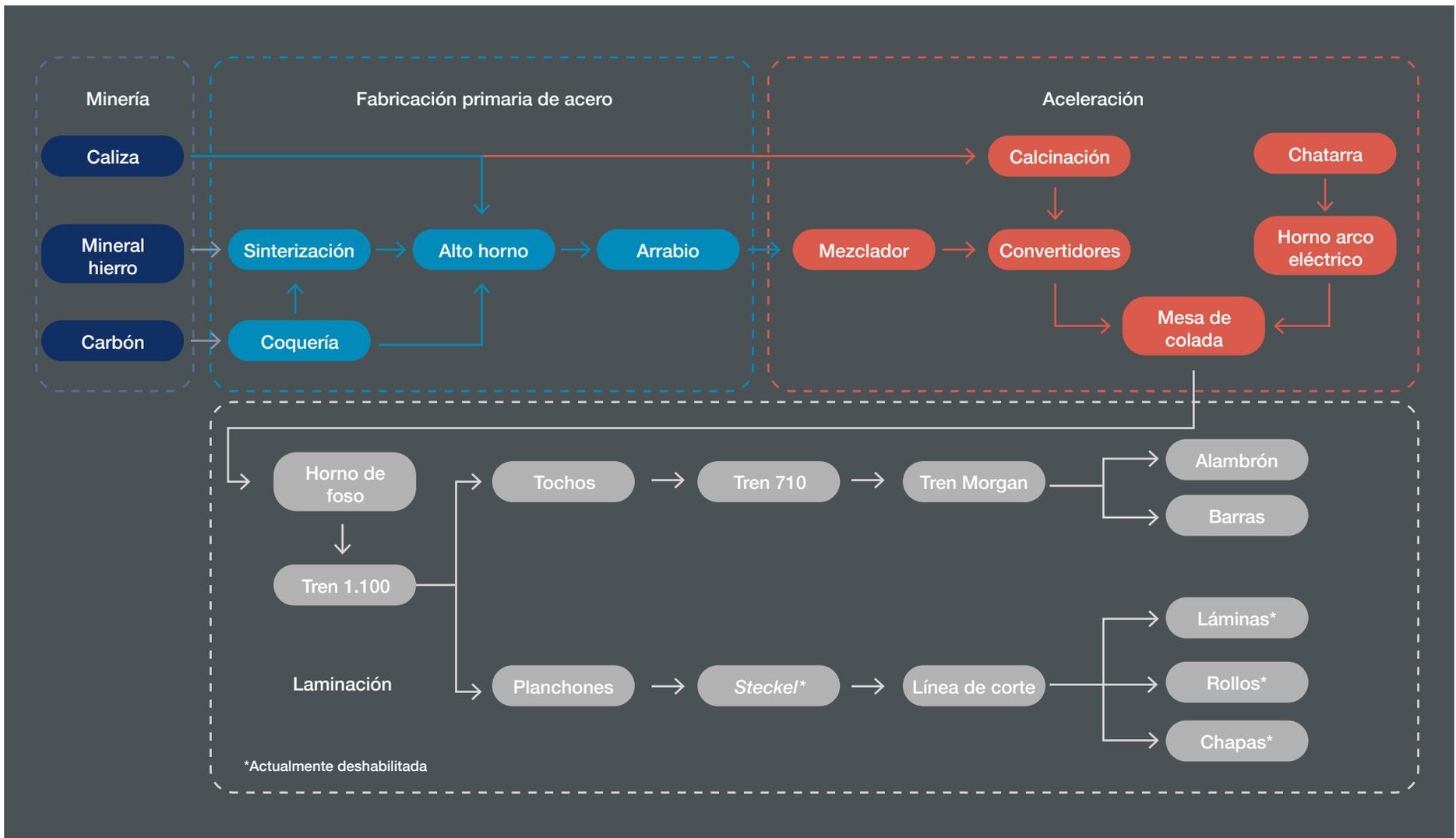
En el país existen proyectos de extracción minera de hierro, ubicados en los departamentos de Boyacá, Cauca, Cundinamarca y La Guajira, con una producción anual estimada, entre 2016 a 2019, en 6.075.913 toneladas de mineral de hierro (UPME, 2018b). Gran parte del mineral extraído no tiene un destino claro; sin embargo, se estima que parte de

esta producción se utiliza para reducción de mineral mediante sinterización para la posterior producción de acero en alto horno en forma de palanquilla; esto, con el fin de producir insumos para construcción. Este proceso se realiza en una única planta ubicada en el departamento de Boyacá. Se estima que dicha planta produce, aproximadamente, 67.900



toneladas al año<sup>16</sup> (DNP, 2002). En el capítulo 2, *Análisis de la producción nacional*, se presentan en detalle los procesos industriales para la fabricación del acero bajo este proceso industrial.

16. Se estima que 30 % del material ferroso producido por esta siderúrgica se da mediante reducción de minerales.



**Ilustración 4.** Diagrama de procesos de producción primaria de acero

**Fuente:** Minambiente recopilado de Cadavid, 2014.

Esta producción y la presencia de varios proyectos mineros no se consideran aportes importantes a los flujos, razón por la cual las entradas y salidas del balance de acero en el país estarán dominadas por el sector secundario de la economía (ANDI, 2017).

## 2.2 Metabolismos del acero (producción secundaria)

Las empresas agrupadas por el sector secundario de la economía representan 87 % del movimiento de acero en el país. Estas empresas se caracterizan por obtener sus materias primas a partir de desperdicios y desechos, fundición, hierro o acero para la producción de elementos que no son considerados remanufacturados, los cuales están clasificados por las partidas del capítulo 72 de clasificación aduanera, excepto el código 7204 referente a desperdicios ferrosos<sup>17</sup>.

Para clasificar las organizaciones se realizó un mapeo de las actividades económicas representativas que utilizan o producen elementos ferrosos<sup>18</sup>. En las consultas realizadas se encontró que dichas organizaciones realizan las siguientes actividades:

- Fabricación de artículos de cuchillería y herramientas.
- Fabricación de productos metálicos para uso estructural.

- Fabricación de tanques, depósitos y recipientes de metal.
- Fabricación de otros productos elaborados de metal NCP.
- Industrias básicas de hierro y acero.
- Industrias básicas de otros metales no ferrosos.
- Tratamiento y revestimiento de metales mecanizados.
- Otras industrias manufactureras NCP.

Aunque el país posee capacidad instalada para producir acero utilizado principalmente en la

construcción, dicha producción no cubre el consumo nacional; en particular, el de aceros especiales. Por ello, al analizar las actividades económicas mencionadas antes, se estiman unas importaciones anuales promedio de materiales ferrosos, entre 2017 a 2019, de 17.558.304 toneladas al año provenientes de productos y materias primas de los subgrupos, como acero para construcción, metalmecánica, maquinaria y equipos importados<sup>19</sup>. Así mismo, se establecieron exportaciones anuales promedio de materiales ferrosos de 2.219.832 toneladas al año<sup>20</sup>. Los materiales ferrosos consumidos son el material presente dentro de los límites del sistema Stock, definido en este estudio como la diferencia entre exportaciones e importaciones. La tabla 4 consolida los valores estimados de consumo de materiales ferrosos acotados por el consumo masivo, la industria y la construcción en el país.

**Tabla 4.** Cifras generales de acero estimadas entre 2017 y 2018

\*Ver ilustraciones 7 a la 9, flujo 6 y 7.

**Fuente:** Minambiente basado en datos de MinCIT y otros.

Año	2017	2018	2019
Stock*	11.958.002	12.417.469	12.646.991
Importaciones	16.885.338	17.817.828	17.971.747
Exportaciones	1.792.924	2.653.546	2.213.028
Consumo	6.391.903	7.005.526	6.907.446

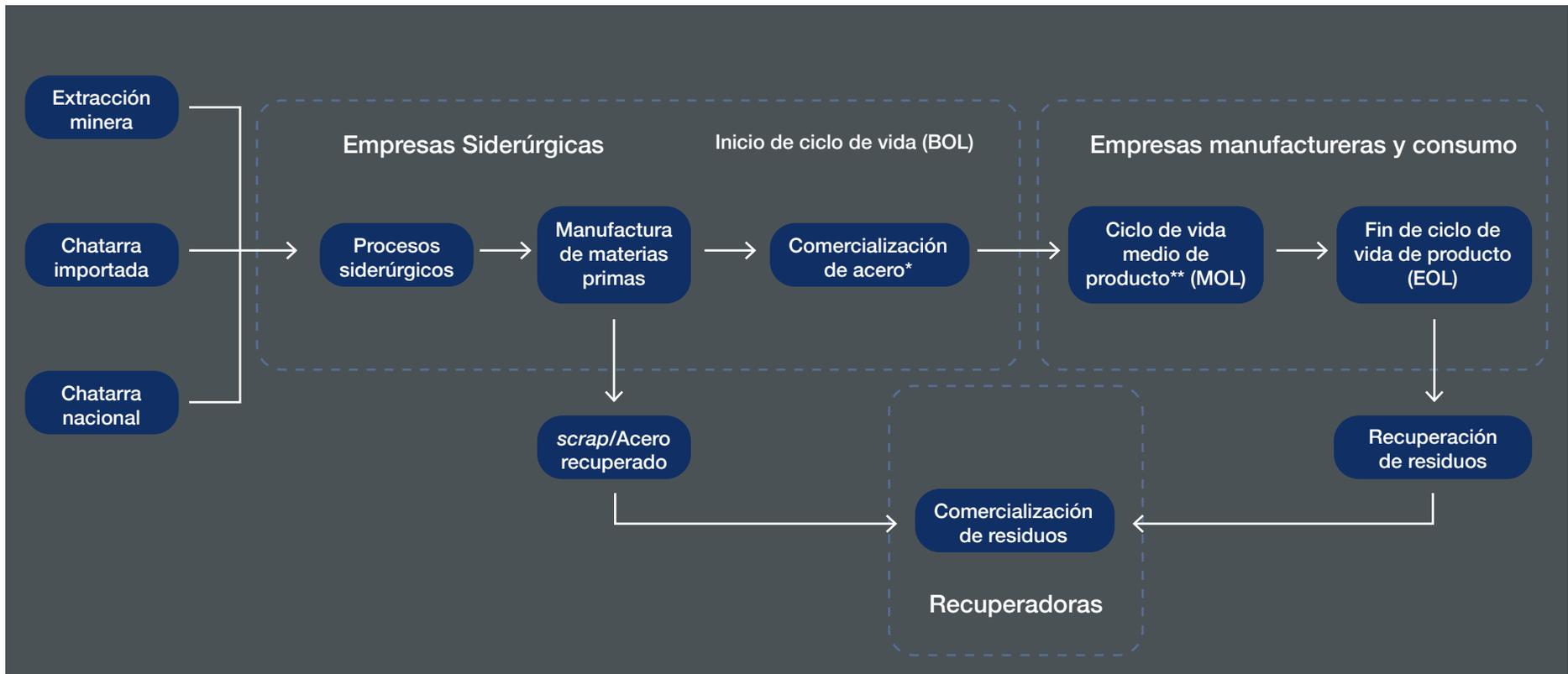
17. Capítulos de clasificación arancelaria determinados por la DIAN —fundición, hierro y acero—.

18. Extraído de bases de datos consolidadas y analizadas por el autor, como Cámara de Comercio de Bogotá, BACEX del MinCIT, DANE y tablas correlativas EAM 2018 y EAI 2018.

19. Datos analizados del BACEX del MinCIT consolidando las partidas arancelarias relacionadas con materiales ferrosos y las actividades económicas correspondientes a manufactura, producción y comercialización de aceros y sus productos derivados.

20. Datos analizados del BACEX del MinCIT consolidando las partidas arancelarias relacionadas con materiales ferrosos y las actividades económicas correspondientes a manufactura, producción y comercialización de aceros y sus productos derivados.

La ilustración 5 representa el diagrama del flujo de aceros en el país recopilando la información presentada antes, el relacionamiento de intercambios de masa en el país y la consulta de bases de datos.



**Ilustración 5.** Flujograma de transición del acero

**Fuente:** Minambiente (2021).

Cabe resaltar que en este análisis es necesario tener en cuenta las cifras del sistema Stock o de material en uso que esta condensado en las empresas comercializadoras de acero, así como la transición a las fases de utilización de los materiales o productos en las fases de ciclo de vida medio (MOL, por sus

siglas en inglés). Así mismo, el consumo de aceros está acotado por el material remanente dentro del sistema, el cual es determinado por la diferencia de exportaciones e importaciones. Los elementos considerados en este apartado hacen referencia a todos los productos y las materias primas con alto

contenido ferroso, como máquina y equipo, automotores, utensilios y herramientas, entre otros. A continuación se analizan los datos recopilados de cada uno de los actores involucrados en el ciclo de vida del acero para estimar el flujo nacional de los materiales ferrosos.

## 2.2.1 Organizaciones productoras de acero

La producción de acero en el país se remonta a la época de la Colonia cuando existían pequeñas ferrierías ubicadas en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, las cuales utilizaban forjas catalanas (Corradine, 2011). Sin embargo, fue solo hasta 1954 que el Gobierno nacional inauguró la primera empresa siderúrgica integral del país capaz de producir alambres y láminas tipo *cold roll* en cantidad y calidad para satisfacer gran parte de la demanda nacional. Así empezó la era de gran producción de acero en el país.

Hacia mediados del siglo pasado, la industria siderúrgica nacional tuvo un gran auge debido a megaconstrucciones como el Aeropuerto El Dorado y el Aeropuerto Enrique Olaya Herrera, época desde la que ha continuado el uso de sus productos en proyectos de infraestructura y de edificaciones. Durante el 2017, esta industria, junto a la cadena metalmeccánica, representó 10,56 % del PIB industrial (ANDI, 2019). Por ello, se le ha considerado la columna vertebral para el desarrollo del país (ANDI, 2018).

