



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

EVALUACIÓN DE LA INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS SOLARES EN LA
INDUSTRIA DEL HIERRO EN CHILE MEDIANTE UN ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

LUIS ALBERTO RODRÍGUEZ BERENGUER

PROFESOR GUÍA:
PATRICIO JORQUERA ENCINA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
WILLY KRACHT GAJARDO
GUSTAVO DÍAZ FERRÁN

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto Solar Mining del Chilean Solar
Energy Research Center

SANTIAGO DE CHILE
2017

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: LUIS ALBERTO RODRÍGUEZ BERENGUER
FECHA: 22/11/2017
PROF. GUÍA: PATRICIO JORQUERA ENCINA

EVALUACIÓN DE LA INTEGRACIÓN DE TECNOLOGÍAS SOLARES EN LA INDUSTRIA DEL HIERRO EN CHILE MEDIANTE UN ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Los antecedentes generales describen en que consiste el proyecto Solar Mining, cuál es la herramienta de análisis de ciclo de vida (ACV), cuáles son las tecnologías solares disponibles y detalles sobre la industria del hierro en Chile.

La principal motivación de este trabajo es abordar temas de sustentabilidad, área de suma importancia e interés en un mundo sumido en el calentamiento global.

El objetivo general de este trabajo es evaluar el beneficio ambiental que puede lograrse con la integración de tecnologías solares en la industria de hierro en Chile a través de un estudio de ACV utilizando como unidad funcional una tonelada de mineral o pellet, específicamente el beneficio respecto al potencial de calentamiento global (PCG) medido en kilogramo de dióxido de carbono (CO_2) equivalente por tonelada de mineral o pellet. Para alcanzar este objetivo general, será necesario estudiar cómo se realiza un análisis de ciclo de vida, recopilar información y datos de la industria del hierro en Chile, modelar los procesos en un software de ACV, obtener indicadores de impacto ambiental, validar los resultados mediante la comparación con estudios previos, revisar las tecnologías solares modeladas por el equipo de Solar Mining e identificar procesos donde sea posible la integración de tecnologías solares.

Los alcances principales son que se estudiará la industria del hierro en la operación de Valle del Huasco, será un ACV que comprende desde la operación minera hasta la concentración y se utilizarán solo las tecnologías solares previamente modeladas por integrantes del proyecto Solar Mining.

La metodología utilizada es el ACV. Se recopiló información específica del sitio en estudio y se utilizó el software Gabi v6 y la base de datos Ecoinvent v3.1 para completar el inventario de ciclo de vida (ICV) y realizar la evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV). Debido a lo agregado de los datos, una asignación de coproductos se debió realizar para analizar cada producto por separado.

Se obtuvo el PCG mediante el método CML2001 considerando un horizonte temporal de 100 años. Para el caso base fue de 116 kg CO_2 eq./t pellet para el pellet, 38 kg CO_2 eq./t mineral para el pellet feed, 17 kg CO_2 eq./t mineral para el sinter feed y 4 kg CO_2 eq./t mineral para el p40. También se obtuvieron indicadores de otras tres categorías de impacto utilizando el método CML2001: el requerimiento de energía bruta (REB), el potencial de acidificación (PA) y el potencial de eutrofización (PE).

Al integrar las tecnologías solares se lograron beneficios en la reducción del PCG de aproximadamente un 34 % para el pellet, un 57 % para el pellet feed, un 22 % para el sinter feed y un 94 % para el p40.

*dedicado a toda mi familia en especial a mis padres, a mi polola y a mi familia mecánica y
beauchefiana.*

Agradecimientos

Al proyecto Solar Mining Conicyt-BMBF20140019 y su equipo de trabajo, a CAP Minería y a mi profesor guía Patricio Jorquera.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes generales	1
1.1.1. Proyecto Solar Mining	1
1.1.2. Análisis de ciclo de vida	1
1.1.3. El hierro en Chile	2
1.1.4. Tecnologías solares	4
1.2. Motivación	4
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos específicos	5
1.4. Alcances	5
2. Antecedentes específicos	6
2.1. Productos operación Valle del Huasco	6
2.1.1. Pellet	6
2.1.2. Pellet feed	6
2.1.3. Sinter feed	7
2.1.4. P40	7
2.2. Descripción de los procesos de la operación Valle del Huasco	7
2.3. Categorías de impacto	9
2.4. Mix de la red eléctrica	9
3. Metodología	10
3.1. Definición de los objetivos y alcances del análisis de ciclo de vida	10
3.1.1. Definición de los objetivos del análisis de ciclo de vida	10
3.1.2. Determinación del tipo de información necesaria	11
3.1.3. Especificidad de la información requerida	11
3.1.4. Organización de los datos y resultados	11
3.1.5. Alcances del análisis de ciclo de vida	11
3.1.6. Principios básicos del trabajo	13
3.2. Inventario del ciclo de vida	13
3.2.1. Diagrama de flujo	13
3.2.2. Plan de recopilación de datos	13
3.2.3. Recopilación de datos	22
3.3. Evaluación del impacto del ciclo de vida	25

4. Resultados	26
4.1. Resultados del inventario de ciclo de vida	26
4.2. Resultados de la evaluación del impacto del ciclo de vida	31
4.2.1. Resumen de los indicadores de las categorías de impacto	31
4.2.2. Requerimiento de energía bruta	32
4.2.3. Potencial de calentamiento global	35
4.2.4. Potencial de acidificación	40
4.2.5. Potencial de eutrofización	43
4.3. Integración de las tecnologías solares	46
5. Análisis de resultados	47
5.1. Comparación con estudios similares	47
5.1.1. Norgate et al.: <i>Life cycle assessment of iron ore mining and processing</i>	47
5.1.2. Ferreira et al.: <i>Life Cycle Assessment study of iron ore mining</i>	48
5.1.3. Zong-ping Li et al.: <i>Life Cycle Assessment of Iron Ore Sintering Process</i>	49
5.2. Análisis de principales contribuciones relativas	49
5.3. Comparación entre los productos	50
5.4. Integración de las tecnologías solares	50
6. Conclusiones	52
Acrónimos	54
Bibliografía	55
Anexos	57

Índice de Tablas

2.1. Mix del SIC 2016 según las contribuciones porcentuales por fuentes de generación.	9
3.1. Cantidad de productos embarcados	24
4.1. Inventario de datos recopilados de las operaciones de Valle del Huasco.	27
4.2. Inventario de datos de pellet según asignación de coproductos.	28
4.3. Inventario de datos de pellet feed según asignación de coproductos.	29
4.4. Inventario de datos de sinter feed según asignación de coproductos.	30
4.5. Inventario de datos de p40 según asignación de coproductos.	30
4.6. Resumen de indicadores de las categorías de impacto	31
4.7. Resumen del potencial de calentamiento global según el contenido de hierro mínimo	31
4.8. Requerimiento de energía bruta para producir pellet [MJ/t pellet]	32
4.9. Requerimiento de energía bruta para producir pellet feed [MJ/t mineral]	33
4.10. Requerimiento de energía bruta para producir sinter feed [MJ/t mineral]	34
4.11. Requerimiento de energía bruta para producir p40 [MJ/t mineral]	34
4.12. Potencial de calentamiento global de la producción de pellet [kg CO_2 eq./t pellet]	35
4.13. Potencial de calentamiento global de la producción de pellet feed [kg CO_2 eq./t mineral]	36
4.14. Potencial de calentamiento global de la producción de sinter feed [kg CO_2 eq./t mineral]	37
4.15. Potencial de calentamiento global de la producción de p40 [kg CO_2 eq./t mineral]	37
4.16. Potencial de calentamiento global de la producción de pellet [kg CO_2 eq./t Fe contenido mín]	38
4.17. Potencial de calentamiento global de la producción de pellet feed [kg CO_2 eq./t Fe contenido mín]	38
4.18. Potencial de calentamiento global de la producción de sinter feed [kg CO_2 eq./t Fe contenido mín]	39
4.19. Potencial de calentamiento global de la producción de p40 [kg CO_2 eq./t Fe contenido mín]	39
4.20. Potencial de acidificación de la producción de pellet [kg SO_2 eq./t pellet]	40
4.21. Potencial de acidificación de la producción de pellet feed [kg SO_2 eq./t mineral]	41
4.22. Potencial de acidificación de la producción de sinter feed [kg SO_2 eq./t mineral]	42
4.23. Potencial de acidificación de la producción de p40 [kg SO_2 eq./t mineral]	42
4.24. Potencial de eutrofización de la producción de pellet [kg PO_4^{-3} eq./t pellet]	43

4.25. Potencial de eutrofización de la producción de pellet feed [kg PO_4^{-3} eq./t mineral]	44
4.26. Potencial de eutrofización de la producción de sinter feed [kg PO_4^{-3} eq./t mineral]	45
4.27. Potencial de eutrofización de la producción de p40 [kg PO_4^{-3} eq./t mineral]	45
4.28. Potencial de calentamiento global de los productos al integrar las tecnologías solares [kg CO_2 eq./t mineral o pellet]	46
4.29. Potencial de calentamiento global de los productos al integrar las tecnologías solares según [kg CO_2 eq./t Fe contenido mín]	46
A.1. Organización para la recopilación de los datos requeridos por cada etapa/subetapa en la hoja de cálculo computacional	58

Índice de Ilustraciones

1.1. Mapa de la ubicación de las operaciones de CAP Minería (Fuente: CAP) . . .	3
3.1. Diagrama del alcance del análisis de ciclo de vida. El recuadro rojo encierra las etapas consideradas	12
3.2. Diagrama de flujo del sistema Valle del Huasco. Las flechas color negro representan el flujo de material principal y las flechas color azul representan el flujo de servicio.	14
3.3. Diagrama de flujo del subsistema minería. Las flechas color negro representan el flujo de material principal y las flechas de color naranja representan flujo de servicio de equipos auxiliares.	15
3.4. Diagrama de flujo del subsistema planta de endurecimiento térmico. Las flechas color negro representan el flujo de material principal.	15
3.5. Diagrama de flujo del sistema de producción de pellet. Las flechas color negro representan el flujo de material principal y las flechas color azul representan el flujo de servicio.	16
3.6. Diagrama de flujo del sistema de producción de pellet feed. Las flechas color negro representan el flujo de material principal y las flechas color azul representan el flujo de servicio.	17
3.7. Diagrama de flujo del sistema de producción de sinter feed. Las flechas color negro representan el flujo de material principal y las flechas color azul representan el flujo de servicio.	18
3.8. Diagrama de flujo del sistema de producción p40. Las flechas color negro representan el flujo de material principal	19
4.1. Contribución porcentual por etapa del requerimiento de energía bruta para producir pellet	32
4.2. Contribución porcentual por etapa del requerimiento de energía bruta para producir pellet feed	33
4.3. Contribución porcentual por etapa del requerimiento de energía bruta para producir sinter feed	34
4.4. Contribución porcentual por etapa del potencial de calentamiento global de la producción de pellet	35
4.5. Contribución porcentual por etapa del potencial de calentamiento global de la producción de pellet feed	36
4.6. Contribución porcentual por etapa del potencial de calentamiento global de la producción de sinter feed	37

4.7. Contribución porcentual por etapa del potencial de acidificación de la producción de pellet	40
4.8. Contribución porcentual por etapa del potencial de acidificación de la producción de pellet feed	41
4.9. Contribución porcentual por etapa del potencial de acidificación de la producción de sinter feed	42
4.10. Contribución porcentual por etapa del potencial de eutrofización de la producción de pellet	43
4.11. Contribución porcentual por etapa del potencial de eutrofización de la producción de pellet feed	44
4.12. Contribución porcentual por etapa del potencial de eutrofización de la producción de sinter feed	45
4.13. Potencial de calentamiento global del caso base y de las tecnologías solares.	46
A.1. Modelo general de Valle del Huasco en software Gabi v.6	59
A.2. Modelo de Mina Los Colorados en software Gabi v.6	60
A.3. Modelo planta de beneficio en software Gabi v.6	61

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes generales

1.1.1. Proyecto Solar Mining

Solar Mining es un proyecto de investigación conjunta entre la Universität Stuttgart y la Universidad de Chile, apoyada por el Ministerio de Educación e Investigación de Alemania y la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Chile. Consiste en realizar investigaciones de las sinergias entre la energía solar y la minería, bajo una mirada de análisis de ciclo de vida. Su objetivo es el de construir una hoja de ruta hacia la integración de la tecnología solar en el norte de Chile.

A lo largo de estos dos años de investigación se han obtenido una serie de resultados preliminares, entre ellos dos análisis de ciclo de vida referentes a minerales, uno sobre litio y otro sobre el cobre. Como parte del proyecto Solar Mining otro análisis estaba previsto, un análisis de ciclo de vida (ACV) de la industria del hierro en Chile, razón de ser de este trabajo de título.

1.1.2. Análisis de ciclo de vida

El ACV es un herramienta, con base científica, de comparación y evaluación de los impactos ambientales de un producto o servicio durante todas las etapas de su vida. Se diferencia de otros métodos de evaluación ambiental en que el producto puede ser analizado desde la “cuna a la tumba”¹ según una unidad funcional. Gracias a estas características se pueden establecer comparaciones entre productos que cumplen propósito iguales o semejantes [1].

Las normas internacionales para ACV se desarrollaron desde los años noventa como parte de la familia de normas de gestión ambiental ISO 14000, siendo las normas ISO 14040 y e

¹Todas las etapas importantes en el ciclo de vida de un producto se incluyen en el análisis [1].

ISO 14044 las más relevantes [2].

El proceso de ACV tiene un enfoque sistemático, por lo que su metodología se compone de cuatro fases:

1. Definición de los objetivos y alcances del ciclo de vida
2. Inventario de ciclo de vida (ICV)
3. Evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV)
4. Interpretación del ciclo de vida

Los esfuerzos de recopilación de datos conllevan una combinación de investigación, visitas a terrenos y contacto directo con expertos. Esto genera gran cantidad de datos. Como alternativa para reducir el tiempo en la recolección y análisis de datos, se puede utilizar una base de datos con información no específica del sitio junto a un software de ACV. Estas dos herramientas unidas pueden ayudar de gran manera en las etapas de ICV, al entregar la información no disponible del sitio específico en estudio y en la EICV ya que permite clasificar y caracterizar, de manera muy fácil, los datos del inventario para obtener las categorías de impacto.

Los resultados principales de un ACV son los indicadores de las categorías de impacto. Estos tienen que ser concisos y consistentes de tal manera que permita una interpretación y comparación adecuada para que le sean de utilidad a los responsables de tomar decisiones.

1.1.3. El hierro en Chile

El hierro es un metal caracterizado por su gran ductilidad y maleabilidad, que forma compuestos ferrosos y férricos. Los óxidos de hierro son los minerales que contienen mayor abundancia del elemento químico hierro. Entre estos están la magnetita (Fe_3O_4) y la hematita (Fe_2O_3).

Este mineral no se utiliza directamente, si no que se emplea para obtener fierro fundido y acero, productos metálicos que se usan en la construcción de obras civiles, en la industria manufacturera y en otras aplicaciones.

Los yacimientos de hierro más importantes de Chile se ubican en el norte, entre las regiones de Atacama y Coquimbo (3^{da} y 4^{ta} región respectivamente). La zona, más conocida como “Franja Ferrífera”, contiene en su mayoría mineral de hierro de tipo magnetítico.

Actualmente, y dada la crisis económica por la que está pasando esta mercancía [3], la Compañía de Acero del Pacífico (CAP) es la principal y la única productora de minerales y pellets de hierro en Chile. En la Figura 1.1 se muestran las operaciones de CAP donde se destaca la de Valle del Huasco. Esta operación, que incluye Mina Los Colorados, Planta Pellets y el Puerto Guacolda II, representó un 40% de la producción total de mineral de hierro y un 100% de la producción de pellets de hierro en Chile en el año 2016 [4].



Figura 1.1: Mapa de la ubicación de las operaciones de CAP Minería (Fuente: CAP)

1.1.4. Tecnologías solares

El norte de Chile posee abundantes recursos naturales. Uno de ellos no proviene de la tierra, sino que de sus cielos. Estas zonas del país poseen niveles muy altos de radiación solar incidente, inclusive, el más alto del planeta en la zona del Desierto de Atacama [5]. A pesar de este gran potencial, actualmente las zonas áridas del norte presentan grandes desafíos debido al alto costo del suministro de energía confiable y sustentable. Situación que se ha convertido en una amenaza real para la competitividad de la actividad minera [5].

Entendiendo este escenario, y bajo la urgente necesidad de buscar soluciones energéticas innovadoras, miembros del equipo de Solar Mining realizaron trabajos de investigaciones ([6], [7] y [8]) que muestran el ahorro en las emisiones potenciales cuando la conectividad eléctrica de la red es remplazada por tecnologías solares. Su estudio se centró en tres tipos de tecnologías, las que se describen a continuación.

- **Fotovoltaica (FV):** el medio más masivo para convertir la irradiación global de la luz solar en electricidad son los sistemas de energía fotovoltaica. Estos sistemas están hechos de células fotovoltaicas las que se montan en módulos que pueden combinarse de diferentes maneras [6].
- **Energía termosolar de concentración**
 - **Cilindro parabólico (EC-CP):** un campo solar compuesto por filas de espejos parabólicos, reflejan la luz solar en un tubo receptor para calentar un fluido de trabajo el cual puede ser utilizado como fuente de calor o para alimentar un bloque de potencia térmica convencional para producir vapor y generar electricidad [7].
 - **Torre central (EC-TC):** tipo de planta termosolar donde se disponen espejos reflectantes, planos o ligeramente cóncavos, que refleja la luz solar a una torre para calentar un fluido de trabajo que permite realizar un ciclo Rankine o Brayton [8].

1.2. Motivación

El presente trabajo tiene como motivaciones trabajar con energía y sustentabilidad, temas que son de suma importancia e interés en un mundo sumido en el calentamiento global; realizar un ACV, herramienta relativamente nueva para el ecosistema chileno y de gran importancia en la toma de decisiones sobre regulaciones ambientales; aprender sobre la actividad minera, principal rubro productivo de Chile por lo que su estudio es importante (y casi obligatorio) para cualquier ingeniero mecánico del país; trabajar con el equipo de Solar Mining que representa un desafío y una oportunidad de expandir los conocimientos al contar con un equipo multidisciplinario.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el beneficio ambiental que puede lograrse con la integración de tecnologías solares en la industria de hierro en Chile través de un estudio del análisis de ciclo de vida.

1.3.2. Objetivos específicos

Para poder alcanzar el objetivo general, será necesario lograr una serie de objetivos específicos en el transcurso del trabajo, los cuales se detallan a continuación:

- Estudiar cómo se realiza un ACV.
- Recopilar información y datos de la industria del hierro en Chile.
- Modelar los procesos en un software de ACV.
- Obtener indicadores de impacto ambiental.
- Comparar los resultados con estudios previos.
- Revisar las tecnologías solares modeladas por el equipo de Solar Mining.
- Identificar procesos donde sea posible la integración de tecnologías solares.