Las transacciones que alimentan el flujo de materiales por este tipo de empresas están

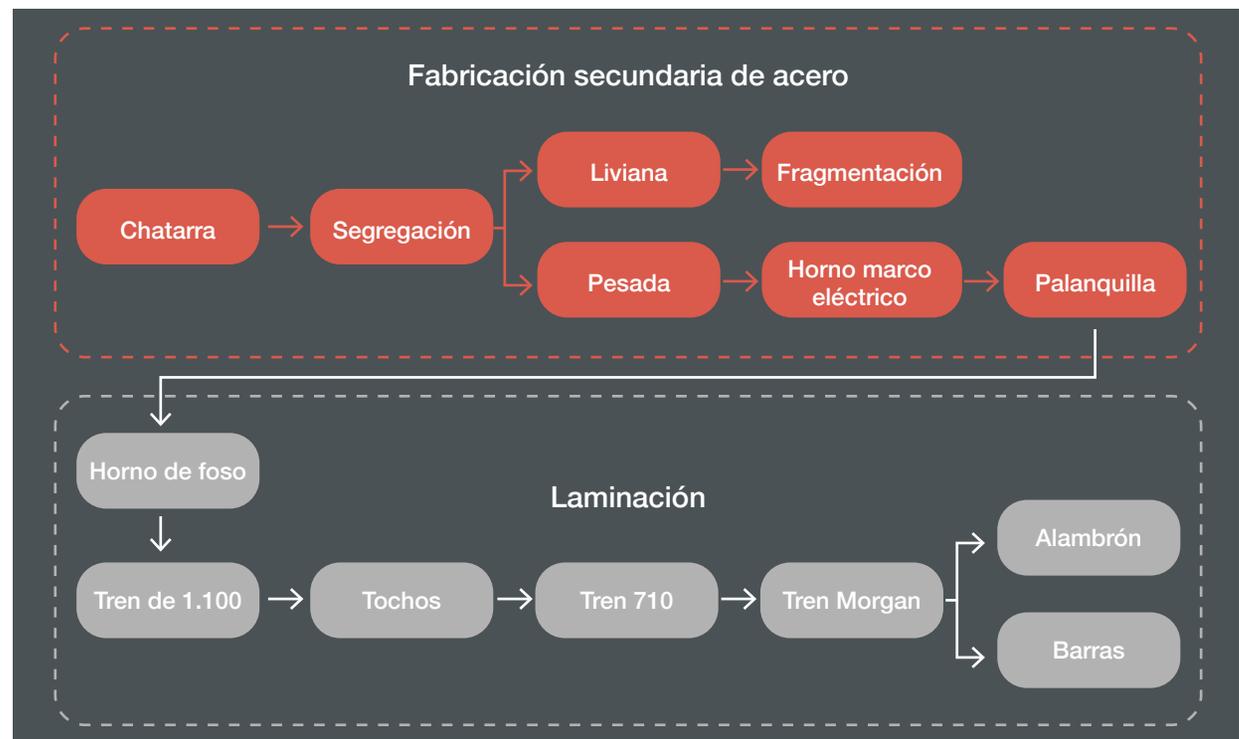
21. Productos féreos obtenidos por reducción directa de minerales de hierro y demás productos féreos esponjosos en trozos, *pellets* o formas similares, e hierro con una pureza superior o igual a 99,94 % en peso, en trozos, *pellets* o formas similares.

22. Dato promedio durante 2016 a 2019. Basado en cifras de datos públicos de comercio y consumo de aceros e información deducida de bases de datos con información de la ANDI, el BACEX (MinCIT), la ANM y el DANE.

23. Consultas realizadas a partir de análisis de bases de datos con información del BACEX del MinCIT y el *Informe de productores de acero* de la ANDI, 2018.

relacionadas con el capítulo 7203<sup>21</sup> y clasificadas con el código CIIU 2410; es decir, se consideran productores de aceros y otros metales ferrosos partiendo de la extracción de minerales y su procesamiento. En el país existe una planta capaz de transformar minerales a aceros aleados que representa 3 % sobre el balance total de masa. Por otra parte, se estima que 97 % del acero producido en el país proviene de la fundición de chatarra nacional y un remanente internacional. Así mismo, se estima que la producción nacional promedio de acero es de 1.602.714 toneladas al año<sup>22</sup>.

Al revisar los productos que manufacturan estas empresas se estima que 84,4 % son barras de hierro sin alear (palanquetas), seguido por 11,5 % que son productos similares utilizados como material en estado de suministro (EDS) para industrias manufactureras y posterior elaboración de elementos especializados propios de otros sectores —como el industrial, de construcción, de autopartes, agroindustrial, entre otros— (Barreto, 2014)<sup>23</sup>. La ilustración 6 presenta el diagrama de procesos que realizan estas empresas mientras que el proceso de producción en detalle se describe en el capítulo 4, *Análisis de la producción nacional*.



**Ilustración 6.** Diagrama de procesos producción secundaria de acero  
Fuente: Minambiente (2021).

Aunque estas empresas representan un ingreso de masa a los flujos de aceros, esta cifra no abastece la demanda total de materiales ferrosos del país. Por ello, los segmentos comercializadores complementan la demanda mediante la importación de materiales similares o de productos con alto contenido ferroso, como las ensambladoras de automotores, los electrodomésticos y la maquinaria industrial, entre otros.

## 2.2.2 Organizaciones comercializadoras de acero

La comercialización de material ferroso se da en dos estados: el primero agrupa el material en EDS —como perfiles, alambres, tuberías, barras, entre otros— y el segundo agrupa productos más elaborados, como elementos de máquina, o productos ensamblados, como electrodomésticos, vehículos automotores o máquinas industriales. Así mismo, dentro de esta comercialización, en la industria manufacturera sobresale la de utensilios para la agroindustria —como machetes—, elementos de unión rápida —como puntillas, clavos y tornillos— y elementos semielaborados para la construcción<sup>24</sup>.

Este sector se caracteriza por registrar grandes importaciones —tanto en grandes empresas como en pequeñas y medianas empresas (Pymes)— de material proveído por empresas especializadas en la comercialización de productos manufacturados, ya sea por la transformación y ensamble de materias primas, principalmente acero, o por la importación y posterior comercialización de productos. De 2017 a 2019, se estima que la masa promedio aportada por estas organizaciones al país es de 17.511.552 toneladas al año, ya sea como productos manufacturados, aleados, no aleados o en EDS.

**Tabla 5.** Cantidades del flujo de aceros comercializados, 2016-2019

**Fuente:** Minambiente basado en datos de MinCIT y otros.

Año	2017	2018	2019
Manufacturados	3.428.515	3.486.800	3.598.378
No aleados (productos)	7.972.011	8.107.535	8.366.976
Aleados	1.072.954	1.091.194	1.126.113
No aleados (suministro)	4.658.071	4.737.258	4.888.850
Total (t)	17.131.552	17.422.788	17.980.317

Este material es importado debido a que no tiene competidores a nivel local. En el país no se encontraron registros de empresas que formulen y laminen aceros o aleaciones de acero, cuyo propósito sea la generación de elementos de maquinaria. Los productos importados de estas empresas son aquellos acotados por los capítulos 73, *Manufacturas de fundición, hierro o acero*; 82, *Herramientas y útiles, artículos de cuchillería y cubiertos de mesa de metal común, partes de estos artículos de metal común*; y 83, *Manufacturas diversas de metal común*<sup>25</sup>. Se encontró que 70 % de los insumos provienen de países de la región, como Panamá, Ecuador, Venezuela,

Perú, Estados Unidos, entre otros, y se observaron picos de importaciones en marzo y noviembre.

Así mismo, se encontró que dichas empresas también realizan exportaciones de manufacturados de acero, principalmente utensilios para la agroindustria —como machetes—, elementos de unión rápida —como puntillas, clavos y tornillos— y semielaborados para la construcción. Entre 2016 y 2019, estos sumaron un total de 1.807.000 toneladas al año, las cuales, en su mayoría, tuvieron como destino países de la región, como Perú, Ecuador, México, Cuba, Panamá, entre otros, y picos de exportación en agosto y diciembre.

24. Un vacío importante en este consolidado de información son los elementos semielaborados en las industrias manufactureras relacionadas con la integración nacional de vehículos automotores, las cuales involucran grandes cantidades de material ferroso que no se acogen a las nomenclaturas manejadas en esta investigación.

25. Capítulos de clasificación arancelaria determinados por la DIAN —fundición, hierro y acero—.

### 2.2.3 Empresas recuperadoras de acero

Las empresas etiquetadas en esta actividad son aquellas dedicadas a la recolección y comercialización de chatarra. Se estima que, aproximadamente, 80 % del material recuperado en las cadenas de reciclaje es demandado por las siderúrgicas para la elaboración de materiales lamina-dos utilizados, en su mayoría, en los sectores de construcción (Millán, 2015).

A través de la codificación y clasificación CIU se identificaron los modelos de negocio asociados con el movimiento de desechos y desperdicios ferrosos y no ferrosos. Las consultas indicaron que las empresas recuperadoras mezclan las actividades de recuperación, acopio, segregación y clasificación de materiales. Estas actividades rotulan a las empresas bajo las actividades económicas de comercialización y recuperación de materiales de todos los tipos.

Se encontró que 70 % de las empresas descritas por estas actividades económicas son de tipo comercializadora internacional (C. I.) con grandes

volúmenes de material exportado; en especial, de tipo no ferroso y aleaciones<sup>26</sup>. Estas empresas realizan dos actividades: acopio de materiales para la comercialización dentro del país, suministrándolos a empresas siderúrgicas nacionales, y exportación, agregándoles valor mediante la clasificación según los requerimientos del comprado en el exterior<sup>27</sup>.

Durante 2017 a 2019, se estima que estas empresas exportaron, aproximadamente, 17.885 toneladas al año y que sus principales destinos fueron China, Venezuela, Bolivia y Estados Unidos. Sin embargo,

la cantidad de material rastreado mediante las exportaciones bajo las subpartidas relacionadas con el capítulo 72<sup>28</sup> no coincide con el fenómeno manifestado por las siderúrgicas, en el cual gran parte de la chatarra del país se exporta desabasteciendo el mercado local de este insumo primario. Incluso se manifiesta que la chatarra se exporta en su mayoría a países asiáticos. Por otra parte, entre 2017 a 2019, se estima que estas empresas importaron, aproximadamente, 94.452 toneladas al año. Este fenómeno se dio para suplir a las empresas siderúrgicas nacionales.

**Tabla 6.** Importaciones y exportaciones nacionales de chatarra ferrosa\*

\* Desperdicios y desechos de acero inoxidable, 7204210000; desperdicios y desechos de hierro o de acero estañados, 7204300000; demás desperdicios y desechos de aceros aleados, 7204290000; desperdicios y desechos (chatarra) de fundición, 7204100000; torneaduras, virutas, esquirlas, limaduras (de amolado, aserrado, limado) y recortes de estampado o de corte incluso en paquetes, 7204410000.

**Fuente:** Minambiente basado en datos de MinCIT y otros.

Desecho	2017	2018	2019
Exportación	17.497	17.794	18.363
Importación	92.864	94.443	96.048

26. Estas empresas registran movimientos de exportaciones en la plataforma BACEX sobre las partidas arancelarias del capítulo 7204, 7404, 7602, entre otras relacionadas con desperdicios y chatarra. Estas organizaciones se concentran en las capitales de los departamentos de Antioquia, Cundinamarca y los Santanderes.

27. Datos arrojados por análisis de base de datos formulada a partir de información del BACEX, la EAM, el DANE, la Cámara de Comercio de Bogotá y la ANDI.

28. Capítulos de clasificación arancelaria determinados por la DIAN —fundición, hierro y acero—.

## 2.2.4 Flujo de materiales ferrosos

Con base en la anterior información y mediante la herramienta STAN 2.6.801<sup>29</sup>, bajo el método de cálculo de DI Oliver Gencic (TU-Wien) y diferencia de cuadrados, se estimaron los flujos de masa de materiales ferrosos para el periodo de 2017 a 2019.

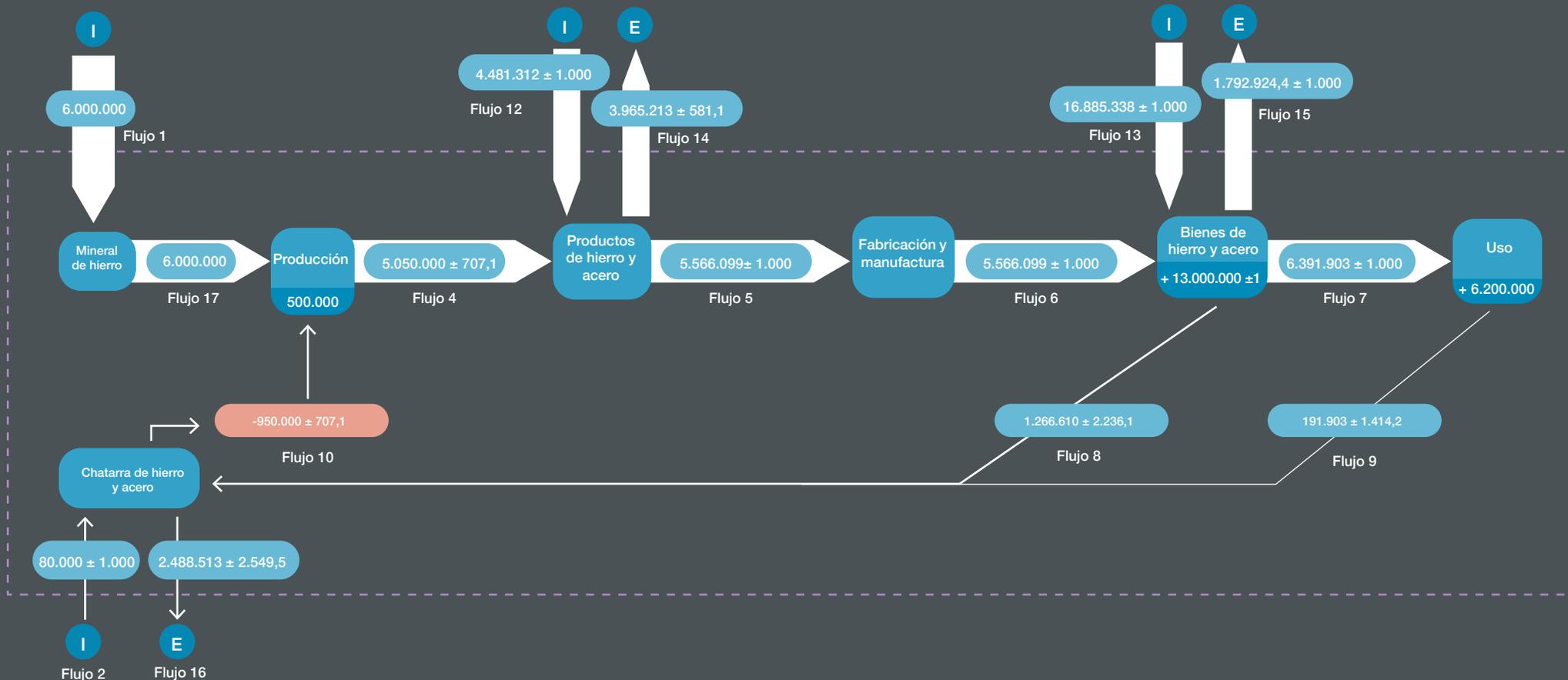
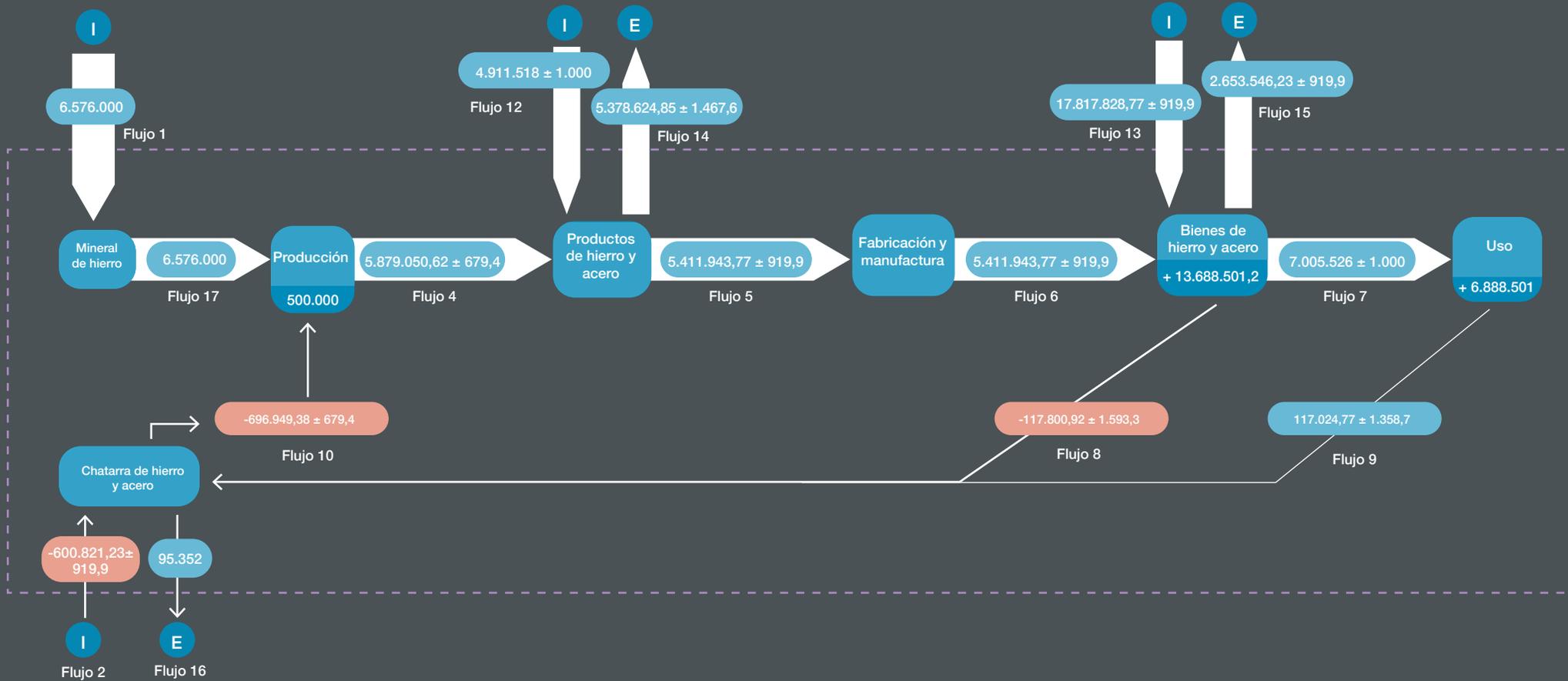


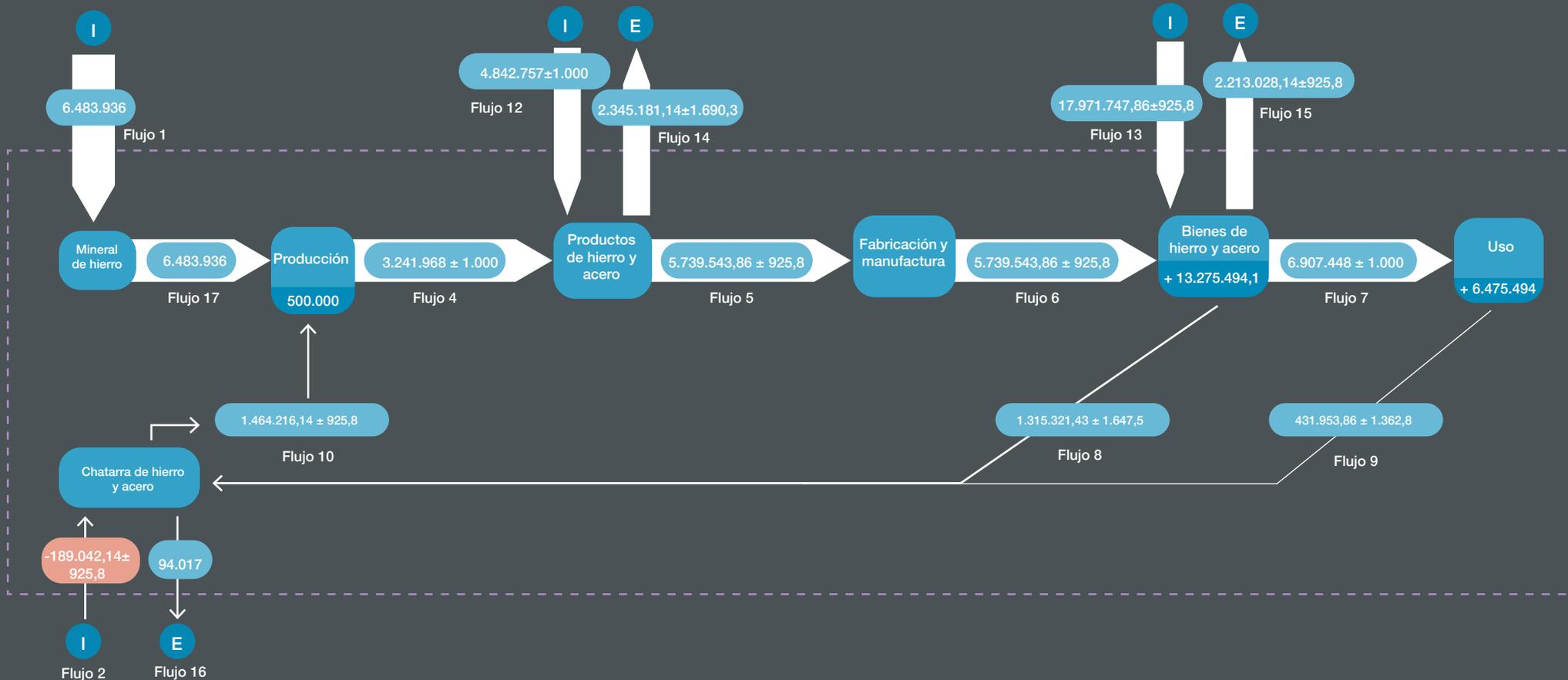
Ilustración 7. Flujo de masa según ciclo de vida del acero, 2017

Fuente: Minambiente (2021).

29. Institute for Water Quality, Resources and Waste Management, Vienna University of Technology, Karlsplatz 13, A-1040 Vienna.



**Ilustración 8.** Flujo de masa según ciclo de vida del acero, 2018  
**Fuente:** Minambiente (2021).



**Ilustración 9.** Flujo de masa según ciclo de vida del acero, 2019  
**Fuente:** Minambiente (2021).

Los *mass flow analysis (MFA)* presentados antes son extraídos según las búsquedas adelantadas en capítulos anteriores, así mismo se realizó una proyección de las cifras por medio del escalamiento con factores provenientes de indicadores relevantes como el valor libre a bordo o *free on board (FOB)* de las exportaciones, el índice de precios al consumidor (IPC) y los indicadores de seguimiento a la economía (ISE).

En el flujo anterior se aprecia el déficit generalizado de chatarra en Colombia. Los valores de chatarra generada apuntan a que los valores de exportaciones son mayores que aquellos registrados en cifras determinadas a lo largo de la investigación. El balance de este flujo está dado por la generación y reincorporación de materiales ferrosos dentro del sistema. Partiendo de los datos consolidados, se

establecen los flujos de entrada y salida (flujos 2 y 16) que mantienen el *stock* de, aproximadamente, 900.000 toneladas, alimentados por una entrada de materia de alrededor de 6.000.000 de toneladas.

Otra restricción del balance se da en el flujo 10, en el que se mapea la reinserción de material a los procesos de producción mediante la recuperación. Esta

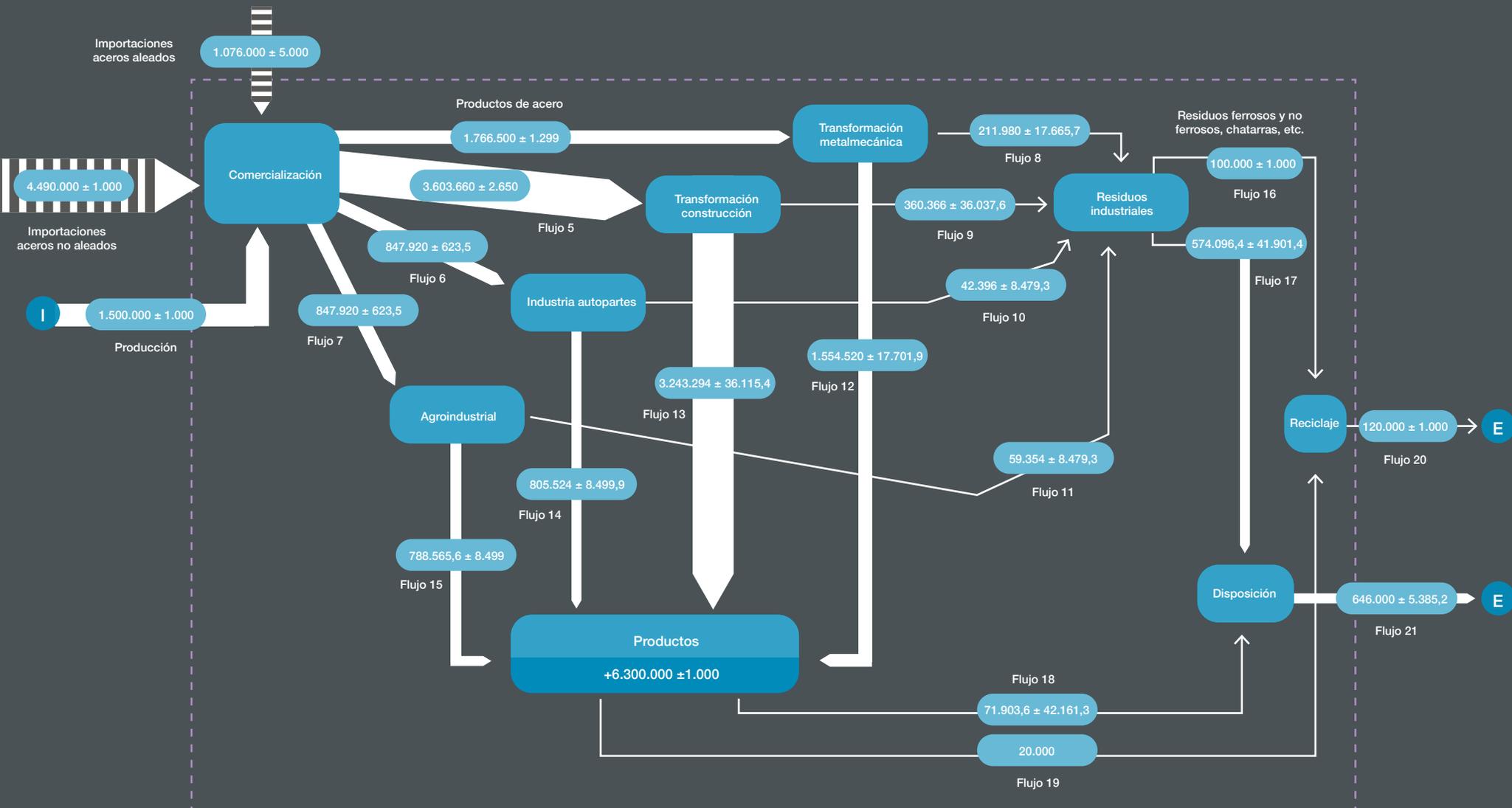
cifra se aproxima a 1.500.000 toneladas. A lo largo del flujo se cuenta con varias entradas y salidas que no modifican en gran medida los balances de los procesos. Además, se aprecia el déficit generalizado de chatarra en Colombia (valores en rojo).

En la ilustración 10 se desglosa el balance de aceros, en el que los procesos de transformación más representativos están relacionados con la producción metalmeccánica, la construcción, la agroindustria y el transporte, siendo la construcción

el segmento que más consume materiales ferrosos en el país. Mediante la reconstrucción de la tasa de consumo de acero se determinó un aproximado de 646.000 toneladas de material que salen del sistema sin establecer su destino ni forma.

**Ilustración 10.** Flujo de materiales ferrosos y sus desperdicios, 2016-2018

Fuente: Minambiente (2021).



# 3. Flujo de masa del aluminio

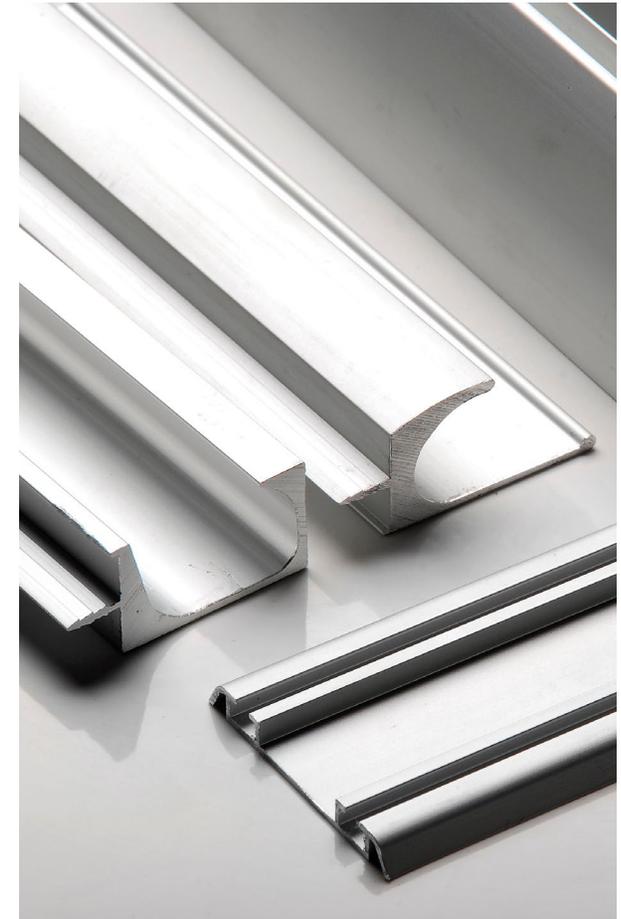
Al igual que el flujo de masa presentado antes, en este apartado se pretendió estimar las cantidades provenientes del sector primario de la economía, relacionado con la minera; del sector secundario, dominado por los consumos y la transformación de materiales; y del sector terciario, correspondiente al comercio y consumo masivo de este insumo. Luego se hizo la clasificación de las cantidades, las organizaciones y los estados del material —suministro, reciclado y producto—.

## 3.1 Metabolismos del aluminio (sector primario)

En el país existen proyectos de extracción de bauxita —mineral esencial para la producción de alúmina y, posteriormente, de aluminio como material en bruto— ubicados en los departamentos de Cauca y Valle del Cauca. Entre 2017 y 2020, estos proyectos tuvieron una producción anual estimada de 32.246 toneladas (UPME,

Los datos suministrados en este informe están sustentados por las consultas realizadas sobre las bases de datos generadas a partir del desarrollo metodológico mencionado antes. A continuación se presentan las consultas relacionadas con los tres sectores de la economía y el flujo de la masa de aluminio en Colombia.

2018b)<sup>30</sup>, destinadas principalmente a la producción de refractarios acoplados en la industria cementera o al tratamiento de agua. Sin embargo, la masa de bauxita extraída no es la suficiente para sustentar el consumo interno de aluminio. De acuerdo con las consultas realizadas, en el país no existen organizaciones relacionadas con



la fabricación primaria de aluminio, por lo que la producción nacional de aluminio se sustenta en la recuperación de material (reciclaje) y el flujo de importaciones.

30. Análisis de base de datos de la ANM.

## 3.2 Metabolismos del aluminio (sector secundario)

Las empresas agrupadas por el sector secundario de la economía representan 100 % del movimiento de aluminio en el país. Dichas empresas se caracterizan por combinar en sus materias primas los códigos relacionados con los desperdicios y desechos de fundición de metales no ferrosos para la producción de elementos sin ser considerados remanufacturados, las cuales están clasificadas por las partidas de los capítulos 7204, 7602 y 7404<sup>31</sup>. Debido a que en el país no hay producción de aluminio primario<sup>32</sup>, la recuperación de material juega un papel importante en la industria nacional. Por lo tanto, dicho material vuelve a fundirse para la generación de nuevos productos. Por otra parte, se identificó que las empresas también realizan importaciones de material, virgen o chatarra, para abastecerse de aluminio.