1.4. Alcances

Abarca solamente la operación de Valle del Huasco por lo que se estudia solo una parte de la industria del hierro en Chile. Es un ACV desde la “cuna a la puerta”, que comprende desde la operación minera hasta la concentración. Tanto para completar el ICV como para realizar la EICV se utiliza un software de ACV y una base de datos. Se incluyen en el análisis solo las tecnologías solares modeladas por el equipo de Solar Mining para medir el beneficio ambiental. El beneficio ambiental es medido solamente respecto a un indicador de la categoría de impacto, el potencial de calentamiento global con un horizonte temporal de 100 años y utilizando el método CML2001².

²Método de evaluación de impacto que restringe el modelamiento cuantitativo a etapas tempranas en la cadena de causa-efecto para limitar las incertidumbres

Capítulo 2

Antecedentes específicos

2.1. Productos operación Valle del Huasco

2.1.1. Pellet

Los pellets son pequeñas bolas de mineral de hierro utilizadas en la producción de acero. Es producido en la operación de Valle del Huasco mediante la aglomeración y endurecimiento del queque húmedo, producto intermedio similar al pellet feed [9]. Dependiendo de sus características se clasifican en:

- **Pellet básico o autofundente:** el término autofundente significa que son manufacturados con un aditivo especial de álcali como caliza o dolomita, en una planta de pellet. Se utiliza en carga directa a altos hornos ¹ para producción de arrabio. Su ley promedio es de 65 % hierro y su diámetro se encuentra entre 9 mm y 16 mm [9].
- **Pellet de reducción directa:** se usa en procesos siderúrgicos de reducción directa para producir hierro esponja, por lo que requiere mayores contenidos de fierro y menores impurezas que el alto horno. Su ley promedio es de 66,4 % y su diámetro se encuentra entre 9,5 mm y 15,9 mm [9].
- **Pellet chip** es el pellet que se ha quebrado en su proceso de producción. Se puede utilizar en lavado de carbones y/o formación de lodos usados en perforaciones de pozos petroleros. Su ley promedio es de 65 % de hierro y su diámetro es menor a 8 mm [9].

2.1.2. Pellet feed

Es un Mineral de hierro de bajo tamaño (menor a 44 micrones), que para ser utilizado en los altos hornos debe ser aglomerado en forma de pellets, es decir no es un pellet aún. Su ley promedio se encuentra entre 66 % y 68 % de hierro [9].

¹Reactores verticales que combustionan coque para reducir el mineral, fundir la carga y obtener hierro líquido.

2.1.3. Sinter feed

Mineral de hierro de alta calidad y de bajas impurezas que para ser producido solo necesita de una etapa de beneficio. Debe ser generalmente aglomerado para posteriormente alimentar un alto horno. Su ley promedio se encuentra entre 62 % y 63 % de hierro [9].

2.1.4. P40

Es un preconcentrado producido del reprocesamiento de la ganga proveniente de la planta de beneficio y de acopio de años anteriores. Se usa como alimentación de un segundo proceso de beneficio para producir pellet feed en otra operación de CAP. Su ley promedio es mayor 40 % de hierro.

2.2. Descripción de los procesos de la operación Valle del Huasco

La descripción de los procesos se obtiene de información de terreno, [10] y [11]

- **Minería:**
 - **Perforación:** actividad que considera el mallado y luego la perforación de pozos. También considera el carguío de los explosivos en dichos pozos.
 - **Tronadura:** etapa en la que se detona el explosivo cargado en la etapa anterior.
 - **Carguío:** involucra, principalmente, palas y cargadores para mover el material desde la tierra a las tolvas de los camiones mineros.
 - **Transporte:** movimiento de material que se realiza por medio de camiones mineros desde el rajo de la mina a la Planta de Beneficio si es mineral o al depósito de desechos si es roca estéril.
 - **Desarrollo:** considera la limpieza y mantención de caminos, así como el apoyo en las labores de minería a través de tractores, motoniveladoras y camiones aljibes.
- **Planta de beneficio:** el mineral proveniente de la mina pasa por dos etapas de chancado y harneo y luego por una prensa de rodillo para finalmente ser concentrado en baterías magnéticas donde se obtiene el preconcentrado. Este producto intermedio es almacenado en canchas para posteriormente ser cargado en las tolvas del ferrocarril.
- **Planta de rechazos:** procesa tanto la ganga fresca proveniente de la planta de beneficio como la ganga de acopio de años anteriores para producir p40.
- **Servicios MLC:** reúne todos los consumos de agua, combustibles y energía eléctrica en las instalaciones de Mina Los Colorados que no están considerados en la cadena principal.
- **Transporte ferroviario:** ferrocarril que transporta a través de 109 km de vía férrea el preconcentrado desde Mina Los Colorados hasta Planta Pellets ubicada en Huasco.

- **Manejo de preconcentrado:** comienza con la descarga del preconcentrado desde el ferrocarril para luego ser enviado directamente a la siguiente etapa, ser apilado en las canchas de recepción y luego ser recuperado o para luego ser embarcado como sinter feed.
- **Planta de beneficio secundaria:** comienza con una molienda húmeda donde se reduce el tamaño del mineral por medio de molinos de bolas para luego ser clasificado en una serie de baterías de hidrociclones. Posterior a esto, la pulpa pasa por un proceso de concentración donde etapas sucesivas de baterías magnéticas reducen la cantidad de impurezas. La pulpa proveniente desde el área de concentración es enviada hacia filtrado donde es espesada y finalmente filtrada. El queque húmedo obtenido en los discos de filtrado posee dos destinos, alimentar el área de aglomeración o ser almacenado como pellet feed.
- **Planta de endurecimiento térmico:**
 - **Planta de aditivo:** la cal viva entra a un sistema de molienda/clasificación para luego, mediante la adición de agua, formar cal hidratada. Este producto intermedio ingresa a un segundo proceso de molienda/clasificación donde es mezclada con caliza. El producto generado en esta última etapa es necesario para la aglomeración de los concentrados de hierro, siendo además el fundente de los pellets en su posterior procesamiento como acero.
 - **Aglomeración:** el queque filtrado y el aditivo son mezclados y homogeneizados para luego alimentar discos peletizadores, donde los finos son aglomerados en partículas de mayor tamaño conocidas como pellets verdes. Los pellets verdes con la granulometría adecuada ingresan al proceso de endurecimiento térmico.
 - **Endurecimiento térmico y manejo de pellets:** los pellets verdes ingresan al horno de parrillas donde son secados y oxidados, completándose el proceso con el endurecidos térmico² y enfriamiento. El calor es obtenido de la quema en el horno rotatorio de carbón pulverizado o de petróleo IFO 180. Una vez que el producto se enfría pasa a una etapa de clasificación donde se separan los pellets de los aglomerados de hierro de gran tamaño (“chunks y mameitas”). Finalmente, el pellet es enviado a las canchas de acopio en el puerto.
- **Operación de puerto:** los pellets provenientes de la etapa anterior y los pellets feed provenientes de planta de beneficio secundaria pueden ser conducidos directamente hasta la pluma de embarque ubicada en el Puerto Guacolda II o son almacenados en cancha. En el caso de que sean almacenados, tanto estos dos productos como el preconcentrado sinter feed son recuperados mediante recuperadores de capachos y/o cargadores frontales terminando al igual que del modo directo, en la pluma de embarque.
- **Servicios PP:** reúne todos los consumos de agua, combustibles y energía eléctrica en las instalaciones de Planta Pellet y del Puerto Guacolda II que no están considerados en la cadena principal.

²Proceso que se utiliza para conferirle al pellet propiedades mecánicas necesarias para su almacenamiento, transporte y procesamiento posterior.

2.3. Categorías de impacto

Son clases que representan las cuestiones ambientales de interés a las que se le pueden asignar indicadores. Dentro de las más importantes (y que se utilizan en este trabajo) se encuentra:

- **Requerimiento de energía bruta (REB):** consiste en obtener el indicador de energía utilizada tanto por la generación de la propia energía, como su uso. Por ejemplo en la combustión de los combustibles fósiles el REB es el poder calorífico superior, mientras que para la energía eléctrica el REB depende del mix de la red.
- **Potencial de calentamiento global (PCG):** se define como el forzamiento radiativo y acumulativo que es integrado durante un período de tiempo a partir de la emisión de una masa unitaria de gas con respecto a algún gas de referencia. El gas de referencia en este estudio es el dióxido de carbono (CO_2) [12].
- **Potencial de acidificación (PA):** es el potencial de lluvia ácida que se puede generar cuando ciertos gases reaccionan con el agua en la atmósfera. El gas de referencia en este estudio es el dióxido de azufre (SO_2) [13].
- **Potencial de eutrofización (PE):** es la acumulación de la concentración de nutrientes químicos en un ecosistema que conduce a una productividad anormal, causando un crecimiento excesivo de las algas en los ríos, lo que provoca una reducción en la calidad del agua y en las poblaciones de animales. La referencia en este estudio es el fosfato (PO_4^{-3}) [13].

2.4. Mix de la red eléctrica

En la siguiente tabla se muestra el mix del Sistema Interconectado Central (SIC), una de las redes eléctricas chilenas, durante el año 2016.

Tabla 2.1: Mix del SIC 2016 según las contribuciones porcentuales por fuentes de generación.

Fuente de Energía	Porcentaje de Participación
Carbón	32 %
Hidráulica de Pasada ^a	21 %
Gas Natural	19 %
Hidráulica de Embalse	15 %
Biomasa	5 %
Eólica	4 %
Solar Fotovoltaica	3 %
Petróleo Diésel	1 %

^a Incluye mini hidráulica de pasada
Fuente: CDEC-SIC

Capítulo 3

Metodología

3.1. Definición de los objetivos y alcances del análisis de ciclo de vida

3.1.1. Definición de los objetivos del análisis de ciclo de vida

Objetivo primario

El objetivo de este ACV es cuantificar la relación entre la producción de minerales y pellets de hierro en Chile y su entorno ambiental, sobre la base de las operaciones del año 2016. Esta relación se cuantifica en cuatro categorías de impacto, el REB, el PCG, el PA y el PE.

Objetivos secundarios

Medir las contribuciones relativas: con los resultados del ACV se esperan medir las contribuciones individuales de cada etapa respecto del sistema. Esto ayuda a identificar dónde se requiere mayor cantidad de energía, recursos o que etapas aportan la mayor cantidad de contaminantes para así decidir dónde enfocar los esfuerzos futuros de remplazos de mejoras en los procesos existentes.

Proporcionar información y dirección a los responsables de tomar decisiones: informar tanto a la industria como al proyecto Solar Mining respecto a las cuestiones ambientales de la industria del hierro.

3.1.2. Determinación del tipo de información necesaria

Dentro de los objetivos está el obtener indicadores de impacto ambiental. Por lo que el tipo de información necesaria son las emisiones que influyen en cada categoría seleccionada, por ejemplo, para el caso del PCG emisiones como el dióxido de carbono, el metano y el dióxido de nitrógeno entre otras inciden en su indicador.

También es importante entregar información de cuáles son las etapas donde se tiene mayor consumo de energía para así enfocar los esfuerzos en el futuro a la hora de explorar alternativas que reduzcan el impacto ambiental en la producción de minerales y pellets de hierro; por lo que disponer de la mayor cantidad de información no agregada es lo que se requiere en este caso.

3.1.3. Especificidad de la información requerida

Este ACV es un punto medio entre un estudio específico del producto y un estudio genérico. Para todas las etapas, las entradas más relevantes de materiales y energía son información específica del sitio elegido. Por otro lado, las salidas o emisiones al medio ambiente de son datos promedios ¹ que se obtienen de la base de datos.

3.1.4. Organización de los datos y resultados

La información recopilada y los resultados de su análisis se organizan según la unidad funcional una tonelada de mineral o pellet de hierro lista para transporte. Específicamente, para el REB se muestran los datos como MJ por tonelada de mineral o pellet, para el PCG se mostrará como kg de CO_2 eq. por tonelada de mineral o pellet, para el PA se mostrará como kg de SO_2 eq. por tonelada de mineral o pellet y para el PE se mostrará como kg de PO_4^{-3} eq. por tonelada de mineral o pellet.

3.1.5. Alcances del análisis de ciclo de vida

Adquisición de materias primas: el ACV comienza con la extracción del mineral de hierro y su transporte a la etapa de beneficio.

Manufactura: cubre la concentración, lo que considera la transformación de la materia prima en minerales y pellets de hierro y no en un producto final.

El resto de las etapas (acería, manufactura, fase de uso y fin de la vida) no se consideran en este estudio, por lo que es un ACV desde la “cuna a la puerta” como se muestra en la Figura 3.1.

¹Estos datos dependen de la información contenida en la base de datos, por lo que los datos promedios pueden ser, por ejemplo datos de hornos europeos.

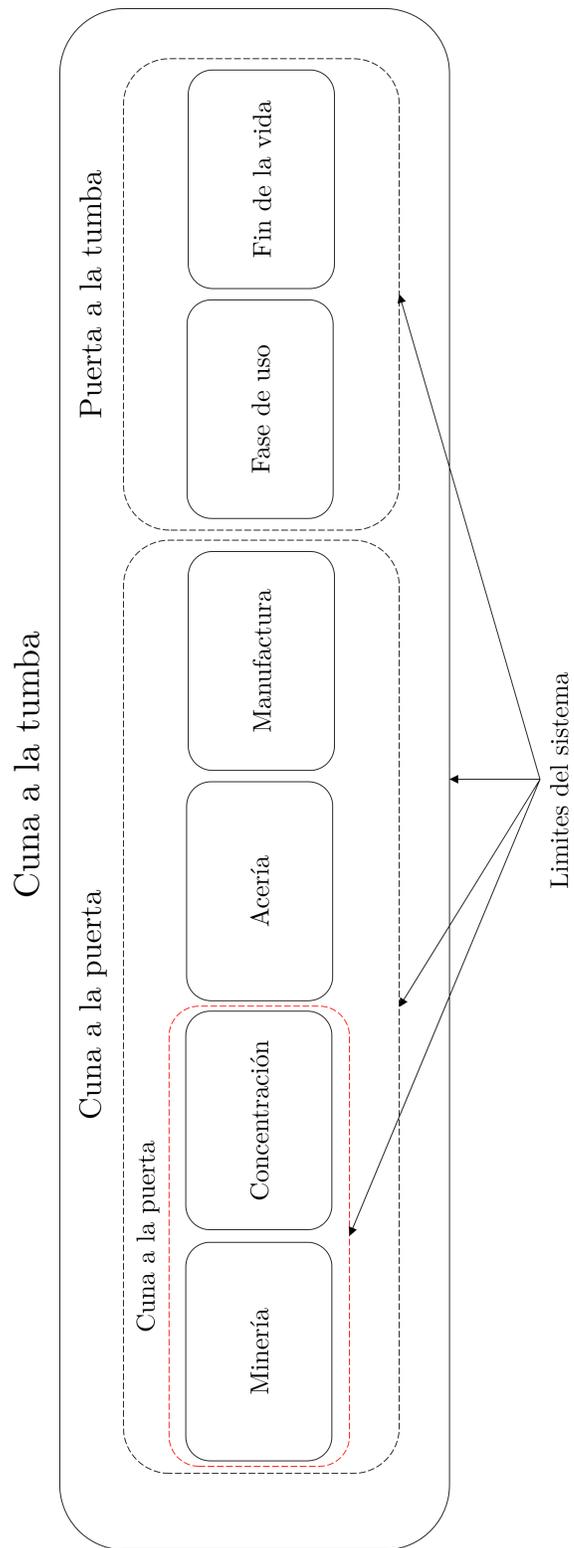


Figura 3.1: Diagrama del alcance del análisis de ciclo de vida. El recuadro rojo encierra las etapas consideradas

3.1.6. Principios básicos del trabajo

Antes de pasar a la fase de ICV, se definen algunos de los procedimientos logísticos para el proyecto.

Documentación de supuestos: para que comprenda como se obtienen los resultados finales todos los supuestos tomados son registrados.

Procedimientos para asegurar la calidad: se llevan a cabo revisiones internas por parte de los miembros de la comisión de la memoria y del proyecto de Solar Mining.

3.2. Inventario del ciclo de vida

3.2.1. Diagrama de flujo

De manera de representar gráficamente cómo se modelaron los procesos y fronteras del caso de estudio, es que se muestra el diagramas de flujo del sistema Valle del Huasco y el de sus subsistemas, minería y planta de endurecimiento térmico, en la Figura 3.2, 3.3 y 3.4 respectivamente y en las Figuras 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8 se muestran los diagramas de flujo de la producción de cada uno de los productos. Una descripción de cada uno de los procesos se puede encontrar en la Sección 2.2.

3.2.2. Plan de recopilación de datos

La exactitud y calidad requeridas de los datos fue definida dentro de los objetivos y alcances de este estudio. Para poder garantizar estos requerimientos se tomaron decisiones respecto a ciertas áreas generales las cuales se detallan a continuación.

Propósito del inventario

El propósito de este inventario es el de recopilar y organizar todos los datos necesarios para poder llevar a cabo el ACV de la industria del hierro en Chile ya que, sin un ICV, no existe ninguna base para evaluar impactos ambientales comparativos o la integración de tecnologías solares.