Aunque el país posee capacidad instalada para producir aluminio —utilizado principalmente en construcción y metalmecánica—, dicha producción no cumple con el consumo nacional. Por ello, existe una entrada y salida importante de estos materiales del país. Al analizar dichos flujos del 2017 al 2019, se estiman unas importaciones anuales promedio de aluminio de 1.704.471 toneladas al año, provenientes de productos y materias primas de los subgrupos aluminio para construcción, metalmecánica, maquinaria y equipos importados. Así mismo, se establecieron exportaciones anuales promedio de 777.033 toneladas al año<sup>33</sup>.

Los materiales de aluminio consumidos pueden considerarse como el material presente dentro de los límites del sistema Stock, el cual en este estudio se define como la diferencia entre exportaciones

e importaciones. La tabla 7 consolida los valores estimados de consumo de aluminio acotados por el consumo masivo, la industria y la construcción.

**Tabla 7.** Cifras generales de aluminio estimadas, 2016-2019

\* Ver ilustraciones 15 a la 17, flujo de productos de aluminio y de bienes con aluminio.

**Fuente:** Minambiente basado en datos de MinCIT y otros.

Año	2017	2018	2019
Stock*	2.804.751	2.362.116	2.621.951
Importaciones	1.767.862	1.585.569	1.759.983
Exportaciones	710.871	767.880	852.347
Consumo	1.046.940	797.118	884.802

31. Capítulos de clasificación arancelaria determinados por la DIAN —fundición, hierro y acero—.

32. El aluminio primario es el que se obtiene directamente de la bauxita. Para extraer aluminio del mineral, el óxido de aluminio de la bauxita se disuelve primero mediante el proceso Bayer y luego se separa mediante electrólisis ígnea.

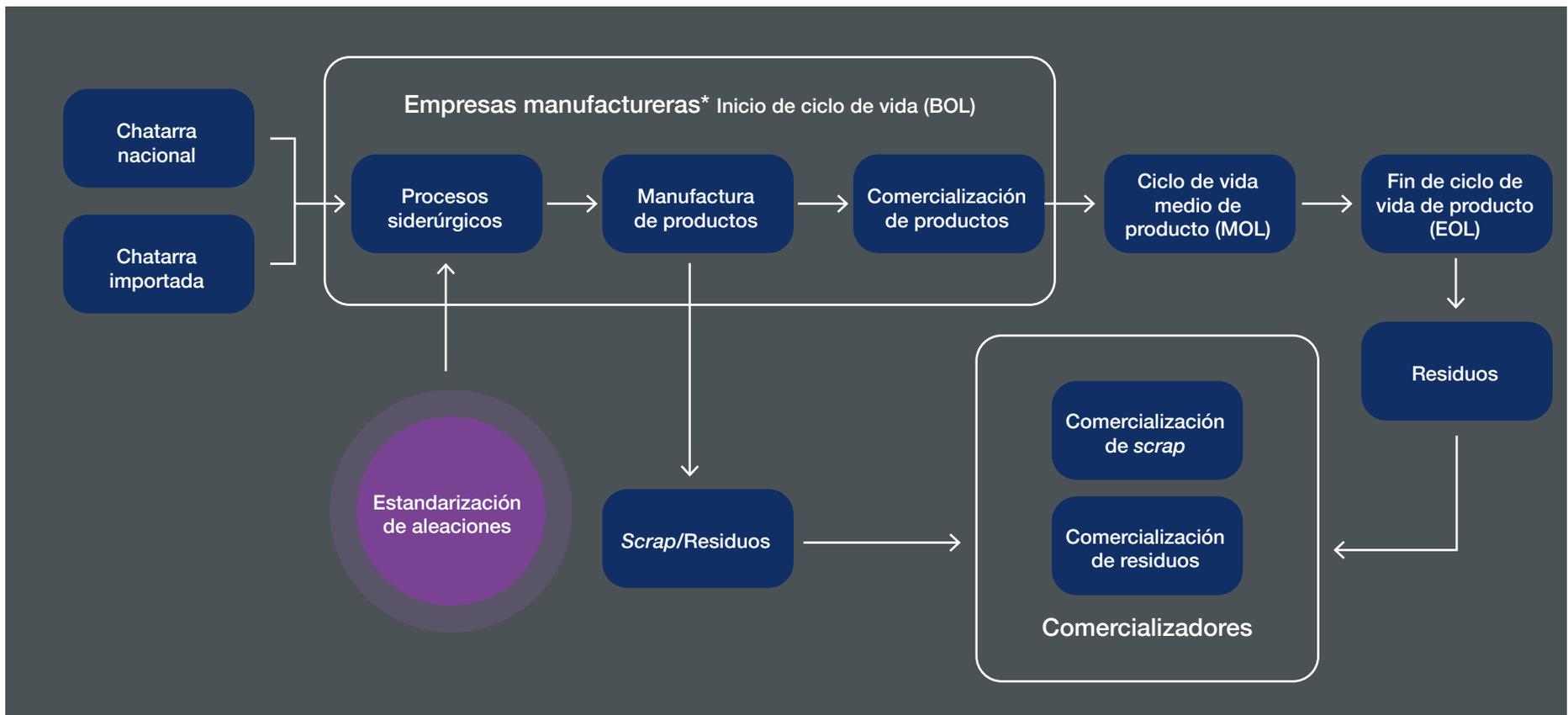
33. Datos analizados del MinCIT y el BACEX consolidando las partidas arancelarias relacionadas con materiales ferrosos y las actividades económicas correspondientes a manufactura, producción y comercialización de aceros y sus productos derivados.

Es importante resaltar que la relación entre el material que ingresa al país y el material que es exportado está por debajo de 30 %<sup>34</sup>. Existen hipótesis que indican que los residuos potenciales de aluminio están alrededor de 1.7 millones de toneladas que circulan al interior del sistema. La ilustración 11 representa el diagrama del flujo de aluminio en el

país recopilando la información presentada antes y el relacionamiento de intercambios de masa en el país según las bases de datos.

Se ha observado que las dinámicas del aluminio en el país se han visto fuertemente afectadas por las medidas tomadas por Estados Unidos en materia

de exportaciones de productos terminados. Así mismo, se han observado importaciones provenientes de China y Venezuela, lo que afecta las ventas de las empresas nacionales. A continuación, se analizan los datos recopilados de cada uno de los actores involucrados en el ciclo de vida del aluminio para estimar el flujo nacional.



**Ilustración 11.** Flujograma de transición del aluminio

**Fuente:** Minambiente (2021).

34. Relación importaciones/exportaciones = 28,68 %. Análisis de bases de datos del BACEX y el MinCIT.

### 3.2.1 Organizaciones productoras y comercializadoras de aluminio

Según las consultas elaboradas, las empresas productoras y manufactureras de aluminio utilizan la chatarra como materia prima. La producción nacional inició, aproximadamente, hacia 1950 con una empresa internacional en el Valle del Cauca. En la actualidad, dicho sector se ha expandido alcanzando siete empresas, ubicadas en los departamentos de Atlántico, Antioquia, Bogotá, Risaralda y Valle del Cauca. Estas empresas comercializan estos productos y dan paso al consumo o utilización de los elementos hasta el fin de vida útil o *MOL*, cuando se convierten en desechos o residuos que son comercializados de nuevo en el mercado nacional o que son exportados mediante procesos de recolección y segregación.

Como se mencionó antes, en Colombia no se produce aluminio primario, por lo que el aluminio comercializado al interior del sistema se encuentra en forma de residuo, EDS o productos manufacturados. Además, en el país no existen empresas netamente productoras de aluminio como material en EDS —es decir, palanquetas o lingotes—, por lo que las empresas producen estos elementos como productos intermedios que son almacenados y utilizados en la elaboración de productos terminados. En este segmento también se agrupan las manufactureras que ingresan aluminio al sistema mediante importaciones o

recuperaciones y que, posteriormente, lo comercializan en presentaciones que son utilizadas en empaques de alimentos, construcción o metalistería. Al consolidar las cifras de las actividades descritas antes, se estima que entre 2016 y 2019

la producción nacional promedio de aluminio fue de 70.250 toneladas al año. La tabla 8 resume las cantidades de material comercializado excluyendo los valores de chatarra de aluminio que son abordados más adelante.

**Tabla 8.** Cantidades del flujo de aluminio producidas, 2016-2019

**Fuente:** Minambiente basado en datos de MinCIT y otros.

Año	2016	2017	2018	2019
Material EDS	38.662	39.319	39.987	41.267
Productos manufacturados	30.421	30.421	30.939	31.929
Total (t)	69.083	69.740	70.926	73.195

Dentro de los productos, se encuentra que 91,1 % de aluminio se produce en forma de perfilería; es decir, manufacturado. Los productos con mayor rotación en el país son laminados y perfiles con aplicaciones estructurales en el sector de construcción. Además, son pocas las organizaciones que manufacturan elementos de

maquinaria como carcazas, productos de consumo masivo y autopartes. El diagrama de producción de estas empresas se puede ver en la ilustración 12. Por otra parte, las empresas de gran tamaño movilizan cerca de 60 % del material del país, lo que deja 40 % en empresas pymes especializadas en el procesamiento de aluminio.

Existen similitudes entre las empresas de importación y exportación de aluminio al país para comercialización. En Colombia, que no es productor primario de aluminio, las necesidades de esta materia prima se obtienen de la importación o del reciclaje de materiales residuales agregando valor mediante procesos de producción y comercializando o exportando los productos terminados. Al analizar las importaciones al país del 2017 al 2019, se estima que ingresaron 1.704.471 toneladas al año. Los productos más representativos que ingresan al país son perfiles de aleaciones de aluminio, tubos de aleaciones de aluminio, demás depósitos, cajas y recipientes similares y demás manufacturas de aluminio. Dichas importaciones tienen picos en marzo, junio y diciembre.

Se estima que las exportaciones, del 2017 al 2019, del país fueron de 777.033 toneladas al año. Los productos más representativos que salen del país son perfiles de aleaciones de aluminio, puertas, ventanas, bastidores y umbrales de aluminio, partes de artículos de uso doméstico de aluminio y desperdicios y desechos de aluminio. Dichas exportaciones tienen picos en abril y agosto y como destino principal Estados Unidos y México.

### 3.2.2 Empresas recuperadoras y cantidades recicladas de aluminio

Estas empresas se dedican a la recuperación de materiales metálicos en general; por ende, es razonable que aparezcan en los análisis de otros materiales. Además, las organizaciones mencionadas en este apartado guardan una estrecha relación con la comercialización y exportación de residuos de aluminio recuperado de

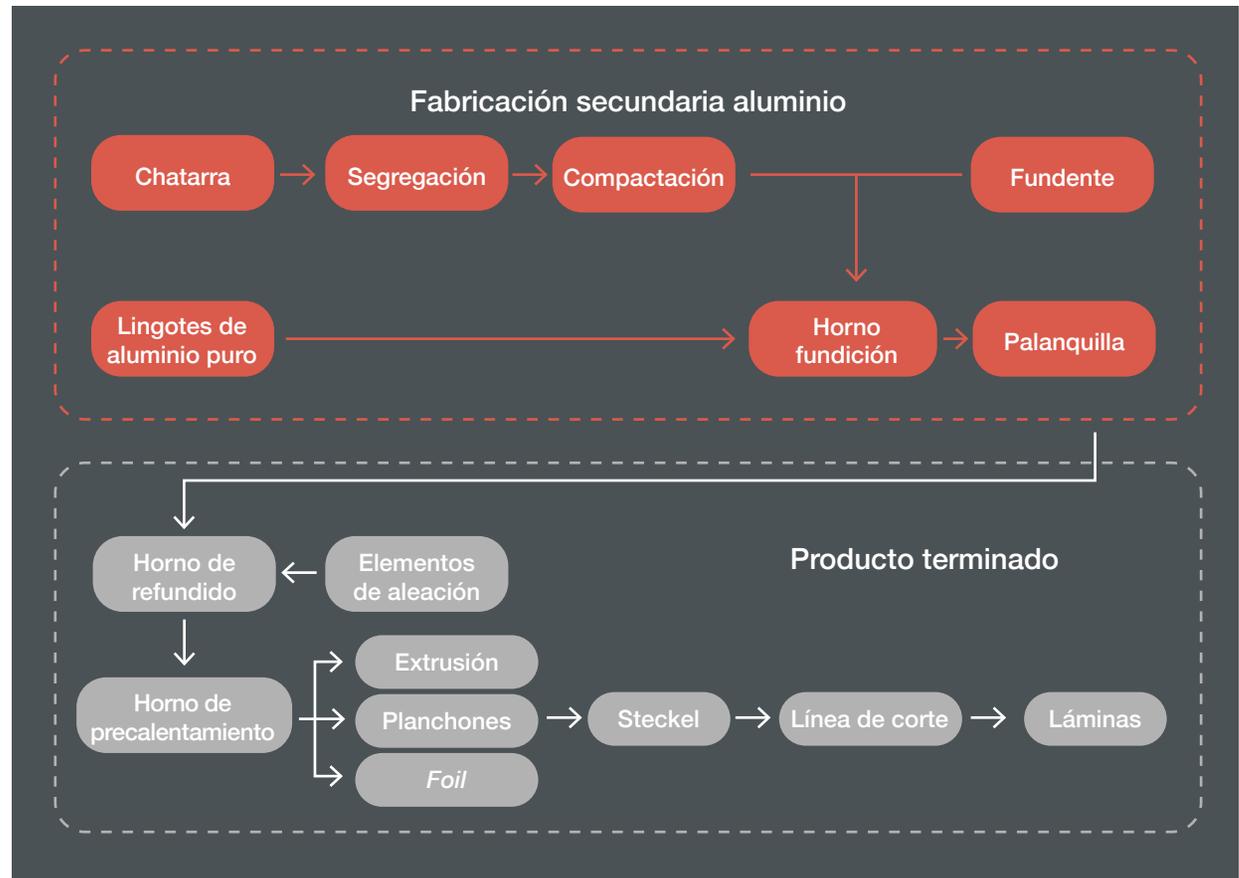


Ilustración 12. Diagrama de procesos de producción secundaria del aluminio  
Fuente: Minambiente (2021).

diversas fuentes; por ejemplo, de RAEE, empaques, construcción, entre otros. Se estima que estas empresas exportaron, de 2017 a 2019, aproximadamente, 75.863 toneladas al año de aluminio recuperado, cuyo destino fueron países con potencial de recuperación y postratamiento de desperdicios como Estados Unidos, China,

Panamá, Ecuador, entre otros. Para complementar el consumo interno, las importaciones de residuos de aluminio, de 2017 a 2019, se estimaron, aproximadamente, de 7.107 toneladas al año. La diferencia respecto al comercio de chatarra en el exterior es abismal y puede incidir en problemas de abastecimiento en las empresas industriales.

**Tabla 9.** Importaciones y exportaciones nacionales de chatarra aluminio

**Fuente:** Minambiente basado en datos de MinCIT y otros.

Desecho	2017	2018	2019
Exportación	67.329	75.953	84.308
Importación	8.587	6.035	6.699

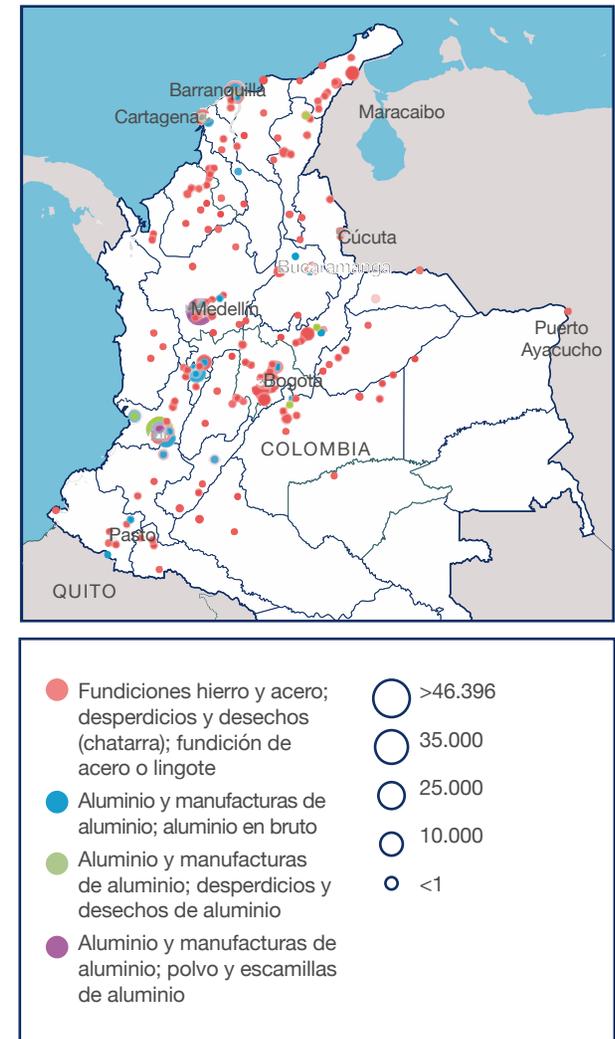
El comercio de aluminio en forma de desecho está mezclado con organizaciones de tipo C. I., acopiadoras de materiales varios, y con empresas que procesan aluminio como materia prima y que generan residuos durante el proceso. Este fenómeno sugiere que las fuentes de chatarra no dependen solo del desecho de productos, sino que existe una fuente importante de residuos que surge de las ineficiencias de los procesos que transforman la materia prima y la convierten en producto. Además, son pocas las empresas que movilizan estas cantidades, lo cual indica una concentración en los servicios de acopio y comercialización de material recuperado, contrario a la informalidad que aún se aprecia en el sector de reciclaje. Esto obedece a la consolidación de materiales recuperados por toda la cadena de recicladores, la cual comercializa materiales que suman valor en la medida en la que se clasifican, embalan y procesan hasta convertirse en productos comercializables.

A nivel nacional, las mayores concentraciones de transacciones y transporte de desperdicios de materiales ferrosos y no ferrosos están en las ciudades capitales. Entre 2015 y 2019, los municipios de Yumbo, Candelaria y Valle del Cauca concentraron

la mayor cantidad de residuos de aluminio, con una participación aproximada de 70,4 %, seguidos por Bogotá con un aproximado de 12,4 % y por Dosquebradas, Risaralda, con 7,2 %<sup>35</sup>. Así mismo, se encontró que cerca de 25 % del flujo de material proviene de diferentes municipios de las regiones de Llanos Orientales, Santanderes, Nariño y La Guajira. Se estima que estos son residuos generados a partir de maquinaria y equipo desechado por la industria minero-energética.

También se encontró que, aproximadamente, 5 % de las toneladas al año son movidas por personas naturales bajo partidas del segmento 7616. Se mencionan estas concurrencias para denotar casos particulares en el flujo de materiales. Finalmente, se percibe que las empresas manufactureras no son ajenas a la venta directa de sus residuos al mercado internacional debido a la atractiva oferta que es la comercialización de sus desechos industriales.

35. Estas pesquisas fueron adelantadas mediante el análisis de datos publicado por el Ministerio de Transporte, en los que se asocian los cargues y descargues por subpartida arancelaria recopilados por los manifiestos de transporte terrestre.



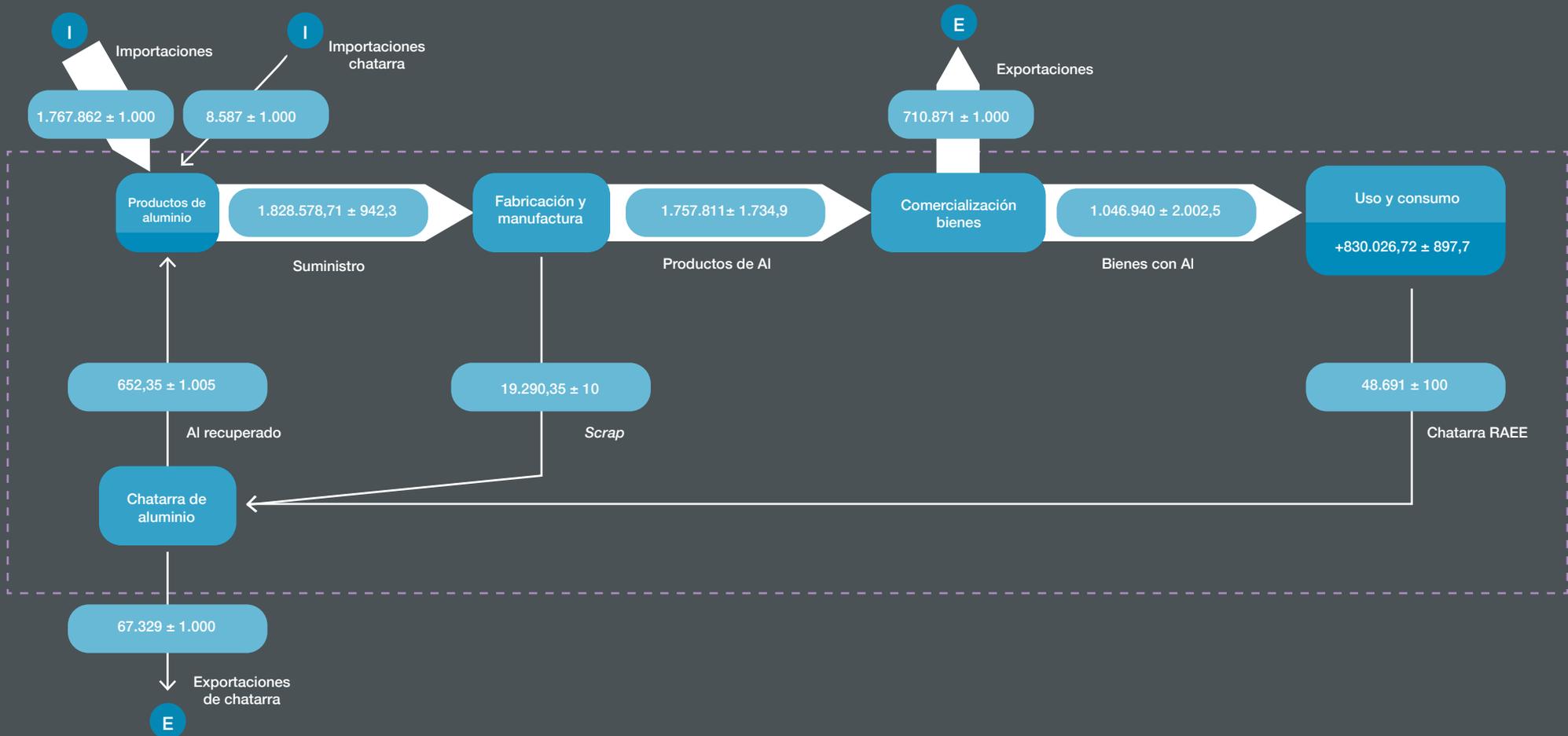
**Ilustración 13.** Distribución de residuos generados en el territorio nacional

\* Análisis de datos publicados por el Ministerio de Transporte, *Remesas del Registro Nacional de Despachos de Carga (RNDC)*, 2016 a 2019.

**Fuente:** Minambiente basado en datos de MinCIT y otros.

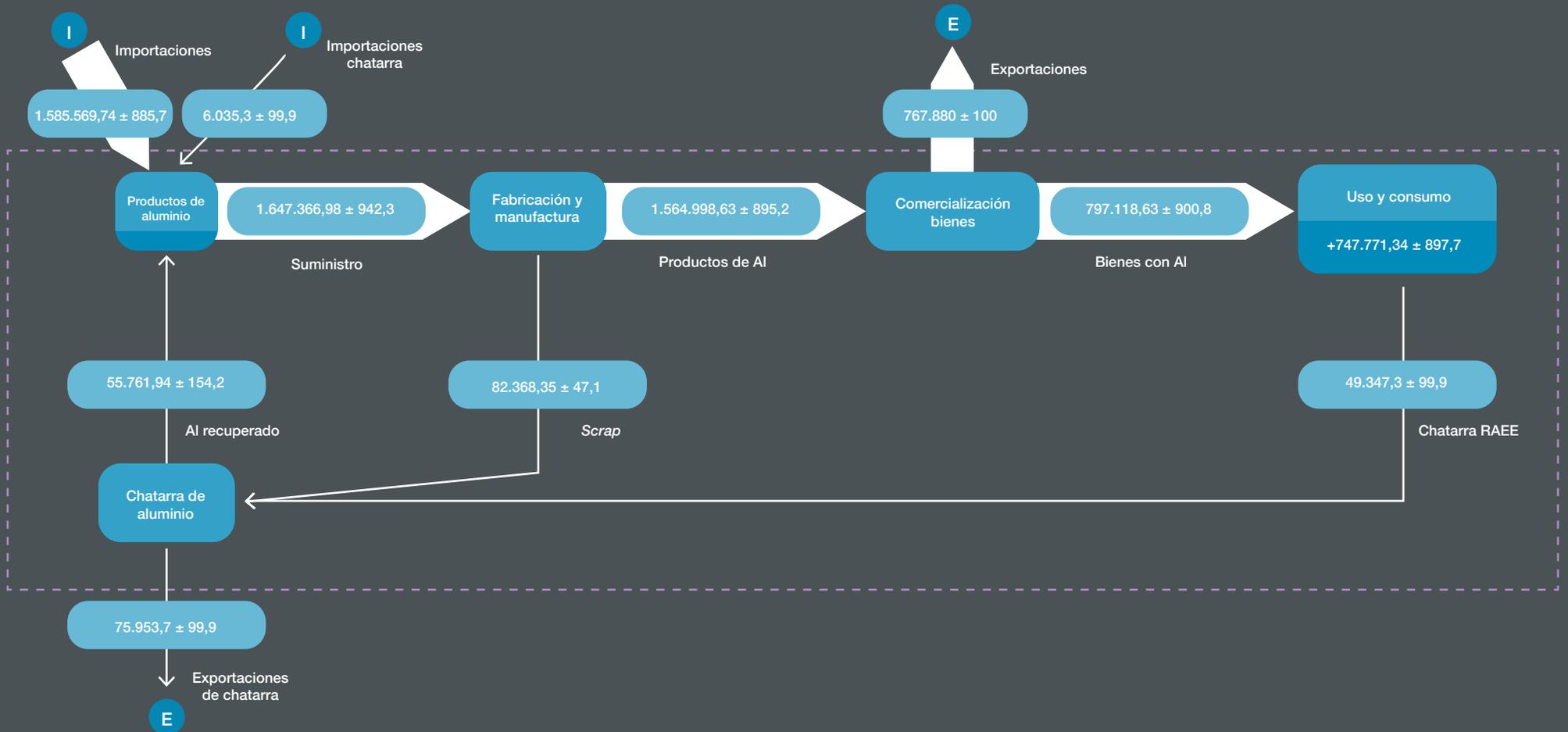
### 3.2.3 Flujos de materiales de aluminio

Para el periodo del 2017 a 2019, se estimaron los flujos de masa de materiales ferrosos en términos del ciclo de vida del aluminio utilizando la herramienta para determinar el flujo y recopilando la información enunciada antes.

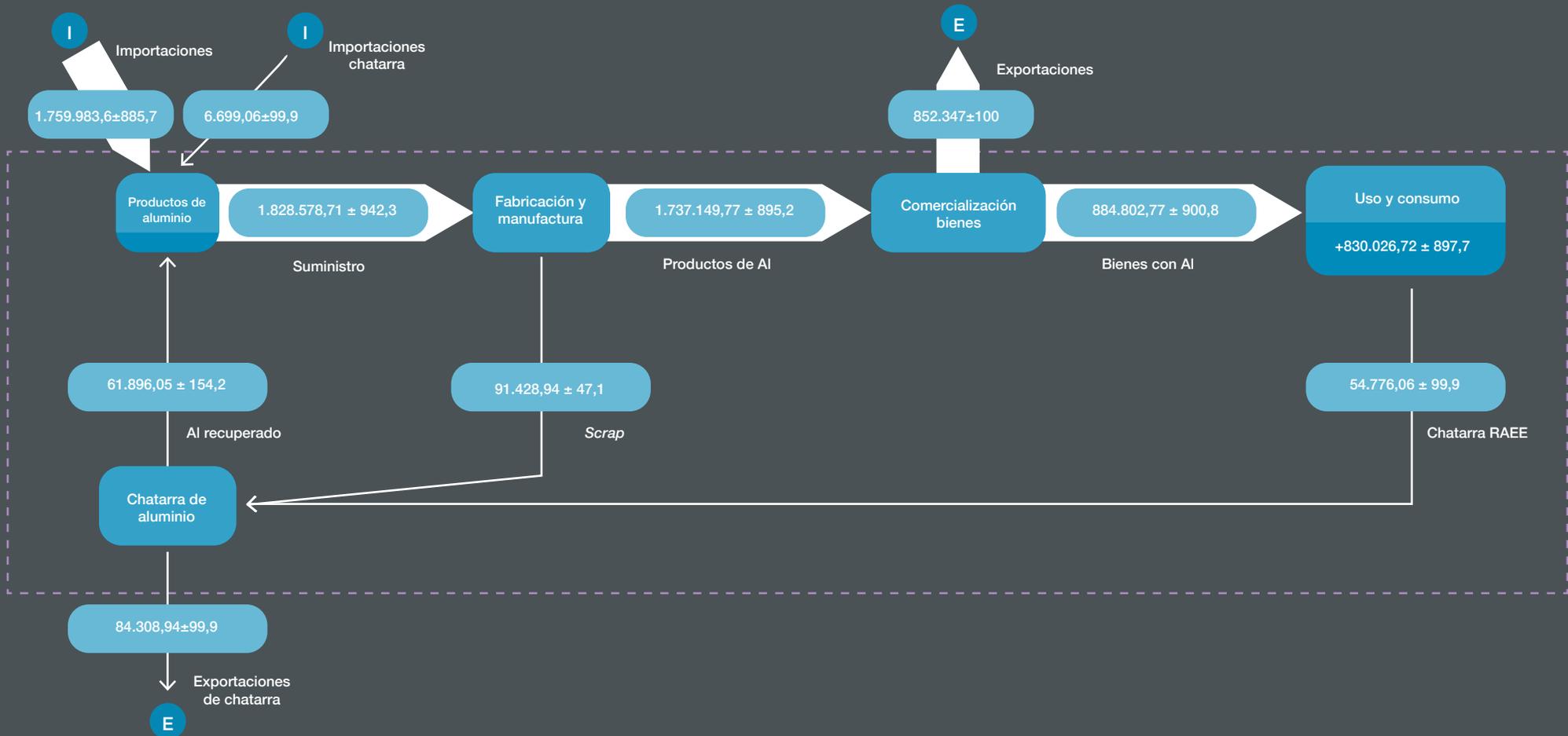


**Ilustración 14.** Flujo de masa según ciclo de vida del aluminio, 2017

**Fuente:** Minambiente (2021).



**Ilustración 15.** Flujo de masa según ciclo de vida del aluminio, 2018  
**Fuente:** Minambiente (2021).



**Ilustración 16.** Flujo de masa según ciclo de vida del aluminio, 2019  
**Fuente:** Minambiente (2021).

Los *MFA* presentados antes son extraídos de las búsquedas adelantadas en capítulos anteriores, así mismo se realizó una proyección de las cifras por medio del escalamiento con factores provenientes de indicadores relevantes como el valor *FOB* de las exportaciones, el IPC y los ISE. El balance

de este flujo está dado por la generación y reincorporación de materiales de aluminio dentro del sistema. Partiendo de los datos consolidados, se establecen los flujos de entrada y salida que mantienen el *stock* de, aproximadamente, 900.000 toneladas, los cuales son alimentados

por una entrada de materia de alrededor de 1.700.000 toneladas. Finalmente, el coeficiente de transferencia de masa en los procesos de uso y consumo se ajusta en una escala macro de 7 % que representa la cantidad de materia disponible como chatarra.