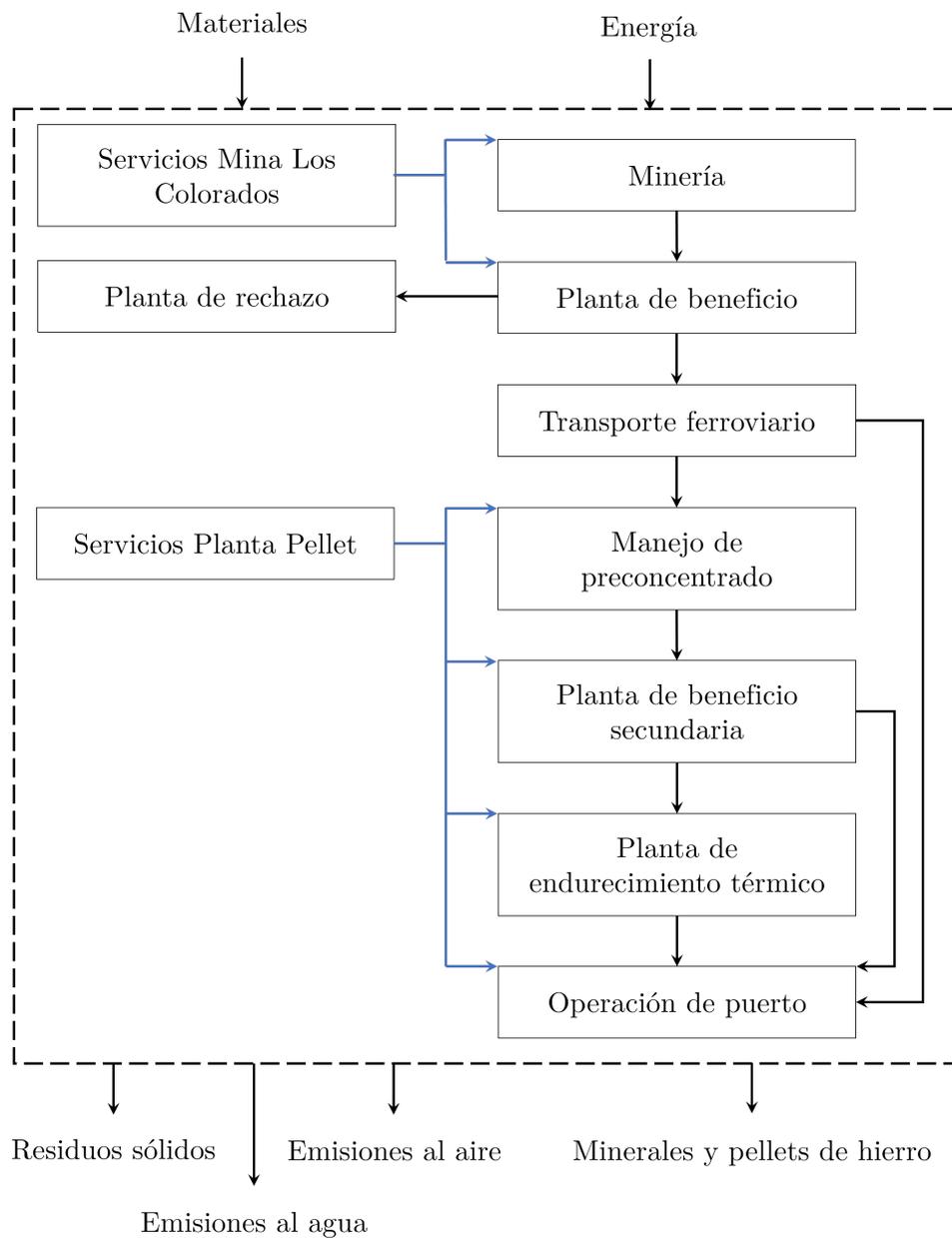


Figura 3.2: Diagrama de flujo del sistema Valle del Huasco. Las flechas color negro representan el flujo de material principal y las flechas color azul representan el flujo de servicio.

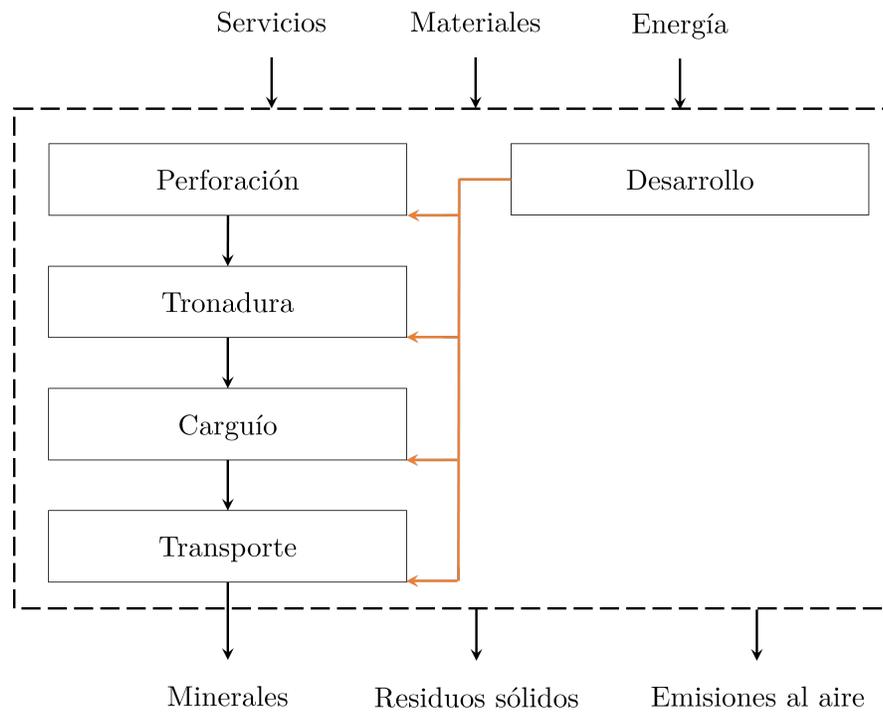


Figura 3.3: Diagrama de flujo del subsistema minería. Las flechas color negro representan el flujo de material principal y las flechas de color naranja representan flujo de servicio de equipos auxiliares.

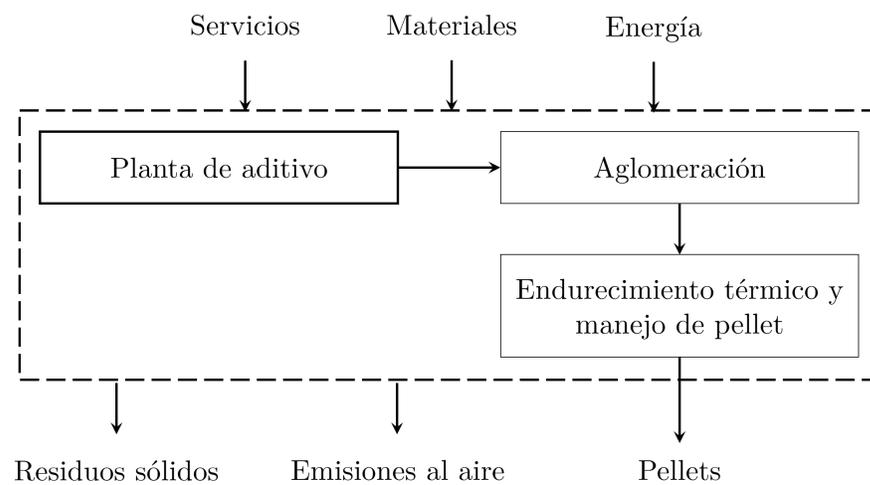


Figura 3.4: Diagrama de flujo del subsistema planta de endurecimiento térmico. Las flechas color negro representan el flujo de material principal.

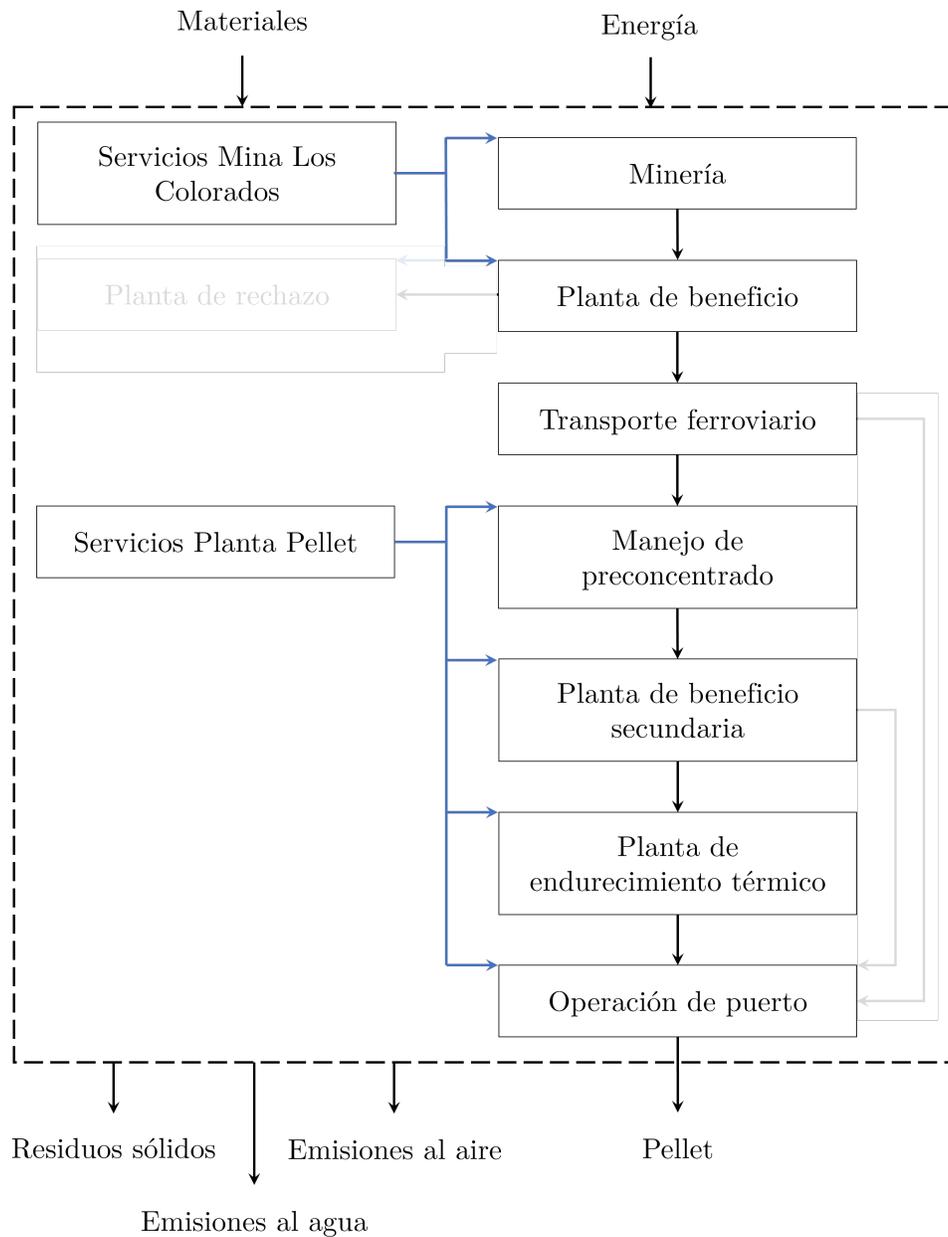


Figura 3.5: Diagrama de flujo del sistema de producción de pellet. Las flechas color negro representan el flujo de material principal y las flechas color azul representan el flujo de servicio.

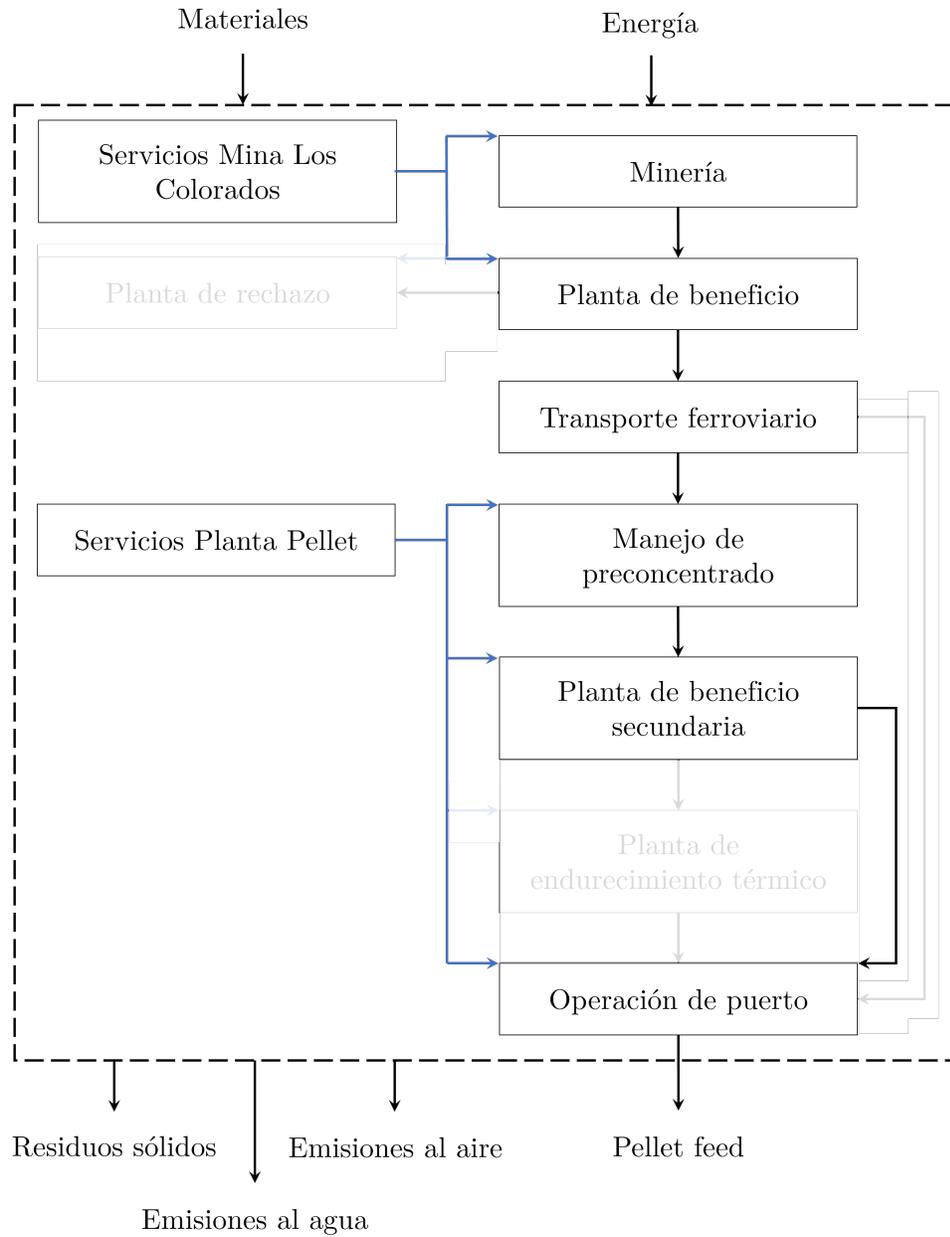


Figura 3.6: Diagrama de flujo del sistema de producción de pellet feed. Las flechas color negro representan el flujo de material principal y las flechas color azul representan el flujo de servicio.

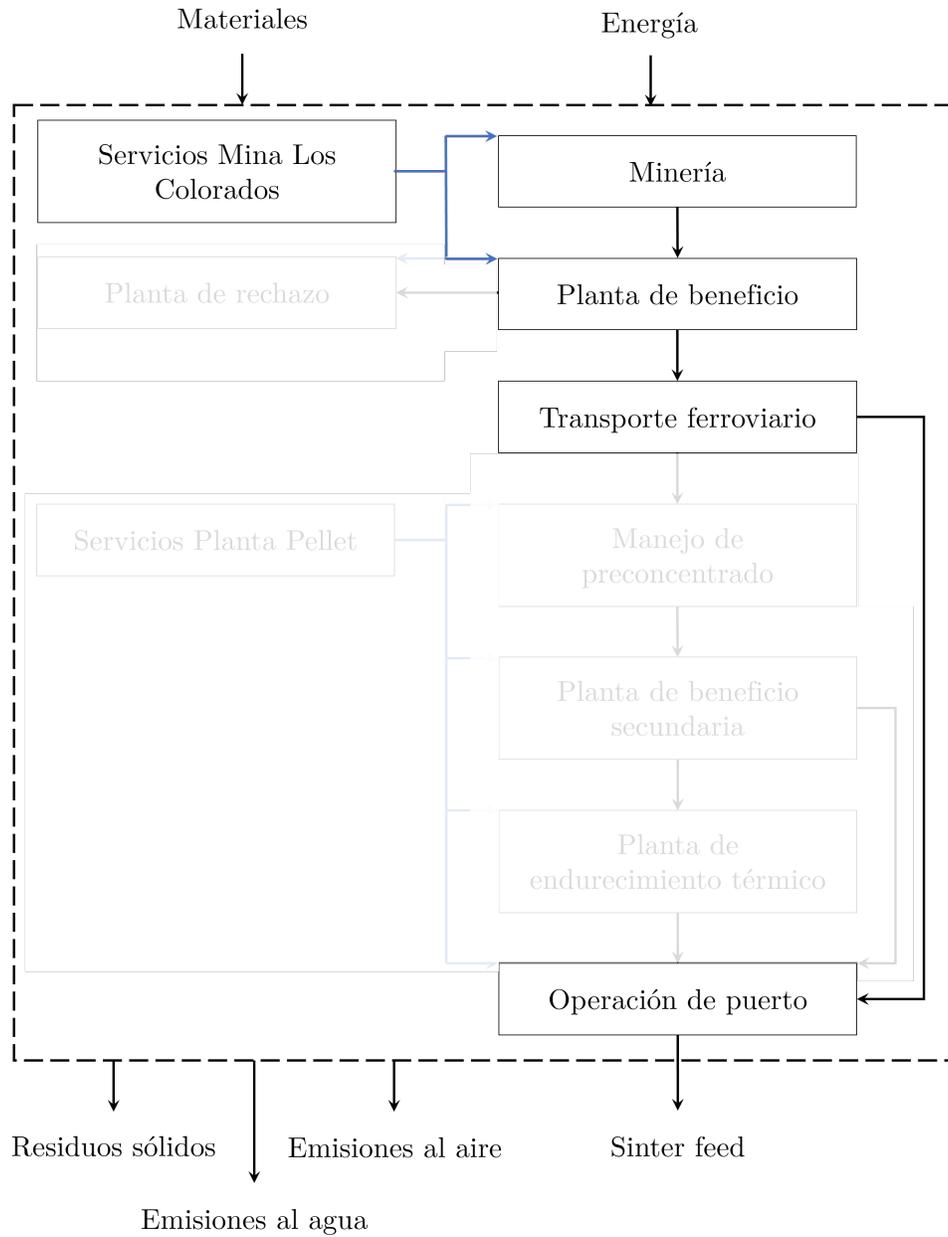


Figura 3.7: Diagrama de flujo del sistema de producción de sinter feed. Las flechas color negro representan el flujo de material principal y las flechas color azul representan el flujo de servicio.