# 4. Flujo de masa del cobre

Al igual que el flujo de masa descrito antes, en este apartado se pretendió mapear el flujo de masa proveniente del sector primario de la economía, minero, y del sector secundario mediante los consumos dentro del sistema y la transformación de materiales para, luego, buscar los flujos propios del sector

terciario de la economía —comercio y consumo masivo— del cobre. Así mismo, se continuó con el desarrollo metodológico descrito antes. A continuación se presentan las consultas relacionadas con los tres sectores de la economía y el flujo de la masa de cobre en Colombia.



## 4.1 Metabolismos del cobre (sector primario)

En el país existen proyectos mineros de producción del mineral cobre estimados, entre 2017 a 2020, en 6.142 toneladas al año, generadas principalmente

en el departamento del Chocó<sup>36</sup>. Esta actividad no es representativa en términos de cantidad. Al igual que el aluminio, no hay registros de organizaciones

relacionadas con la fabricación primaria de cobre; por lo tanto, la producción de este se sustenta en la recuperación de material y el flujo de importaciones.

## 4.2 Metabolismos del cobre (sector secundario)

El cobre es un material ampliamente utilizado en la fabricación de componentes electrónicos e infraestructura eléctrica, algunas veces es representativo en construcción. Esto hace que el volumen

de material consumido sea el menor en comparación con el del acero y del aluminio. Sin embargo, el valor por cada kilogramo de cobre puede llegar a ser hasta diez veces mayor a los otros metales

analizados. Esta diferencia hace que el cobre sea un material altamente comercializado como residuo y en el que se invierten esfuerzos importantes para su recuperación.

36. Análisis de base de datos de la ANM.

Debido a que la producción de cobre primario en el país es cero, la recuperación de material juega un papel importante en la industria nacional; por lo tanto, el material recuperado vuelve a fundirse para la generación de nuevos productos. Sin embargo, se observa que la mayoría de los residuos de cobre son exportados debido al precio de este residuo en

el mercado internacional. En cuanto a las entradas y salidas de este material, se estiman importaciones anuales en promedio, entre 2017 y 2019, de 402.500 toneladas constituidas por productos y materias primas de los subgrupos tuberías y productos manufacturados, y exportaciones anuales promedio de 73.353 toneladas<sup>37</sup>.

Los materiales de cobre consumidos son el material presente dentro de los límites del sistema Stock, el cual en este estudio se define como la diferencia entre exportaciones e importaciones. La tabla 10 consolida los valores estimados de consumo de cobre acotados por el consumo masivo, la industria y la construcción.

**Tabla 10.** Cifras generales estimadas del cobre, 2017-2019\*

\* Análisis de base de datos compuesta por información del DANE, el MinCIT, el BACEX, la ANM y la Cámara de Comercio.

\*\* Ver ilustraciones 19 a la 21, flujo de comercio y consumo.

**Fuente:** Minambiente basado en datos de MinCIT y otros.

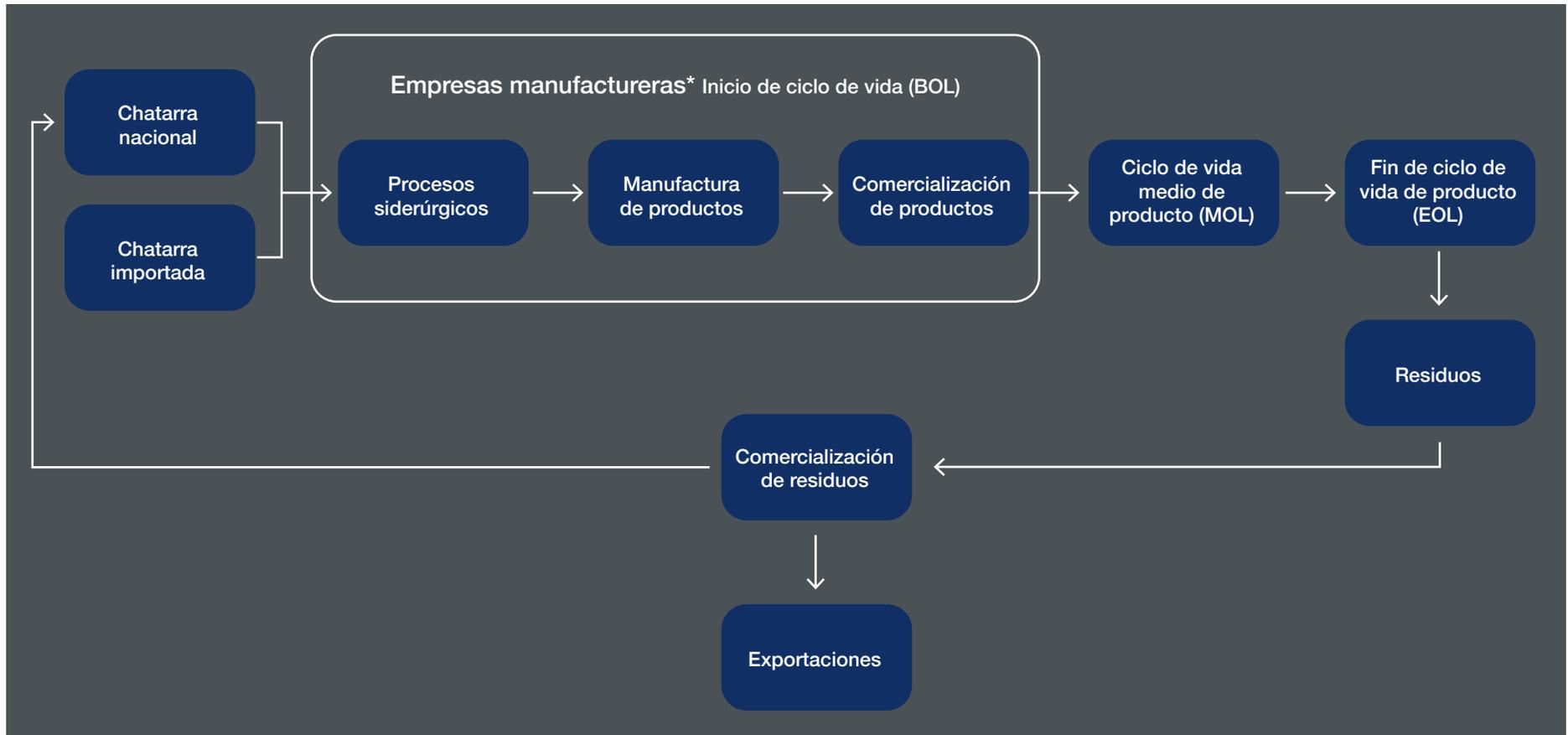
Año	2017	2018	2019
Stock**	613.667	705.179	735.661
Importaciones	364.936	405.079	437.485
Exportaciones	66.507	73.823	79.729
Consumo	273.580	315.678	327.966

A diferencia de los demás materiales, la finalidad del metabolismo del cobre es la comercialización en el extranjero (exportaciones), debido a la poca capacidad del país, en términos industriales, para

generar materiales en EDS con propiedades específicas que aporten a la generación de productos. La ilustración 17 representa el diagrama del flujo de cobre en el país —en el que existe una

salida imperativa del sistema— recopilando la información presentada antes y el relacionamiento de intercambios de masa en el país basado en los datos enunciados.

37. Datos analizados del MinCIT y el BACEX consolidando las partidas arancelarias relacionadas con materiales ferrosos y las actividades económicas correspondientes a manufactura, producción y comercialización de aceros y sus productos derivados.



**Ilustración 17.** Flujograma de transición del cobre

**Fuente:** Minambiente (2021).

El balance de masa inicia con la deducción del *stock* al interior del sistema, deducido a partir de las entradas y salidas de masa representadas por las exportaciones e importaciones de cobre y de productos con contenido de este material. Se observa una relación de 5 a 1 entre la masa que ingresa al sistema y la que se comercializa al exterior. Sería de esperar que el *stock* acumulado de material crezca

de manera exponencial y que se presenten fenómenos de circularidad gracias al reúso de materiales en empresas del sector secundario.

En la revisión de las consultas y en el relacionamiento de datos se percibió una influencia de organizaciones procesadoras de RAEE en el acopio y exportación de cobre. Este es un indicador

positivo de la estabilidad de las tablas, puesto que varias organizaciones son mapeadas desde diferentes perspectivas, lo que facilita la comprensión del movimiento de materiales, procesos y residuos. A continuación se analizan los datos recopilados de cada uno de los actores involucrados en el ciclo de vida del cobre para estimar el metabolismo nacional.

## 4.2.1 Organizaciones productoras y comercializadoras de cobre

Como se mencionó antes, en Colombia no se produce cobre primario, por lo que el cobre al interior

del sistema se encuentra en forma de residuo, EDS o productos manufacturados. En el país existen muy pocas empresas capaces de realizar estos procesos de transformación. De acuerdo con las consultas realizadas, se estima que la comercialización nacional promedio de cobre, entre 2016 a 2019, fue de 10.464 toneladas al año, cifras basadas en su

producción, importación y recuperación interna de desechos como materia prima. La tabla 11 resume las cantidades de materia producidas excluyendo los valores de chatarra de cobre, que son abordados más adelante. Estos valores son el estimado basado en los análisis de la base de datos mencionada en la definición metodológica.

**Tabla 11.** Cantidades de flujo de cobre comercializado, 2016-2019

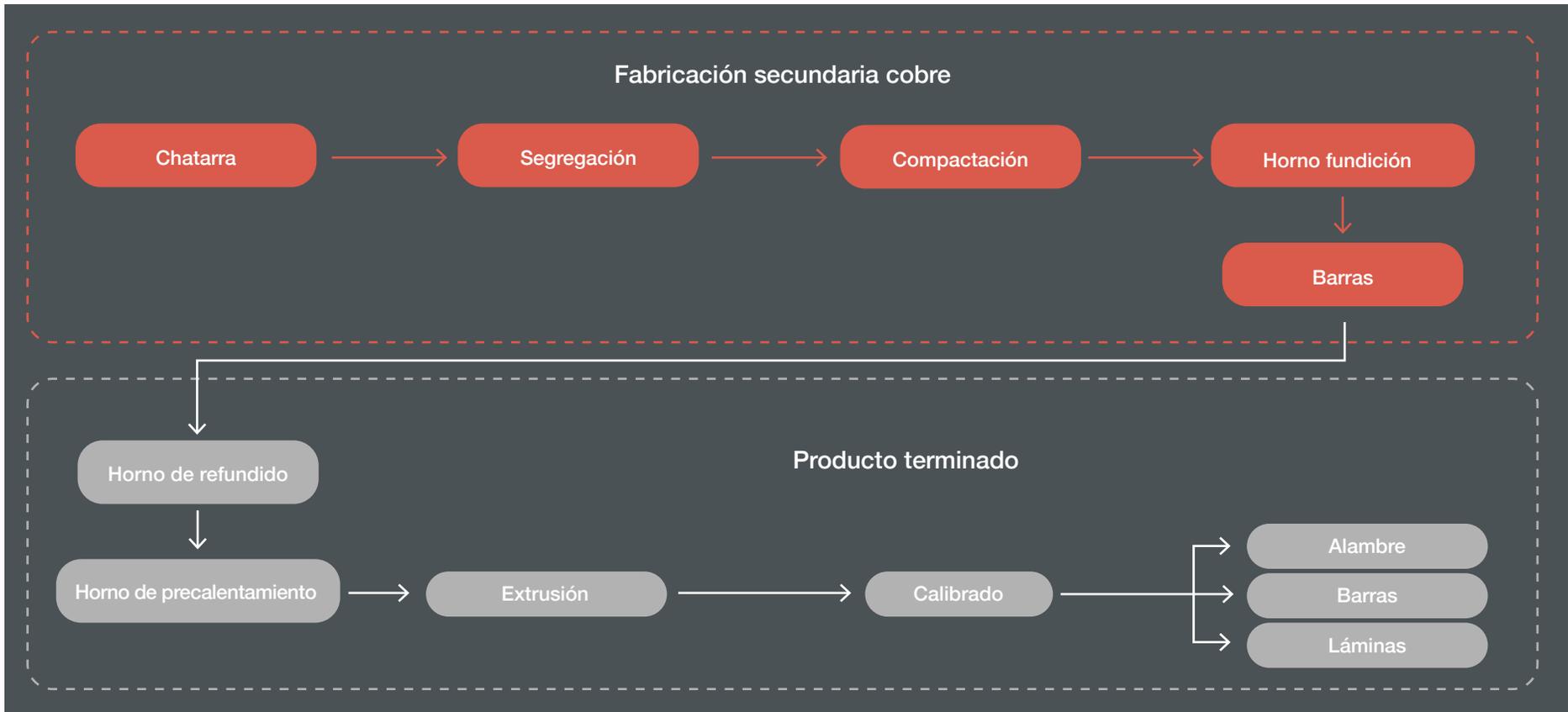
**Fuente:** Minambiente basado en datos de MinCIT y otros.

Año	2016	2017	2018	2019
Material EDS	3.418	3.476	3.535	3.648
Productos manufacturados	6.745	6.860	6.976	7.200
Total (t)	10.163	10.336	10.511	10.848

Se estima que 85 % de los productos que producen estas empresas son barras y perfiles de cobre, seguidos por la producción de aleaciones de bronce

y latón con 12 %, comercializado principalmente en el sector de construcción e infraestructura eléctrica. La ilustración 18 presenta el diagrama de

procesos que realizan estas empresas, el proceso en detalle se describe en el capítulo 4, *Análisis de la producción nacional*.



**Ilustración 18.** Diagrama de procesos de producción secundaria de cobre

**Fuente:** Minambiente (2021).

El desarrollo de productos relacionados con la producción de componentes electrónicos no aporta a los metabolismos presentados. La industria colombiana y la infraestructura de las empresas relacionadas no están capacitadas para aportar este tipo de productos al mercado. Por ello, de manera recurrente, estos elementos son importados como parte de un sistema o producto de mayor envergadura y complejidad.

La comercialización de cobre depende en gran medida del segmento industrial y los productos

que contienen este material. Entre los productos con mayor comercialización en el país se encuentran los accesorios de aleaciones de cobre para tuberías con 48 %, seguidos por otros productos manufacturados con 12 %, por puntas, clavos y chichinetas con 12 %, por tubos de cobre refinado con 7 %, entre otros productos.

Las cantidades importadas para la comercialización de cobre, entre 2016 a 2019, se estiman en, aproximadamente, 375.763 toneladas al año, siendo los

principales productos cables, arneses o semielaborados<sup>38</sup>. Estas cifras no contienen los residuos y desechos exportados, los cuales se tratan más adelante. Se observan grandes ingresos de estos insumos en los inicios de los ciclos de producción durante mayo. Por otra parte, las cantidades exportadas del país, entre 2016 a 2019, se estiman en, aproximadamente, 68.480 toneladas al año.

38. Basado en las tendencias de BACEX.

## 4.2.2 Empresas recuperadoras y cantidades recicladas de cobre

De la relación entre las actividades económicas (CIU) en las que las organizaciones recuperan materiales provenientes de los RAEE y el desmantelamiento de redes eléctricas u otras

infraestructuras se deduce que la principal fuente de material para la producción de elementos o material en EDS es la recuperación y reciclaje de cobre en centros de acopio. Entre 2017 a 2019, se estima que estas empresas recuperaron, aproximadamente, 60.143 toneladas al año funcionando como centros de acopio que exportan el material en forma de residuos.

Rastreando las transacciones se obtiene que la mayoría de los compradores internacionales son empresas comercializadoras de mayor envergadura que clasifican y empaquetan los materiales para suministrarlos a empresas metalúrgicas. Sin embargo, la diferencia respecto al comercio de chatarra en el exterior es abismal y puede incidir en problemas de abastecimiento en las empresas industriales.

**Tabla 12.** Importaciones y exportaciones nacionales de chatarra de cobre

**Fuente:** Minambiente basado en datos de MinCIT y otros.

Desecho	2017	2018	2019
Exportación	56.343	56.541	67.544
Importación	4.284	4.744	5.136

Analizando la participación de las empresas que acopian y comercializan cobre se encuentran coincidencias con las empresas que procesan RAEE. Así se establece la hipótesis de considerar los RAEE como una fuente valiosa de este material. El comercio de residuos y desperdicios de cobre clasificado antes es dominado por China, con una representación aproximada de 36,5 %. La tercera tasa de compra por un extranjero está en Panamá, un país no industrializado que compra alrededor de 15,26 % de las exportaciones nacionales constituidas,

principalmente, por la subpartida 7404000090, demás desperdicios y desechos de cobre.

Los municipios en Colombia que concentran mayor cantidad de cobre son Cajicá, Cundinamarca, Dosquebradas, Risaralda, y Malambo, Atlántico. La región andina predomina con un aproximado de 50 % de la masa total. Esto implica un costo agregado a todos los materiales que llegan a las zonas costeras y en los puertos para su posterior comercialización en el extranjero.

## 4.2.3 Flujos de materiales de cobre

El flujo del cobre es simplificado por la ausencia de procesos metalúrgicos y extractivos que generen material en bruto. Las únicas entradas del material son las importaciones de materias primas y productos con contenidos del mismo. Utilizando la misma herramienta para determinar los flujos del acero y recopilando la información enunciada antes, se estimó el flujo de masa de materiales ferrosos en términos del ciclo de vida del cobre entre 2017 y 2019.

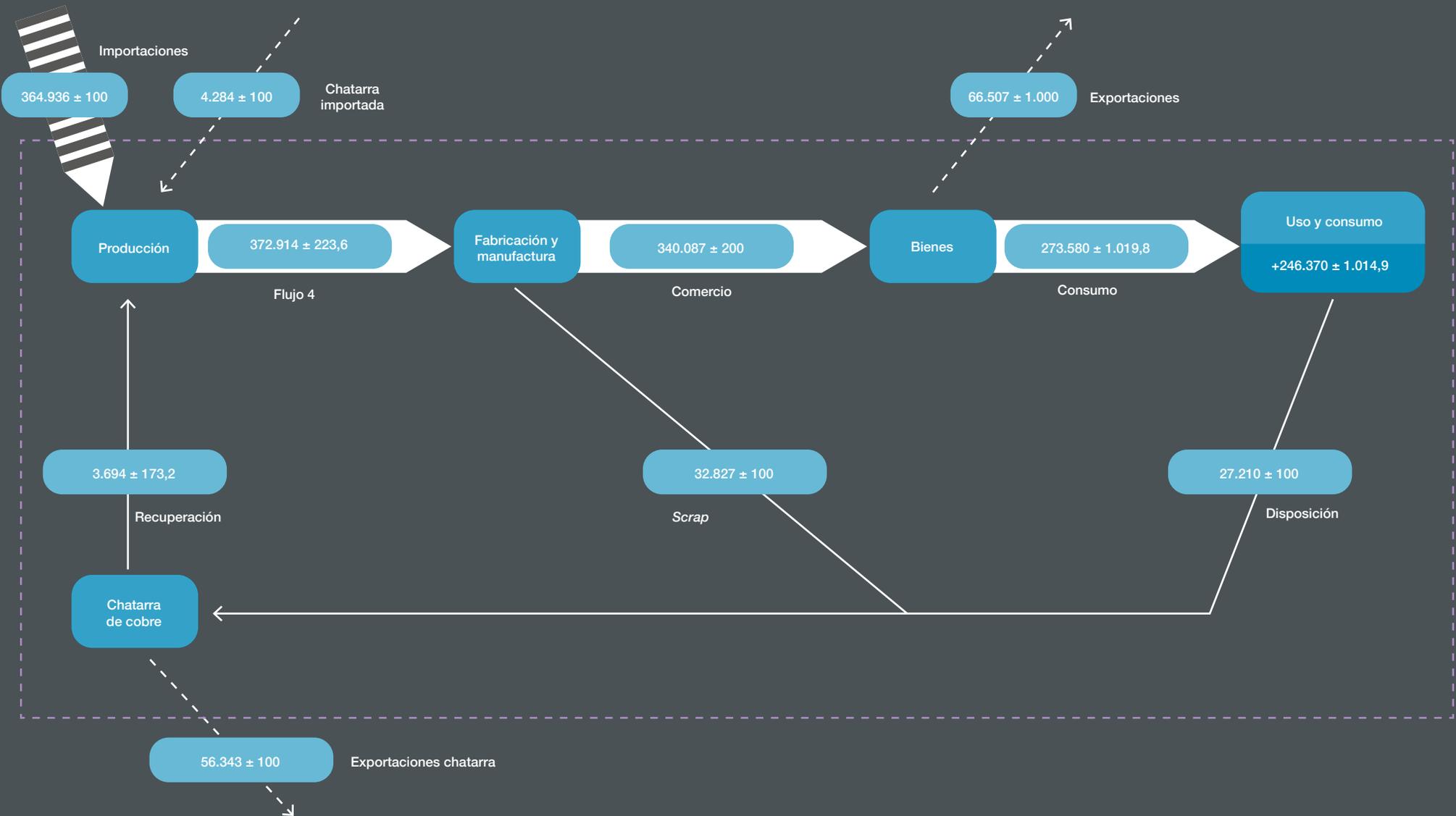
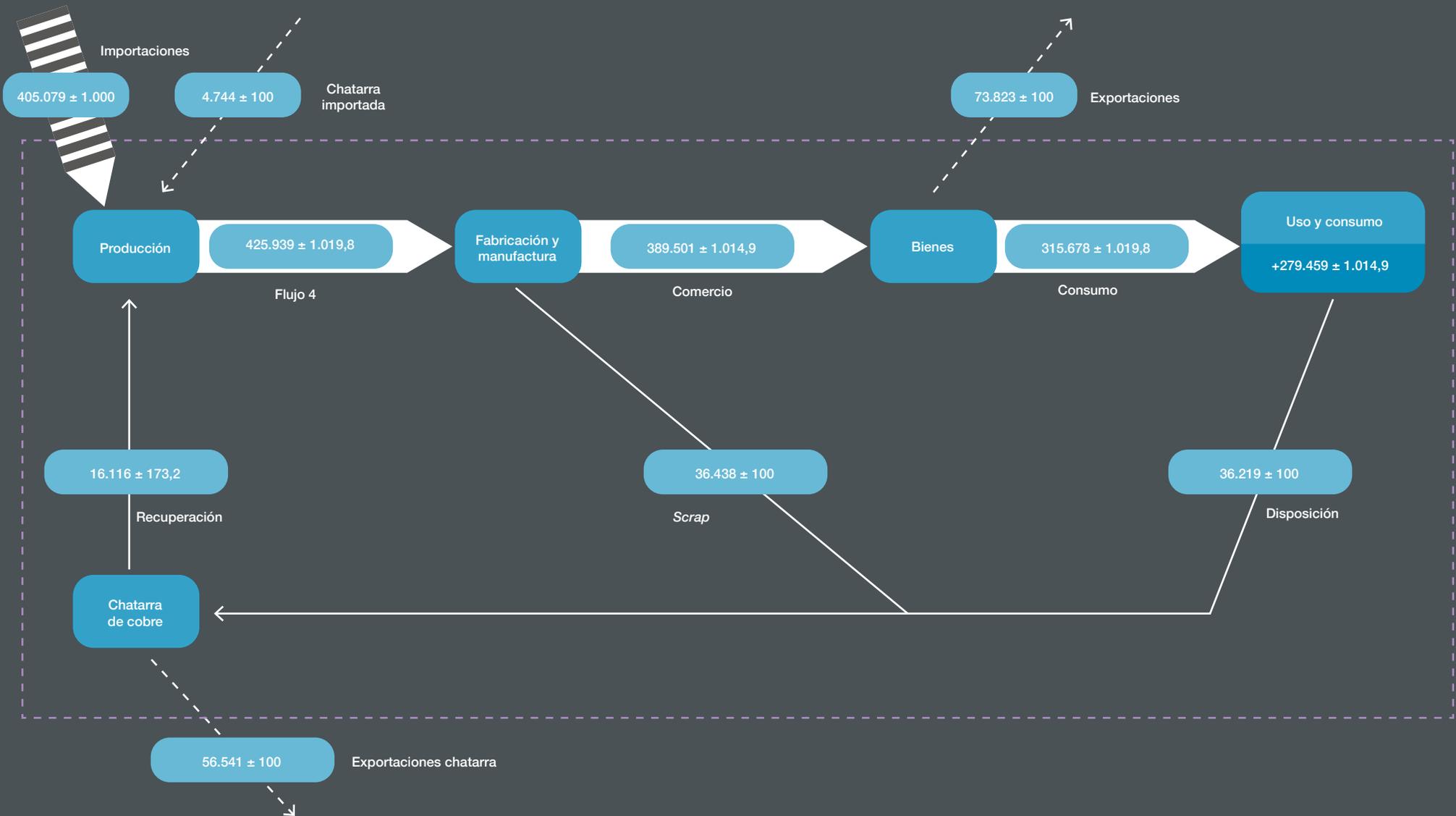


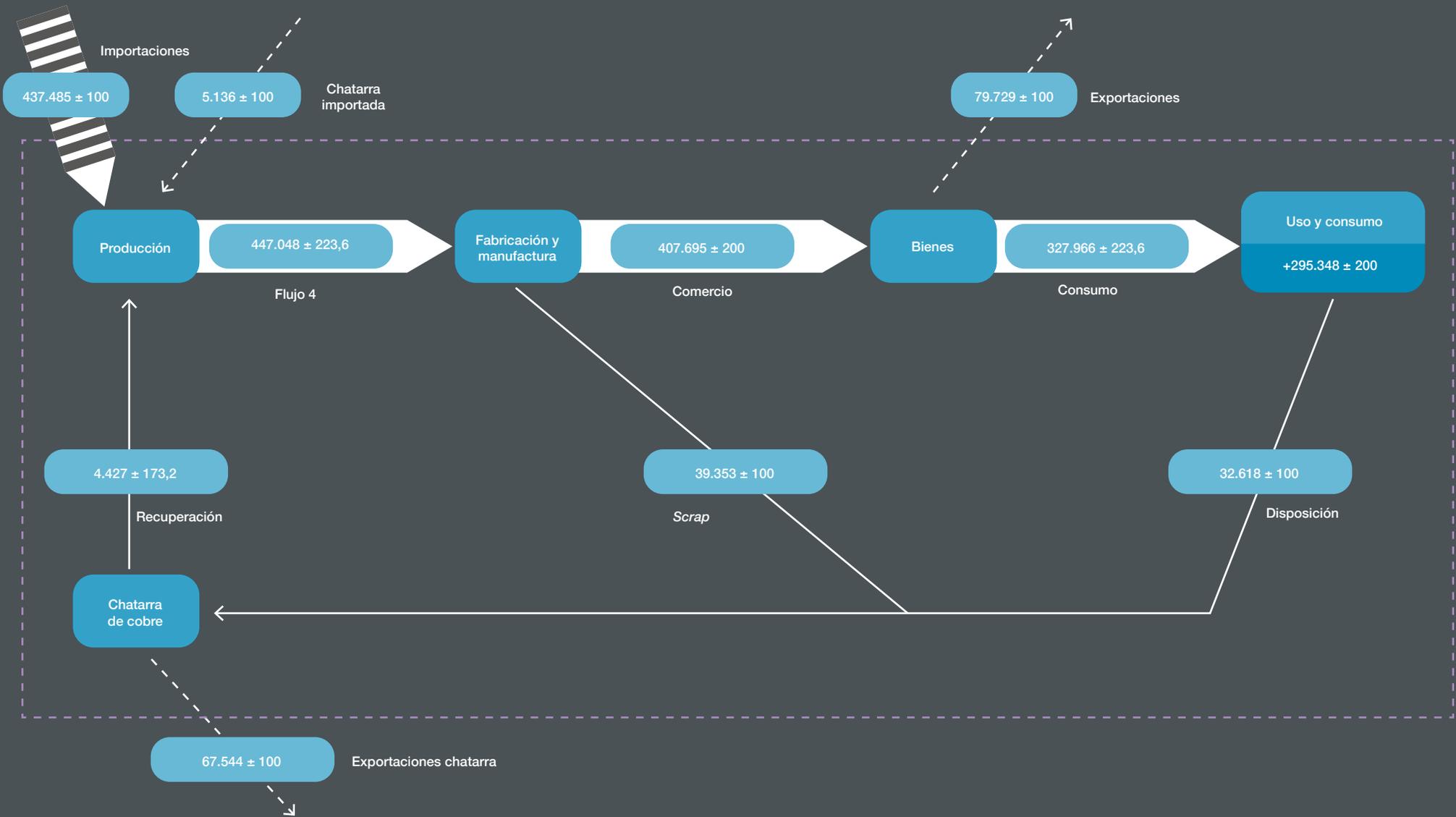
Ilustración 19. Flujo de masa según ciclo de vida del cobre, 2017

Fuente: Minambiente (2021).



**Ilustración 20.** Flujo de masa según ciclo de vida del cobre, 2018

Fuente: Minambiente (2021).



**Ilustración 21.** Flujo de masa según ciclo de vida del cobre, 2019

Fuente: Minambiente (2021).