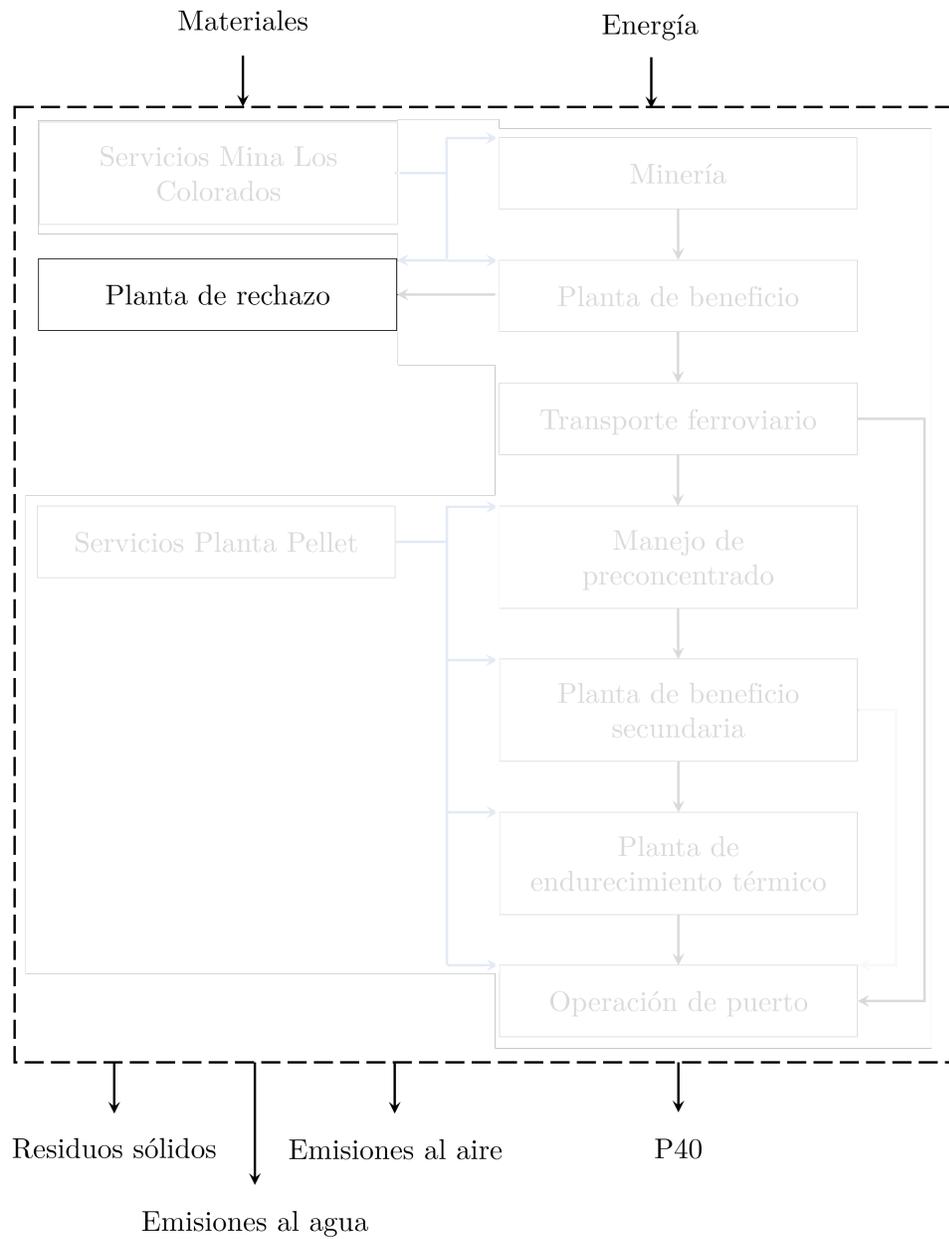


Figura 3.8: Diagrama de flujo del sistema de producción p40. Las flechas color negro representan el flujo de material principal

Límites del sistema

Como se muestra en las Figuras 3.5, 3.6, 3.7 y 3.8 las fronteras del sistema contemplan: para el caso del pellet, las etapas de minería, proceso de beneficio primario y secundario, transporte ferroviario, manejo de preconcentrado, planta de endurecimiento térmico y el embarque; para el caso del pellet feed, las etapas de minería, proceso de beneficio primario y secundario, transporte ferroviario, manejo de preconcentrado y el embarque; para el caso del sinter feed, las etapas de minería, proceso de beneficio primario, transporte ferroviario y el embarque; y para el caso del p40 la planta de rechazos.

Alcance geográfico

El alcance geográfico corresponde a las operaciones de CAP en Valle del Huasco, ubicado en la provincia de Huasco, región de Atacama, Chile.

Procedimientos de recopilación de datos

Se utilizaron tres procedimientos para recopilar los datos.

- **Datos específicos del sitio:** como señala el título, consistió en recopilar datos específicos del sitio en estudio. Para esto se realizó una pasantía de dos semanas en las instalaciones de Mina Los Colorados y otras dos semanas en las instalaciones de Planta Pellet.
- **Datos no específicos del sitio:** al contrario de la descripción anterior este procedimiento recopiló datos no específicos del sitio. Esto fue llevado a cabo con la utilización de la base de datos Ecoinvent v3.1.
- **Cálculos bajo supuestos:** para todos los datos no recopilados desde las dos fuentes anteriores, se realizaron cálculos bajo supuestos y según investigación.

Objetivos de calidad de datos

Para esta área de decisión se definieron los objetivos de la calidad de datos a recopilar los cuales fueron:

- Para las materias primas, los insumos energéticos, el consumo de agua, efluentes de agua y generación de residuos sólidos los datos son del sitio específico.
- Los datos de emisiones al aire son obtenidos de la base de datos Ecoinvent v3.1.
- Un mínimo del 95 por ciento de los insumos de materias primas y energía serían contabilizados en el ACV.
- Para los datos no registrados en los inventarios de la empresa, serían adecuados los valores aproximados o calculados bajo ciertos supuestos.

Indicadores de calidad de datos

Se definieron indicadores de la calidad con los cuales se caracterizan cada dato en cada una de las etapas del ACV. A continuación, se enlistan dichos indicadores.

- **Muy Alta:** Datos medidos a través de instrumentos con rango de error despreciable, los datos provienen de la lectura de instrumentos.
- **Alta:** Datos provenientes de registros internos con rango de error aceptable según el criterio ingenieril.
- **Media:** Estimaciones en base a información secundaria, promedios o rangos informados por la organización, admite supuestos.
- **Baja:** Información proviene del juicio de expertos, en este tipo de estimaciones pueden existir sesgos y/u omisiones.
- **Muy Baja:** Información proviene de publicaciones y supuesto generales, normalmente los datos son aproximaciones que pueden tener un alto margen de error.

Nivel de Agregación de los Datos

Se especifica el nivel de agregación de los datos, esto es, por ejemplo, si los datos son representativos de un proceso o varios procesos.

Período de tiempo de los datos:

El período de tiempo considerado para este ACV son los datos de todo un año de producción, específicamente el año 2016. Este período de tiempo se considera que es lo suficientemente extenso de tal manera de que suaviza cualquier desviación o variación en las operaciones normales de una instalación como las paradas de planta para mantenimiento rutinario, actividades de puesta en marcha y/o fluctuación en los niveles de producción.

Construcción de hoja de cálculo computacional

El último paso antes de realizar la recolección de datos fue la preparación de una "hoja de cálculo computacional". Su objetivo, guiar la recolección de datos tal que se considerarán todas las entradas y salidas importantes sin olvidar ninguna y especificar las áreas de decisión anteriormente mencionadas para cada dato.

Se utiliza el diagrama de flujo del sistema Valle del Huasco (Figura 3.2) para definir, numéricamente, las relaciones entre los subsistemas y la cantidad de productos finales. Estas relaciones numéricas son la fuente de los factores de proporcionalidad².

²Relaciones cuantitativas que reflejan las contribuciones relativas de los subsistemas al sistema total.

Para evitar las omisiones inadvertidas o el conteo doble de los datos es que cada etapa se vincula con la siguiente, de tal manera que, por ejemplo, el valor de la salida de un producto corresponde al mismo valor que la entrada de dicho producto a la siguiente etapa. Además de esto, se utiliza un sistema de organización consistente ya que la desorganización del inventario puede traer resultados incorrectos.

Cada hoja se organizó para que contuviera las siguientes tablas:

- Tabla según datos recolectados
- Tabla según factores de proporcionalidad
- Tablas según asignación de coproductos
 - Pellet
 - Pellet feed
 - Sinter feed
 - P40

3.2.3. Recopilación de datos

Entradas en el análisis del inventario del ciclo de vida del producto

Debido a limitantes de información, las consideraciones que se realizaron referentes a las entradas fueron dos.

La primera es que se excluyeron ciertos tipos de insumos (equipos, lubricantes, etc) dado que la recolección de datos hubiese sido un ejercicio sin fin al ser el número de insumos demasiado grande y no tener la empresa una organización centralizada con todos estos valores. Esta decisión es usada de manera general para muchos sistemas dentro de la literatura estudiada y su justificación es que la asignación de este tipo de insumos es minúscula cuando se consideran los millones de kg de producto. Esta opción tuvo la ventaja además de excluir muchos subsistemas complejos disminuyendo la complejidad computacional.

La segunda decisión que se tomó fue la de excluir entradas de menos de un 1% de contribución a los subsistemas (gasolina, cemento, etc.). Históricamente, esta regla del uno por ciento ha sido útil para limitar el alcance del análisis en los inventarios. A pesar de tener la ventaja de utilizar un menor tiempo para la recolección de dato, tiene la desventaja de que la posible presencia de una actividad perjudicial para el medio ambiente asociada con estos materiales podría pasarse por alto.

Energía: para los datos de energía se consideraron tanto la energía de procesos, que es la energía que se utiliza para que funcionen y operen los equipos, y la energía de transporte. La incorporación de dichas energías consideró tanto la cantidad específica de combustible como su transformación a unidades de energía según su factor equivalente.

Valores de combustión y precombustión: para este estudio solo se consideraron los valores de combustión y no los de precombustión, esto debido tanto a la información disponible.

Fuentes de energía

- *Combustibles Fósiles:* de manera general se consideró todo el uso de petróleo diesel. Para la etapa de Sinterizado se consideró el consumo de carbón y petróleo IFO 180.
- *Electricidad:* se consideraron las fuentes de combustible utilizado para generarla. Una vez que la electricidad se genera y se alimenta a las líneas eléctricas, es indistinguible de la electricidad de cualquier otra fuente. Por esto se utilizó el modelamiento de la red eléctrica del SIC realizado en el software Gabi v.6 por parte de miembros equipo de Solar Mining.
- *Otras fuentes:* dentro de las otras fuentes, se consideró la energía utilizada en la tronadura debido al mix de explosivo.

Agua: el consumo de agua también fue considerado, debido a que es un recurso importante sobre todo en la zona norte de país donde escasea. En ambas instalaciones el agua proviene de un pozo (agua subterránea), y dicha agua no es devuelta a la zona de extracción.

Transporte: el transporte considerado es el que mueve la carga desde el subsistema planta de Beneficios al subsistema planta de pellet por un ferrocarril. Debido a que este transporte no es operado por CAP, información del año 2016 no se pudo recopilar, por lo que se utilizó datos de un estudio de medición de huella de carbono para CAP minería del año 2013 ([14]), donde se señala el consumo de petróleo diésel y la cantidad de mineral transportado, para obtener un valor aproximado.

Salidas del análisis de inventario del ciclo de vida del producto

Tal como lo inventarios tradicionales, se construyó este inventario calificando dos categorías

- Producto
- Emisiones ambientales
 - Emisiones atmosféricas
 - Emisiones al agua
 - Desechos sólidos

Cada una de estas áreas se analiza con más detalle en las siguientes secciones.

Emisiones atmosféricas: para obtener los datos, se modeló, en el software Gabi v6, la combustión de los combustibles fósiles para la energía de proceso y de transporte, así como las emisiones de la producción de electricidad. Por otra parte, se consideró que la diferencia entre el agua que ingresa al sistema y el agua consumida o descargada al mar es agua evaporada.

Emisiones al agua: Se toman en consideración emisiones relativas a la planta de pellet, específicamente el relave con un 45,2 % de sólido que es descargado mediante un relaveducto al fondo del mar.

Desechos sólidos: se incluyeron los desechos sólidos producidos por la minería y los procesos de concentración y pelletizado. Los datos de residuos sólidos referentes a los combustibles y

a la generación de electricidad fueron obtenidos como resultado del modelamiento. El resto de los residuos como neumáticos, grasas, etc. no se consideran.

Productos: se consideró que cada subsistema tiene un producto resultante y que era conocido como un material intermedio o el producto terminado del sistema. Para el caso de los productos intermedios dentro de un subsistema (productos de las etapas), cálculos bajo supuesto se debieron realizar debido a que la información no existe. En su mayoría fueron cálculos donde se desprecia las pérdidas de material durante los procesos. Los productos finales considerados son cuatro: el pellet, que reúne los tres tipos de pellets que produce CAP, pellet básico o autofundente, pellet de reducción directa y el pellet chip; el pellet feed, el sinter feed y el p40.

Asignación de coproductos: dado que existe un interés por estudiar los productos por separados y de que en CAP no se registran datos de los productos por separados en los procesos que comparten es que se realizó una *asignación de coproductos*.

La Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés) se refiere a este tipo de situaciones en la ISO 14041 y señala un enfoque siguiendo tres posibles pasos:

Paso 1: es conveniente, en la medida de lo posible, evitar la asignación

Paso 2: cuando la asignación no puede evitarse, es conveniente dividir las entradas y las salidas del sistema entre sus diferentes productos o funciones de manera que se reflejen las relaciones.

Paso 3: cuando no pueda establecerse o utilizarse una relación física como base para la asignación, es conveniente repartir las entradas entre los productos y las funciones, de forma que se reflejen otras relaciones entre ellos. Por ejemplo, los datos de entrada y de salida podrían ser repartidos entre los coproductos proporcionalmente al valor económico de los productos.

A pesar de esto y debido a los datos disponibles es que no en todos los casos fue posible evitar la asignación de coproductos. Por lo que se vio etapa a etapa y para cada uno de los flujos el tipo de asignación que se realizaría. En casi la totalidad de los casos se siguió el paso 2 y la asignación se realizó según el peso de los productos embarcados (Tabla 3.1).

Tabla 3.1: Cantidad de productos embarcados

Productos	Cantidad [t]
Sinter feed	2.670.426
Pellet feed	2.211.664
Pellet	3.900.239

Bases de datos: las bases de datos utilizadas son:

- Combustibles fósiles:
 - GLO: diesel, burned in building machine ecoinvent
 - GLO: heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW
 - GLO: heat production, at hard coal industrial furnace 1-10MW

- Energía eléctrica
 - CL: electricity, high voltage production mix 2016 CDEC-SICecoinvent
 - Electricity, CSP, Calama_TT
 - Electricity, PV, Calama_TT
 - Electricity, Solar Tower, Calama_TT

3.3. Evaluación del impacto del ciclo de vida

Para esta EICV la clasificación y la caracterización fueron realizadas por el software de Gabi v6 y no se consideraron ni el agrupamiento, ni la ponderación.

Como se planteó en los objetivos del ACV, en la EICV se obtuvieron los indicadores REB, el PCG, el PA y el PE a través del método CML2001. En el caso del PCG el tiempo considerado fue de 100 años.

Los resultados de los indicadores se obtienen a partir de los consumos de energía eléctrica y combustibles fósiles y de sus emisiones ambientales, datos obtenidos de las bases de datos y según la modelación de los procesos.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Resultados del inventario de ciclo de vida

Las emisiones al medio ambiente producto de la generación eléctrica y el consumo de combustibles fósiles no se muestra en los resultados del inventario del ciclo de vida dado la cantidad de estas.

Tabla 4.1: Inventario de datos recopilados de las operaciones de Valle del Huasco.

Clasificación	Subclasificación	Ítem	Valor	Unidad		
Etapa	Subetapa					
Minería	Perforación	Petróleo diésel	0,69	kg/t pellet		
		Tronadura	Explosivos	3,55	kg/t pellet	
	Carguío	Energía eléctrica	0,43	kWh/t pellet		
		Petróleo diésel	1,31	kg/t pellet		
	Transporte	Petróleo diésel	4,81	kg/t pellet		
		Desarrollo	Petróleo diésel	0,54	kg/t pellet	
Planta de beneficio		Energía eléctrica	14,29	kWh/t pellet		
		Petróleo diésel	0,01	kg/t pellet		
Planta de rechazo		Energía eléctrica	1,19	kWh/t pellet		
Servicios Mina Los Colorados		Energía eléctrica	0,43	kWh/t pellet		
		Petróleo diésel	0,32	kg/t pellet		
		Petróleo diésel	2,30	kg/t pellet		
Transporte ferroviario		Energía eléctrica	2,34	kWh/t pellet		
Manejo de preconcentrado		Petróleo diésel	0,02	kg/t pellet		
		Energía eléctrica	43,67	kWh/t pellet		
Planta de beneficio secundaria Planta de endurecimiento térmico	Planta de aditivos	Caliza	28,55	kg/t pellet		
		Cal viva	3,95	kg/t pellet		
		Energía eléctrica	0,78	kWh/t pellet		
		Aglomeración	Floform	0,01	kg/t pellet	
			Energía eléctrica	4,80	kWh/t pellet	
	Endurecimiento térmico	Energía eléctrica	23,27	kWh/t pellet		
		Carbón	19,07	kg/t pellet		
		Petróleo IFO 180	1,15	kg/t pellet		
	Operación de puerto		Energía eléctrica	0,62	kWh/t pellet	
			Petróleo diésel	0,01	kg/t pellet	
Servicios Planta Pellet		Energía eléctrica	0,24	kWh/t pellet		
		Petróleo diésel	0,03	kg/t pellet		
<hr/>						
Total						
Entradas		Agua	1,05	m3/t pellet		
		Caliza	28,55	kg/t pellet		
		Cal viva	3,95	kg/t pellet		
		Floform	0,01	kg/t pellet		
		Explosivos	3,55	kg/t pellet		
		Energía eléctrica	92,06	kWh/t pellet		
		Petróleo diésel	10,04	kg/t pellet		
		Carbón	19,07	kg/t pellet		
		Petróleo IFO 180	1,15	kg/t pellet		
		Salidas	Producto	Pellet	1	t/t pellet
				Coproductos	Pellet feed	0,57
		Sinter feed	0,68		t/t pellet	
		P40	0,18		t/t pellet	
		Residuos sólidos	Estéril		9,49	t/t pellet
Ganga	0,96		t/t pellet			
Chunks y mameitas	6,95		t/t pellet			
Emisiones al agua		Ganga	0,41	t/t pellet		
		Agua	0,49	m3/t pellet		

Tabla 4.2: Inventario de datos de pellet según asignación de coproductos.

Clasificación	Subclasificación	Item	Valor	Unidad	
Etapa	Subetapa				
Minería	Perforación	Petróleo diésel	0,33	kg/t pellet	
		Tronadura	Explosivos	1,70	kg/t pellet
	Carguío	Energía eléctrica	0,21	kWh/t pellet	
		Petróleo diésel	0,63	kg/t pellet	
	Transporte	Petróleo diésel	2,30	kg/t pellet	
		Desarrollo	Petróleo diésel	0,26	kg/t pellet
Planta de beneficio		Energía eléctrica	6,84	kWh/t pellet	
		Petróleo diésel	0,01	kg/t pellet	
Servicios Mina Los Colorados		Energía eléctrica	0,21	kWh/t pellet	
		Petróleo diésel	0,15	kg/t pellet	
Transporte ferroviario		Petróleo diésel	1,10	kg/t pellet	
		Manejo de preconcentrado	Energía eléctrica	1,52	kWh/t pellet
Planta de beneficio secundaria		Petróleo diésel	0,01	kg/t pellet	
		Energía eléctrica	28,47	kWh/t pellet	
Planta de endurecimiento térmico	Planta de aditivos	Caliza	28,55	kg/t pellet	
		Cal viva	3,95	kg/t pellet	
		Energía eléctrica	0,78	kWh/t pellet	
	Aglomeración	Floform	0,01	kg/t pellet	
		Energía eléctrica	4,80	kWh/t pellet	
	Endurecimiento térmico	Energía eléctrica	23,27	kWh/t pellet	
		Carbón	19,07	kg/t pellet	
		Petróleo IFO 180	1,15	kg/t pellet	
	Operación de puerto		Energía eléctrica	0,74	kWh/t pellet
			Petróleo diésel	0,04	kg/t pellet
Servicios Planta Pellet		Energía eléctrica	0,65	kWh/t pellet	
		Petróleo diésel	0,23	kg/t pellet	
<hr/>					
Total					
Entradas		Agua	0,66	m3/t pellet	
		Caliza	28,55	kg/t pellet	
		Cal viva	3,95	kg/t pellet	
		Floform	0,01	kg/t pellet	
		Explosivos	1,70	kg/t pellet	
		Energía eléctrica	67,49	kWh/t pellet	
		Petróleo diésel	5,07	kg/t pellet	
		Carbón	19,07	kg/t pellet	
		Petróleo IFO 180	1,15	kg/t pellet	
		Salidas	Producto	Pellet	1
Residuos sólidos	Estéril			4,54	t/t pellet
	Ganga		0,55	t/t pellet	
	Chunks y mameitas		6,95	t/t pellet	
Emisiones al agua	Ganga		0,26	t/t pellet	
	Agua		0,32	m3/t pellet	

Tabla 4.3: Inventario de datos de pellet feed según asignación de coproductos.

Clasificación	Subclasificación	Ítem	Valor	Unidad
Etapa	Subetapa			
Minería	Perforación	Petróleo diésel	0,31	kg/t mineral
		Tronadura	Explosivos	1,60
	Carguío	Energía eléctrica	0,20	kWh/t mineral
		Petróleo diésel	0,59	kg/t mineral
	Transporte	Petróleo diésel	2,17	kg/t mineral
		Desarrollo	Petróleo diésel	0,24
Planta de beneficio		Energía eléctrica	6,44	kWh/t mineral
		Petróleo diésel	0,01	kg/t mineral
	Servicios Mina Los Colorados	Energía eléctrica	0,20	kWh/t mineral
Transporte ferroviario		Petróleo diésel	0,14	kg/t mineral
	Manejo de preconcentrado	Petróleo diésel	1,04	kg/t mineral
Planta de beneficio secundaria		Energía eléctrica	1,44	kWh/t mineral
	Operación de puerto	Petróleo diésel	0,01	kg/t mineral
		Energía eléctrica	26,81	kWh/t mineral
Servicios Planta Pellet		Energía eléctrica	0,74	kWh/t mineral
		Petróleo diésel	0,04	kg/t mineral
		Energía eléctrica	0,65	kWh/t mineral
		Petróleo diésel	0,23	kg/t mineral
<hr/>				
Total				
Entradas		Agua	0,63	m ³ /t mineral
		Explosivos	1,60	kg/t mineral
		Energía eléctrica	36,47	kWh/t mineral
		Petróleo diésel	4,79	kg/t mineral
Salidas	Producto	Pellet feed	1	t/t mineral
	Residuos sólidos	Estéril	4,28	t/t mineral
		Ganga	0,51	t/t mineral
	Emisiones al agua	Ganga	0,25	t/t mineral
		Agua	0,30	m ³ /t mineral

Tabla 4.4: Inventario de datos de sinter feed según asignación de coproductos.

Clasificación	Subclasificación	Ítem	Valor	Unidad
Etapa	Subetapa			
Minería	Perforación	Petróleo diésel	0,27	kg/t mineral
		Tronadura	Explosivos	1,38
	Carguío	Energía eléctrica	0,17	kWh/t mineral
		Petróleo diésel	0,51	kg/t mineral
		Transporte	Petróleo diésel	1,87
Planta de beneficio	Desarrollo	Petróleo diésel	0,21	kg/t mineral
		Energía eléctrica	5,54	kWh/t mineral
			Petróleo diésel	0,01
Servicios Mina Los Colorados		Energía eléctrica	0,17	kWh/t mineral
		Petróleo diésel	0,12	kg/t mineral
Transporte ferroviario		Petróleo diésel	0,89	kg/t mineral
Operación de Puerto		Energía eléctrica	0,54	kWh/t mineral
		Petróleo diésel	0,02	kg/t mineral
<hr/>				
Total				
Entradas		Agua	0,05	m^3 /t mineral
		Explosivos	1,38	kg/t mineral
		Energía eléctrica	6,42	kWh/t mineral
		Petróleo diésel	3,89	kg/t mineral
Salidas	Producto	sinter feed	1	t/t mineral
	Residuos sólidos	Estéril	3,68	t/t mineral
		Ganga	0,44	t/t mineral

Tabla 4.5: Inventario de datos de p40 según asignación de coproductos.

Clasificación	Subclasificación	Ítem	Valor	Unidad
Entrada		Energía eléctrica	6,57	kWh/t mineral
Salidas	Producto	P40	1	t/t mineral
	Residuos sólidos	Ganga	5,31	t/t mineral

4.2. Resultados de la evaluación del impacto del ciclo de vida

4.2.1. Resumen de los indicadores de las categorías de impacto

Tabla 4.6: Resumen de indicadores de las categorías de impacto

Categorías de impacto	Pellet	Pellet feed	Sinter feed	P40	Unidad
Requerimiento de energía bruta	1429,44	574,89	243,46	63,37	MJ/t mineral o pellet
Potencial de calentamiento global	115,72	37,80	16,51	4,02	kg CO_2 eq./t mineral o pellet
Potencial de acidificación	0,83	0,25	0,12	0,03	kg SO_2 eq./t mineral o pellet
Potencial de eutrofización	0,14	0,08	0,03	0,01	kg PO_4^{-3} eq./t mineral o pellet

Tabla 4.7: Resumen del potencial de calentamiento global según el contenido de hierro mínimo

Categoría de impacto	Pellet	Pellet feed	Sinter feed	P40	Unidad
Potencial de calentamiento global	75,22	24,94	10,24	1,61	kg CO_2 eq./t Fe contenido mín

4.2.2. Requerimiento de energía bruta

Tabla 4.8: Requerimiento de energía bruta para producir pellet [MJ/t pellet]

Etapa	Subetapa	Fuente de energía		
		Red eléctrica	C. fósil	Explosivos
Minería	Perforación		15,13	
	Tronadura			4,85
	Carguío	2,00	28,56	
	Transporte		105,02	
	Desarrollo		11,71	
Planta de beneficio		66,02	0,28	
Servicios Mina Los Colorados		2,01	6,98	
Transporte ferroviario			50,23	
Manejo de preconcentrado		14,72	0,46	
Planta de beneficio secundaria		274,73		
Planta de endurecimiento térmico	Planta de aditivos	7,53		
	Aglomeración	46,36		
	Endurecimiento térmico	224,56	542,23	
Operación de puerto		7,13	2,01	
Servicios Planta Pellet		6,30	10,63	
Total		651,36	773,23	4,85

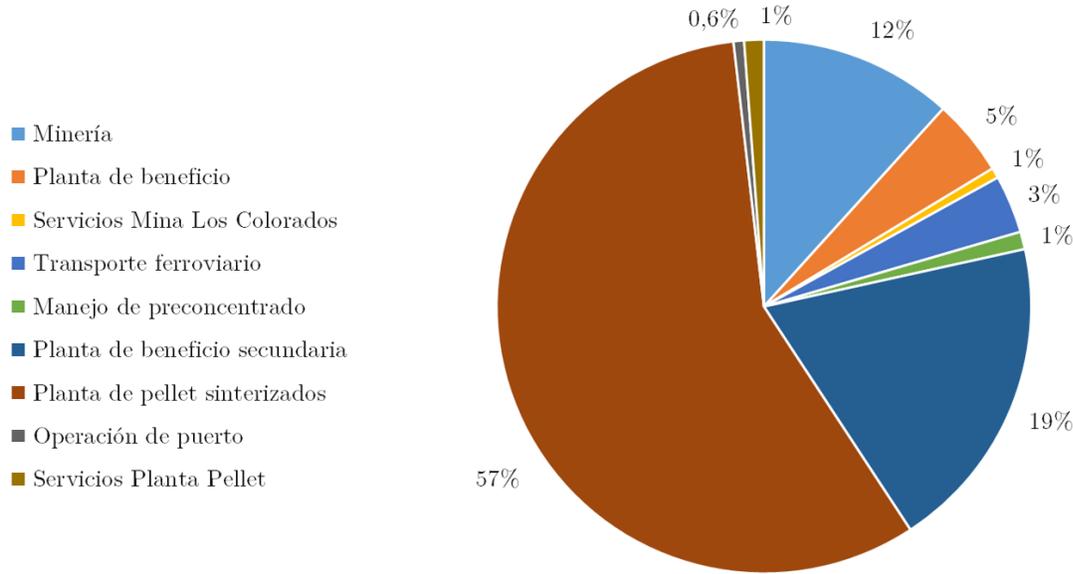


Figura 4.1: Contribución porcentual por etapa del requerimiento de energía bruta para producir pellet

Tabla 4.9: Requerimiento de energía bruta para producir pellet feed [MJ/t mineral]

Etapa	Subetapa	Fuente de energía		
		Red eléctrica	C. fósil	Explosivos
Minería	Perforación		14,25	
	Tronadura			4,57
	Carguío	1,89	26,90	
	Transporte		98,91	
	Desarrollo		11,03	
Planta de beneficio		62,18	0,27	
Servicios Mina Los Colorados		1,89	6,58	
Transporte ferroviario			47,31	
Manejo de preconcentrado		13,86	0,44	
Planta de beneficio secundaria		258,76		
Operación de puerto		7,13	2,01	
Servicios Planta Pellet		6,30	10,63	
Total		352,01	218,30	4,57

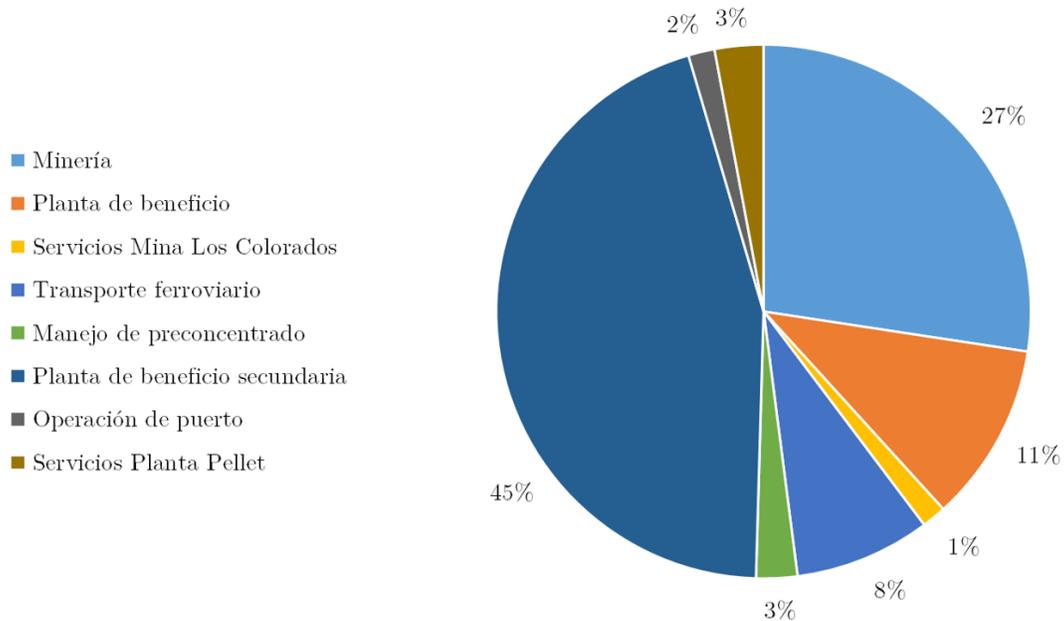


Figura 4.2: Contribución porcentual por etapa del requerimiento de energía bruta para producir pellet feed

Tabla 4.10: Requerimiento de energía bruta para producir sinter feed [MJ/t mineral]

Etapa	Subetapa	Fuente de energía		
		Red eléctrica	C. fósil	Explosivos
Minería	Perforación		12,25	
	Tronadura			3,93
	Cargío	1,62	23,13	
	Transporte		85,06	
	Desarrollo		9,48	
Planta de beneficio		53,47	0,23	
Servicios Mina Los Colorados		1,62	5,65	
Transporte ferroviario			40,68	
Operación de puerto		5,22	1,10	
Total		61,94	177,59	3,93

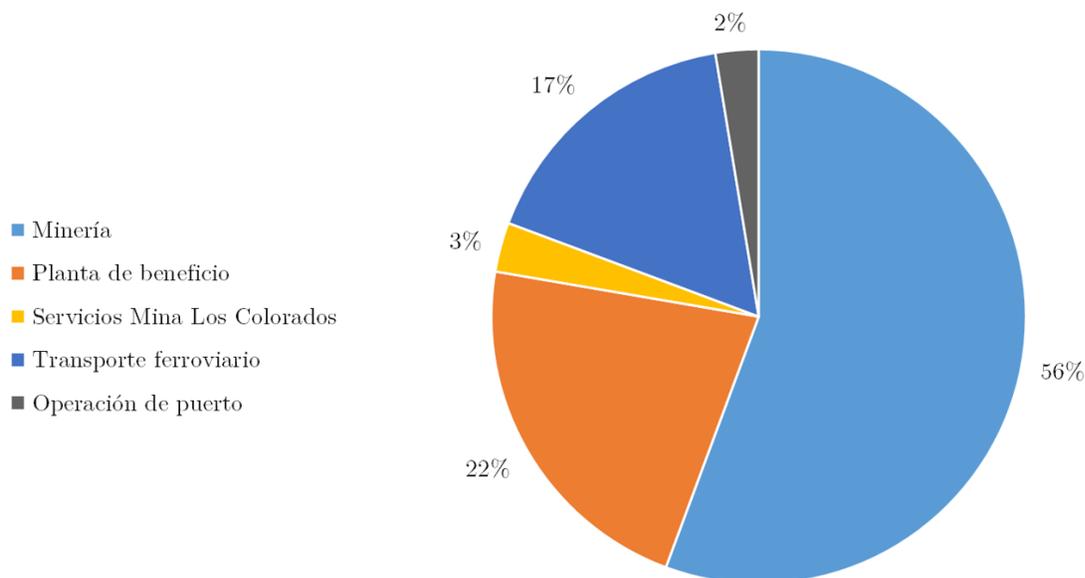


Figura 4.3: Contribución porcentual por etapa del requerimiento de energía bruta para producir sinter feed

Tabla 4.11: Requerimiento de energía bruta para producir p40 [MJ/t mineral]

Etapa	Subetapa	Fuente de energía		
		Red eléctrica	C. fósil	Explosivos
Planta de rechazo		63,37		
Total		63,37		

4.2.3. Potencial de calentamiento global

Tabla 4.12: Potencial de calentamiento global de la producción de pellet [kg CO₂ eq./t pellet]

Etapa	Subetapa	Fuente de energía		
		Red eléctrica	C. fósil	Explosivos
Minería	Perforación		1,05	
	Tronadura			0,26
	Carguío	0,13	1,99	
	Transporte		7,31	
	Desarrollo		0,82	
Planta de beneficio		4,19	0,02	
Servicios Mina Los Colorados		0,13	0,49	
Transporte ferroviario			3,50	
Manejo de preconcentrado		0,93	0,03	
Planta de beneficio secundaria		17,44		
Planta de endurecimiento térmico	Planta de aditivos	0,48		
	Aglomeración	2,94		
	Endurecimiento térmico	14,26	58,02	
Operación de puerto		0,45	0,14	
Servicios Planta Pellet		0,40	0,74	
Total		41,35	74,11	0,26

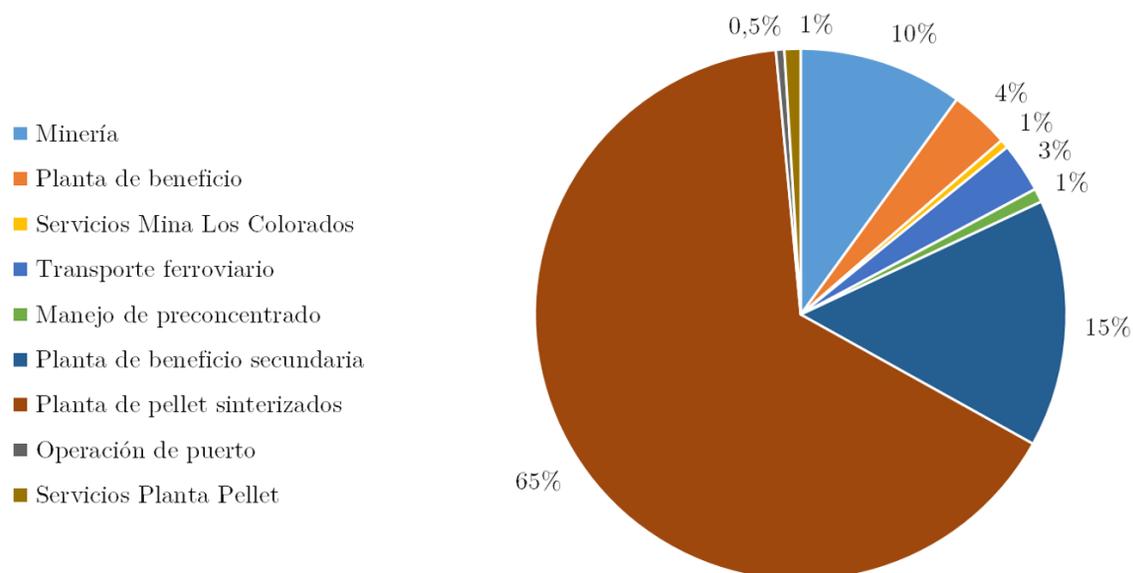


Figura 4.4: Contribución porcentual por etapa del potencial de calentamiento global de la producción de pellet

Tabla 4.13: Potencial de calentamiento global de la producción de pellet feed [kg CO_2 eq./t mineral]

Etapa	Subetapa	Fuente de energía		
		Red eléctrica	C. fósil	Explosivos
Minería	Perforación		0,99	
	Tronadura			0,24
	Carguío	0,12	1,87	
	Transporte		6,89	
	Desarrollo		0,77	
Planta de beneficio		3,95	0,02	
Servicios Mina Los Colorados		0,12	0,46	
Transporte ferroviario			3,29	
Manejo de preconcentrado		0,88	0,03	
Planta de beneficio secundaria		16,43		
Operación de puerto		0,45	0,14	
Servicios Planta Pellet		0,40	0,74	
Total		22,35	15,20	0,24

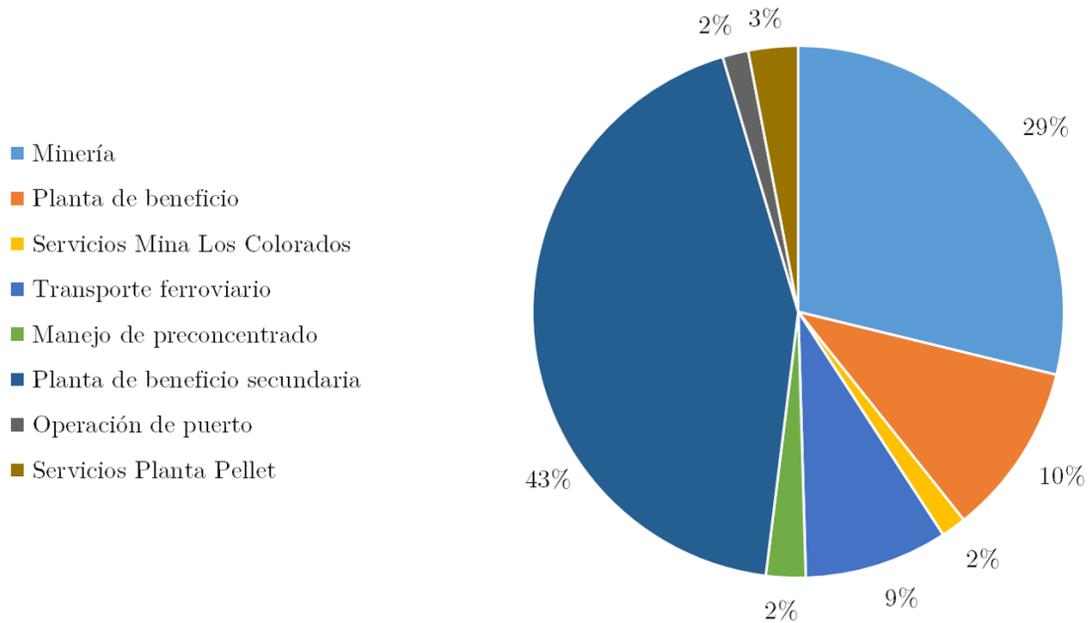


Figura 4.5: Contribución porcentual por etapa del potencial de calentamiento global de la producción de pellet feed

Tabla 4.14: Potencial de calentamiento global de la producción de sinter feed [kg CO_2 eq./t mineral]

Etapa	Subetapa	Fuente de energía		
		Red eléctrica	C. fósil	Explosivos
Minería	Perforación		0,85	
	Tronadura			0,21
	Cargío	0,10	1,61	
	Transporte		5,92	
	Desarrollo		0,66	
Planta de beneficio		3,39	0,02	
Servicios Mina Los Colorados		0,10	0,39	
Transporte ferroviario			2,83	
Operación de puerto		0,33	0,08	
Total		3,93	12,37	0,21

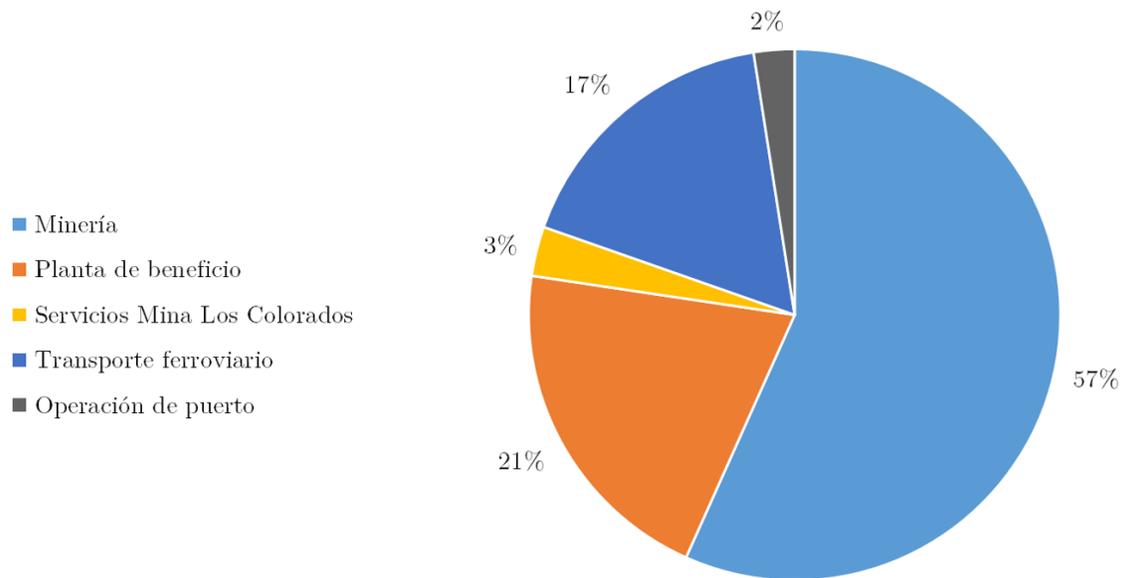


Figura 4.6: Contribución porcentual por etapa del potencial de calentamiento global de la producción de sinter feed

Tabla 4.15: Potencial de calentamiento global de la producción de p40 [kg CO_2 eq./t mineral]

Etapa	Subetapa	Fuente de energía		
		Red eléctrica	C. fósil	Explosivos
Planta de Rechazo		4,02		
Total		4,02		

Potencial de calentamiento global según el contenido de hierro mínimo

Tabla 4.16: Potencial de calentamiento global de la producción de pellet [kg CO_2 eq./t Fe contenido mín]

Etapa	Subetapa	Fuente de energía		
		Red eléctrica	C. fósil	Explosivos
Minería	Perforación		0,68	
	Tronadura			0,17
	Carguío	0,08	1,29	
	Transporte		4,75	
	Desarrollo		0,53	
Planta de beneficio		2,72	0,01	
Servicios Mina Los Colorados		0,08	0,32	
Transporte ferroviario			2,27	
Manejo de preconcentrado		0,61	0,02	
Planta de beneficio secundaria		11,34		
Planta de endurecimiento térmico	Planta de aditivos	0,31		
	Aglomeración	1,91		
	Endurecimiento térmico	9,27	37,71	
Operación de puerto		0,29	0,09	
Servicios Planta Pellet		0,26	0,48	
Total		26,88	48,17	0,17

Tabla 4.17: Potencial de calentamiento global de la producción de pellet feed [kg CO_2 eq./t Fe contenido mín]

Etapa	Subetapa	Fuente de energía		
		Red eléctrica	C. fósil	Explosivos
Minería	Perforación		0,65	
	Tronadura			0,16
	Carguío	0,08	1,24	
	Transporte		4,55	
	Desarrollo		0,51	
Planta de beneficio		2,61	0,01	
Servicios Mina Los Colorados		0,08	0,30	
Transporte ferroviario			2,17	
Manejo de preconcentrado		0,58	0,02	
Planta de beneficio secundaria		10,84		
Operación de puerto		0,30	0,09	
Servicios Planta Pellet		0,26	0,49	
Total		14,75	10,04	0,16

Tabla 4.18: Potencial de calentamiento global de la producción de sinter feed [kg CO_2 eq./t Fe contenido mín]

Etapa	Subetapa	Fuente de energía		
		Red eléctrica	C. fósil	Explosivos
Minería	Perforación		0,53	
	Tronadura			0,13
	Cargío	0,06	1,00	
	Transporte		3,67	
	Desarrollo	0,00	0,41	
Planta de beneficio		2,10	0,01	
Servicios Mina Los Colorados		0,06	0,24	
Transporte ferroviario			1,76	
Operación de puerto		0,21	0,05	
Total		2,44	7,67	0,13

Tabla 4.19: Potencial de calentamiento global de la producción de p40 [kg CO_2 eq./t Fe contenido mín]

Etapa	Subetapa	Fuente de energía		
		Red eléctrica	C. fósil	Explosivos
Planta de Rechazo		1,61		
Total		1,61		

4.2.4. Potencial de acidificación

Tabla 4.20: Potencial de acidificación de la producción de pellet [kg SO₂ eq./t pellet]

Etapa	Subetapa	Fuente de energía		
		Red eléctrica	C. fósil	Explosivos
Minería	Perforación		7,76E-03	
	Tronadura			s.i.
	Carguío	8,00E-04	1,46E-02	
	Transporte		5,38E-02	
	Desarrollo		6,00E-03	
Planta de beneficio		2,64E-02	1,45E-04	
Servicios Mina Los Colorados		8,01E-04	3,58E-03	
Transporte ferroviario			2,58E-02	
Manejo de preconcentrado		5,88E-03	2,37E-04	
Planta de beneficio secundaria		1,10E-01		
Planta de endurecimiento térmico	Planta de aditivos	3,01E-03		
	Aglomeración	1,85E-02		
	Endurecimiento térmico	8,97E-02	4,56E-01	
Operación de puerto		2,85E-03	1,03E-03	
Servicios Planta Pellet		2,52E-03	5,45E-03	
Total		2,60E-01	5,75E-01	

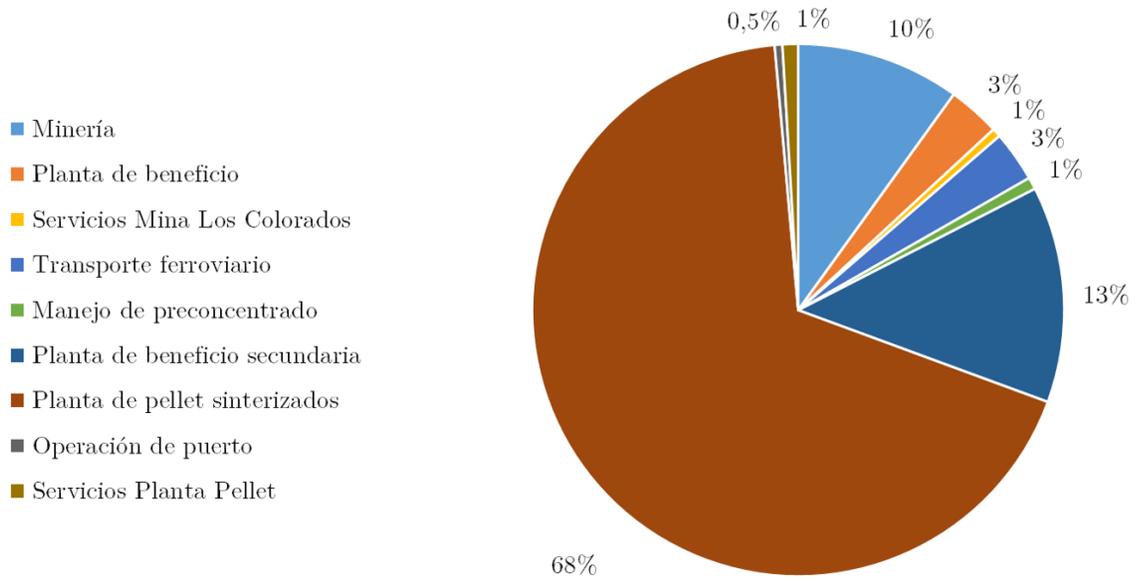


Figura 4.7: Contribución porcentual por etapa del potencial de acidificación de la producción de pellet

Tabla 4.21: Potencial de acidificación de la producción de pellet feed [kg SO₂ eq./t mineral]

Etapa	Subetapa	Fuente de energía		
		Red eléctrica	C. fósil	Explosivos
Minería	Perforación		7,30E-03	
	Tronadura			s.i.
	Carguío	7,53E-04	1,38E-02	
	Transporte		5,07E-02	
	Desarrollo		5,65E-03	
Planta de beneficio		2,48E-02	1,37E-04	
Servicios Mina Los Colorados		7,55E-04	3,37E-03	
Transporte ferroviario			2,43E-02	
Manejo de preconcentrado		5,54E-03	2,24E-04	
Planta de beneficio secundaria		1,03E-01		
Operación de puerto		2,85E-03	1,03E-03	
Servicios Planta Pellet		2,52E-03	5,45E-03	
Total		1,41E-01	1,12E-01	

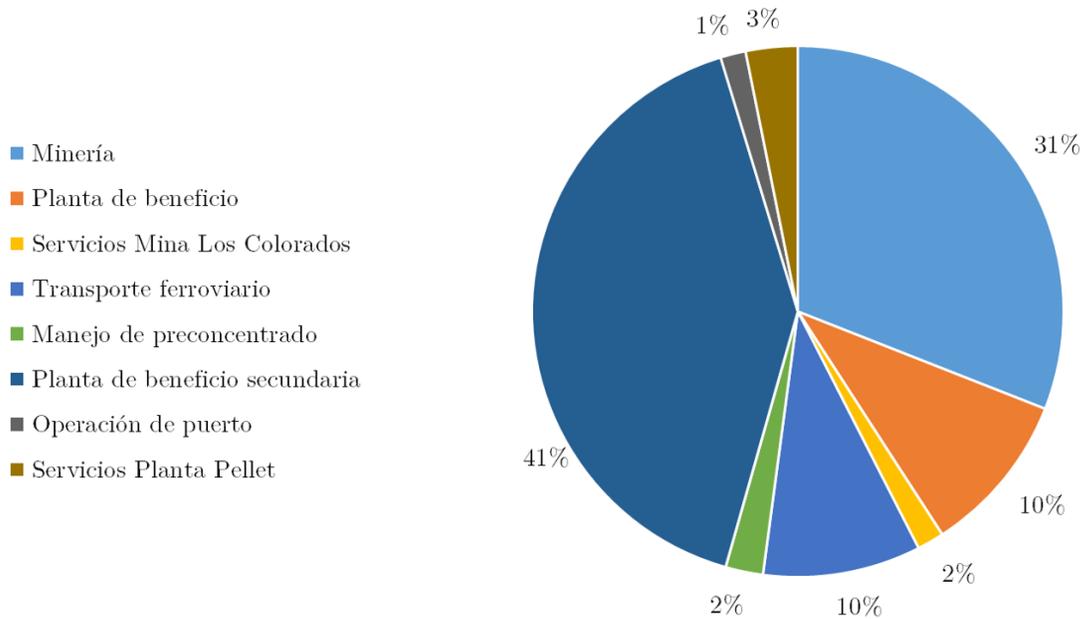


Figura 4.8: Contribución porcentual por etapa del potencial de acidificación de la producción de pellet feed

Tabla 4.22: Potencial de acidificación de la producción de sinter feed [kg SO_2 eq./t mineral]

Etapa	Subetapa	Fuente de energía		
		Red eléctrica	C. fósil	Explosivos
Minería	Perforación		6,28E-03	
	Tronadura			s.i.
	Cargío	6,48E-04	1,19E-02	
	Transporte		4,36E-02	
	Desarrollo		4,86E-03	
Planta de beneficio		2,14E-02	1,18E-04	
Servicios Mina Los Colorados		6,49E-04	2,90E-03	
Transporte ferroviario			2,09E-02	
Operación de puerto		2,09E-03	5,65E-04	
Total		2,47E-02	9,11E-02	

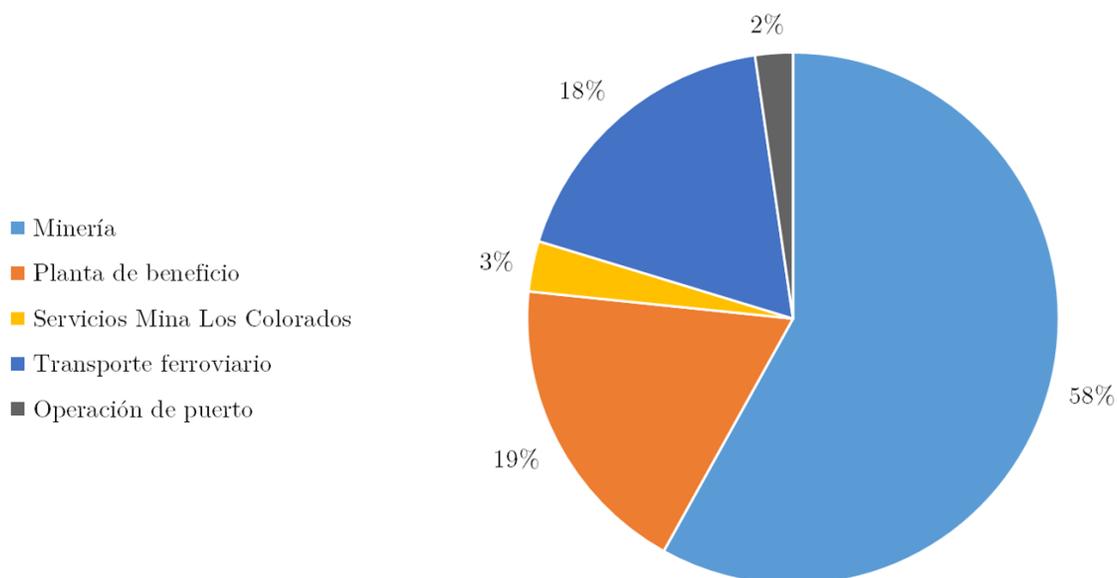


Figura 4.9: Contribución porcentual por etapa del potencial de acidificación de la producción de sinter feed

Tabla 4.23: Potencial de acidificación de la producción de p40 [kg SO_2 eq./t mineral]

Etapa	Subetapa	Fuente de energía		
		Red eléctrica	C. fósil	Explosivos
Planta de Rechazo		2,53E-02		
Total		2,53E-02		

4.2.5. Potencial de eutrofización

Tabla 4.24: Potencial de eutrofización de la producción de pellet [kg PO_4^{-3} eq./t pellet]

Etapa	Subetapa	Fuente de energía		
		Red eléctrica	C. fósil	Explosivos
Minería	Perforación		1,92E-03	
	Tronadura			s.i.
	Carguío	2,94E-04	3,63E-03	
	Transporte		1,34E-02	
	Desarrollo		1,49E-03	
Planta de beneficio		9,69E-03	3,61E-05	
Servicios Mina Los Colorados		2,95E-04	8,88E-04	
Transporte ferroviario			6,39E-03	
Manejo de preconcentrado		2,16E-03	5,89E-05	
Planta de beneficio secundaria		4,03E-02		
Planta de endurecimiento térmico	Planta de aditivos	1,11E-03		
	Aglomeración	6,81E-03		
	Endurecimiento térmico	3,30E-02	1,62E-02	
Operación de puerto		1,05E-03	2,55E-04	
Servicios Planta Pellet		9,25E-04	1,35E-03	
Total		9,57E-02	4,56E-02	

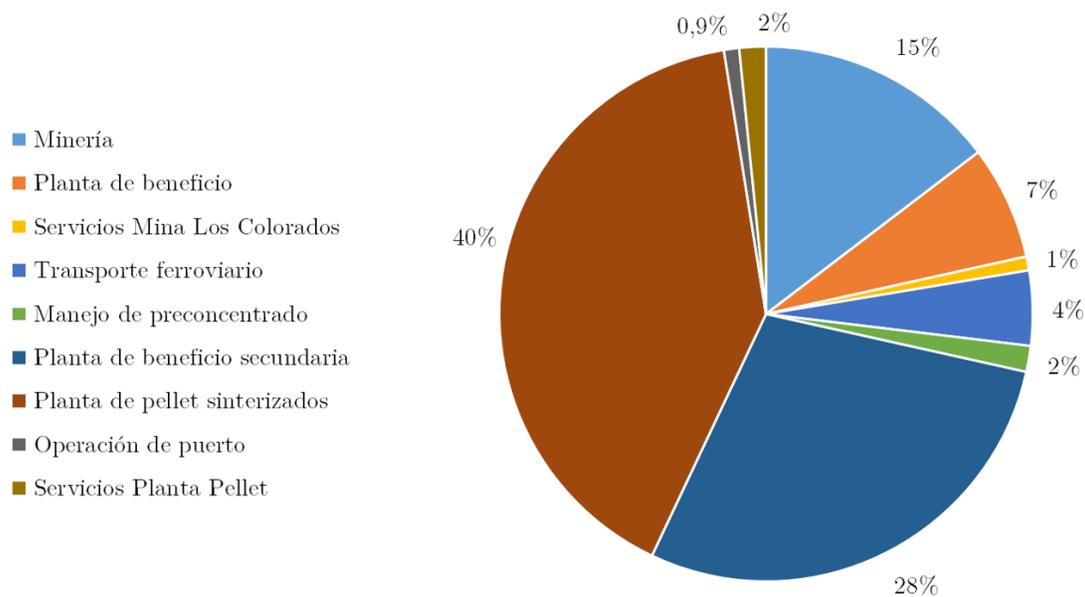


Figura 4.10: Contribución porcentual por etapa del potencial de eutrofización de la producción de pellet

Tabla 4.25: Potencial de eutrofización de la producción de pellet feed [kg PO_4^{-3} eq./t mineral]

Etapa	Subetapa	Fuente de energía		
		Red eléctrica	C. fósil	Explosivos
Minería	Perforación		1,81E-03	
	Tronadura			s.i.
	Carguío	2,77E-04	3,42E-03	
	Transporte		1,26E-02	
	Desarrollo		1,40E-03	
Planta de beneficio		9,13E-03	3,40E-05	
Servicios Mina Los Colorados		2,77E-04	8,37E-04	
Transporte ferroviario			6,02E-03	
Manejo de preconcentrado		2,04E-03	5,55E-05	
Planta de beneficio secundaria		3,80E-02		
Operación de puerto		1,05E-03	2,55E-04	
Servicios Planta Pellet		9,25E-04	1,35E-03	
Total		5,17E-02	2,78E-02	

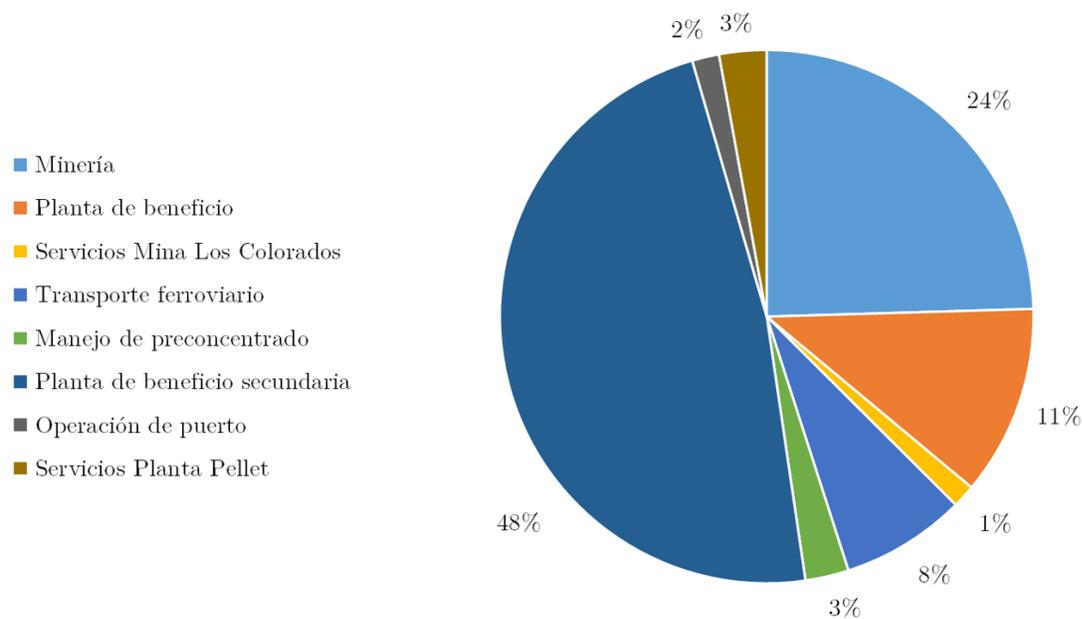


Figura 4.11: Contribución porcentual por etapa del potencial de eutrofización de la producción de pellet feed

Tabla 4.26: Potencial de eutrofización de la producción de sinter feed [$\text{kg } PO_4^{-3} \text{ eq./t mineral}$]

Etapa	Subetapa	Fuente de energía		
		Red eléctrica	C. fósil	Explosivos
Minería	Perforación		1,56E-03	
	Tronadura			s.i.
	Cargío	2,38E-04	2,94E-03	
	Transporte		1,08E-02	
	Desarrollo		1,21E-03	
Planta de beneficio		7,85E-03	2,92E-05	
Servicios Mina Los Colorados		2,39E-04	7,19E-04	
Transporte ferroviario			5,18E-03	
Operación de puerto		7,67E-04	1,40E-04	
Total		9,10E-03	2,26E-02	

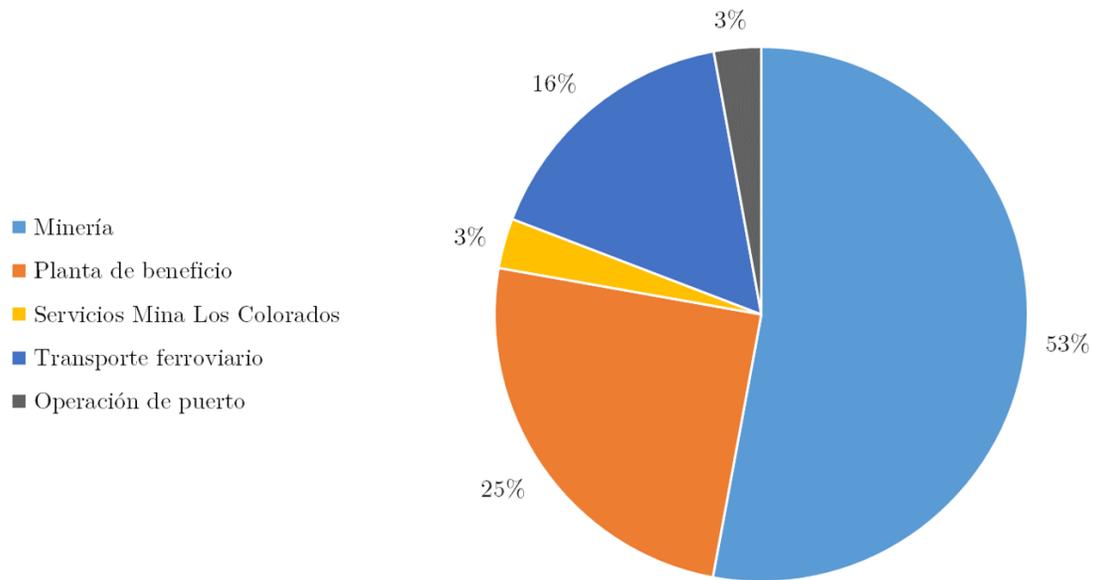


Figura 4.12: Contribución porcentual por etapa del potencial de eutrofización de la producción de sinter feed

Tabla 4.27: Potencial de eutrofización de la producción de p40 [$\text{kg } PO_4^{-3} \text{ eq./t mineral}$]

Etapa	Subetapa	Fuente de energía		
		Red eléctrica	C. fósil	Explosivos
Planta de rechazo		9,31E-03		
Total		9,31E-03		

4.3. Integración de las tecnologías solares

Tabla 4.28: Potencial de calentamiento global de los productos al integrar las tecnologías solares [kg CO_2 eq./t mineral o pellet]

Producto	Casos base	Tecnologías solares		
		FV	EC-CP	EC-TC
Pellet	115,72	77,39	76,51	75,98
Pellet feed	37,80	17,13	16,66	16,37
Sinter feed	16,51	12,95	12,87	12,82
P40	4,02	0,28	0,20	0,14

Tabla 4.29: Potencial de calentamiento global de los productos al integrar las tecnologías solares según [kg CO_2 eq./t Fe contenido mín]

Producto	Casos base	Tecnologías solares		
		FV	EC-CP	EC-TC
Pellet	75,22	50,30	49,73	49,38
Pellet feed	24,94	11,30	10,99	10,80
Sinter feed	10,24	8,03	7,98	7,95
P40	1,61	0,11	0,08	0,06

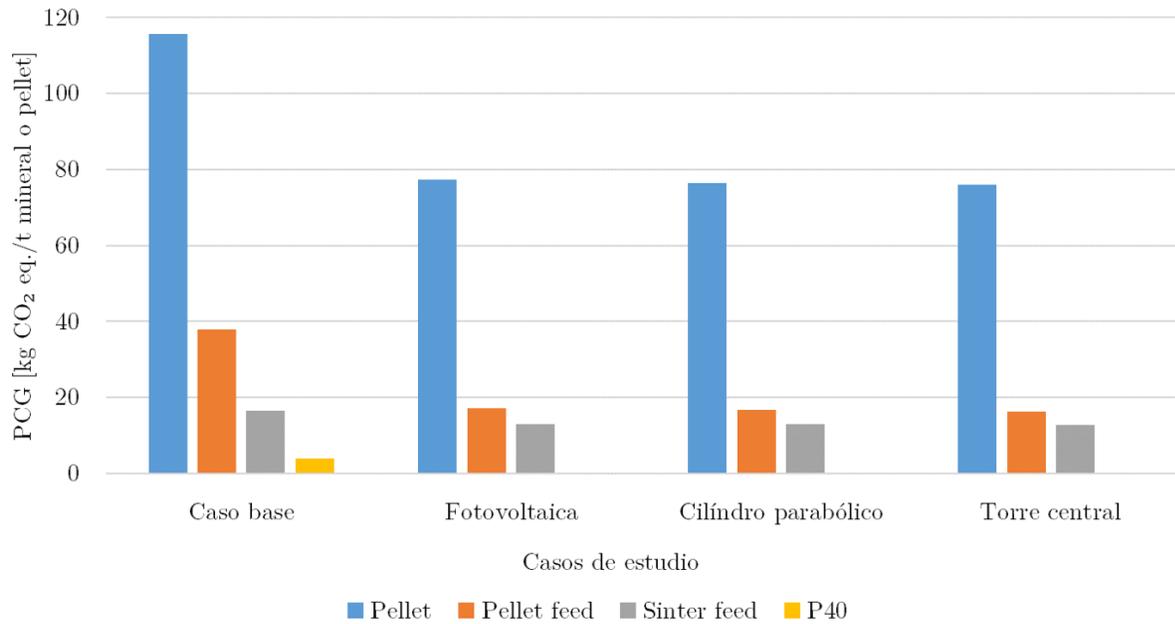


Figura 4.13: Potencial de calentamiento global del caso base y de las tecnologías solares.

Capítulo 5

Análisis de resultados

5.1. Comparación con estudios similares

5.1.1. Norgate et al.: *Life cycle assessment of iron ore mining and processing*

Dentro de los productos estudiados en este trabajo, el sinter feed es el que mayor similitud guarda con los productos (granzas y finos) estudiados por Norgate ([15] y [16]). Si bien no son exactamente los mismos minerales de hierro, comparten las fronteras del sistema.

Los resultados del estudio mencionado, para el REB fue 152,7 [MJ/t mineral] y para el PCG 11,9 kg de CO_2 eq./t de mineral. Con respecto al primer indicador el resultado representa un 63 % del valor encontrado en este estudio mientras que para el segundo indicador representa un 72 %. Además del resultado final se analiza la metodología utilizada debido a que ningún ACV es conducido de igual manera ni considera exactamente las mismas condiciones.

El inventario de datos construido para el sinter feed proviene de una asignación de co-producto, dada la información recopilada dicha asignación fue realizada según el peso de los productos que, si bien es el método más utilizado en la literatura, no es el más adecuado para este caso por lo que se explica a continuación. Dado las investigaciones de terreno, tanto los consumos como los desechos en realidad son menores debido a que para la producción de sinter feed se utiliza en su mayoría una unidad textural conocida como macizo. Esta textura es la de mayor calidad en Mina Los Colorados con leyes medias superiores al 57 % Fe. Por lo tanto, la operación minera y la planta de beneficio consumen menor energía para obtener sinter feed (ley 62 %-63 % Fe) que para obtener el preconcentrado normal (ley <60 %) ya que estos son alimentados con unidades texturales, en promedios, menores a 50 % Fe.

La utilización de un software y base de datos es un factor importante a considerar y sobre todo si no se utilizan los mismos como en este caso, donde Norgate y Haque utilizaron el software SimaPro y su base de datos correspondiente mientras que en este estudio se trabajó

con el software Gabi v6 y base de datos Ecoinvent v3.1. Esto resulta en una diferencia en el PCG producto de la combustión del petróleo diésel, el cual al ser una mercancía no debería cambiar mucho su composición química. Sin embargo, el valor utilizado por Norgate es de 2,73 kg de CO_2 eq./kg de petróleo diésel mientras que para este trabajo el valor utilizado es de 3,17 CO_2 eq./kg de petróleo diésel, mostrando una diferencia de casi un 14 % debido a la utilización de diferentes bases de datos. De haber utilizado el mismo factor que en el estudio citado, el PCG hubiese sido 14,8 kg de CO_2 eq./t de mineral acercándose hasta un 20 % de diferencia respecto al PCG de Norgate.

En el caso de la roca estéril generada este trabajo considera su movimiento hasta la zona de depósito final, actividad que no considera el estudio australiano. Las actividades de carguío y transporte en camiones mineros son las más intensivas en cuanto a uso de petróleo diésel, representando cerca de un 45 % del REB y del PCG respecto al total del sistema.

Para el caso de la red eléctrica, el valor utilizado por Norgate fue de 1 kg de CO_2 eq./kWh mientras que para este estudio se utilizó un valor de 0,61 kg de CO_2 eq./kWh. Esto último es debido al mix eléctrico de Australia en el 2009 fue generado por cerca de un 90 % con combustibles fósiles [17] mientras que en Chile, el SIC en el 2016 generó un 52 % de la electricidad con combustible fósil. Esto último podría explicar por qué, a pesar de tener una demanda de energía eléctrica en Mina Los Colorados de casi el doble que en las minas de Australia, el PCG no tiene el mismo comportamiento en esta etapa.

En el caso de las minas australianas en estudio, solo se utiliza un proceso de chancado y cribado ya que su ley promedio es del 60 % Fe, mientras que en el caso de Mina Los Colorados se cuenta con tres etapas de chancado, dos etapas de cribado y una de concentración magnética, operaciones que representan el mayor consumo energético en la planta de beneficio.

Este trabajo también considera servicios (servicios MLC) y equipos de apoyo (desarrollo), actividades que representan un 5 % del PCG de sistema y que no es considerado por el estudio de Norgate.

El CO_2 referente al explosivo tiene diferentes formas de considerarlo. Mientras que Norgate considera el CO_2 liberado durante la producción del explosivo, en este estudio se considera solamente el liberado al ser detonado.

Se destaca que en Mina Los Colorados se usa apenas un quinto de la cantidad de agua que se usa en las minas australianas para producir los minerales. Tema importante ya que el agua es un recurso que escasea en el norte de Chile.

5.1.2. Ferreira et al.: *Life Cycle Assessment study of iron ore mining*

Similar a la comparación anterior, el sinter feed es el producto con mayor similitud al concentrado producido en el estudio de Helio Ferreira and Mariangela Praça ([18]). No obstante, se debe contraer las fronteras del sistema de producción de sinter feed para que coincidan, por lo que no se considera ni el transporte en ferrocarril ni las operaciones de puerto para

esta comparación.

En el estudio mencionado, el resultado del PCG fue de 13,32 kg de CO_2 eq./t de mineral, muy similar al obtenido al contraer las fronteras del sistema con valor de 13,27 kg de CO_2 eq./t de mineral. Además del resultado final se analiza la metodología utilizada.

El estudio brasileño considera actividades como la clausura de la mina, la producción y abastecimiento tanto de equipos como de materias primas y el sistema de soporte donde considera el transporte del personal y el transporte y disposición final de los residuos industriales. En conjunto, estas actividades representan aproximadamente un 62 % de los kg de CO_2 eq./t mineral liberado, quitando los elementos mencionados el valor del PCG sería 5,1 kg de CO_2 eq./t mineral, un 37 % que los 13,27 kg de CO_2 eq./t de mineral obtenidos.

En la operación del caso brasileño en casi todas las actividades se utiliza energía eléctrica, tanto en la planta de beneficio como en la mina, ya que se transporta el mineral al proceso de chancado mediante correas transportadoras. Para este país esto es más sustentable ya que en Brasil más del 70 % de la generación eléctrica proviene de hidroelectricidad [19], pudiendo ser esta la causa de que haya una liberación menor de CO_2 en el estudio de Ferreira con respecto a este trabajo.

5.1.3. Zong-ping Li et al.: *Life Cycle Assessment of Iron Ore Sintering Process*

El pellet es el producto más adecuado para realizar la comparación con el estudio de Zong-ping Li ([20]) debido a que comparten las mismas fronteras y el producto es similar obteniéndose en ambos casos un pellet que ha pasado por un proceso de endurecimiento térmico.

El resultado del PCG encontrado para el estudio citado es de 241,53 kg CO_2 eq./t pellet que es mayor al obtenido en este estudio cuyo valor es de 115,72 kg de CO_2 eq./t de pellet.

Entre las diferencias más importantes son que el estudio chino consideró los consumos indirectos debido a la producción y abastecimiento de materias primas, las emisiones se calcularon mediante fórmulas teóricas y supuestos empíricos y que la energía eléctrica de China durante los últimos años ha sido generada por más de un 75 % con combustibles fósiles [21]. Debido a la poca claridad en la metodología de este estudio, un análisis más profundo es imposible de llevar a cabo.

5.2. Análisis de principales contribuciones relativas

El pellet es el producto que más etapas necesita para su producción. Es por esto que es el que más energía consume y más emisiones genera, como se observa en la Tabla 4.6.

La planta de endurecimiento térmico es la etapa más intensiva en consumo de energía

y en producción de emisiones como se observa en las Figuras 4.8, 4.16 4.20 y 4.24 . Esto ocurre principalmente debido al consumo de carbón requerido para lograr las temperaturas de trabajo del horno rotatorio, las cuales alcanzan en promedio los 1300 °C. Esta temperatura es necesaria para lograr las propiedades mecánicas requeridas por los procesos siguientes. Esta etapa también tiene el mayor consumo de energía eléctrica del sistema debido a que los discos peletizadores de la aglomeración, los motores de los ventiladores que hacen circular el aire caliente, los motores que hacen girar el horno y también los lavadores de gases son equipos de consumo eléctrico intensivo.

De las Tablas 4.2 y 4.3 se desprende que La planta de beneficio secundaria consume más energía eléctrica que la planta de beneficio primaria. Esto se debe a que es más difícil lograr la concentración requerida del pellet y del pellet feed (ley >65 % Fe) a partir de la concentración del preconcentrado (ley <60 % Fe) que lograr la concentración del preconcentrado a partir del mineral de la mina (ley <50 % Fe). Esto sucede ya que para lograr mayores concentraciones se requieren menores tamaño de mineral y para lograr dicha reducción se debe llevar a cabo un proceso más intensivo. En este caso la planta de beneficio secundaria tiene tres molinos de bolas cada uno con potencias diez veces mayores al chancador que se utiliza al comienzo de la planta de beneficio primaria y que es el equipo que consume mayor cantidad de energía de esa etapa.

La minería también tiene un gran consumo energético y grandes emisiones al medio ambiente en todos los productos debido al alto consumo de petróleo diésel. En las Tablas 4.8 4.9 y 4.10 se puede obtener que el 80 % de este consumo es debido al proceso de carguío y transporte, los cuales deben mover grandes cantidades de estéril y de mineral.

5.3. Comparación entre los productos

Como se puede observar en la Tabla 4.7 el pellet es el producto que más energía utiliza y más emisiones libera al medio ambiente debido a, como se menciona anteriormente, la cantidad de etapas que requiere este es mayor al resto de los productos.

Por otro lado, al comparar el pellet feed con el sinter feed se observa que este último consume energía y libera emisiones un 60 % menos que el pellet feed. Valor es de gran importancia dado que a ambos productos le restan la misma cantidad de etapas para transformarse en en aceros. Esto sucede debido a que para producir sinter feed se utilizan rocas con mayor ley de hierro que para el pellet feed necesitando así menos procesos para obtener mejor ley.

5.4. Integración de las tecnologías solares

En la Tabla 4.29 y la Figura 4.13 se puede observar que, de manera general, el beneficio ambiental respecto del PCG depende más del producto que de la tecnología utilizada ya que sus valores se diferencian en apenas 4 % al variar la tecnología, mientras que al variar el producto sus valores tiene una mayor diferencia entre ellos debido a los procesos que se

utilizan para su producción.

El mayor beneficio obtenido (a excepción de la producción del p40 ya que la planta de rechazo solo utiliza energía eléctrica) con la integración solar se logra en el proceso de producción de pellet feed, al reducirse su PCG en más de un 55 %. Esto se debe a que este producto tiene un gran consumo de energía eléctrica en las planta de beneficio. En el resto de los productos la reducción fue de entre un 35 % a un 25 %.

Capítulo 6

Conclusiones

Este trabajo cuantifica la relación entre la producción de minerales y pellets de hierro en Chile y su entorno ambiental, sobre la base de las operaciones del año 2016.

Con este estudio se evalúa el beneficio ambiental que se puede lograr con la integración de tecnologías solares en la industria de hierro en Chile a través de un ACV. Específicamente se obtuvo que para el Pellet su PCG de 116 kg de CO_2/t mineral se calculó una reducción potencial aproximada de 34 %, para el Pellet Feed su PCG de 38 kg de CO_2/t mineral tiene una reducción potencial calculada de 56 %, para el Sinter Feed su reducción potencial es de 22 % respecto al 17 kg de CO_2/t mineral del caso base y para el P40 el cálculo de su reducción fue del 95 % siendo 4 kg de CO_2/t mineral el PCG inicial.

Para lograr esto, se llevó a cabo un ACV de la “cuna a la puerta” de la industria del hierro en Chile; se recopilaron datos e información específica de la operación de Valle del Huasco de la compañía CAP que representa el 100 % de la producción de pellet y el 40 % de la producción de mineral de hierro en Chile; se modelaron los procesos en el software Gabi v6 y se utilizó la base de datos Ecoinvent v3.1 para obtener los indicadores de REB, PCG, PA y EP cuyos resultados están resumidos en la Tabla 4.6; se realizó la revisión de las tecnologías solares modeladas previamente por el equipo de Solar Mining; y finalmente, se identificaron etapas y proceso donde podría haber una integración solar y mediante el software Gabi v6 se realizó la evaluación.

Se realizó una comparación con resultados de trabajo de ACV de productos similares a los de este estudio de la cual se concluye que tanto el resultados como la claridad en la metodología utilizada son importantes. Se realizó también otra comparación entre los productos según su peso de hierro contenido mínimo de la cuál se concluye que producir acero utilizando el pellet producido con el mineral sinter feed podría ser menos contaminante y de una ley 3 % menor que en el caso del pellet feed con el que se produce el producto pellet estudiado.

Se midieron las contribuciones relativas de cada etapa para cada uno de los productos, encontrándose que, las más intensivas en cuanto a consumo de energía y las que más contaminación liberan al aire son: en la producción del pellet, la planta de endurecimiento térmico

y la planta de beneficio secundaria; para la producción de pellet feed la planta de beneficio secundaria y la etapa de minería; y para la producción de sinter feed la etapa de minería y la planta de beneficio.

Se deja para futuros análisis incluir el resto de las operaciones de CAP Minería y el poder expandir las fronteras de los sistemas abarcando también la acería, la manufactura.

Acrónimos

ACV	análisis de ciclo de vida
CAP	Compañía de Aceros del Pacífico
CB	caso base
CL	Chile
CO_2	dióxido de carbono
°C	grados celsius
EC-CP	energía termosolar de concentración - cilindro parabólico
EC-TC	energía termosolar de concentración - torre central
EICV	evaluación del impacto del ciclo de vida
Fe	hierro
FV	fotovoltaica
GLO	global
ICV	inventario de ciclo de vida
IFO	combustible intermedio
ISO	Organización Internacional de Normalización
kg	kilogramo
kWh	kilowatt hora
MJ	megajoules
MLC	Mina Los Colorados
MW	megawatt
PA	potencial de acidificación
PCG	potencial de calentamiento global
PE	potencial de eutrofización
PO_4^{-3}	fosfato
PP	Planta Pellet
REB	requerimiento de energía bruta
SIC	Sistema Interconectado Central
SO_2	dióxido de azufre
t	tonelada

Bibliografía

- [1] Klöpffer W. *Introducing Life Cycle Assessment and its Presentation in 'LCA Compendium'*, volume I. Springer, Dordrecht, 2014.
- [2] Matthias Finkbeiner. *The International Standards as the Constitution of Life Cycle Assessment: The ISO 14040 Series and its Offspring*, volume I. Springer, Dordrecht, 2014.
- [3] Comisión Chilena del Cobre Gobierno de Chile. *Mercado internacional del hierro y el acero*. 2016.
- [4] CAP Minería. *Memoria Anual 2016*. 2017.
- [5] Programa Energía Solar. Disponible en: www.programaenergiasolar.cl/comite-solar/desierto-de-atacama, Fecha de consulta: 15 de Septiembre del 2017.
- [6] Thomas Telsnig and Gustavo Díaz. Solar mining technology options – techno-economic-ecological datasheet, photovoltaics, open space photovoltaic system, 2016.
- [7] Thomas Telsnig and Gustavo Díaz. Solar mining technology options – techno-economic-ecological datasheet, concentrated solar power, parabolic trough with storage, 2016.
- [8] Thomas Telsnig and Gustavo Díaz. Solar mining technology options – techno-economic-ecological datasheet, concentrated solar power, solar power tower with storage, 2016.
- [9] CAP Minería. Presentación planta pellet, 2016.
- [10] CAP Minería. Presentación mina los colorados, 2016.
- [11] CAP Minería. Caracterización proceso planta de pellets, 2011.
- [12] Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Quinto informe de evaluación, 2009.
- [13] European Commission. Environmental impacts analysed and characterisation factors, 2006.
- [14] Bureau Veritas. *Informe final - huella de carbono Corporativa: Planta de Pellets y Puerto Guacolda II*. 2013.

- [15] Norgate T. and Haque N. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Cleaner Production*, 2010.
- [16] Norgate T. and Haque N. Life cycle assessment of iron ore mining and processing, 2015.
- [17] Australian Government. *Australian Energy Update 2016*. Canberra, 2016.
- [18] F. Helio and M. Praça. A life cycle assessment study of iron ore mining, 2015.
- [19] U.S. Energy Information Administration. *International Energy Outlook*. 2016.
- [20] Zong-ping LI and Xiao-hui FAN. Life cycle assessment of iron ore sintering process, 2015.
- [21] National Bureau of Statiticss of China. *Statistical Yearbook*. 2016.

Anexos

Anexo A: hoja de cálculo computacional

Tabla A.1: Organización para la recopilación de los datos requeridos por cada etapa/subetapa en la hoja de cálculo computacional

Nombre de la etapa/subetapa:								
Nivel de agregación de los datos:								
Descripción de la etapa/subetapa:								
Tipo de Flujo	Clasificación	Subclasificación	Valor	Unidad	Fuente	Tipo de dato	Calidad de Dato	Supuesto
Entrada	Materiales							
	Energía							
Salida	Productos							
	Coproductos							
	Residuos Sólidos							
	Emisiones al Agua							
	Emisiones al Aire							

Anexo B: ejemplos del modelo en Gabi

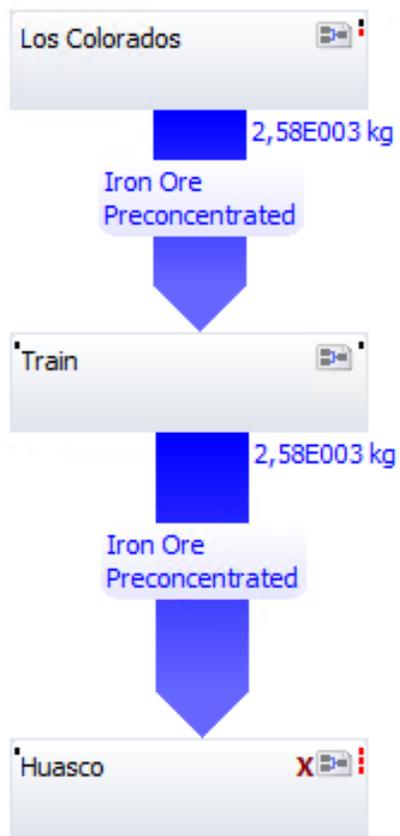


Figura A.1: Modelo general de Valle del Huasco en software Gabi v.6

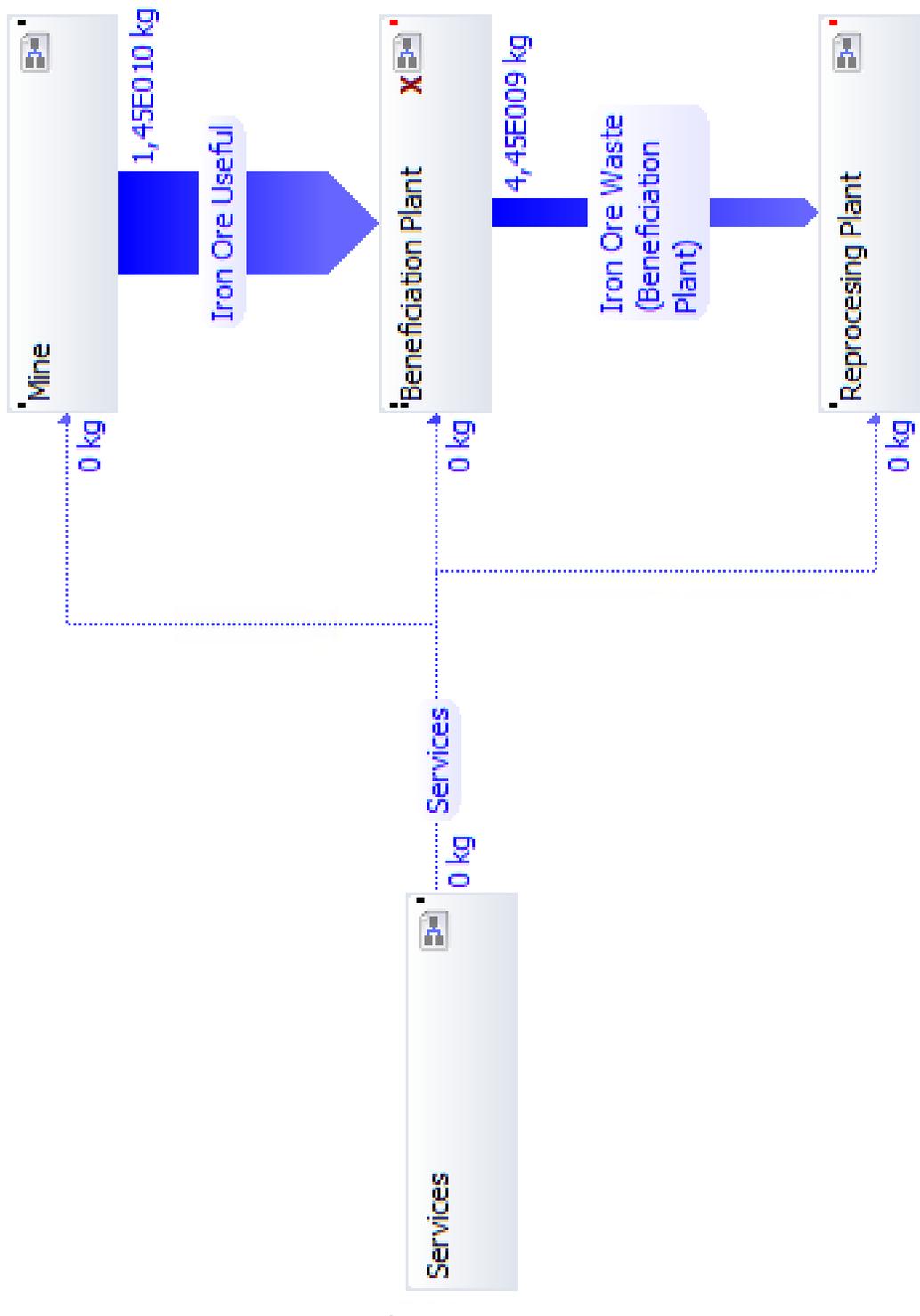


Figura A.2: Modelo de Mina Los Colorados en software Gabi v.6

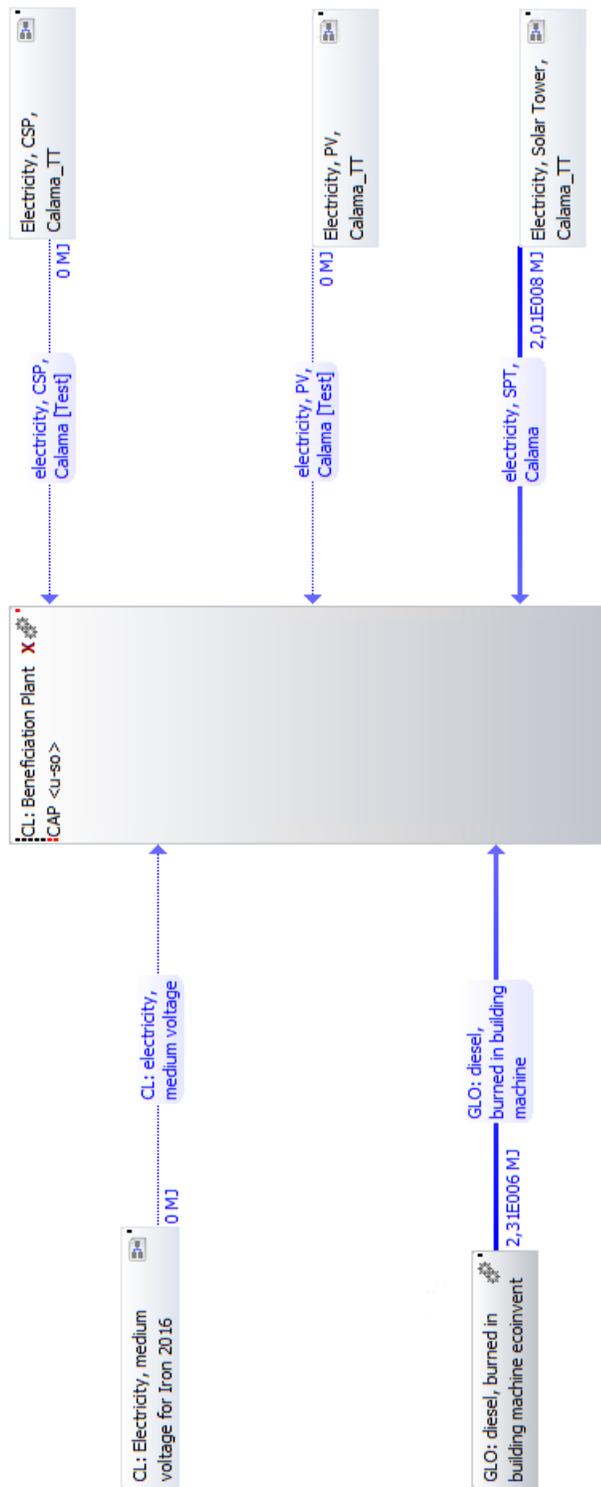


Figura A.3: Modelo planta de beneficio en software Gabi v.6