Los MFA presentados antes son extraídos de las búsquedas adelantadas en capítulos anteriores. También se realizó una proyección de las cifras mediante el escalamiento con factores provenientes de indicadores relevantes como el valor *FOB* de las exportaciones, el IPC y los ISE. El balance de este flujo está dado por la generación y reincorporación de materiales de cobre dentro del sistema. Partiendo de los datos consolidados, se establecieron los flujos de entrada y salida que mantienen el *stock* de, aproximadamente, 300.000 toneladas, los cuales son alimentados por

una entrada de materia alrededor de 400.000 toneladas. Finalmente, el coeficiente de transferencia de masa en los procesos de uso y consumo se ajusta en una escala macro de 13 % que representa la cantidad de materia disponible como chatarra. Los productos con mayor rotación en este segmento son los cables de comunicaciones o transmisión de energía.

En Colombia determinar las fuentes de materiales ferrosos y delinear el ciclo de vida de estas materias, ya sea como materiales o productos,

es un reto en términos de consultas y análisis, ya que no existe un sistema que haga seguimiento o guarde trazabilidad de las cantidades de materiales que transitan y se consumen en el país. La reserva de las organizaciones, la deficiente industrialización y la informalidad crean un entorno propenso al empadronamiento inconcluso de subregistros. Cabe destacar que los registros comerciales, aduaneros y fiscales son una fuente fiable y potentada de información que permite la deducción de hipótesis.



# 5. Discusión y conclusiones

Las pymes influyen de manera considerable en los flujos y balances de masas. Las empresas más representativas acaparan volúmenes de, al menos, 50 % en todos los grupos de materiales, cada una con una representación inferior a 1 %. Es decir, la distribución de materiales y residuos está dispuesta por organizaciones que movilizan volúmenes ínfimos de la masa dentro de los límites del sistema. Por ello, no es conveniente realizar análisis sesgados con restricciones ni pesquisas a grupos que se consideren exclusivamente representativos bajo la premisa de considerarlos grandes organizaciones que dominan segmentos relevantes del mercado.

Las formulaciones para llegar a las cifras del presente estudio parten de la cantidad de material disponible en el país con relación a los años 2016 a 2019. La selección de este periodo de tiempo representa de mejor manera la capacidad productiva del país sin las contingencias provocadas por eventos internacionales, como los conflictos comerciales entre EE. UU. y China, y sus consecuencias, como el aumento en los aranceles por parte de EE. UU.

La información postulada en este resumen está basada en la hipótesis de cuánto material está presente dentro del sistema para un periodo de tiempo determinado. Esta es una visión holística del flujo de materiales establecido con la información existente. Se estima que los máximos y mínimos

en los histogramas de todos los grupos se corresponden con los cierres de años fiscales en los países a los cuales se exporta y el alistamiento de inventarios y pedidos según tendencias comerciales y del mercado. Este dato permite adelantar consultas personalizadas en las que es posible analizar con precisión los periodos comprendidos entre febrero a marzo para importaciones y entre agosto a octubre para exportaciones.

Los subgrupos de cobre y aluminio tienen una alta relación con las pesquisas adelantadas para RAEE. Aunque los análisis adelantados sobre RAEE se basan en compuesto de tipo polimérico, hay concurrencias entre varios actores cuya actividad económica está representada por recuperación, acopio y comercialización de materiales con alto valor comercial. Es decir, hay una clara tendencia en los mercados emergentes para captación y acopio de chatarra no ferrosa.

Cabe resaltar que dentro de las exportaciones de cobre relacionadas con el procesamiento de RAEE, las empresas dedicadas a la recolección, procesamiento, clasificación y exportación de cobre u otros minerales presentes en estos residuos son cada vez más comunes. La falta de partidas que clasifiquen los materiales posteriores al procesamiento de residuos es una caja negra sobre el valor real de estos, el cual es aprovechado por los compradores internacionales.

En los segmentos de cobre y aluminio no hay productores primarios identificados hasta el momento. Ninguna empresa referenciada por las consultas produce estos materiales no ferrosos partiendo de minerales para la producción de *pellets* o lingotes. Las empresas transformadoras utilizan materiales recuperados por centros de acopio para generar subproductos con composición balanceada según las especificaciones requeridas.

Se considera que el modelo de datos establecido y expuesto en este documento tiene la robustez para responder a consultas personalizadas, así como para crear grupos de estudio representativos que permitan explicar los flujos de materiales a través de procesos relacionados con el ciclo de vida y el metabolismo de estos hasta cuando se les considera un desecho con potencial aprovechamiento.

La participación de empresas productoras relacionadas con el sector primario de la economía es casi nula en comparación a los productores del sector secundario; es decir, de la industria manufacturera. La relación 9:1 muestra que la circularidad y el retorno de las materias primas sostiene al sector manufacturero. Sin embargo, las organizaciones que acopian materiales dedican su actividad económica a la comercialización y exportación de estas materias primas obligando a las organizaciones consumidoras a importar o acopiar, en menor medida, insumos para su propio consumo y transformación.

Es recomendable clasificar y caracterizar la calidad de los residuos de materiales, ya que en los mercados nacional e internacional se perciben los diversos alcances de la calidad de los residuos comercializados, así como su impacto ambiental y económico sobre otras industrias. Así mismo, se sugiere la creación de estándares que permitan la tipificación de procesos y protocolos para lograr eficiencia y eficacia en las operaciones relacionadas con la recuperación de materiales. La informalidad pone a un alto costo los materiales acopiados desde diversas fuentes impidiendo la valorización competitiva de los residuos para su posterior disposición.

La escalabilidad de los análisis depende del alcance de los datos. Entre mayor sea el número de empresas registradas y el horizonte de las transacciones, mayor será el refinamiento de las tendencias. Los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE) de consumo masivo o los automotores en circulación tienen ciclos de vida con duración de hasta veinte años, este horizonte abre vacíos caracterizados por la ausencia total de información y plantea retos para la generación de inventarios de material y posteriores MFA y LCA.

Las empresas dedicadas al acopio de materiales no hacen ninguna discriminación sobre la subclasificación de materiales de tipo ferroso y no ferroso. Los modelos de negocio de estas empresas, determinados a partir de la clasificación de sus actividades económicas, dictan que su principal función es recopilar toda clase de materiales que son, posteriormente, embalados y comercializados a empresas con capacidades de categorización y postratamiento para la generación de materiales de calidad con propiedades mecánicas y eléctricas estandarizadas. Una forma de cerrar ciclos al interior del sistema es incentivando la incubación de organizaciones que valoricen los residuos con estándares competitivos.

Las empresas con capacidad de transformar la chatarra o los residuos ferrosos carecen de competencias tecnológicas para competir en mercados como el de los aceros aleados. Empresas con capacidad siderúrgica buscan abastecerse de insumos para la creación de aceros, con poca complejidad en su composición y postratamiento, subutilizando el potencial de residuos con composiciones diversas. Materiales como el cobre o el aluminio requieren mayores esfuerzos para la producción de materias primas con propiedades especializadas, en las cuales varias organizaciones se han especializado logrando avances en la materia y convirtiéndose en casos comerciales exitosos.



Otra variante del fenómeno anterior se sustenta en el mercado de metales a nivel internacional. Empresas multinacionales, *off shore*, pueden comprar residuos a mejor precio en comparación con los de Colombia. Esto se debe a que los materiales recolectados en el país pueden conservar mucho de su valor original. En otros términos, la chatarra recolectada tiene un alto valor cuando está compuesta



de materiales aleados, como aceros especiales, que al reclasificarse superan el valor de la chatarra tradicional comúnmente utilizada para la producción de aceros convencionales de bajo carbono, útiles en los segmentos de construcción.

Así mismo, materiales como el aluminio o cobre tienen comportamientos similares. La exportación de chatarra ferrosa y no ferrosa no está lo suficientemente desglosada o diferenciada en partidas arancelarias o en controles aduaneros. Cualquier residuo con contenido de estos materiales es apto para su exportación sin tener en cuenta las concentraciones o aleaciones de dichos compuestos. Esta situación es ampliamente aprovechada por empresas extranjeras que invierten en la reclasificación y segregación recuperando materiales de alto valor.



7.

Bibliografía

- ALFED. (1998). *Secondary Aluminium Refining and Remelting*.
- ANDI. (2017). *Colombia: balance 2016 y perspectivas 2017*.
- ANDI. (2018a). *Informe del sector siderúrgico*. Comité Colombiano de Productores de Acero. [Http://www.andi.com.co/Uploads/INFORME%20ACERO%20MAYO%207%20BAJA.pdf](http://www.andi.com.co/Uploads/INFORME%20ACERO%20MAYO%207%20BAJA.pdf).
- ANDI. (2018b). *País colombiano construye el país*.
- ANDI. (2018c). *El acero colombiano, columna vertebral para el progreso del país*.
- ANDI. (2019). *Informe del sector siderúrgico 2018*.
- ANM. (2012). Catastro minero. En *Balance del mineral 2012-2016: bauxita*. Agencia Nacional de Minería.
- Barreto, P. B. (2014). La reconversión industrial de la siderúrgica integrada en Colombia. *Estudios gerenciales*, 30 (133), 451-460. DOI: 10.1016/j.estger.2014.05.001.
- Boin, U., et al. (1998). *Stand der Technik in der Sekundäraluminiumerzeugung im Hinblick auf*. UBA.
- Cadavid, G. H. (2014). *Análisis de ciclo de vida (ACV) del proceso siderúrgico*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Química Manizales.
- COM. (1991). *Technical BAT Note Heavy Metal Emissions from Non-Ferrous Industrial Plants*.
- COM. (1997). *Panorama of EU Industry 1997: An Extensive Review of the Situation and Outlook*. DG III.
- COM. (1998). Personal Discussions [comunicación personal].
- Corradine, A. (2011). *De las ferrerías a la siderurgia*. Banrepcultural. <https://www.banrepcultural.org/biblioteca-virtual/credencial-historia/numero-262/de-las-ferrerias-la-siderurgia>.
- Cusano, et al. (2017). *Best Available Techniques (BAT): Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries*. Publications Office of the European Union.
- DNP. (2002). *Informe COP 2018*.
- DNP. (2018). *Colombia productiva y sostenible*.
- EAA. (2004). *Aluminum Recycling: The Road to High Quality Products*. Asociación Europea de Aluminio y Organización de Refinadores y Refundidores de Aluminio de Europa (OEA). [Http://www.oea-alurecycling.org/de/verband/oea\\_eaa\\_aluminium\\_recycling.pdf](http://www.oea-alurecycling.org/de/verband/oea_eaa_aluminium_recycling.pdf).
- Eurometaux. (1998). *Fabrication of Semi-Finished Products from Copper and Copper Alloys*. Eurometaux.
- European Commission. (2012). *Best Available Techniques (BAT): Reference Document for Iron and Steel Production*. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU.
- Greenwood, E. (1997). *Química de los elementos (Chemistry of the Elements)*.
- International Copper Association. (2014). *La ventaja del cobre: guía para trabajar con cobre y con aleaciones de cobre*. Copper Alliance.
- Kojo, et al. (2006). *Copper production with FSF and FCF*. TMS.
- Laheye, R., et al. (1998). *Greenmelt: An Environmentally Sound Remelting Concept*. Hoogovens NL.
- McLellan. (1998a). *Electromagnetic Pumping Improves the Efficiency of Melting Aluminium*. ETSU.
- McLellan. (1998b). *Electromagnetic Pumping of Aluminium*. ETSU.
- Millán, F. D. (2015). Aluminum Recycling: Development Opportunities in Bogotá (Colombia). *Gestión y ambiente*, 18 (2), 135-152.
- Minambiente. (2017). *Plan de Implementación del Convenio de Estocolmo sobre compuestos orgánicos persistentes*.
- Minambiente. (2021). *Inventario Nacional de Fuentes y Estimación de Liberaciones de COP No Intencionales en Colombia*.
- Nordheim, E. (1998). *Minutes from IPPC BREF*. Aluminium Expert Group.
- Opportimes. (2019). *Los 10 mayores productores de acero 2018*. <https://www.opportimes.com/los-10-mayores-productores-de-acero-en-2018/>.

- OSPARCOM. (1996). *Description of BAT for the Primary Production of Non-Ferrous Metals*. Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic.
- PNUMA. (2007). *Directrices sobre mejores técnicas disponibles y orientación provisional sobre mejores prácticas ambientales conforme al artículo 5 y anexo C del Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes*. Secretaría del Convenio de Estocolmo.
- PNUMA. (2008). *Directrices sobre mejores técnicas disponibles y orientación provisional sobre mejores prácticas ambientales conforme al artículo 5 y anexo C del Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes*.
- PSM y Dupont. (2019). *Preparación de superficies*. <https://www.psm-dupont.com.mx/es/axalta/servicios/preparacion-de-superficies.html>.
- Rentz, O., et al. (1999). *Report on BAT in German Copper Production* [borrador final]. University Karlsruhe (DFIU).
- Sicre, J. A. (2009). *Obtención de aleaciones maestras mediante molienda mecánica para la modificación de aceros de baja aleación* [tesis doctoral]. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química. <https://core.ac.uk/download/pdf/30041920.pdf>.
- Traulsen, H. (1998). *Plant Information: Copper Industry* [borrador]. Copper Expert Group.
- UBA. (2004). *Austria M168: Medienübergreifende Umweltkontrolle in ausgewählten*.
- UNEP. (2009). *Convenio de Estocolmo sobre contaminantes orgánicos persistentes (COP)*.
- Universidad de Salamanca. (2010). *Aluminio*. <http://ocw.usal.es/eduCommons/enseanzas-tecnicas/materiales-ii/contenidos/METALES%20.pdf>.
- Universidad de Santiago de Chile. (2003). *Hidrometalúrgica*. Departamento de Ingeniería Metalúrgica. <https://metalurgia.usach.cl/sites/metalurgia/files/paginas/capitulo14.pdf>.
- Universidad Técnica de Oriente. (2010). *Pirometalurgia*. Unidad Técnica del Oriente. [http://docentes.uto.edu.bo/cvelascoh/wp-content/uploads/Capitulo1\\_Introducci%C3%B3n.pdf](http://docentes.uto.edu.bo/cvelascoh/wp-content/uploads/Capitulo1_Introducci%C3%B3n.pdf).
- UPME. (2012). *Bauxita: balance 2012-2016*.
- UPME. (2018a). *Aluminio*. [http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Datos/mercado-inter/Producto2\\_Aluminio\\_FINAL\\_12DIC2018.pdf](http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Datos/mercado-inter/Producto2_Aluminio_FINAL_12DIC2018.pdf).
- UPME. (2018b). *Elaborar los modelos nacionales de oferta y demanda, y balance de minerales, analizando los escenarios mineros y estableciendo proyecciones de oferta y demanda de minerales en el corto, mediano y largo plazo (a 2035)*.
- UPME. (2018c). *Cobre*. [http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Datos/mercado-inter/Producto%202\\_Cobre\\_FINAL\\_12Dic2018.pdf](http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Datos/mercado-inter/Producto%202_Cobre_FINAL_12Dic2018.pdf).
- VDI. (2007). *VDI (D): 2102 Emission Control*.
- VDI. (2008). *VDI 2286, Part 1 and 2: Emission control in Aluminium Smelting Plants*.



El ambiente  
es de todos

Minambiente

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible  
Bogotá D. C., Colombia  
[www.minambiente.gov.co](http://www.minambiente.gov.co)

Publicación financiada por:

