

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

Uso de silicato de hierro (escoria de cobre) como reemplazo de áridos en la construcción





AUTORES:

Danilo Granato

Felipe Pequeño

Nicolás Donoso

Pia Wiche

REVISIÓN:

Javier Obach

GRÁFICAS Y DIAGRAMACIÓN:

Krystel Contreras

Fecha: noviembre de 2023

Este informe fue producido en el marco del estudio *Análisis del impacto ambiental del uso de escoria de cobre en Chile en comparación con el uso de áridos naturales para la construcción de obras de infraestructura durante todo el ciclo de vida del producto*, solicitado por el Programa Territorio Circular, programa estratégico de CORFO y que impulsa SOFOFA Hub.

Territorio Circular, CORFO, Sofofa Hub ni EcoEd se responsabilizan sobre las declaraciones realizadas o decisiones tomadas en base a los resultados de este estudio.

Cómo citar este documento: Granato, Danilo; Pequeño, Felipe; Donoso, Nicolás; Wiche, Pia. Análisis de Ciclo de Vida: Uso de silicato de hierro (escoria de cobre) como reemplazo de áridos en la construcción, 2023.

EcoEd, Territorio Circular, Corfo y Sofofa Hub son marcas registradas y de propiedad de sus respectivos dueños.

Imágenes por Getty Images y Pexels.

INFORME DESARROLLADO POR



Resumen ejecutivo

Este es el último informe producido en el marco del proyecto *Análisis del impacto ambiental del uso de escoria de cobre en Chile en comparación con el uso de áridos naturales para la construcción de obras de infraestructura durante todo el ciclo de vida del producto*, solicitado por el Programa Territorio Circular, programa estratégico de CORFO y que impulsa SOFOFA Hub. El presente informe se basa en el estudio del estado del arte del uso de escoria de cobre en la construcción publicado anteriormente dentro del mismo proyecto (1).

En este estudio, se evalúan los impactos ambientales del reemplazo de áridos naturales por silicato de hierro (escoria de cobre) a través del análisis de ciclo de vida (ACV) para tres productos: 1 m³ de hormigón premezclado con resistencia de 30 MPa a los 28 días, una mezcla asfáltica para 100 m² de tratamiento superficial simple (TSS) y el núcleo de un terraplén con 1 metro de largo por 6 metros de ancho con 60 centímetros de espesor.

Para el análisis, se usan como referencia las normas ISO 21930 y EN 15804 y la regla de categoría de productos (RCP) PCR 2019:14 para productos de la construcción (2; 3; 4). Para el hormigón y la mezcla asfáltica, el límite del sistema considerado es desde la cuna hasta la obra (etapas A1-A4), excluyéndose las etapas de construcción, uso, mantención y fin de vida. Para el núcleo del terraplén se incluye también el diésel y la maquinaria para su construcción (etapas A1-A5).

Se evalúan 10 categorías de impacto en línea con los requisitos de la PCR 2019:14, que está enmarcada en la EN15804 + A2 (4): cambio climático, acidificación, eutrofización marina, de agua dulce y terrestre, agotamiento de la capa de ozono, creación de ozono fotoquímico, agotamiento de recursos fósiles y minerales y privación del agua.

Para cada producto (hormigón, mezcla para TSS y núcleo del terraplén) se analizan tres escenarios:

- **Línea Base:** uso de 100% áridos naturales y sin uso de silicato, el que se dispone en escorial.
- **Uso silicato (precio cero):** se asume un reemplazo de una porción de los áridos gruesos por silicato de hierro y que éste es un residuo recuperado sin valor económico que no “hereda” cargas ambientales de la producción de cobre (enfoque ISO 21930).
- **Uso silicato (precio árido natural):** se asume un reemplazo de una parte de los áridos gruesos por silicato de hierro y que éste tiene un valor comercial similar a los áridos naturales. Por lo tanto, el silicato es un subproducto del proceso del cobre y “hereda” una fracción (0,3%) de sus impactos ambientales (enfoque EN 15804).

Los resultados de impacto muestran que:

- El reemplazo de áridos naturales por silicato de hierro tiene una potencial reducción de impactos solamente si el silicato tiene un precio de cero.
 - Para el hormigón, las reducciones de impacto son pequeñas (entre 0-10%) para todas las categorías de impacto analizadas.
 - Para la mezcla asfáltica, el cambio en los impactos es mixto: algunos impactos se reducen y otros aumentan debido a la mayor cantidad de asfalto (ligante) en la mezcla con silicato. Sin embargo, las reducciones tienen una mayor magnitud (de 15-50%) que los aumentos (de 5-20%), por lo que también se estima que haya un potencial beneficio en usar silicato de hierro.
 - Para el terraplén, una categoría de impacto presenta una reducción marginal de 5% mientras que hay un gran potencial de reducción del impacto (de 50% a 89%) para todas las demás categorías.
- En general, agregar el chancado y el transporte del silicato tienen menos impacto que su disposición en los escoriales. Si a esto se suman los ahorros de la producción de los áridos naturales, evitar la intervención de cauces de ríos y liberar humedales de pasivos ambientales se observa un beneficio ambiental por el uso del silicato. Este beneficio está condicionado a tres elementos.
 - El precio del silicato. Para ambos productos (hormigón y mezcla asfáltica), si el silicato tiene el mismo precio de los áridos naturales, todos los impactos ambientales aumentan con respecto a usar áridos naturales, por considerar que el silicato hereda una fracción de los impactos de la producción del cobre.
 - Cambios de dosificaciones para lograr un desempeño mínimo. Este es el caso de la mezcla asfáltica que necesita más asfalto (ligante) si se usa silicato de hierro, lo que aumenta algunos impactos.
 - El transporte. En este estudio se considera que el silicato y los áridos son transportados la misma distancia. Si el silicato, que es más pesado, también debe recorrer una mayor distancia que los áridos naturales, entonces los impactos ambientales pueden ser superiores.
- Los impactos del hormigón y de la mezcla asfáltica son dominados por el cemento (60-90%) y el asfalto (30-80%) respectivamente. Reemplazar estos materiales podría reducir los impactos de una manera mucho más significativa.

Vale notar que la incertidumbre del estudio es alta, por lo que ninguna reducción ocurre con un 90% de confianza. Pero hay reducciones indicativas y se deben sumar los beneficios ambientales cualitativos de prevenir el daño a cauces de ríos y eliminar el pasivo ambiental acumulado de silicato de hierro para abrir espacios a los ecosistemas

locales. Por lo tanto, se concluye que sí, hay un beneficio ambiental por el uso de escoria en reemplazo de los áridos gruesos, solamente en el caso de su precio ser cero y este ser transportado distancias cortas.

Con base en estos resultados se recomienda:

- Reemplazar áridos naturales por silicato de hierro en el núcleo de terraplenes de caminos locales.
- Potenciar estudios de la aplicación del silicato de hierro en el reemplazo del cemento en hormigones.

Esto por el mayor potencial de reducción de impactos (5; 6) y por la cercanía entre los centros de disposición del silicato y los centros de producción de cemento y hormigón en Chile.

Sin embargo, para definir qué características debe tener el silicato, es vital tener más estudios de la aplicación del silicato de hierro en cementos con casos de uso bien determinados. Estos estudios ayudarían a determinar la factibilidad técnica para usos específicos y permitiría hacer un ACV comparativo para determinar la aplicación con el mayor potencial de reducción de impactos ambientales.

Los estudios de aplicación, como el del cemento recién mencionado, pueden llevar años para llegar a resultados interesantes de aplicación. Por lo tanto, es menester encontrar aplicaciones más inmediatas del silicato de hierro para aprovechar su potencial de reducción de impactos ambientales.

La construcción de núcleos de terraplenes de caminos locales es una de estas aplicaciones. Es un caso de estudio que ya fue estudiado con desempeño aceptable, tiene un gran potencial de reducción de los impactos ambientales (entre 50% a 90%) y va a potenciar la experiencia e innovación para encontrar formas de mejorar su desempeño para esta y otras aplicaciones del silicato.

Tabla de contenido

RESUMEN EJECUTIVO	I
TABLA DE CONTENIDO	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VI
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 SELECCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO	2
1.2 METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	3
2 DEFINICIÓN DE OBJETIVO Y ALCANCE	5
2.1 OBJETIVO.....	5
2.1.1 Audiencia.....	5
2.1.2 Comparabilidad con otros estudios.....	6
2.2 ALCANCE GENERAL.....	6
2.2.1 Etapas del ciclo de vida.....	6
2.2.2 Procedimientos de asignación.....	7
2.2.3 Fuentes de datos	8
2.2.4 Alcance temporal.....	8
2.2.5 Alcance geográfico	8
2.2.6 Criterio de corte.....	8
2.2.7 Supuestos generales	9
2.2.8 Exclusiones generales.....	9
2.3 ALCANCE HORMIGÓN PREMEZCLADO	10
2.3.1 Unidad declarada.....	10
2.3.2 Límites del sistema.....	10
2.3.3 Suposiciones.....	10
2.4 ALCANCE MEZCLA ASFÁLTICA.....	12
2.4.1 Unidad declarada.....	12
2.4.2 Límites del sistema.....	12
2.4.3 Suposiciones.....	12
2.5 ALCANCE NÚCLEO DEL TERRAPLÉN.....	14
2.5.1 Unidad declarada.....	14
2.5.2 Límites del sistema.....	14
2.5.3 Suposiciones.....	14
3 ANÁLISIS DE INVENTARIO DE CICLO DE VIDA.....	17
3.1 EXTRACCIÓN Y PROCESAMIENTO DE LOS ÁRIDOS NATURALES	17
3.1.1 Extracción de áridos naturales por cantera	17
3.1.2 Extracción de áridos naturales de ríos	19
3.1.3 Supuestos y exclusiones	19
3.2 PRODUCCIÓN, PROCESAMIENTO Y FIN DE VIDA DEL SILICATO DE HIERRO	21
3.2.1 Asignación de los impactos de la producción del silicato de hierro	24

3.2.2	Proceso de chancado del silicato de hierro	26
3.3	PRODUCCIÓN DEL HORMIGÓN PREMEZCLADO.....	26
3.3.1	Descripción del producto	26
3.3.2	Composición del hormigón	27
3.3.3	Datos de Inventario para la elaboración del hormigón	27
3.4	PRODUCCIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA PARA TRATAMIENTO SUPERFICIAL SIMPLE (TSS)	28
3.4.1	Descripción del producto	28
3.4.2	Composición	28
3.4.3	Datos de inventario para el tratamiento superficial asfáltico simple.....	29
3.5	CONSTRUCCIÓN DEL NÚCLEO DE UN TERRAPLÉN	29
3.5.1	Descripción del producto	29
3.5.2	Cantidad de áridos.....	30
3.5.3	Cantidad de diésel	31
3.5.4	Datos de inventario para núcleo de terraplén.....	32
3.6	TRANSPORTE.....	32
3.7	RESUMEN DE LA REGIONALIZACIÓN DE LOS DATASETS.....	33
4	ANÁLISIS DE IMPACTO DEL CICLO DE VIDA E INTERPRETACIÓN.....	35
4.1	DESCRIPCIÓN DE LOS IMPACTOS	35
4.1.1	Cómo interpretar los impactos	37
4.2	RESULTADOS DE IMPACTO PARA EL HORMIGÓN	37
4.2.1	Cambios relativos a la línea base.....	37
4.2.2	Análisis de impacto por materiales	38
4.2.3	Análisis de impactos por procesos	40
4.2.4	Magnitud de la cantidad potencial de silicato de hierro usado	41
4.3	RESULTADOS DE IMPACTO PARA LA MEZCLA ASFÁLTICA	42
4.3.1	Cambios relativos a la línea base.....	42
4.3.2	Análisis de impacto por procesos	43
4.4	RESULTADOS DE IMPACTO PARA EL NÚCLEO DEL TERRAPLÉN.....	45
4.4.1	Cambios relativos a la línea base.....	45
4.4.2	Análisis de impactos por procesos	46
4.4.3	Magnitud de la cantidad potencial de silicato de hierro usado	47
4.5	ANÁLISIS CUALITATIVO DE OTROS IMPACTOS	48
4.6	ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE	49
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
5.1	RESUMEN	51
5.2	RECOMENDACIONES.....	53
5.3	LIMITACIONES	55
	REFERENCIAS	57
	ANEXO A : RESULTADOS DE INCERTIDUMBRE	63
	ANEXO B : DESGLOSE DE LOS IMPACTOS POR PROCESOS	68

Índice de figuras

Figura 1: Etapas de un análisis de ciclo de vida (ACV)	3
Figura 2: Etapas del ciclo de vida de productos de la construcción de acuerdo con la norma ISO 21930.....	7
Figura 3: Diagramas de procesos para los distintos escenarios de producción de hormigón.....	11
Figura 4: Diagramas de procesos para los distintos escenarios de producción de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial simple.	13
Figura 5: Diagramas de procesos para los distintos escenarios de la construcción del núcleo del terraplén.....	15
Figura 6: Diagrama de procesos para la extracción de áridos gruesos desde canteras.	18
Figura 7: Diagrama de procesos de la extracción y procesamiento de áridos naturales gruesos desde ríos.	20
Figura 8: Diagrama de procesos de la producción y procesamiento del silicato de hierro.	22
Figura 9: Diagrama de las partes de un terraplén y el nivel de calidad de los materiales para cada una (47).....	30
Figura 10: Gráfico de impactos al cambio climático para 1m ³ de hormigón por material.	39
Figura 11: Impactos al Cambio Climático para 1m ³ de hormigón por proceso sin mostrar la producción y transporte del cemento y del hormigón.	40
Figura 12: Gráfico de impactos al cambio climático de una mezcla asfáltica para 100m ² de tratamiento superficial simple (TSS) por proceso.....	44
Figura 13: Gráfico de impactos al cambio climático de la construcción de un núcleo de terraplén de 1m de largo, 6m de ancho y 60cm de espesor.....	46

Índice de tablas

Tabla 1: Exclusiones del estudio y su justificación.....	9
Tabla 2: Supuestos y exclusiones para el inventario de áridos naturales.....	19
Tabla 3: Supuestos y exclusiones para el inventario del silicato de hierro.....	23
Tabla 4: Ajustes de los datos del silicato de hierro para el contexto del estudio.....	23
Tabla 5: Parámetros de cálculo para la asignación económica de los impactos de la producción del silicato de hierro.	25
Tabla 6: Comparación del aggregate crushing value entre silicato de hierro y áridos naturales (11).....	26
Tabla 7: Composición del hormigón para los escenarios analizados.....	27
Tabla 8: Composición de la mezcla asfáltica para TSS para los escenarios analizados.	28

Tabla 9: Cubicación de los materiales para el núcleo del terraplén.....	30
Tabla 10: Cálculo del consumo de diésel por m ³ para la construcción de un camino rural en Dinamarca (48).....	31
Tabla 11: Ajustes de los datos de áridos naturales para el contexto de Chile.....	33
Tabla 12: Categorías de impacto usadas en el estudio y su explicación.....	35
Tabla 13: Cambios relativos de impactos ambientales con respecto a la línea base para 1m ³ de hormigón.....	38
Tabla 14: Cambios relativos de impactos ambientales con respecto a la línea base para 100 m ² de tratamiento superficial asfáltico simple (TSS).....	42
Tabla 15: Cambios relativos de impactos ambientales con respecto a la línea base para la construcción de un núcleo de terraplén de 1m de largo, 6m de ancho y 60cm de espesor.....	45
Tabla 16: Valores reportados de impacto ambiental y rangos de incertidumbre para el análisis de ciclo de vida de 1 m ³ de hormigón, línea base.....	63
Tabla 17: Valores reportados de impacto ambiental y rangos de incertidumbre para el análisis de ciclo de vida de 1 m ³ de hormigón, silicato en uso – precio cero.....	63
Tabla 18: Valores reportados de impacto ambiental y rangos de incertidumbre para el análisis de ciclo de vida de 1 m ³ de hormigón, silicato en uso – precio árido natural.....	64
Tabla 19: Valores reportados de impacto ambiental y rangos de incertidumbre para el análisis de ciclo de vida de la mezcla asfáltica para 100 m ² de tratamiento superficial simple (TSS), línea base.....	64
Tabla 20: Valores reportados de impacto ambiental y rangos de incertidumbre para el análisis de ciclo de vida de la mezcla asfáltica para 100 m ² de tratamiento superficial simple (TSS), silicato en uso – precio cero.....	65
Tabla 21: Valores reportados de impacto ambiental y rangos de incertidumbre para el análisis de ciclo de vida de la mezcla asfáltica para 100 m ² de tratamiento superficial simple (TSS), silicato en uso – precio árido natural.....	65
Tabla 22: Valores reportados de impacto ambiental y rangos de incertidumbre para el análisis de ciclo de vida del núcleo del terraplén de 1 metro de largo, 6 metros de ancho y 60 centímetros de espesor, línea base.....	66
Tabla 23: Valores reportados de impacto ambiental y rangos de incertidumbre para el análisis de ciclo de vida del núcleo del terraplén de 1 metro de largo, 6 metros de ancho y 60 centímetros de espesor, silicato en uso – precio cero.....	66
Tabla 24: Valores reportados de impacto ambiental y rangos de incertidumbre para el análisis de ciclo de vida del núcleo del terraplén de 1 metro de largo, 6 metros de ancho y 60 centímetros de espesor, silicato en uso – precio árido natural.....	67
Tabla 25: Desglose de los impactos por procesos para 1 m ³ de hormigón.....	68
Tabla 26: Desglose de los impactos por procesos de una mezcla asfáltica para 100 m ² de tratamiento superficial simple (TSS).....	69
Tabla 27: Desglose de los impactos por procesos de un núcleo de terraplén con 1 metro de largo, 6 metros de ancho y 60 cm de espesor.....	69

Glosario de términos

Agregado: material granular de composición mineral como arena, grava, conchas, escoria o piedra triturada que se utiliza con un medio cementante para formar morteros u hormigón. O solo, como en capas de base, balasto de ferrocarril, etc. (7).

Árido: material pétreo compuesto de partículas duras, de forma y tamaño estables.

Árido natural: árido procedente de yacimientos pétreos naturales como pozos, canteras o ríos (8).

Análisis de ciclo de vida (ACV): es una recopilación y evaluación de las entradas, salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema de producto a lo largo de su ciclo de vida (9).

Análisis de inventario del ciclo de vida: fase de evaluación del ciclo de vida que implica la recopilación y cuantificación de entradas y salidas de un producto a lo largo de su ciclo de vida (9).

Cemento Portland: Cemento hidráulico producido pulverizando clinker, compuesto esencialmente por silicatos cálcicos hidráulicos cristalinos, y que suele contener uno o más de los siguientes elementos: agua, sulfato cálcico, hasta un 5% de piedra caliza y aditivos de proceso (10).

Ciclo de vida: son las etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema de producto, desde la adquisición o generación de materias primas a partir de recursos minerales hasta la disposición final (9).

Categoría de impacto: es la clase que representa los problemas ambientales de interés, a los que se pueden asignar los resultados del análisis del inventario del ciclo de vida (9).

Escoria de cobre: es un subproducto resultante de la producción de cobre (11). Asimismo, es un residuo industrial del proceso pirometalúrgico aplicado a los concentrados de minerales de cobre que ingresan a la fundición, el cual es acopiado y depositado en vertederos autorizados. Se compone principalmente de óxidos de: hierro, silicio, aluminio y calcio. Existen distintos tipos de escoria dependiendo de su grado de silicatos o tipo de enfriamiento (12).

Escoria siderúrgica: producto no metálico constituido esencialmente por silicatos cálcicos y ferritas combinados con óxidos fundidos de hierro, aluminio, manganeso, calcio y magnesio, que se desarrolla simultáneamente con el acero en hornos básicos de oxígeno, eléctricos o de solera abierta (7). Su utilización como árido fino en la producción de hormigón reporta varios beneficios medioambientales, como el reciclado de residuos, y evita los problemas de eliminación (13).

Hormigón: material que resulta de la mezcla de agua, arena, grava, cemento, eventualmente aditivos y adiciones, en proporciones adecuadas que, al fraguar y endurecer, adquiere resistencia (14).

Límite del sistema: conjunto de criterios que especifican qué procesos unitarios forman parte de un sistema de productos (9).

Residuos no peligrosos: Residuos comerciales / industriales que no son peligrosos: polvo, escombros u otros residuos procedentes de la extracción de materias primas; residuos en plan de eliminación municipal, y escorias residuales o sobrantes (15).

Tratamiento superficial asfáltico simple (TSS): Un tratamiento superficial asfáltico consiste en una o más aplicaciones alternadas de ligante asfáltico y agregado pétreo sobre una base granular. Simple se refiere a que es solamente una aplicación (16).

Unidad funcional: Rendimiento cuantificado de un sistema de producto para su uso como unidad de referencia (9).



Introducción

1 Introducción

La industria de la construcción demanda altas cantidades de áridos. Se necesita un 1,35 m³ de árido por m³ de hormigón y 10,5 m³ de áridos por m³ de mezcla asfáltica (17). Estos áridos son rocas y arenas extraídas de cauces, lechos de ríos, pozos y canteras, lo que tiene el potencial de generar un gran impacto ambiental: afectan la biodiversidad local, cambian la sedimentación de cursos de agua y generan material particulado y gases producto del uso de maquinaria. Este impacto se amplifica en el caso de la extracción informal de áridos, que en Chile se estima esté en torno al 60% de los áridos comercializados anualmente (18).

En paralelo, la industria minera genera alrededor de 4,5 millones de toneladas de silicato de hierro (escoria de cobre¹) por año. Estas se suman a los 70 millones de toneladas ya acumuladas en la historia minera del país, conformando un gran pasivo ambiental (19).

El silicato de hierro tiene características fisicoquímicas que permiten su utilización en la construcción, por ejemplo, en el reemplazo de áridos o de cemento en mezclas de hormigón. El uso de escorias en construcción es una práctica habitual en Norteamérica, Europa, Singapur (20) y otros países del mundo, con una mayor diseminación de las escorias provenientes de la producción de hierro o acero.

Por ende, existe la oportunidad de potenciar la economía circular usando el silicato de hierro proveniente de fundiciones de cobre como reemplazo de áridos naturales en la construcción. Esto tiene el potencial de reducir los impactos ambientales generados por la extracción de áridos y también los pasivos ambientales por la acumulación de este material en los vertederos, mientras se impulsa una construcción más circular en el país.

Sin embargo, ¿será este cambio realmente positivo? Este reporte presenta la metodología y resultados del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con el objetivo de evaluar el desempeño ambiental del uso del silicato de hierro proveniente de la fundición de cobre en Chile, en comparación con el uso de áridos naturales para la construcción. Esto permite tener una mirada sistémica en todos los procesos de la cadena productiva y estimar en cuánto disminuye (o aumenta) el impacto ambiental de la solución circular.

En el capítulo 1, se explica la selección de los casos de uso y la metodología del ACV. Las secciones siguientes presentan el objetivo y alcance del estudio (capítulo 2), el análisis de inventario de ciclo de vida (capítulo 3), los resultados e interpretación de los impactos (capítulo 4) y las conclusiones, limitaciones y recomendaciones (capítulo 5).

¹ En este informe se entenderán como sinónimos de silicato de hierro: escoria de cobre, escoria de fundición de cobre, escoria simplemente o también *copper slag* en su traducción en inglés, a no ser que se exprese en el texto lo contrario.

1.1 Selección de los casos de estudio

El silicato de hierro tiene muchas potenciales aplicaciones en la industria de la construcción, como se ha discutido en el estudio del Estado del Arte (1), reportado anteriormente al Programa Territorio Circular como parte de los informes de este proyecto.

Para este estudio, se evalúan los impactos ambientales para el silicato de hierro usado como agregado grueso en hormigón, en mezclas para tratamientos superficiales asfálticos y núcleos de terraplenes. Los criterios utilizados para esta decisión son:

- Que el silicato de hierro cumpla con la normativa de construcción,
- Que tenga un desempeño que haga posible su uso,
- Que haya información suficiente para la toma de decisiones.

El silicato de hierro puede ser usado para producir cemento con potenciales reducciones del impacto ambiental (5). Sin embargo, sus propiedades varían significativamente dependiendo de la cantidad de silicato de hierro, procesamiento y otros aditivos (21). Esto amplifica la incertidumbre de las propiedades de mortero u hormigones producidos con cementos modificados. Por lo tanto, se descarta el caso para este estudio debido a la alta incertidumbre de los usos de un cemento producido con silicato de hierro.

Por otro lado, ya se han realizado pruebas de hormigón con cemento Portland tradicional y silicato de hierro como agregado para fabricación de bloques o barreras Jersey (22). Por esto, se considera más factible la implementación de estos productos modificados y se analiza el uso de silicato de hierro en la fabricación de hormigones.

Respecto a los recubrimientos asfálticos simples, se ha estudiado su producción con silicato de hierro que presentan propiedades aceptables para el uso en caminos (12), lo que hace otro caso de estudio útil para ser evaluado.

Sobre el uso de silicato de hierro para núcleos de terraplenes, estudios preliminares muestran propiedades aceptables de terraplenes con núcleo de silicato de hierro para caminos locales² (23). Es posible que, con un tratamiento adecuado del silicato, las propiedades de terraplenes puedan ser aun mejores. Además, esta aplicación tiene el potencial de ser masiva, por lo que es estudiada.

Por lo tanto, los casos analizados serán la fabricación de hormigón premezclado, la producción de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial simple (TSS) y la construcción de núcleos de terraplenes para caminos locales.

² De acuerdo con el Manual de carreteras un camino local es “provincial o comunal que se conecta a los Caminos Colectores. Están destinados a dar servicio preferentemente a la propiedad adyacente” (16)

1.2 Metodología del Análisis de Ciclo de Vida

Un análisis de ciclo de vida (ACV) es un método para evaluar los impactos ambientales potenciales de un producto o servicio durante todo su ciclo de vida. Es decir, considera toda su “historia”, desde la obtención de sus materias primas hasta la disposición final. Este tipo de análisis permite comparar diferentes productos de una manera justa e identificar dónde hay oportunidades de mejora en el ciclo de vida de los productos.

Un ACV es normado por las ISO 14040 e ISO 14044 y se divide en cuatro fases:



Figura 1: Etapas de un análisis de ciclo de vida (ACV)

1. **Definición del objetivo y alcance:** el objetivo define los motivos por los que se hace el estudio, cómo serán usados los resultados y a quién va dirigido el informe. El alcance consiste en los elementos que se incluyen en el estudio (sistema de producto) y cuáles son los criterios de calidad para los datos utilizados.
2. **Análisis de inventario de ciclo de vida:** se identifican y contabilizan el consumo de recursos (entradas) y las emisiones al aire, suelo, agua y de residuos (salidas) del sistema.
3. **Evaluación de impactos:** aquí se transforman las entradas y salidas en información sobre impactos ambientales usando modelos científicos.
4. **Interpretación:** en esta etapa se interpretan los resultados de las fases anteriores para obtener conclusiones, identificar limitaciones y ofrecer recomendaciones que apoyen la toma de decisiones.

A continuación, se explican las decisiones metodológicas generales mientras que cada caso de estudio discute las decisiones específicas para cada caso.



Definición de objetivo y alcance

2 Definición de objetivo y alcance

En este documento se presentan los análisis de ciclo de vida comparando la elaboración de tres productos usando áridos naturales o silicato de hierro (escoria de cobre).

Los productos analizados separadamente son: la fabricación de hormigón, la preparación de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial simple (TSS) y la construcción de núcleos de terraplenes. A continuación, se detalla la metodología utilizada para cada uno de ellos.

Para diferenciar las consideraciones de cada caso de estudio, los alcances, inventarios y resultados identificarán el producto pertinente en el nombre de la sección.

2.1 Objetivo

El objetivo del presente ACV es evaluar el desempeño ambiental del uso de silicato de hierro (escoria de cobre) proveniente de la fundición de cobre en Chile, en comparación con el uso de áridos naturales para la producción de:

- Hormigón premezclado,
- La mezcla para un tratamiento superficial asfáltico simple (TSS),
- Núcleos de terraplenes para caminos locales.

Las aplicaciones de este estudio son:

- Comparar los impactos ambientales del uso de silicato de hierro (escoria de cobre) como reemplazo de áridos naturales en los casos de estudio.
- Decidir sobre los potenciales usos del silicato de hierro en la construcción.

Este estudio **no cuenta con revisión crítica**, por lo que **no puede ser usado en comunicaciones comerciales** a clientes, prospectos o consumidores en general para aseverar de que un producto tiene menor impacto ambiental que otro.

2.1.1 Audiencia

El informe está escrito para audiencias interesadas en los temas de silicato de hierro, áridos naturales y economía circular, incluyendo:

- Mineras
- Empresas constructoras
- Académicos y estudiantes
- Órganos públicos como el MOP, SOFOFA, etc.

Estas audiencias no necesariamente conocen el análisis de ciclo de vida. Por este motivo se mantiene en lo posible un lenguaje claro y simple, manteniendo los términos específicos del área, de forma que la audiencia pueda comprender más fácilmente los resultados del estudio.

2.1.2 Comparabilidad con otros estudios

El estudio está hecho con base en las normas ISO 21930 y EN 15804 y en la Regla de Categoría de Producto *PCR 2019:14* (EPD System) para facilitar comparaciones con otros estudios que siguen las mismas reglas. En línea con lo anterior, se recomienda tomar en cuenta las suposiciones, exclusiones y limitaciones para lograr consistencia en las comparaciones con otros estudios.

Se debe tener una alta precaución al comparar resultados de este estudio con otros, ya que este estudio **no está verificado**. Por lo mismo, **no puede ser usado en comunicaciones comerciales** a clientes, prospectos o consumidores en general para aseverar de que un producto tiene menor impacto ambiental que otro, especialmente aseveraciones que contengan comparaciones.

2.2 Alcance general

En esta sección se detallan aspectos del alcance del Análisis de Ciclo de Vida que aplican para el análisis de hormigón, la mezcla del TSS y el núcleo de terraplén.

2.2.1 Etapas del ciclo de vida

De acuerdo con la norma ISO 21930 (2), el ciclo de vida de los productos de la construcción se divide en cuatro módulos del ciclo de vida subdivididas en diversas etapas. Las etapas abarcan A) la producción de materiales y la construcción, B) la operación, uso y mantenimiento, C) el fin de vida y D) la recuperación de los materiales, como se muestra en la Figura 2.

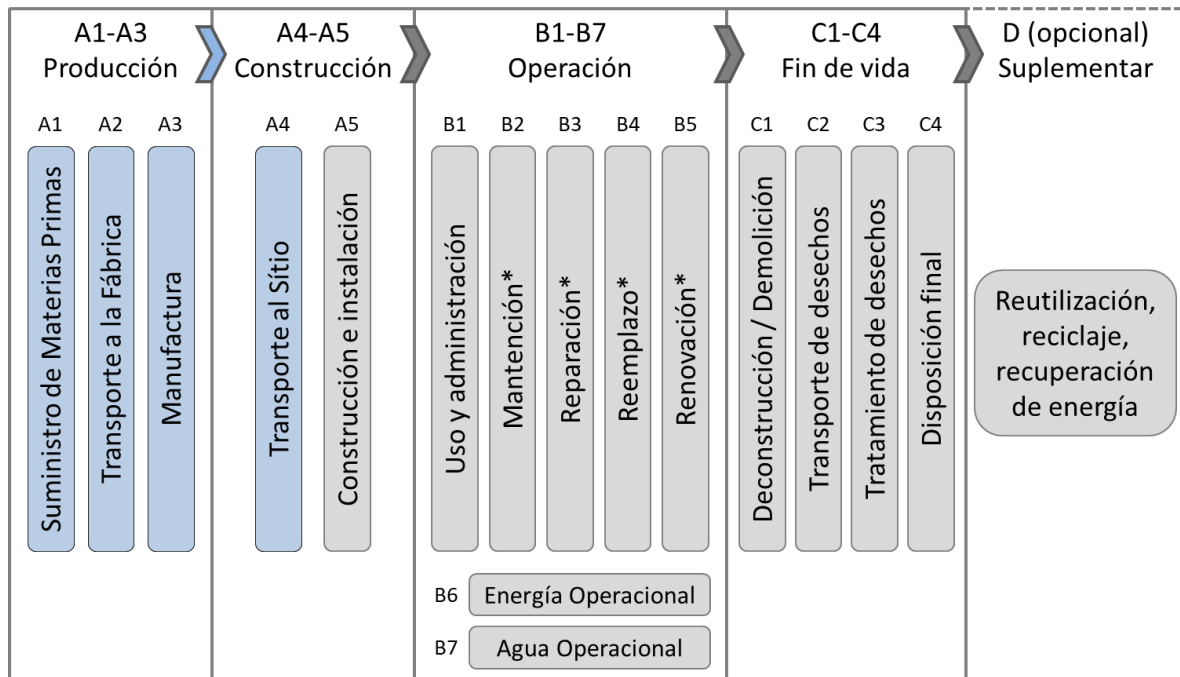
Para los casos analizados, se considerarán principalmente las etapas de producción de materiales y el transporte al sitio de construcción (A1-A4). Esto porque los cambios más significativos entre las alternativas ocurren en estas etapas. Se excluyen el análisis de las etapas (A5-C4) que no presentan cambios conocidos. La excepción es el caso de terraplenes que incluye el diésel de las maquinarias usadas en la etapa de construcción (A5) como explicado en la sección 3.5.

Las etapas de extracción y suministro de materias primas (A1) consiste en la extracción del árido natural o la obtención de la escoria de cobre, que son distintas.

La etapa de manufactura (A3) consiste en el procesamiento de estos materiales para su uso adecuado, como lavado, selección y chancado. Estos pueden presentar diferencias por la granulometría inicial del insumo como también la mayor dificultad en chancar el silicato de hierro por su gran dureza (24).

Por fin, el transporte (etapas A2 y A4) es relevante porque los áridos naturales y el silicato de hierro se originan de sitios diferentes, lo que cambia las distancias de transporte. Además, el silicato de hierro es más denso que los áridos naturales, por lo que se transporta más peso para un mismo volumen de material.

Figura 2: Etapas del ciclo de vida de productos de la construcción de acuerdo con la norma ISO 21930.



* incluyendo producción, transporte y desecho de los materiales necesarios.

Etapas incluidas en este estudio

Etapas excluidas de este estudio

2.2.2 Procedimientos de asignación

La asignación es el proceso a través del cual se reparte el impacto ambiental de las actividades entre los diferentes productos y co-productos del sistema analizado. La asignación de cargas ambientales puede ser realizada de tres maneras distintas: física, económica o causal (9).

Tanto para el hormigón como para el tratamiento superficial asfáltico (TSS) y el terraplén no se realizan asignaciones porque se considera que estos productos no tienen subproductos. La única asignación que se realiza es de los impactos de la producción de cobre al silicato de hierro, que es explicada en la sección 3.2.1 (página 24).

2.2.3 Fuentes de datos

Este estudio no utiliza datos primarios.³ Todos los datos utilizados son secundarios.⁴ Estos incluyen la extracción de materia prima, el transporte al sitio de manufactura, la fabricación, la producción de energía, combustibles utilizados, emisiones de proceso, construcción de infraestructura, entre otros.

Las proporciones de materiales para el hormigón y el TSS son obtenidas de estudios que analizaron el desempeño de los productos con áridos naturales y silicato de hierro (12; 25).

Los datos de actividad para la producción de cada insumo son obtenidos de la base de datos ecoinvent 3.9.1 (26). Cada inventario de datos fue modificado para que se aproxime a la realidad nacional dependiendo del origen de éstos. Las modificaciones son discutidas en la sección 3.

2.2.4 Alcance temporal

Se hizo un esfuerzo para considerar los datos más recientes posibles. Para los inventarios de datos de ecoinvent se abarcan datos con una antigüedad máxima de 6 años (publicados hasta 2017). Para las referencias bibliográficas sobre el uso de escoria de cobre y áridos, se considera una antigüedad máxima de 22 años (publicados hasta 2001).

2.2.5 Alcance geográfico

Los límites del sistema abarcan materiales y procesos hechos y utilizados en Chile. Para tal, se modificaron las entradas de datos de inventario de otros países para acercarse al contexto nacional (detalles en la sección 3). Sin embargo, las actividades indirectas, como la extracción de petróleo o de la cal, tienen alcance global.

2.2.6 Criterio de corte

Se realizó el esfuerzo por incluir la mayor cantidad de información en el estudio con el fin de representar de la mejor forma posible la realidad modelada, por lo que se estima que los elementos que han quedado marginados corresponden a menos de 1% de los impactos del ciclo de vida en los límites establecidos en este estudio.

³ *Dato primario: es el valor cuantificado de un proceso o una actividad obtenido a partir de una medición directa o de un cálculo basado en mediciones directas (ISO 14064-1:2018).*

⁴ *Datos secundarios: son datos obtenidos de fuentes diferentes a los datos primarios (ISO 14 064-1:2018) por ejemplo, bases de datos. En general, aportan mayor incertidumbre que los datos primarios.*

2.2.7 Supuestos generales

Se considera el reemplazo de áridos gruesos (gravas y gravillas) por el silicato de hierro. Los áridos finos (arena) usados en los productos analizados se consideran provenientes de fuentes naturales.

Se considera que las etapas de construcción, operación y fin de vida de las obras generadas a partir del hormigón y el tratamiento superficial asfáltico (desde A5 a C4) son similares entre las alternativas con áridos naturales y con silicato de hierro. Este supuesto se debe a que no se tiene más información respecto a diferencias en el uso, mantenimiento, reparaciones y fin de vida de materiales hechos con áridos naturales comparados con silicato de hierro.

Por otro lado, como el núcleo del terraplén es un elemento constructivo por sí solo, se incluyó el consumo de diésel por la maquinaria durante su fase de construcción (A5). El uso de diésel se supone similar para el caso de árido natural y silicato de hierro.

Se considera que se gasta más energía y hay mayor desgaste de las piezas para el chancado del silicato de hierro. Más detalles en la sección 3.2.2.

Se estima que el hormigón y la mezcla para el TSS son fabricados en planta para luego dirigirse al sitio de construcción.

Se asume que los áridos naturales y el silicato de hierro son transportados por 25 km, hasta las fábricas de hormigón y de TSS y el local de construcción del terraplén, sin diferencia de distancia entre ambos insumos (etapa A2) (27). Se asume que los demás insumos son transportados por 100 km hasta los sitios de producción. Se hace esta diferencia porque, típicamente, los sitios de producción de áridos son cercanos a los lugares de uso (17).

Se asume que el transporte del hormigón y de la mezcla para el TSS terminados son transportados por 100 km desde la fábrica hasta el sitio de construcción (etapa A4).

Se considera que todos los transportes son realizados por camiones de 16 a 32 toneladas usando norma Euro V (28). Más información se encuentra en la sección 3.5.

2.2.8 Exclusiones generales

Se excluyen elementos del estudio considerados fuera de los límites del sistema y aquellos que no poseen datos primarios o secundarios para su modelación.

Tabla 1: Exclusiones del estudio y su justificación.

Elemento excluido	Justificación
Etapas A5, B1-B7 y C1-C4 del ciclo de vida	Se consideran similares entre ambas opciones. No se tiene información precisa sobre las diferencias entre sus usos, instalación, mantenimiento, reparaciones, reposiciones y fin de vida del ciclo de vida.

2.3 Alcance hormigón premezclado

2.3.1 Unidad declarada

La unidad declarada es de 1 m³ de hormigón premezclado con resistencia de 30 MPa a los 28 días.

2.3.2 Límites del sistema

Este estudio se enfoca en comparar los potenciales impactos ambientales de la producción de hormigón con dos mezclas distintas. La primera utiliza áridos naturales, mientras que en la segunda se reemplazan los áridos gruesos por silicato de hierro.

Para el primer caso, las materias primas incluyen: agua, cemento (caliza, arcilla, yeso), áridos finos (arena) y áridos gruesos (grava). El segundo caso son las mismas materias primas, pero reemplazando 50% del volumen de áridos gruesos por silicato de hierro.

Para el silicato de hierro, se analizarán dos casos en que se consideran o no los impactos de su producción (ver sección 3.2.1) como ilustrado en la Figura 3. En ambos casos se consideran los procesos de chancado y transporte del silicato de hierro.

Para el caso que se usan áridos naturales, se amplía el límite del sistema para incluir el fin de vida del silicato de hierro, puesto que no está siendo usado. En este caso, no se incluyen los impactos por su producción (ver Figura 3).

Los límites del sistema son de cuna al sitio de construcción (A1-A4), comenzando desde la extracción u obtención de materias primas, el transporte a la fábrica, la manufactura, y el transporte al sitio de construcción. El uso y disposición del cemento no fueron incluidas.

2.3.3 Suposiciones

Además de las suposiciones explicadas en la sección 2.2.7, se hacen las siguientes suposiciones específicas para el hormigón:

- Proceso de fabricación de hormigón: se asume similar entre ambas alternativas estudiadas. En ambos casos se consideran hormigones sin aditivos ni adiciones.

Escenarios Hormigón

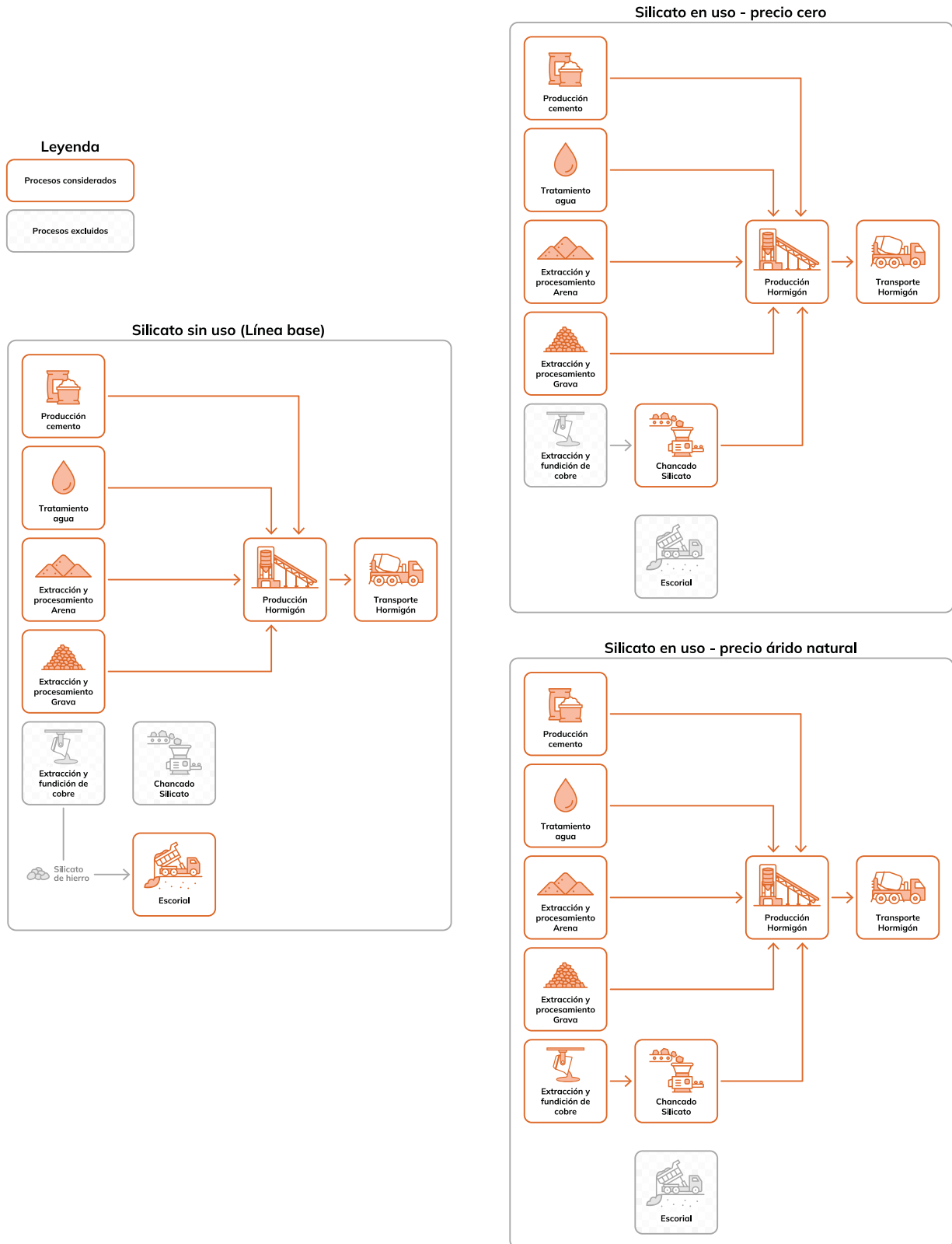


Figura 3: Diagramas de procesos para los distintos escenarios de producción de hormigón.

2.4 Alcance mezcla asfáltica

2.4.1 Unidad declarada

La unidad declarada es la producción de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial simple (TSS) para cubrir 100 m² de un camino.

2.4.2 Límites del sistema

El estudio considera solamente la producción de los insumos (A1), el transporte de los insumos hasta la fábrica de TSS (A2), el proceso de mezclado de los insumos (A3) y el transporte del TSS hasta el sitio de construcción (A4).

Las etapas de construcción (A5), uso y mantenimiento (B1-B7) y el fin de vida (C1-C4) se consideran iguales para materiales usando árido natural y silicato de hierro, por lo que no hacen diferencia en la comparación y no se incluyen en el alcance del estudio.

Esta suposición puede ser incorrecta particularmente por el uso de maquinaria en las etapas de construcción (A5) y por el desgaste de los materiales que afectan sus reparaciones (B4). Sin embargo, para determinar estas diferencias se necesitan datos de caminos reales los cuáles no tenemos disponibles para el caso de caminos con silicato de hierro.

El estudio solamente considera la capa superficial asfáltica. No considera los impactos de los movimientos de tierra ni de la base, subbase y otros elementos del camino (berma, pinturas, señales de tránsito, iluminación, etc.). Estas actividades también se suponen iguales para ambos escenarios.

Los escenarios analizados consideran la producción del ligante (emulsión asfáltica), la extracción y procesamiento de los áridos naturales y el procesamiento (chancado) del silicato de hierro. La producción de silicato se considera o excluye dependiendo del escenario de asignación (precio del silicato). El fin de vida del silicato de hierro es considerado en la línea base. Los límites de cada escenario están ilustrados en la Figura 4.

2.4.3 Suposiciones

Además de las suposiciones explicadas en la sección 2.2.7, se hacen las siguientes suposiciones específicas para la mezcla de TSS:

- Producción: Se estima que la mezcla para el tratamiento superficial será fabricada en planta para luego dirigirse al sitio de construcción.

Escenarios TSS

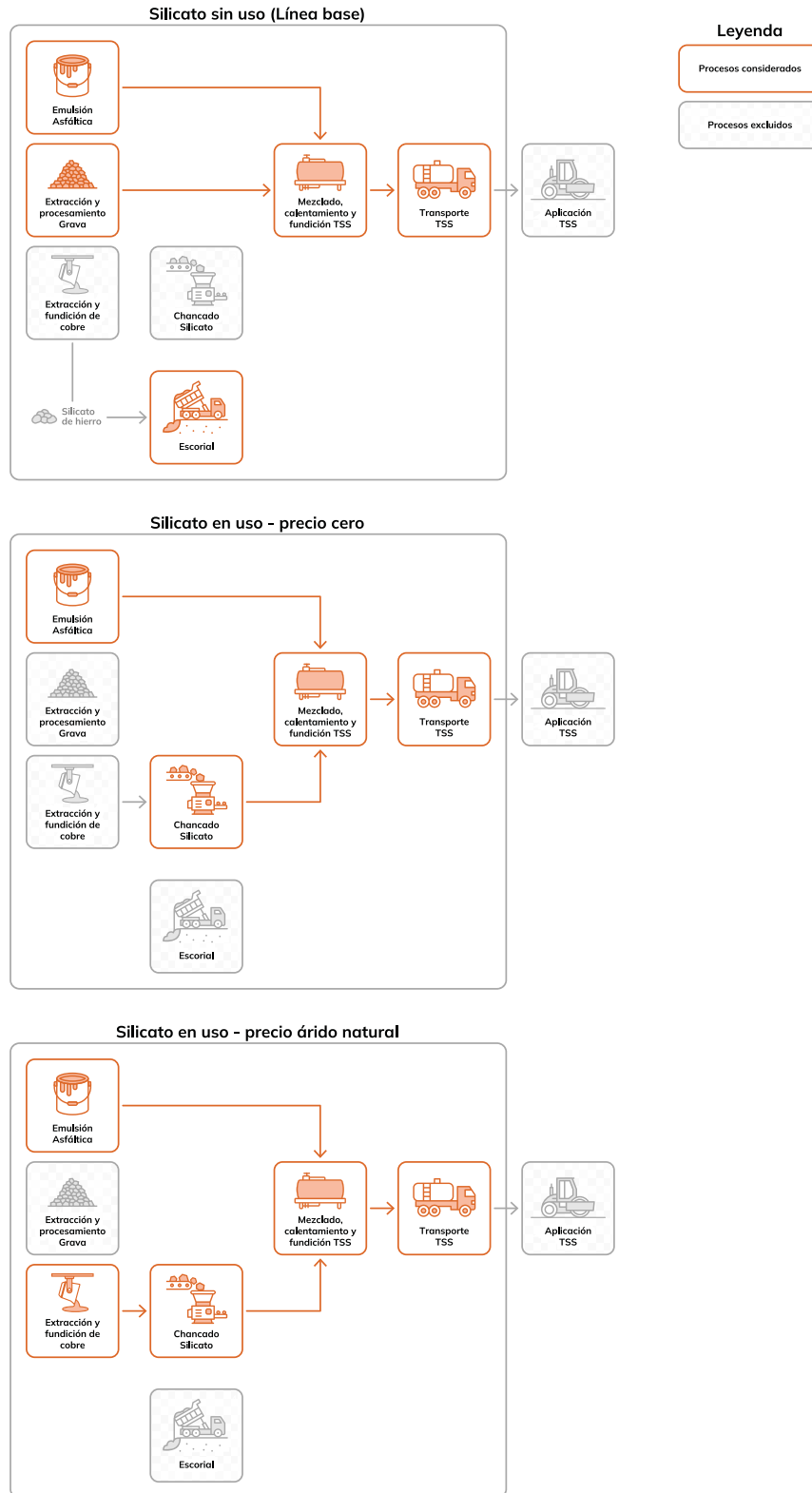


Figura 4: Diagramas de procesos para los distintos escenarios de producción de la mezcla asfáltica para un tratamiento superficial simple.

2.5 Alcance núcleo del terraplén

2.5.1 Unidad declarada

La unidad declarada es la construcción del núcleo de terraplén con 1 metro de largo, 6 metros de ancho y 60 centímetros de espesor.

2.5.2 Límites del sistema

El estudio considera solamente la producción de los insumos (A1), el proceso de mezclado y chancado de los insumos (A3), su transporte hasta el sitio de construcción (A4) y el diésel de la maquinaria usada en la construcción del terraplén (A5 parcial).

Se considera que la etapa A2 está asociada a la etapa A1 o A3 ya que típicamente el procesamiento de los áridos es realizado o en el local de producción o en el de construcción. Por lo tanto, solo se considera una etapa de transporte de insumos (A3).

Se incluye el consumo de diésel de las maquinarias de construcción en la etapa A5 porque podría tener una magnitud relevante se comparado con los materiales. Se excluyen el transporte del diésel, la construcción y la mantención de las maquinarias y el uso de agua o de áridos adicionales para manejar la humedad del núcleo.

Las etapas de uso y mantención (B1-B7) y el fin de vida (C1-C4) se consideran iguales para materiales usando árido natural y silicato de hierro, por lo que no hacen diferencia en la comparación y se excluyen del alcance del estudio.

Esta suposición puede ser incorrecta particularmente por la potencial diferencia de durabilidad al largo plazo del terraplén construido con distintos materiales, lo que afectaría la frecuencia y magnitud de reparaciones (B3). Sin embargo, para determinar estas diferencias se necesitan datos de caminos reales los cuáles no tenemos disponibles para el caso de terraplenes con silicato de hierro.

El análisis solamente considera el núcleo del terraplén. No considera el tratamiento previo del terreno para la fundación tampoco las capas superiores de coronación, base y sello asfáltico. Estas actividades también se suponen iguales para ambos escenarios.

Los escenarios analizados consideran la extracción y procesamiento de los áridos naturales, el procesamiento (chancado) del silicato de hierro y su transporte hasta el sitio de construcción. La producción de silicato se considera o excluye dependiendo del escenario de asignación (precio del silicato). El fin de vida del silicato de hierro es considerado en la línea base. Los límites de cada escenario se muestran en la Figura 4.

2.5.3 Suposiciones

Además de las suposiciones explicadas en la sección 2.2.7, se hacen suposiciones respecto al uso de materiales y diésel explicados en la sección 3.5.

Escenarios Núcleo del Terraplén

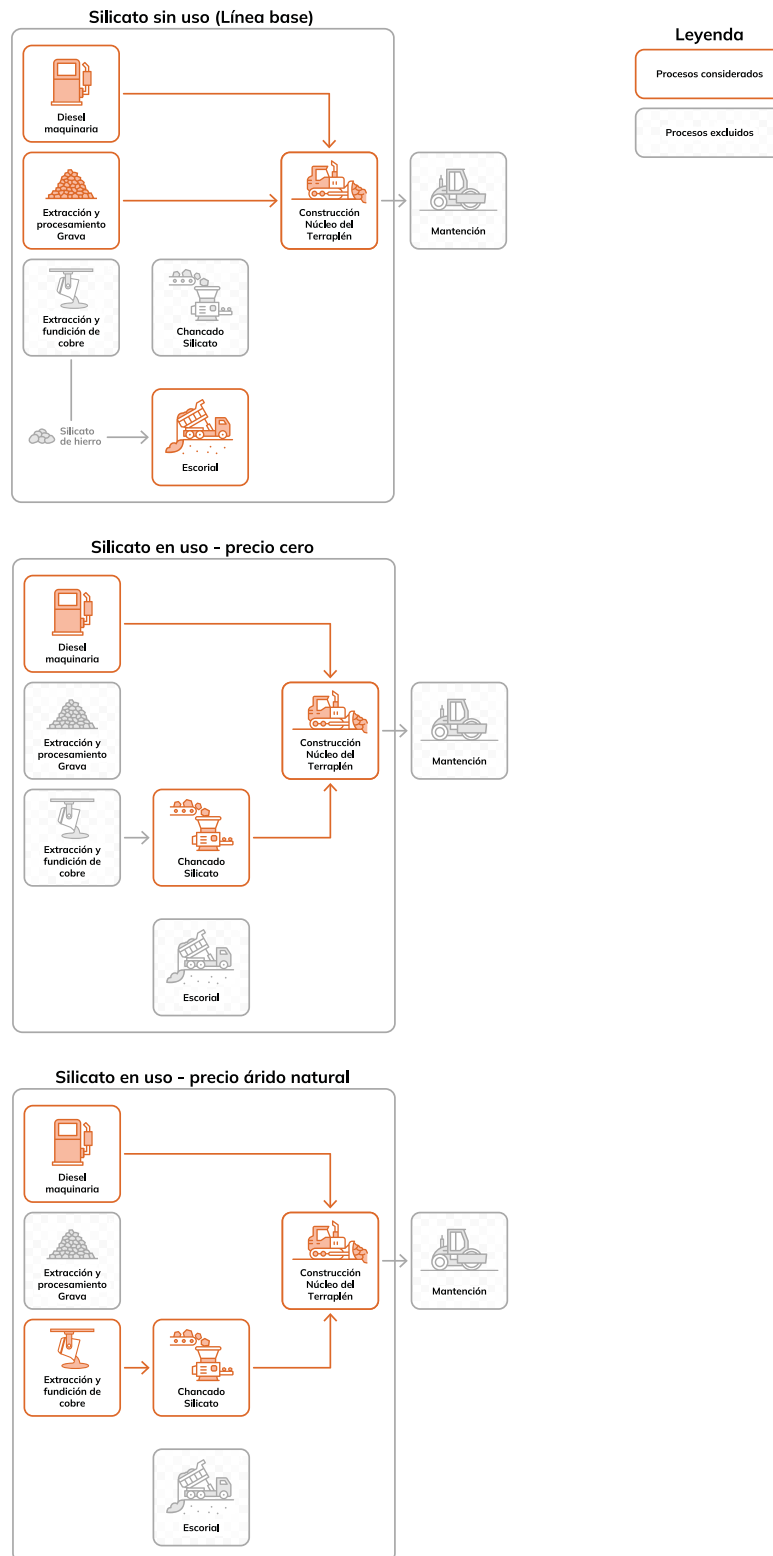


Figura 5: Diagramas de procesos para los distintos escenarios de la construcción del núcleo del terraplén.



Análisis de Inventario de ciclo de vida

3 Análisis de Inventario de ciclo de vida

3.1 Extracción y procesamiento de los áridos naturales

Los áridos naturales son definidos como: “material pétreo, inerte con relación aglomerante, que se emplea en la confección de morteros y hormigones y que se clasifica en arenas y gravas. Esto puede ser las arcillas superficiales y las arenas, ripios, gravas, rocas y demás materiales áridos aplicables directamente a la construcción” (29).

Para los casos seleccionados para este estudio, se enfocará el reemplazo de los áridos gruesos, como grava y gravilla. Los áridos finos (arena) serán considerados siempre provenientes de fuentes naturales.

En Chile, un 70% de los áridos gruesos son extraídos desde cantera y los otros 30% desde ríos (17). Por esto, el proceso de extracción y procesamiento de áridos naturales (A1) es un promedio ponderado de ambos métodos de extracción usando los porcentajes mencionados. Los áridos finos se consideraron 100% extraídos desde ríos.

A continuación, se explican los modelos para cada método de extracción de áridos naturales.

3.1.1 Extracción de áridos naturales por cantera

Los datos de inventario para los áridos gruesos son obtenidos de la extracción y producción de áridos por cantera en Brasil publicados enecoinvent 3.9.1 (30).

La extracción de los áridos gruesos por cantera es hecha por explosivos y maquinaria a diésel. Los bloques de piedra son llevados a la planta de chancado por camiones. El chancado y selección es realizado por una serie de chancadoras y tamices vibratorios conectados por cintas transportadoras. Toda la maquinaria para el procesamiento es eléctrica. No incluye lavado. A pesar de que tamaños más pequeños requieren más energía, no es posible hacer la distinción por falta de datos detallados. El proceso termina con el acopio y el cargamento de los camiones para entrega, pero no la entrega en sí.

Los impactos incluyen el cambio de uso de la tierra, pero no la remoción de la capa superficial de materia orgánica. También se incluyen los impactos de la construcción de la infraestructura. Los impactos de la administración y fin de vida de la cantera no son considerados. El diagrama de procesos se muestra en la Figura 6.

Se modifica el dataset para representar el uso de la matriz eléctrica chilena de 2022 (31) y el uso de agua de río en lugar de agua de lluvia.

Extracción y procesamiento de áridos naturales de Cantera (A1)

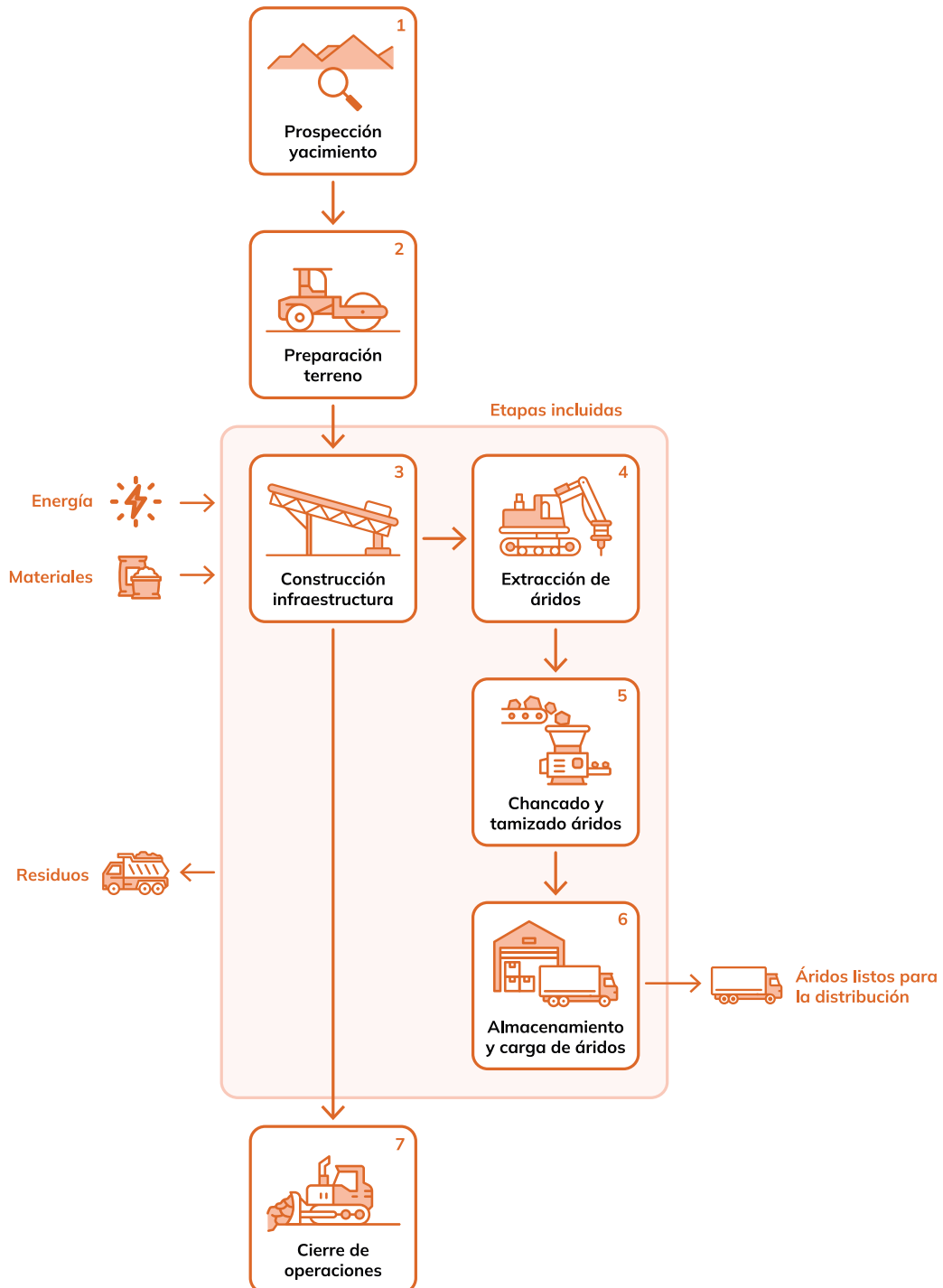


Figura 6: Diagrama de procesos para la extracción de áridos gruesos desde canteras.

3.1.2 Extracción de áridos naturales de ríos

En el caso de los áridos gruesos obtenidos de ríos, no se cuenta con una entrada de datos disponible de esta fuente de extracción. Por ello, se supone que la extracción de áridos gruesos de río es igual a la de áridos finos.

A la extracción de áridos gruesos, se suma un proceso de chancado, que no está considerado en el dataset de extracción de áridos finos. El diagrama de procesos es mostrado en la Figura 7.

El inventario de la arena se obtiene de la extracción de lechos de río en Brasil, publicado porecoinvent 3.9.1 (32). El inventario contiene desde la extracción de la arena, el transporte al punto de procesamiento, la limpieza del árido y el mantenimiento de equipos.

Para el proceso de chancado, se utiliza un inventario de datos que representa el servicio para los procesos que incluyen la maquinaria, repuestos, desgastes y aceite lubricante, pero no así el consumo eléctrico (33). La cantidad de energía utilizada fue supuesta la misma que para el proceso de chancado por cantera (30). Por ello, se agrega una entrada de datos de inventario de electricidad equivalente a la electricidad utilizada para la extracción de áridos gruesos en cantera, adaptado con una fuente de energía de la Matriz Chilena Eléctrica para el año 2022.

Para la extracción y procesamiento de los áridos finos, se usó el mismo dataset de extracción de arena para Brasil (19), modificando la matriz energética. No se agregó el chancado (solamente proceso en naranja en la Figura 7).

3.1.3 Supuestos y exclusiones

Para modelar los áridos naturales se hicieron algunos supuestos y exclusiones que se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2: Supuestos y exclusiones para el inventario de áridos naturales.

Supuesto/Exclusión	Justificación
Supuesto: se usa la misma cantidad de energía para chancar diferentes tamaños de áridos.	Faltan datos detallados para discriminar uso de recursos por tamaño del árido.
Exclusión: prospección del yacimiento y remoción de la capa superficial de materia orgánica.	Los datos fueron obtenidos de minas en operación, por lo que no tenían esta información.
Exclusión: impactos de la administración.	No se incluye por el estándar.
Exclusión: fin de vida de la mina.	No hay un plan de restauración normalizado, por lo que varía de faena a faena.

Extracción y procesamiento de áridos naturales de Ríos (A1)

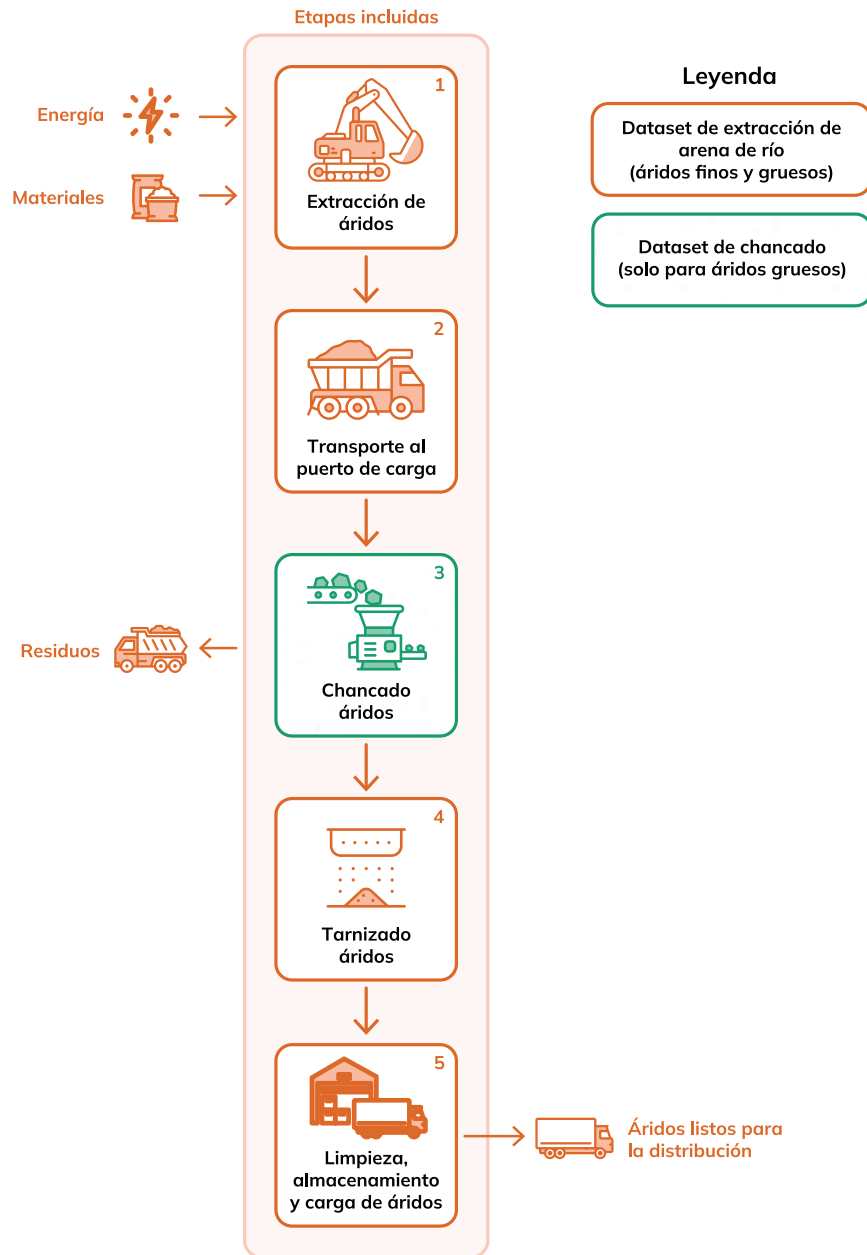


Figura 7: Diagrama de procesos de la extracción y procesamiento de áridos naturales gruesos desde ríos.

3.2 Producción, procesamiento y fin de vida del silicato de hierro

El silicato de hierro (escoria de cobre) es un residuo del proceso de la fundición del cobre donde el producto principal es el ánodo de cobre. Los ánodos son refinados para obtenerse el cátodo que es comercializado en el mercado internacional.

Por ende, el sistema de proceso del silicato de hierro incluye la extracción del cobre, la fundición en ánodos de cobre y el fin de vida del silicato.

Según los estándares internacionales utilizados para la realización de este ACV, hay dos alternativas para la consideración de los impactos ambientales de la etapa de producción. Una alternativa es considerar que el silicato de hierro es un residuo recuperado (ISO 21930) que no trae impactos ambientales de la producción de cobre. El segundo caso es considerar que el silicato es un subproducto del sistema (que tiene valor económico), en cuyo caso se agrega una fracción de impacto de la producción de cobre (EN 15804). En este estudio, se analizan ambos escenarios descritos en más detalle en la sección 3.2.1.

La línea base considera solamente los impactos del fin de vida del silicato de hierro, en que, actualmente, el material es acopiado en un escorial autorizado.

En los escenarios que el silicato de hierro es usado como árido, no se considera su fin de vida y se agrega una fase de chancado para llegar a la granulometría correspondiente a su uso (detalles en la sección 3.2.2) además del transporte hasta el sitio en donde será usado. Los procesos para los distintos escenarios se ilustran en la Figura 8.

El inventario para la fase de extracción del cobre es obtenido de la operación de mina para Chile en ecoinvent 3.9.1 (34). Esto incluye desde la construcción de la mina, la excavación del sitio, la instalación de la infraestructura, el beneficiado del cobre y deconstrucción de la mina. Estos incluyen la entrada de los materiales y energía necesarios y la salida de los residuos generados con sus respectivos tratamientos.

El inventario para la fase de fundición del cobre es obtenido del dataset asociado de ecoinvent 3.9.1 (35). El inventario abarca la fundición desde la recepción del concentrado de cobre hasta la producción del ánodo. Esto incluye la generación del silicato de hierro (escoria de cobre) y su tratamiento de fin de vida.

Ambos inventarios son actualizados con informaciones de mercado de 2020 para Chile. Por lo tanto, ya debería reflejar la realidad nacional. Solo se hacen dos cambios en los inventarios: la actualización de la matriz energética chilena para reflejar el mix de 2022 (31) y la remoción del fin de vida del silicato de hierro en los escenarios correspondientes.

Extracción y procesamiento del silicato de hierro (A1)

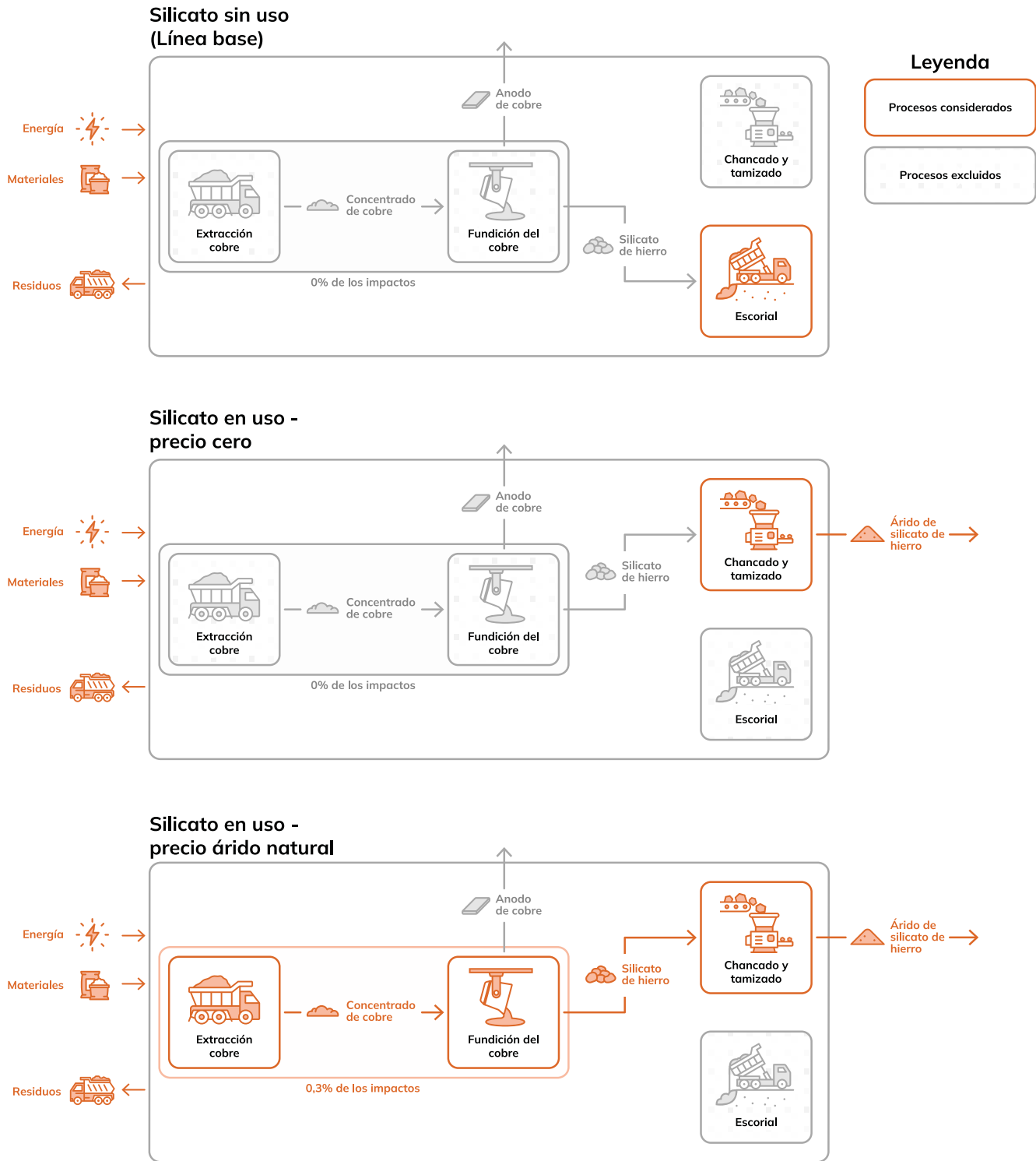


Figura 8: Diagrama de procesos de la producción y procesamiento del silicato de hierro.

El inventario para la etapa del fin de vida del silicato de hierro es obtenido del dataset asociado en ecoinvent 3.9.1 (36), que considera la construcción del escorial, las emisiones de corto plazo, lixiviación en cursos de agua del silicato de hierro y rehabilitación del sitio después de cerrado.

El proceso de chancado usa el mismo dataset que para el proceso de chancado de áridos naturales explicado en la sección 3.1.2 (página 17). Para simular una mayor dificultad en el chancado del silicato por su mayor dureza, se multiplica este impacto por un factor explicado en la sección 3.2.2, más adelante.

Las suposiciones, exclusiones y modificaciones en el dataset mencionadas en el texto son resumidas en las Tabla 3 y Tabla 4.

Tabla 3: Supuestos y exclusiones para el inventario del silicato de hierro.

Supuesto/Exclusión	Justificación
Supuesto: los distintos tamaños de chancado utilizan la misma cantidad de energía.	Faltan datos detallados para discriminar usos de recursos por tamaño del árido.
Exclusión: prospección del yacimiento y remoción de la capa superficial de materia orgánica.	Los datos fueron obtenidos de minas en operación, por lo que no tenían esta información.
Exclusión: impactos de la administración.	No se incluye por el estándar.
Exclusión: fin de vida de la mina.	No hay un plan de restauración normalizado, por lo que varía de faena para faena.

Tabla 4: Ajustes de los datos del silicato de hierro para el contexto del estudio.

Dataset	Elemento modificado	Cambio realizado
Extracción de cobre y fundición de ánodos	Matriz eléctrica de Chile para 2019.	Matriz eléctrica de Chile para 2022 (31).
Fundición de ánodos	Fin de vida del silicato de hierro.	*Se elimina solo para escenarios en que el silicato de hierro es usado como escoria.

3.2.1 Asignación de los impactos de la producción del silicato de hierro

Un proceso puede producir más de un producto. En este caso, se usa un procedimiento de asignación para distribuir los impactos ambientales de este proceso a todos sus coproductos y subproductos.

Por lo tanto, al usar el silicato de hierro (escoria de cobre) como materia prima se debiese considerar los potenciales impactos por su producción (es decir, los impactos ambientales de la extracción y fundición del cobre). El impacto de la producción de silicato de hierro puede ser determinado de dos formas distintas.

- A. Norma ISO 21930: Considerarlo como un residuo (o un producto con precio cero) y no asignarle cargas ambientales por su producción o
- B. Norma EN 15804: Considerarlo como un subproducto y asignarle cargas ambientales proporcional a su valor monetario.

Actualmente, el silicato de hierro es clasificado como residuo por la legislación ambiental. Además, los productores de cobre no ven un valor monetario en el silicato de hierro, por lo que no cobrarían por su uso. Esto equivale a considerarlo un subproducto con un precio cero y, por lo tanto, no considerar cargas ambientales por su producción.

Por otro lado, si el silicato de hierro se ocupa masivamente como materia prima, este puede tener un valor comercial en el futuro, y esto debería ser reflejado en su impacto ambiental.

Por lo tanto, este estudio considera ambos escenarios: el silicato de hierro como residuo o como subproducto haciendo la asignación económica. Estos escenarios están ilustrados en la Figura 8.

Hacer una asignación másica no tiene sentido porque todo el proceso de producción del cobre es realizado para producir cobre, que tiene un valor económico muy superior al silicato de hierro.

Se recuerda al lector de que este estudio no ha tenido revisión crítica, por lo que los resultados son meramente indicativos y no deben ser usados para comunicar ventajas ambientales de un producto por sobre otro.

Para calcular la asignación económica, se toma el precio promedio del cobre en los últimos 5 años y el valor de mercado típico de áridos naturales vendidos en Chile.

El valor promedio del cobre fue calculado usando los valores mensuales de la Bolsa de Metales de Londres desde enero de 2018 hasta diciembre de 2022, inclusive (37). Esto resulta en US\$3,09 por libra de cobre a dólares fijos de 2012. El valor diario promedio del dólar a pesos chilenos en 2012 fue de 486,75 pesos chilenos por dólar (38) lo que resulta un valor de CL\$1.504 por libra de cobre.

En conversaciones con vendedores de áridos de la región central, se identificó un valor de CL\$21.000 por metro cúbico de gravilla 3/4" puesto en obra (con flete). Se supone el mismo valor para el silicato de hierro si fuera usado en reemplazo de árido. Este es un escenario de “peor caso” porque no se espera que el silicato pueda ser vendido a un precio de mercado mayor al de los áridos naturales si es usado para el mismo fin.

Se nota que estas suposiciones sobreestiman el valor del silicato de hierro en comparación al valor del cobre por los siguientes motivos:

- Los valores del cobre son para un dólar de 2012, mientras que el valor de los áridos es para 2023.
- El valor de los áridos considera el flete, pero se considera en este estudio como el valor del silicato de hierro sin el flete.

Por otro lado, el valor del cobre está sobreestimado porque es para el cobre refinado. En el momento que el silicato de hierro es producido, el cobre aún necesita más procesos para llegar al nivel de ser vendido al mercado y, por lo tanto, el producto intermedio tiene un valor menor, muy difícil de determinar.

Sin embargo, se considera que estas suposiciones representan una correcta orden de magnitud para la asignación de los impactos.

El inventario de datos de ecoinvent considera que la producción de 1 kg de cobre genera 1,2 kg de silicato de hierro (35). Sin embargo, para este estudio se considera que la producción de 1 kg de cobre genera 2,2 kg de silicato de hierro siendo el criterio más conservador basado en los datos referenciales (39; 40; 41). Se considera una densidad aparente suelta⁵ del silicato de 2.088 kg/m³ (25).

Con esta información, se calcula la asignación como resumido en la Tabla 5. Por lo tanto, en el escenario que el silicato tiene el mismo precio de los áridos naturales, la producción de 1 kg de silicato “hereda” un 0,3% de los impactos de la producción de 1 kg de cobre.

Tabla 5: Parámetros de cálculo para la asignación económica de los impactos de la producción del silicato de hierro.

Parámetro	Unidad	Cobre	Silicato de Hierro
Valor por kilo	CLP/kg	\$3,316	\$10
Cantidad Producida	kg	1.0	2.2
Valor producido	CLP	\$3,316	\$22
% del valor producido	%	99.34%	0.66%
Asignación para 1 kg de silicato	%	--	0.30%

⁵ La densidad aparente suelta es la densidad que ocupan los áridos considerando los vacíos que estos generan al ser cargados en un camión. Esta es la densidad comúnmente usada para el transporte de áridos.

3.2.2 Proceso de chancado del silicato de hierro

El silicato de hierro es más duro que los áridos naturales, por lo que el primero será más difícil de chancar (11). Una forma de tener un valor respecto a la resistencia de un árido para ser chancado o triturado bajo la aplicación gradual de una carga es el “*aggregate crushing value*”. En la Tabla 6 se comparan estos valores para la escoria de cobre y áridos de caliza y granito (11).

Tabla 6: Comparación del *aggregate crushing value* entre silicato de hierro y áridos naturales (11).

	Piedra Caliza	Granito	Promedio Áridos	Silicato de Hierro	Factor de cambio (promedio áridos / silicato)
Mínimo	19,0	23,0	21,0	10,0	2,10
Promedio	24,0	26,0	25,0	20,3	1,23
Máximo	31,0	30,0	30,5	26,4	1,16

Entre mayor sea el valor de esta propiedad más fácil es triturar o chancar el material, por lo que se aprecia que el silicato de hierro es más difícil de triturar en comparación a los dos áridos naturales citados (tiene un menor valor). Para simular esta mayor dificultad de manera conservadora, los impactos del chancado del silicato de hierro son obtenidos multiplicando los impactos del chancado de áridos (sección 0) por el mayor factor de la Tabla 6.

Por lo tanto, esto representa que el chancado del silicato de hierro tiene un gasto de energía y desgaste de piezas 2,1 veces mayor que el chancado de áridos naturales.

3.3 Producción del hormigón premezclado

3.3.1 Descripción del producto

Este estudio presenta el análisis de ciclo de vida (ACV) para la fabricación de hormigón producido con silicato de hierro en reemplazo de áridos naturales.

La unidad declarada para este ACV es 1 m³ de hormigón con una resistencia a la compresión de 30 MPa a los 28 días, que es lo más comúnmente usado en Chile (25).

El hormigón es compuesto por cemento, agua, grava y arena. Se analizarán dos casos: utilizando grava de origen natural y reemplazada en 50% de volumen por silicato de hierro. Fue elegido este porcentaje porque mostró los mejores resultados de resistencia a la compresión en ensayos: una resistencia 50% mayor a los 28 días y 35% mayor a los 56 días que un hormigón de áridos naturales (25). No se cambia la cantidad de arena.

Ya se han usado hormigones con árido de silicato para fabricar elementos constructivos livianos tales como barreras jersey, muros, baldosas, entre otros (22; 42).

3.3.2 Composición del hormigón

La composición de los hormigones se basa en un estudio comparativo de hormigones de áridos naturales y de silicato (25). Para alcanzar la resistencia requerida según la norma chilena, se debe usar 422 kg/m³ de cemento. La razón agua/cemento es de 0,45 y la proporción de áridos es 36% arena y 64% grava en volumen. Se analizan dos casos:

- Línea base: un 100% de la grava es de origen natural.
- Uso de silicato: un 50% del volumen de la grava es de origen natural y el restante es árido de silicato.

Con estos datos, la dosificación de cada compuesto es dada en la Tabla 7.

Tabla 7: Composición del hormigón para los escenarios analizados.

Material	Línea Base	Uso de silicato de hierro	Unidad
Cemento	422	422	kg/m ³
Agua	190	190	kg/m ³
Árido fino (arena)	606	606	kg/m ³
Árido grueso (grava)	1.113	557	kg/m ³
Silicato de Hierro	0	750	kg/m ³

3.3.3 Datos de Inventario para la elaboración del hormigón

Los datos de inventario de ciclo de vida para el cemento son obtenidos de la producción de cemento Portland, publicado porecoinvent (43). Esto contiene la infraestructura, la producción de Clinker, el consumo eléctrico y reactivos de proceso. Se adecua la base de datos modificando la matriz eléctrica con los datos del Sistema Eléctrico Nacional del 2022 (31).

Para la obtención de agua, se usa el inventario de datos para la producción de un kilo de agua potable bajo presión, lista para su distribución en la red. El inventario representa el funcionamiento promedio del tratamiento convencional para agua, que incluye coagulación y decantación, filtración y desinfección, ajustes de pH y alcalinidad, y la energía usada para el bombeo del agua para la distribución (44).

Los inventarios de los áridos naturales y el silicato de hierro son discutidos en las secciones 3.1 y 3.2

Para la elaboración del hormigón, se consideran los inventarios de los cuatro insumos mencionados anteriormente, con la variación del uso de áridos naturales o silicato de hierro. El diagrama de procesos para los distintos escenarios de la fabricación del hormigón se muestra en la Figura 3 (página 11).

3.4 Producción de la mezcla asfáltica para tratamiento superficial simple (TSS)

3.4.1 Descripción del producto

El tratamiento asfáltico es la aplicación de uno o más riegos de un ligante asfáltico sobre superficies de calzada. Un tratamiento superficial simple (TSS) corresponde a cuando se realiza un solo riego, principalmente en caminos de tránsito medio a bajo, por lo que de acuerdo con el Manual de Carreteras Vol. 3 (16) se puede adoptar para caminos provinciales⁶ o con tránsito menores de 2 pistas las cuales pueden tener un ancho entre 3,0 y 3,5 metros dependiendo del diseño y categoría adoptado. El TSS está compuesto principalmente por dos materiales, el ligante (emulsión asfáltica) y el agregado (12).

Un tratamiento superficial asfáltico aplicado en un camino realiza dos funciones. Primero el asfalto liga las partículas de agregado y proporciona un sello a prueba de agua. Segundo, el agregado resiste la abrasión del tráfico, transmite la carga de las ruedas y proporciona resistencia al deslizamiento. Finalmente, entrega una capa de protección a la base granular o pavimento de que está compuesto el camino. El tratamiento superficial no aporta capacidad estructural al pavimento.

Este estudio presenta el análisis de ciclo de vida (ACV) del reemplazo de 100% de los áridos naturales por silicato de hierro en la producción del material para un TSS.

Para este estudio, solo se considera el ciclo de vida de la cuna a la puerta de la producción de la mezcla para el tratamiento superficial, excluyendo todas las etapas anteriores de construcción del camino y la aplicación uso y fin de vida del TSS.

3.4.2 Composición

Las dosificaciones para la mezcla del TSS fueron obtenidas en base al estudio (12) y se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: Composición de la mezcla asfáltica para TSS para los escenarios analizados.

Componente	Línea Base	Uso de silicato de hierro	Unidad
Ligante (emulsión asfáltica)	1.02	1.14	kg/m ²
Árido grueso (grava)	10.73	0	kg/m ²
Silicato de Hierro	0	16.63	kg/m ²
Mezcla lista (total)	11.75	17.77	kg/m²

⁶ Camino provinciales o comunales que se conectan a los Caminos Colectores. Están destinados a dar servicio preferentemente a la propiedad adyacente. Velocidades de proyecto consideradas pueden ser: 70, 60, 50 y 40 km/h.

3.4.3 Datos de inventario para el tratamiento superficial asfáltico simple

Los datos para la emulsión asfáltica (material ligante) se obtienen del dataset deecoinvent 3.9.1 para la producción de compuestos adhesivos bituminosos en caliente con aplicación de protección en carreteras (45). Este dataset incluye la producción de la emulsión, el calentamiento de la mezcla, la infraestructura, el transporte y la disposición de los residuos.

Los inventarios de los áridos naturales y el silicato de hierro son discutidos en las secciones 3.1 y 3.2.

Adicionalmente se considera el mezclado de los insumos para producir la mezcla del TSS. Estos datos se obtienen de la producción de asfalto mástico de econivent 3.9.1 (46) que describe el proceso para generar el asfalto considerando la energía de proceso, combustibles y maquinaria. De este dataset se retiran los insumos de cal, brea y arena, para sumar los insumos considerados en este estudio.

Se realizó el cambio de la fuente de matriz energética para la geografía chilena mediante los datos del SEN del año 2022 (31).

3.5 Construcción del núcleo de un terraplén

3.5.1 Descripción del producto

El terraplén es la base en la cual se asienta el camino. Este es conformado por distintas partes como se muestra en la Figura 9; se describen a continuación:

- **Cimiento:** la capa en contacto con el suelo de apoyo.
- **Espaldón:** la capa lateral que aporta un apoyo adicional manteniendo la compactación del núcleo terraplén.
- **Núcleo:** es el “cuerpo” del terraplén que brinda la resistencia estructural a la base del camino.
- **Coronación:** la capa en contacto con la base del camino.

Este análisis se enfoca en la construcción del núcleo del terraplén usando silicato de hierro en reemplazo de áridos naturales.

Solamente se usan áridos en la construcción de un terraplén. Sin embargo, se necesita verterlos en el camino, extender el material y compactarlo, por lo que el uso de diésel de las maquinarias puede tener un impacto relevante en comparación con los materiales. Por este motivo se incluye el uso de diésel de la maquinaria para su construcción.

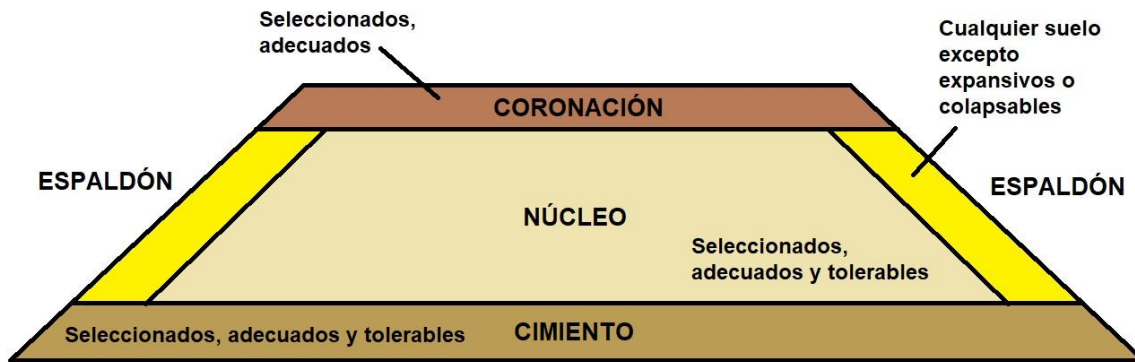


Figura 9: Diagrama de las partes de un terraplén y el nivel de calidad de los materiales para cada una (47).

3.5.2 Cantidad de áridos

La cantidad de materiales fue definida en base al informe final de un convenio entre el MOP, Autopista Los Andes y Anglo American para evaluar la factibilidad técnica en usar silicato de hierro para construir terraplenes (23).

El estudio mencionado construyó cuatro canchas de prueba de 150 m cada una cambiando el material y algunas características del núcleo del terraplén. Se ocupan las dimensiones para la cancha de referencia, construida con áridos naturales, y la cancha con 100% silicato de hierro sin confinamiento. Esta última fue la que tuvo mejores resultados en el ensayo de perfilometría (mide el ahuellamiento del camino).

En este informe, se consideran que las pistas tienen una longitud de 1 m para que los resultados sean fácilmente escalables. El cálculo de los materiales usados se encuentra en la Tabla 9.

Tabla 9: Cubicación de los materiales para el núcleo del terraplén.

	Línea base (cancha 4)	Uso de silicato (cancha 3)	Unidad
Largo	1	1	metros
Ancho	6	6	metros
Espesor	0,6	0,6	metros
Volumen	3,6	3,6	m ³
% árido natural	100%	0%	%
% escoria	0%	100%	%
Densidad (23)	2.750	3.232	kg/m ³
Masa del material	9.900	11.635	kg

3.5.3 Cantidad de diésel

El informe técnico sobre la construcción de terraplenes con escoria de cobre no reportaba información para estimar el uso de combustible durante la construcción del núcleo. Sin embargo, el diésel usado por la maquinaria es un factor importante de los impactos de un camino (48), por lo que se estima este valor desde otras fuentes.

Un estudio sobre la construcción de un camino secundario en Dinamarca reporta el consumo total de diésel de la maquinaria durante la fase de construcción del camino (se excluye el diésel usado para la preparación del terreno) (48). Utilizando las medidas del camino que fue analizado, se obtiene una proporción del consumo de litros de diésel por m³ de camino. Se supone el mismo uso de diésel para todos los escenarios.

Tabla 10: Cálculo del consumo de diésel por m³ para la construcción de un camino rural en Dinamarca (48).

Medida	Cantidad	Unidad
Largo	1.000	m
Ancho	17,2	m
Espesor	0,7	m
Volumen	12.040	m³
Diésel usado	20.800	litros
Consumo por m³	1,73	l/m³

Aplicando el consumo calculado a las dimensiones del camino del presente estudio (Tabla 9), se obtiene el valor de 6,2 litros por metro de camino.

Para evaluar si esta estimación de uso de diésel es razonable, se compara con los valores usados porecoinvent 3.9.1 para la construcción de caminos (49).

La base de datos deecoinvent maneja el consumo de combustible por MJ. Para la conversión, se usa para el diésel un poder calorífico inferior de 42.8 MJ/kg (50) y una densidad de 0,84 kg/l a 15°C (51).

El dataset de construcción de camino deecoinvent estima el uso de 0,10 litros de diésel por metro-año de camino. El mismo dataset estima una vida de 40 años para la fundación de un camino lo que resulta en un valor de 4,0 litros de diésel por metro.

Por lo tanto, ambos valores son de la misma orden de magnitud por lo que hay una mayor confianza en que pueda ser representativo. En este informe se usa el mayor valor (6,2 litros/metro) en línea con el principio de suposición conservadora.

Este valor es una sobreestimación, ya que el consumo de diésel considera la construcción de todo el camino mientras estamos interesados solamente en la construcción del terraplén. Sin embargo, es una estimación razonable y es mejor tener alguna estimación que no tener ninguna.

3.5.4 Datos de inventario para núcleo de terraplén

Se usan los datos de áridos naturales gruesos y del silicato de hierro como se discute en las secciones 3.1 y 3.2.

A pesar de que el silicato de hierro no fue chancado para construir las pistas de prueba, se considera una etapa de chancado como explicado en la sección 3.2.2. Esto asegura que los resultados sean válidos para los casos en que se requiera chancar el silicato para uso en terraplenes en aplicaciones futuras.

Para el diésel, se consideró el *dataset* de combustión de diésel en maquinaria de construcción (50). Se modificaron la entrada y la salida de lubricantes para reflejar una geografía de países fuera de la Europa. Es decir, se removieron las entradas y salidas de lubricantes con geografía de Suiza y Europa y se agregaron los mismos valores con geografía de “resto del mundo”.

3.6 Transporte

El transporte se modela para el transporte de los insumos hasta la fábrica de hormigón o de la mezcla asfáltica (etapa A2) y de los productos terminados hasta el sitio de construcción (etapa A4).

Típicamente, los áridos naturales son producidos cerca de los sitios de uso (17), por lo que se asume que recorren 25 km. Se asume que el silicato de hierro recorre la misma distancia. Porque el silicato es más denso que los áridos naturales (11; 12; 25), asumir distancias iguales ayuda a identificar el aumento de impacto solamente debido al aumento del peso transportado. Una diferencia entre estas distancias en una aplicación real podría cambiar el impacto relativo del silicato en comparación con los áridos (6).

Para los demás insumos (cemento y emulsión asfáltica) y para los productos (hormigón y mezcla para el TSS) se asumen que son transportados 100 km.

El silicato de hierro es un material más denso que los áridos naturales, lo que implica que para un mismo volumen de áridos el silicato pesará más y por lo tanto su transporte tendrá más impacto.

Se asume que el transporte se realiza vía terrestre en camiones de carga de capacidad entre 16 y 32 toneladas, de norma Euro V.⁷

La distancia y peso transportado se calcula multiplicando los kilómetros recorridos (km) por el peso transportado (en toneladas, t). A esta unidad se le conoce como “toneladas-kilómetro” o tkm.

⁷ La norma más actual para vehículos de transporte de carga en Santiago es la Euro V para vehículos pesados (71), existiendo un anteproyecto aprobado para la implementación de la norma Euro VI (70).

Para la estimación de los impactos del transporte en camión, se utiliza un inventario de datos de ciclo de vida publicado por ecoinvent (52). El inventario incluye todo el ciclo de vida del transporte, es decir, a la construcción, operación, mantenimiento, final de vida de los vehículos, las infraestructuras viales, el consumo de combustible y las emisiones.

3.7 Resumen de la regionalización de los datasets

Para aproximar el modelo al contexto de Chile, se ajustan los datasets utilizados como se resume en la Tabla 11.

Principalmente, se ajustan el consumo eléctrico de las entradas de datos de ecoinvent 3.9.1 a la matriz eléctrica chilena⁸ del año 2022. Como control de calidad, se comparó la huella de carbono de la matriz eléctrica nacional modelada con la huella de carbono declarada por la Comisión Nacional de Energía, habiendo una diferencia menor al 1% (31).

Tabla 11: Ajustes de los datos de áridos naturales para el contexto de Chile.

Dataset	Elemento modificado	Cambio realizado
Producción de áridos gruesos en cantera	Agua captada de lluvia.	Agua captada de lluvia por fuente de ríos.
	Fuente energética del consumo eléctrico.	Matriz eléctrica de Brasil por Matriz eléctrica de Chile para 2022 (31) .
Extracción de áridos finos de río Producción de cemento Mezclado TSS Chancado de áridos	Fuente energética del consumo eléctrico.	Se cambia la matriz eléctrica original por la por la matriz eléctrica de Chile para 2022 (31).

⁸ Las fuentes de la matriz energética chilena son extraídas desde Energía Abierta de la Comisión Nacional De Energía del Ministerio de Energía (<http://energiaabierta.cl/>). La composición de la matriz, según la participación relativa 2022 es 23,5% Carbón, 19,1% Gas Natural, 17,4% Fotovoltaica, 13,4% Hidráulica pasada, 10,6% Eólica, 11,0% Hidráulica embalse, 1,8% Petróleo, 2,3% Biomasa, 0,6% Geotérmica.



Análisis de impacto del ciclo de vida e interpretación

4 Análisis de impacto del ciclo de vida e interpretación

En esta fase del estudio, los datos del inventario se transforman en indicadores de impacto ambiental con la finalidad de extraer, de acuerdo con los objetivos y alcance del estudio, conclusiones y recomendaciones que permitan una eventual toma de decisiones.

4.1 Descripción de los Impactos

Siguiendo los lineamientos de la Regla de Categoría de Producto *PCR 2019:14* para productos de la construcción (4) se seleccionan las categorías de impactos descritas en la Tabla 12. Para la evaluación de impacto se usa el software *OpenLCA* versión 2.0.3 (53).

Estos impactos son estimados a través de modelos, pero aún no existen modelos para todos los posibles impactos. Al final de este capítulo se hace un análisis cualitativo para complementar el análisis con potenciales impactos de la extracción de áridos naturales y la disposición de la escoria que no tienen modelos establecidos y no están considerados en el ACV.

Tabla 12: Categorías de impacto usadas en el estudio y su explicación.

Categoría [modelo de impacto]	Explicación
Cambio climático (CC) [IPCC 2021 AR6 GWP100] (54)	El cambio climático es originado por el aumento de la temperatura media del planeta a causa del incremento de los gases de efecto invernadero (GEI). Estos gases suelen provenir de la combustión (calderas, transporte, etc.), sistemas de refrigeración (aire acondicionado, cámaras de frío), agroindustria y residuos orgánicos (papel, restos de comida, etc.), entre otras actividades humanas. Esto genera fenómenos como sequías, destrucción de hábitats, deshielos entre otros efectos. La medida del impacto en esta categoría es conocida como la huella de carbono del producto y se mide en kg CO2 equivalentes, es decir, los efectos se expresan en relación con el efecto del dióxido de carbono (CO2).
Acidificación (ACID) [Accumulated exceedance] (55)	La liberación de gases contaminantes a la atmósfera, como los óxidos de nitrógeno (NOx) y el dióxido de azufre (SO2), se transforman en ácido sulfúrico y ácido nítrico al reaccionar con la humedad del suelo, del agua o del aire. Esto puede causar impactos negativos como la desaparición de especies vegetales, pérdida de microorganismos fijadores de nitrógeno y pérdida de pelaje de animales, entre otros. El potencial de acidificación se mide en "mol H+ e", número de iones de hidrógeno que una sustancia puede liberar cuando reacciona en el medio ambiente

Categoría [modelo de impacto]	Explicación
Eutrofización, agua dulce (E.ADU) [EUTREND model] (56)	Esta categoría muestra el efecto que causa el vertido de nutrientes al agua dulce. Éstos aceleran el crecimiento de algas, las que disminuyen el oxígeno en el agua, dañando al ecosistema acuático. La unidad de medida referencial es el efecto que produce un kg de fósforo en el agua
Eutrofización, marina (E.MAR) [EUTREND model] (56)	La eutrofización también puede ocurrir en el mar, donde el exceso de nutrientes puede generar marea roja (crecimiento de algas). A diferencia de la eutrofización de agua dulce, donde el estándar es el fosfato, en esta categoría se comparan los impactos con los de un kg de nitrógeno, otro importante nutriente
Eutrofización, terrestre (E.TER) [Accumulated exceedance] (55)	Se refiere al proceso por el cual se produce un aumento excesivo de nutrientes en el suelo, lo que puede provocar un crecimiento excesivo de plantas y otros organismos terrestres. Esto ocurre cuando se agregan grandes cantidades de nitrógeno y fósforo al suelo
Agotamiento de la capa de ozono (OZO) [Steady-state ODPs] (57)	Son los efectos causados por el incremento de emisiones de radiación UV como resultado de la descomposición de compuestos que contribuyen al agotamiento del ozono estratosférico (NOx, CFCs). El agotamiento de la capa de ozono se expresa en kg de CFC-11 equivalentes
Formación de ozono fotoquímico (SMOG) [LOTOS-EUROS model] (58)	El ozono a nivel de suelo (troposférico) es irritante y tóxico. A las personas afecta especialmente el sistema respiratorio (inflamación pulmonar, insuficiencia respiratoria, asma) y cardiovascular (infartos, insuficiencias cardiacas). Además, daña la vegetación, la productividad y calidad de los cultivos, matorrales y bosques. El ozono troposférico se genera por la reacción de compuestos orgánicos volátiles (COV) y el monóxido de carbono con los óxidos de nitrógeno en la luz solar.
Uso de recursos, fósiles (FÓSIL) [CML-IA] (59)	La escasez de recursos fósiles estima la reducción en la disponibilidad de petróleo, gas natural, carbón mineral, entre otros, que se miden en MJ.
Uso de recursos, minerales y metales (MIN) [CML-IA] (59)	Esta categoría de impacto se refiere al agotamiento y degradación de las reservas de recursos minerales. Relaciona la producción de minerales respecto de la disponibilidad del recurso, medido en kg de Sb equivalentes.
Privación del agua (H ₂ O) [AWARE] (60)	El método AWARE, se basa en la cuantificación del agua relativa restante por área una vez que se ha satisfecho la demanda humana y de los ecosistemas acuáticos, respondiendo a la pregunta "¿Cuál es el potencial de privar a otro usuario (humano o ecosistema) al consumir agua en esta área?"

4.1.1 Cómo interpretar los impactos

Todas las actividades humanas tienen impacto. El objetivo del estudio es conocer y minimizar estos impactos. Al leer los resultados de impacto, se debe tener en cuenta que:

- Estos se refieren a todas las actividades relacionadas con el ciclo de vida de los materiales estudiados,
- El estudio tiene exclusiones y suposiciones que podrían variar los resultados,
- El estudio no cuenta con revisión crítica.

Se debe considerar que los impactos aquí descritos son estimaciones, hechas por modelos matemáticos y no predicen efectos directos a la salud humana o de ecosistemas, ni el sobrepaso de límites o márgenes de seguridad.

Cada categoría de impacto tiene una unidad de impacto relativo a una sustancia de referencia, lo que no significa que solamente esa sustancia de referencia esté siendo emitida. Por ejemplo, la sustancia de referencia para el cambio climático es el dióxido de carbono (CO₂). El óxido de nitrógeno (N₂O) tiene un efecto 273 veces mayor que el CO₂ al cambio climático, entonces, el impacto de un kg de N₂O al cambio climático es de 273 kg CO₂ equivalentes.

Como cada categoría de impacto tiene una unidad distinta de la otra, es imposible comparar las magnitudes absolutas entre las categorías de impacto.

4.2 Resultados de impacto para el hormigón

Los impactos mostrados en esta sección corresponden a los siguientes casos de estudio:

- **Línea Base:** uso de 100% áridos naturales en el hormigón y silicato sin uso dispuesto en escorial.
- **Uso silicato – precio cero:** se asume un reemplazo de 50% de los áridos gruesos por silicato de hierro. También que el silicato de hierro es un residuo recuperado que no “hereda” cargas ambientales de la producción de cobre (enfoque ISO 21930).
- **Uso silicato – precio árido natural:** se asume un reemplazo de 50% de los áridos gruesos por silicato de hierro y que este es un subproducto del proceso del cobre y, por lo tanto, “hereda” una fracción de sus impactos ambientales, correspondiente al 0,3% de los impactos (enfoque EN 15804).

4.2.1 Cambios relativos a la línea base

La Tabla 13 muestra los cambios de impacto de los escenarios de uso de silicato de hierro con respecto a la línea base. Es decir, para cada categoría de impacto, la Tabla 13 muestra el porcentaje de cambio de este impacto que tendría el uso de silicato como

reemplazo de áridos naturales (la línea base representa un 0% de cambio con respecto a la línea base).

Se observa que los impactos para la producción de hormigón se reducen en hasta un 9% si el precio del árido es cero (no se consideran los impactos de la producción de cobre). Vale notar que la incertidumbre de este estudio es alta y, por lo tanto, esta reducción podría ser menor o hasta nula. Por lo tanto, una estimación conservadora es asumir que los impactos de la cuna a la puerta para el hormigón no cambiarían significativamente en este escenario (silicato con precio cero).

Tabla 13: Cambios relativos de impactos ambientales con respecto a la línea base para 1m³ de hormigón.

	Línea Base	Uso silicato (precio cero)	Uso silicato (precio árido natural)
Cambio climático	0%	-1%	1%
Acidificación	0%	-7%	116%
Eutrofización, agua dulce	0%	0%	110%
Eutrofización, marina	0%	-8%	3%
Eutrofización, terrestre	0%	-9%	4%
Agotamiento de la capa de ozono	0%	-5%	-1%
Formación de ozono fotoquímico	0%	-9%	8%
Uso de recursos, fósiles	0%	-5%	-1%
Uso de recursos, minerales y metales	0%	-1%	4633%
Privación del agua	0%	-7%	6%

Por otro lado, este resultado cambia significativamente si el silicato tiene el mismo precio que los áridos (impactos asignados de la producción de cobre). Para algunas categorías, el cambio no sería significativo (menor a 8%). Sin embargo, el impacto podría ser el doble para las categorías de acidificación y eutrofización de agua dulce y casi 50 veces el impacto en el uso de recursos minerales.

Por lo tanto, el reemplazo de áridos naturales por silicato de hierro tiene una potencial reducción de impactos si el precio del silicato es cero. Por otro lado, si tiene un precio asociado, estas ventajas desaparecen y el impacto aumenta en algunas categorías.

En la sección siguiente se analiza el porqué de estos cambios.

4.2.2 Análisis de impacto por materiales

Para entender por qué los impactos cambian, se desglosa el impacto por material para una categoría de impacto (cambio climático), lo que es mostrado en la Figura 10.

El análisis está realizado para la categoría de cambio climático. Aunque la interpretación es similar a las otras categorías de impacto, estas podrían variar.

Los impactos desglosados por proceso para todas las categorías de impacto se encuentran en el Anexo B.

Se observa que la mayor contribución al impacto proviene del cemento (83-85%), seguido por la mezcla lista de hormigón (10-11%). Los impactos de los áridos naturales gruesos y del silicato de hierro ascienden solamente a un 2,6% y 3,5% del impacto total (de la cuna a la puerta) respectivamente.

El impacto del cemento proviene mayoritariamente de su producción, mientras que el impacto del hormigón proviene del transporte y puede ser mayor o menor dependiendo de las distancias transportadas.

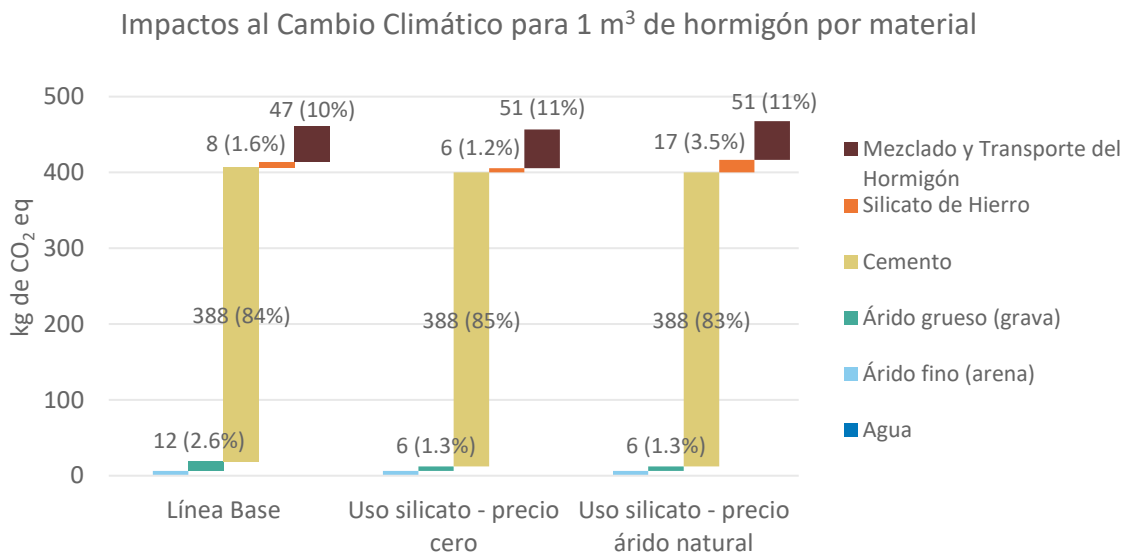


Figura 10: Gráfico de impactos al cambio climático para 1m³ de hormigón por material.

De esto, se concluye que el impacto total del hormigón es dominado por los impactos del cemento. Cambios en los impactos de los áridos cambiarán muy poco el impacto total del hormigón. Algunas categorías de impacto presentan excepciones en el escenario que el silicato de hierro es vendido por el mismo precio que los áridos naturales (ver sección 4.2.1).

Por ende, una alternativa para reducir aún más los impactos ambientales del hormigón sería reemplazar el cemento (que es el mayor contribuyente al impacto total del hormigón) por silicato de hierro. Como discutido en la sección 1.1, página 2, este uso no se analizó por falta de información precisa sobre dosificaciones y desempeño, por lo que sería relevante tener más estudios para determinar las dosificaciones de materiales para alcanzar un desempeño aceptable para una aplicación específica.

4.2.3 Análisis de impactos por procesos

A pesar del bajo impacto de los áridos al hormigón, es relevante entender los procesos por detrás de los cambios en el impacto por el uso del silicato de hierro. Para enfocar en estos cambios, se presenta en la Figura 11 el desglose de los impactos al cambio climático por procesos sin considerar la producción y transporte del cemento ni del hormigón.

El análisis está realizado para la categoría de cambio climático. Aunque la interpretación es similar a las otras categorías de impacto, estas podrían variar. Los impactos desglosados por proceso para todas las categorías de impacto se encuentran en el Anexo B.

Para el caso de uso de silicato, se observa que los impactos de la grava (Figura 11, en verde) se reducen a la mitad porque se usa el 50% del material. Esta reducción es superior a la de los impactos de chancar y transportar una mayor masa de silicato de hierro (Figura 11, en naranja), resultando ya en una reducción neta marginal (para el escenario de silicato a precio cero). Si a esta reducción consideramos además los impactos evitados del fin de vida del silicato de hierro, el escenario de uso de silicato muestra una reducción favorable de los impactos ambientales.

En el escenario de que el silicato tiene el precio de los áridos naturales, se consideran una parte de los impactos de la producción de cobre asignados al silicato. El impacto de esta producción es mayor a los impactos evitados por el fin de vida del silicato y el resultado neto es un aumento del impacto total.

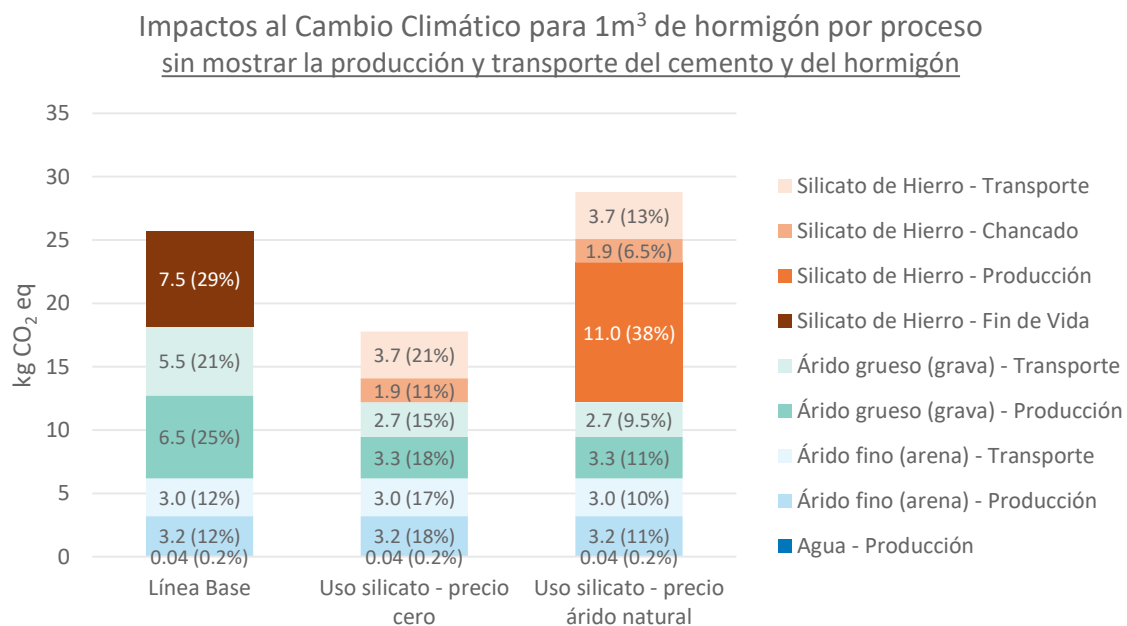


Figura 11: Impactos al Cambio Climático para 1m³ de hormigón por proceso sin mostrar la producción y transporte del cemento y del hormigón.

Otro resultado importante es que los impactos por transporte de áridos y de silicato tienen importancia similar (la misma orden de magnitud) que sus etapas de producción y chancado. Por esto, los resultados pueden variar significativamente dependiendo de las distancias recorridas por cada material.

En este análisis, se consideró que ambos materiales recorren la misma distancia. Pero esto puede no ser verdad ya que los centros de producción de áridos naturales y silicato de hierro están en zonas distintas.

4.2.4 Magnitud de la cantidad potencial de silicato de hierro usado

Un factor importante es cuanto es el máximo de silicato de hierro que podría ser utilizado dentro del país, para ver el potencial de reemplazo.

El escenario analizado reemplaza el 50% del volumen de áridos gruesos, lo que resulta en un uso de 750 kg de silicato por m³ de hormigón (Tabla 7 de la página 27).

La producción de silicato de hierro es estimada en 4,5 millones de toneladas por año (19). Si se usara todo este silicato para reemplazar el 50% de la grava en hormigones, se podría producir 6.000.000 m³ de hormigón por año.

Esto es un 98% de los 6.121.150 m³ de hormigón despachados entre noviembre de 2022 y octubre de 2023 en el país (61). Por lo tanto, solo la producción de hormigón del país tiene el potencial de absorber todo el silicato producido en Chile anualmente.

Otro uso potencial recomendado es para la producción de cemento. En el país, se despacharon cerca de 3.500.000 toneladas de cemento entre noviembre de 2022 y octubre de 2023 (62). Asumiendo una densidad real (peso específico) de 2.800 kg/m³ (63) esto es equivalente a aproximadamente 1.250.000 m³ de cemento usado por año en Chile.

Se obtienen propiedades similares a un cemento Portland con un reemplazo de 30% del cemento con una mezcla de 80% silicato de hierro y 20% óxido de calcio (21). Esto ocupa un 24% de silicato de hierro por m³ de cemento. Si todo el cemento producido en Chile ocupara esta proporción de silicato, esto usaría 300.000 m³. Asumiendo una densidad real seca de 3.579 kg/m³ (25) esto equivale a cerca de 1 millón de toneladas de silicato, lo que es un 24% de los 4.5 millones de toneladas anuales de silicato producidas.

Por lo tanto, hay un mercado potencial en el país para el uso masivo de la escoria de cobre en reemplazo de áridos y cemento en hormigones. En el caso del cemento, hay también un potencial de exportación ya que es un producto con un creciente mercado en búsqueda de alternativas más sostenibles (64).

4.3 Resultados de impacto para la mezcla asfáltica

Los impactos mostrados en esta sección corresponden a los siguientes casos de estudio:

- **Línea Base:** uso de 100% áridos naturales en el tratamiento superficial asfáltico simple (TSS) y silicato sin uso dispuesto en escorial.
- **Uso silicato – precio cero:** se asume un reemplazo de 100% de los áridos gruesos por silicato de hierro y que este es un residuo recuperado que no “hereda” cargas ambientales de la producción de cobre (enfoque ISO 21930).
- **Uso silicato – precio árido natural:** se asume un reemplazo de 100% de los áridos gruesos por silicato de hierro y que este es un subproducto del proceso del cobre y, por lo tanto, “hereda” una fracción de sus impactos ambientales, correspondiente al 0,3% de los impactos (enfoque EN 15804).

4.3.1 Cambios relativos a la línea base

La Tabla 14 muestra los cambios de impacto de los escenarios de uso de silicato de hierro con respecto a la línea base. Es decir, para cada categoría de impacto, la Tabla 14 muestra el porcentaje de cambio de este impacto que tendría el uso de silicato como reemplazo de áridos naturales (la línea base representa un 0% de cambio con respecto a la línea base).

Tabla 14: Cambios relativos de impactos ambientales con respecto a la línea base para 100 m² de tratamiento superficial asfáltico simple (TSS).

	Línea Base	Uso silicato (precio cero)	Uso silicato (precio árido natural)
Cambio climático	0%	7%	23%
Acidificación	0%	-15%	450%
Eutrofización, agua dulce	0%	19%	1374%
Eutrofización, marina	0%	-24%	26%
Eutrofización, terrestre	0%	-32%	32%
Agotamiento de la capa de ozono	0%	6%	11%
Formación de ozono fotoquímico	0%	0%	34%
Uso de recursos, fósiles	0%	6%	11%
Uso de recursos, minerales y metales	0%	9%	21959%
Privación del agua	0%	-50%	58%

Se observa que los impactos para la producción de TSS varían mucho de acuerdo con la categoría de impacto. El uso de silicato de hierro (sin precio) aumenta el impacto marginalmente en algunas categorías (menos de 10%) pero llega a aumentar 20% la eutrofización de agua dulce. Por otro lado, algunas categorías reducen el impacto entre un 15% hasta un 50%.

Este comportamiento se debe a que, al usar silicato de hierro, también se debe aumentar la cantidad de emulsión asfáltica (ver Tabla 8, en la página 28). Disminuir los impactos del fin de vida del silicato o de la producción de áridos naturales no contrarresta el aumento de impacto causado por un mayor uso del ligante en ciertas categorías.

Por otro lado, los mayores contribuyentes a otras categorías son el fin de vida del silicato (ej. privación de agua) o la producción de áridos naturales (acidificación y eutrofización marina y terrestre). Reemplazar estos elementos por el uso de silicato de hierro resultan en una reducción neta de los impactos en estas categorías, aun con un mayor uso de emulsión asfáltica.

Sin embargo, se disminuye el impacto en algunas categorías solamente en el caso del precio del silicato ser cero (no considerar los impactos proporcionales de la producción de cobre). Para el escenario de uso de silicato con precio de árido natural (considerando los impactos de su producción) el impacto aumenta sobre un 10% de aumento en todas las categorías de impacto, pudiendo llegar a múltiples veces en el caso de acidificación, eutrofización de agua dulce y uso de minerales (escenario subproducto).

4.3.2 Análisis de impacto por procesos

Para entender por qué los impactos cambian, se desglosa el impacto por proceso para una categoría de impacto (cambio climático), lo que es mostrado en la Figura 12.

El análisis está realizado para la categoría de cambio climático para analizar tendencias. Los resultados específicos podrían cambiar para otras categorías de impacto. Los impactos desglosados por proceso para todas las categorías de impacto se encuentran en el Anexo B.

Se observa que la mayor contribución al impacto proviene de la producción de la emulsión asfáltica (53-62%) seguido del transporte de la mezcla completa (15-22%). Los impactos de los áridos naturales gruesos y del chancado y transporte del silicato de hierro son alrededor a 7-8% del impacto total.

De esto, se concluye que el impacto del tratamiento asfáltico es dominado por la emulsión asfáltica y cambios en los impactos de los áridos cambiarán muy poco el impacto total de la mezcla del TSS.

Sin embargo, el reemplazo de áridos naturales por silicato de hierro aumentan la cantidad de emulsión necesaria y el peso total de la mezcla. Más emulsión hace que el impacto del TSS debido a su producción sea un 12% mayor (de 89 a 99 kg CO₂ eq.). Un mayor peso, aumenta el impacto del transporte de la mezcla en un 50% (de 23 a 35 kg CO₂ eq.).

Estos incrementos de impacto son mayores al ahorro de evitar el fin de vida del silicato, resultando en un impacto neto superior usando silicato de hierro (esto podría cambiar para otras categorías de impacto).

Si, además, se considera la producción del silicato (escenario precio árido natural), entonces los impactos son aún mayores.

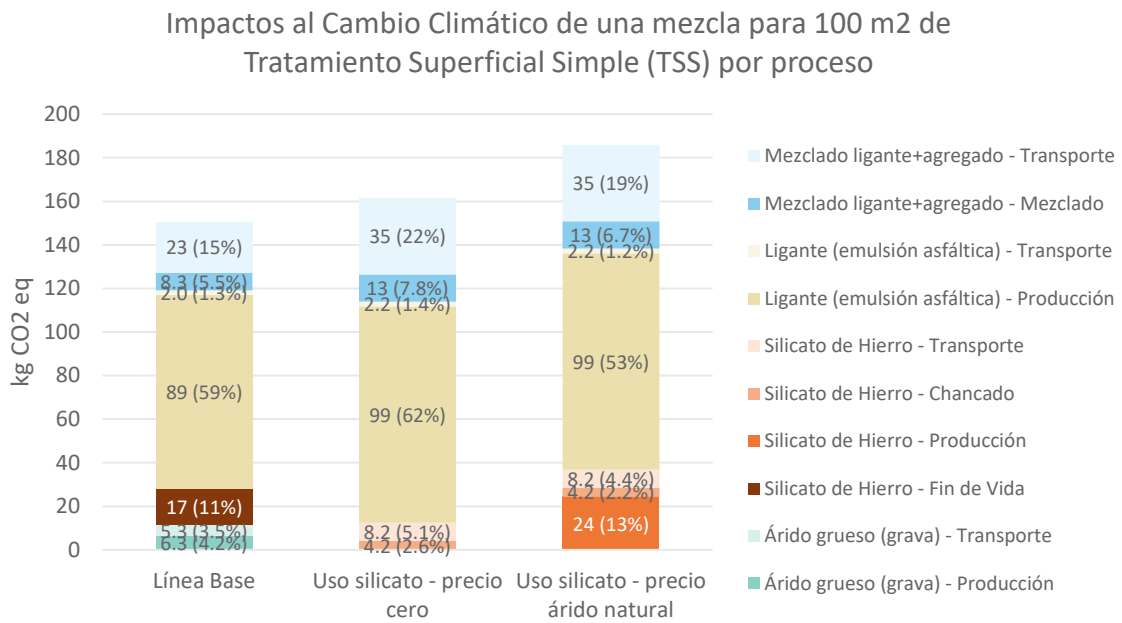


Figura 12: Gráfico de impactos al cambio climático de una mezcla asfáltica para 100m² de tratamiento superficial simple (TSS) por proceso.

4.4 Resultados de impacto para el núcleo del terraplén

Los impactos mostrados en esta sección corresponden a los siguientes casos de estudio:

- **Línea Base:** uso de 100% áridos naturales en la construcción del núcleo de un terraplén y sin uso de silicato, el que es dispuesto en escorial.
- **Uso silicato – precio cero:** se asume un reemplazo de 100% de los áridos gruesos por silicato de hierro y que éste es un residuo recuperado que no “hereda” cargas ambientales de la producción de cobre (enfoque ISO 21930).
- **Uso silicato – precio árido natural:** se asume un reemplazo de 100% de los áridos gruesos por silicato de hierro y que éste es un subproducto del proceso del cobre y, por lo tanto, “hereda” una fracción de sus impactos ambientales, correspondiente al 0,3% de los impactos (enfoque EN 15804).

4.4.1 Cambios relativos a la línea base

La Tabla 15 muestra los cambios de impacto de los escenarios de uso de silicato de hierro con respecto a la línea base. Es decir, para cada categoría de impacto, la Tabla 15 muestra el porcentaje de cambio de este impacto que tendría el uso de silicato como reemplazo de áridos naturales (la línea base representa un 0% de cambio con respecto a la línea base).

Tabla 15: Cambios relativos de impactos ambientales con respecto a la línea base para la construcción de un núcleo de terraplén de 1m de largo, 6m de ancho y 60cm de espesor.

	Línea Base	Uso silicato (precio cero)	Uso silicato (precio árido natural)
Cambio climático	0%	-52%	22%
Acidificación	0%	-76%	981%
Eutrofización, agua dulce	0%	-5%	4.497%
Eutrofización, marina	0%	-77%	10%
Eutrofización, terrestre	0%	-81%	16%
Agotamiento de la capa de ozono	0%	-64%	-19%
Formación de ozono fotoquímico	0%	-76%	48%
Uso de recursos, fósiles	0%	-65%	-19%
Uso de recursos, minerales y metales	0%	-50%	85.553%
Privación del agua	0%	-89%	88%

Se observa que, para la construcción del núcleo del terraplén, el impacto en todas las categorías se reduce si el precio del árido es cero (no se consideran los impactos de la producción de cobre). La menor reducción es de un 5% para la eutrofización de agua dulce, por lo que la incertidumbre podría ser considerada no significativa. Por otro lado, todas las otras categorías de impacto presentan una reducción de entre un 50% y 89%.

Este resultado cambia significativamente si el silicato tiene el mismo precio que los áridos (se asignan impactos por la producción de cobre). Para dos categorías, habría una reducción de un 19% (agotamiento de la capa de ozono y uso de combustible fósiles). Sin embargo, todas las otras categorías aumentan su impacto, siendo algunas múltiples veces mayores. El impacto podría ser 10 veces más para las categorías de acidificación y más de 800 veces más para el impacto en uso de recursos minerales.

Por lo tanto, el reemplazo de áridos naturales por silicato de hierro en núcleo de terraplenes tiene una potencial reducción de impactos si el precio del silicato es cero. Si tiene un precio asociado, estas ventajas desaparecen y el impacto aumenta en la mayoría de las categorías.

En la sección siguiente se analiza el porqué de estos cambios.

4.4.2 Análisis de impactos por procesos

Para entender por qué los impactos cambian, se desglosa el impacto por material para una categoría de impacto (cambio climático), lo que se muestra en la Figura 13.

El análisis está realizado para la categoría de cambio climático. Aunque la interpretación es similar a las otras categorías de impacto, estas podrían variar. Los impactos desglosados por proceso para todas las categorías de impacto se encuentran en el Anexo B.

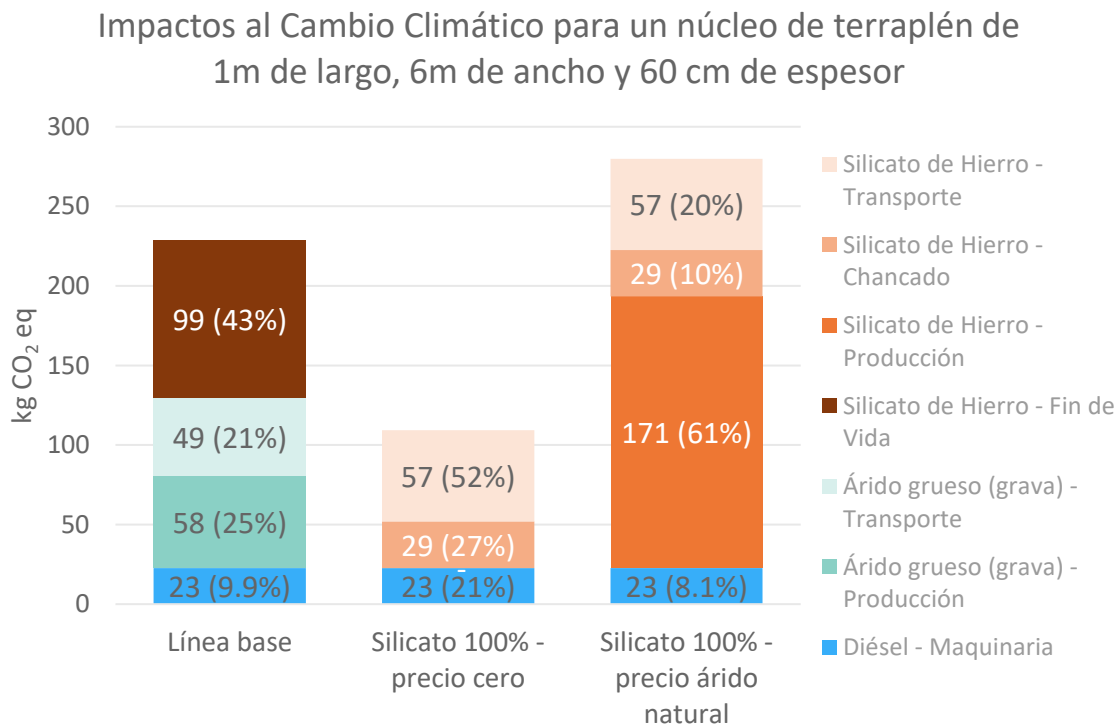


Figura 13: Gráfico de impactos al cambio climático de la construcción de un núcleo de terraplén de 1m de largo, 6m de ancho y 60cm de espesor.

Para el caso de uso de silicato, se observa que los impactos del chancado más transporte del silicato (Figura 13, en naranja claro) son menores que los impactos de la producción y transporte de la grava (Figura 13, en verde), resultando ya en una reducción neta marginal (para el escenario de silicato a precio cero). Si además se consideran los impactos evitados del fin de vida del silicato de hierro (en naranja oscuro), el escenario de uso de silicato a precio cero muestra una reducción favorable de los impactos ambientales.

En el escenario de que el silicato tiene el precio de los áridos naturales, se consideran una parte de los impactos de la producción de cobre asignados al silicato. El impacto de esta producción es mayor a los impactos evitados por el fin de vida del silicato y el resultado neto es un aumento del impacto total.

Otro resultado importante es que los impactos por transporte de áridos y de silicato tienen importancia similar (la misma orden de magnitud) que sus etapas de producción y chancado. Por esto, los resultados pueden variar significativamente dependiendo de las distancias recorridas por cada material.

En este análisis, se consideró que ambos materiales recorren la misma distancia. Pero esto puede no representar correctamente la situación ya que los centros de producción de áridos naturales y silicato de hierro están en zonas distintas.

Adicionalmente, se observa que el uso de diésel para la construcción aporta entre un 8% y un 20% del impacto al cambio climático dentro del alcance evaluado. Este valor es relevante, pero menor que el de otros procesos analizados. Sin embargo, este es un valor estimado con alta incertidumbre y podría variar significativamente con datos de una construcción real.

4.4.3 Magnitud de la cantidad potencial de silicato de hierro usado

Un factor importante es cuánto es el máximo de silicato de hierro que podría ser utilizado dentro del país, para ver el potencial de reemplazo.

El escenario analizado reemplaza el 100% del volumen de áridos gruesos, lo que resulta en un uso de 11.635 kg de silicato por metro de camino (Tabla 9 de la página 30).

Entre 2020 y 2021, Chile agregó 1.865 km de red vial no pavimentada (65). Considerando que fue necesario crear un terraplén de similares características de este estudio (6 metros de ancho y 60 centímetros de espesor) para estos caminos no pavimentados, esto habría resultado en 21,7 millones de toneladas de silicato utilizado.

Esto es casi cinco veces la producción anual de 4,5 millones de toneladas por año (19). Aunque la construcción de caminos varía de año a año, usar silicato en terraplenes tiene el potencial de reducir el silicato acumulado en escoriales como pasivo ambiental.

4.5 Análisis cualitativo de otros impactos

Los impactos antes descritos consideran solamente las categorías para las que hay un modelo de impacto. Sin embargo, existen impactos locales los cuáles no están descritos en los resultados anteriores.

Respecto a las extracciones de áridos naturales. Estas extracciones, si son mal manejadas, modifican la morfología de los lechos lo que pueden afectar la calidad del agua y destruir hábitats, generando la pérdida de biodiversidad (66).

Además, la extracción de áridos naturales provocan erosión de los suelos lo que puede generar aluviones, afectando aún más la morfología del terreno, los ecosistemas y las poblaciones aledañas (67).

Estos impactos pueden ser reducidos con un buen manejo de la faena, pero mucha de la extracción de áridos naturales en Chile ocurre de forma ilegal o poco regulada (1; 29), lo que conlleva a la poca preocupación ambiental y una intensificación de estos impactos.

Por otro lado, existe el creciente acúmulo del silicato de hierro como pasivo ambiental. Es un material que no se deteriora, por lo que ocupan vastas extensiones de tierra, desplazando el área de ecosistemas y creando áreas infértiles (68).

Por lo tanto, usar el silicato en lugar de áridos naturales podría tener dos efectos positivos:

1. Limitar la extracción de áridos y sus impactos a los cauces de ríos, a la calidad del agua y reducir el riesgo de aluviones provocados por erosiones no humanas,
2. Reducir el acúmulo del silicato de hierro y, potencialmente, aumentar el área de tierra ocupada por ecosistemas naturales para su recuperación y expansión de la biodiversidad local.

4.6 Análisis de incertidumbre

Cualquier estudio que se realice contiene elementos de incertidumbre, sea por imprecisiones en las mediciones o porque los datos no reflejan exactamente las tecnologías utilizadas. Para determinar el impacto de esta incertidumbre se emplea una matriz de *pedigree* y una simulación por Monte Carlo.

La matriz de *pedigree* clasifica cada entrada de datos de acuerdo con cinco criterios (69):

- Confianza: ¿Son los datos basados en mediciones o en estimaciones?
- Completitud: ¿Los datos representan el proceso completo o solo parte de ello?
- Correlación temporal: ¿Los datos son recientes o antiguos?
- Correlación geográfica: ¿Los datos son referentes al país o son de un país distinto?
- Correlación tecnológica: ¿Los datos son para tecnologías de la empresa o producciones genéricas?

Cada criterio es evaluado en una escala de cinco niveles que, en conjunto, definen un margen de error para cada dato. Posteriormente, se realizan múltiples simulaciones para determinar cuáles serían los impactos si los datos variaran dentro del margen de error (método de Montecarlo). Luego de 1.000 simulaciones se determina el rango en que los resultados de impacto ocurren un 90% de las veces.

Los rangos obtenidos por el análisis de incertidumbre se encuentran en el Anexo A.

Para este estudio, la incertidumbre es alta por lo que no se pueden identificar diferencias con un 90% de confianza. Pero hay reducciones indicativas que son mostradas en las secciones siguientes en adición a los beneficios ambientales analizados cualitativamente en la sección 4.4.

Se podría tener una mayor confianza en las diferencias de dos formas. La primera es reduciendo el margen de error con datos de mayor calidad, como datos primarios de procesos reales. La segunda forma es buscar alternativas que tengan un mayor potencial reducción del impacto, de forma que la diferencia sea mayor que la incertidumbre del estudio.



Conclusiones y recomendaciones

5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Resumen

Se evalúan los impactos ambientales en el ciclo de vida del reemplazo de áridos naturales por silicato de hierro (escoria de cobre) para tres productos: 1 m³ de hormigón premezclado con resistencia de 30 MPa a los 28 días, una mezcla asfáltica para 100 m² de tratamiento superficial simple (TSS) y el núcleo de un terraplén con 1 m de largo, 6 m de ancho y 60 cm de espesor.

Para el hormigón y la mezcla asfáltica, el límite del sistema considerado fue desde la cuna hasta la obra (etapas A1-A4), excluyéndose las etapas de construcción, uso, mantenimiento y fin de vida. Para el núcleo del terraplén se incluyó también el diésel, la producción y la mantención de la maquinaria para su construcción (etapas A1-A5).

Para cada producto, se analizaron tres escenarios:

- **Línea Base:** uso de 100% áridos naturales, sin uso de silicato, el que es dispuesto en escorial.
- **Uso silicato (precio cero):** se asume un reemplazo de una porción de los áridos gruesos por silicato de hierro y que éste es un residuo recuperado sin valor económico que no “hereda” cargas ambientales de la producción de cobre (enfoque ISO 21930).
- **Uso silicato (precio árido natural):** se asume un reemplazo de una parte de los áridos gruesos por silicato de hierro y que éste tiene un valor comercial similar a los áridos naturales. Por lo tanto, el silicato es un subproducto del proceso del cobre y “hereda” una fracción (0,3%) de sus impactos ambientales. (enfoque EN 15804).

Los resultados de impacto muestran que el reemplazo de áridos naturales por silicato de hierro tiene una potencial reducción de impactos solamente si el silicato tiene un precio de cero.

Para el hormigón, las reducciones de impacto son nulas o pequeñas (hasta un 10%) para todas las categorías de impacto analizadas.

Para la mezcla asfáltica, el resultado es mixto: el impacto aumenta en cinco categorías y se reduce en cuatro categorías (una categoría no presenta diferencia). Esto debido al mayor uso de asfalto en una mezcla con silicato. Sin embargo, las reducciones tienen una mayor magnitud (de 15-50%) que los aumentos (de 5-20%), por lo que también se estima que haya un potencial beneficio en usar silicato de hierro.

Usar silicato de hierro en el núcleo del terraplén presenta una reducción de 50% a 89% en nueve de las diez categorías de impacto analizadas y un cambio marginal en la última. Esto muestra un gran potencial de reducción de impactos para esta aplicación.

Las reducciones ocurren principalmente porque los impactos de chancado y transporte del silicato son, en general, menores que los impactos de su fin de vida. Por lo tanto, agregar procesos para usar el silicato de hierro presenta beneficios inmediatos por evitar su fin de vida. Si a esto se suman los ahorros de la producción y procesamiento de áridos naturales y la reducción de los impactos cualitativos, se observa un beneficio ambiental por el uso del silicato. Este beneficio está condicionado a tres elementos: el precio del silicato, cambios de dosificaciones y distancias transportadas.

El precio del silicato define la proporción de los impactos de la producción de cobre que el silicato “hereda”. Si el precio es cero, entonces no se considera este impacto. Si el silicato es vendido, entonces se deben sumar estos impactos. Para los tres productos (hormigón, mezcla asfáltica y núcleo de terraplén), si el silicato tiene el mismo precio de los áridos naturales, la gran mayoría de los impactos ambientales aumentan con respecto a usar áridos naturales, por considerar que el silicato hereda una fracción de los impactos de la producción del cobre.

Dependiendo del producto, se requieren cambios de dosificación de materiales entre las mezclas con y sin silicato para lograr el mismo desempeño. En el caso del hormigón no hay cambios de dosificación. Pero una mezcla asfáltica con silicato necesita más asfalto (ligante) para tener propiedades similares a una mezcla con áridos naturales. Este aumento de asfalto explica el aumento en algunas categorías de impacto para la mezcla asfáltica. Para el terraplén, el escenario analizado no presentaba cambios de dosificaciones de material, pero es posible que sea necesario usar más material para confinar o cambiar las dimensiones de un terraplén usando silicato de hierro para mantener sus propiedades estructurales.

El transporte es el tercer elemento importante. En este estudio se considera que el silicato y los áridos son transportados la misma distancia. Pero esto podría no reflejar la realidad de forma precisa. Si el silicato, que es más pesado, también debe recorrer una mayor distancia que los áridos, entonces los impactos ambientales pueden ser superiores.

Para el hormigón y la mezcla asfáltica, aunque existan reducciones, las diferencias de impacto son típicamente marginales debido a que los áridos son una proporción pequeña del impacto total. Los mayores contribuyentes son el cemento para el hormigón (60-90%) y el asfalto para la mezcla asfáltica (30-80%), por lo que reemplazar estos materiales reduce los impactos de una manera mucho más significativa.

Por otro lado, el núcleo del terraplén consiste casi totalmente en áridos, por lo que estos materiales son una parte importante del impacto total. Por lo tanto, reemplazar áridos naturales por silicato tiene un buen potencial de reducción de los impactos (de 50% a 89%).

Vale notar que la incertidumbre del estudio es alta, por lo que ninguna reducción ocurre con un 90% de confianza. Pero hay reducciones indicativas y a ellas se deben agregar los beneficios ambientales cualitativos de prevenir el daño a cauces de ríos y eliminar el pasivo ambiental acumulado de silicato de hierro para abrir espacios a los ecosistemas locales. Por lo tanto, se concluye que sí, hay un beneficio ambiental por el uso de escoria en reemplazo de los áridos gruesos, solamente en el caso de su precio ser cero y este ser transportado distancias cortas.

5.2 Recomendaciones

Con base en estos resultados, se hacen las siguientes recomendaciones.

Es vital encontrar formas de reutilización del silicato de hierro. Los impactos del fin de vida del silicato de hierro (construcción del escorial) son de la misma orden de magnitud que la extracción de áridos. Por lo tanto, encontrar una aplicación para este material implica reducir estos impactos ambientales. Aún más considerando los impactos locales y específicos analizados de forma cualitativa, como los daños a cauces de río por la extracción de áridos y el daño a ecosistemas vecinos por el silicato.

Enfocar los estudios en el uso de silicato de hierro para el cemento. El cemento es uno de los elementos con mayor aporte al cambio climático (70) y es en el que existe el mayor potencial de reducción de impactos.

Esto porque los impactos ambientales del hormigón son dominados por el cemento (60-90%). Otros estudios han mostrado una reducción significativa de los impactos ambientales para hormigones con una fracción del cemento reemplazado por silicato de hierro (5; 6).

No se analizó el caso del cemento en este estudio porque el porcentaje, tipo y composición del silicato utilizado, bien como el método de producción del cemento cambia significativamente las características del producto final y, por lo tanto, su aplicación (21).

Por lo tanto, es importante tener más estudios de la aplicación del silicato de hierro en cementos con casos de uso bien determinados. Estos estudios ayudarían a determinar la factibilidad técnica para aplicaciones específicas y permitiría hacer un ACV comparativo para determinar el mayor potencial de reducción de impactos ambientales.

Usar el silicato de hierro en terraplenes de caminos locales mientras se encuentran otras formas de aplicación. Usar silicato de hierro para construir terraplenes tiene un gran potencial de reducción de impactos ambientales asociados a reducir la extracción de áridos naturales y a evitar el acopio de silicato en los escoriales.

Los estudios actuales muestran que núcleos de terraplenes construidos con silicato de hierro tienen propiedades aceptables para caminos locales. Es posible que las propiedades mejoren si el silicato es chancado y tamizado. Sin embargo, usar el silicato

de hierro para construir terraplenes aceleraría las innovaciones que pueden traer mejoras de procesos y desempeño bien como ya reduciría los impactos ambientales asociados a la construcción de los caminos.

Encontrar alternativas de uso cerca de los centros de producción y acopio de silicato. El transporte de los materiales es un componente importante del impacto ambiental ya que el silicato es más denso y, por ende, más pesado por volumen que los áridos naturales.

En este estudio, se asumió que ambos materiales recorran las mismas distancias. Pero típicamente los áridos son extraídos cerca de centros constructivos (17) mientras que el silicato de hierro está concentrado en ciertos puntos en el país. Si el silicato debe viajar una distancia mucho mayor a los áridos, esto aumenta proporcionalmente su impacto ambiental. Otro estudio mostró que potenciales ventajas ambientales desaparecen con apenas 26 km de diferencia (6).

Chile tiene este aspecto positivo, en que puntos de producción de silicato de hierro están cerca de productos de cemento y hormigón, como es el caso de Ventanas. Esto es un punto a favor al buscar alternativas de trabajo en conjunto entre estas empresas.

Controlar el proceso de enfriamiento para obtener silicato que necesite menor procesamiento para ser usado. El proceso de enfriamiento del silicato cambia su porosidad, dureza, tamaño y formato (11) y se necesita un proceso de chancado para obtener la granulometría deseada.

Al ser el silicato más duro que los áridos naturales, su chancado se hace más difícil: se usa más energía y tiempo y las piezas se desgastan más rápidamente, aumentando la necesidad de mantención. Aunque el chancado no contribuye significativamente a los impactos de forma general, sí contribuye a algunas categorías específicas y podría considerarse una traba técnica para el uso de silicato en la construcción (en base a entrevista con personal del Departamento de Vialidad del MOP).

Por lo tanto, controlar el proceso de enfriamiento reduce potencialmente la necesidad de postratamiento del silicato de hierro, puede disminuir marginalmente sus impactos ambientales y aumentar la factibilidad técnica de implementarlo como una alternativa viable.

Incluso, un estudio mostró un potencial significativo de reducción de impactos ambientales ocupando el calor residual del silicato en la fabricación de cemento. Esto muestra que las innovaciones de proceso fomentan la viabilidad de aplicación y la reducción de los impactos del material.

5.3 Limitaciones

Estos resultados tienen ciertas limitaciones que pueden influenciar su interpretación. Por ello se recomienda considerarlas en el análisis y toma de decisiones.

- Uso de datos secundarios: se utilizan inventarios de ciclo de vida de otros países y de fuentes secundarias. Pese a que se realizan modificaciones para acercar los valores a la realidad nacional, los valores podrían tener variaciones con respecto a prácticas nacionales. Esto se mejora con el levantamiento de datos de inventario locales.
- Regionalización: los datos están regionalizados para el contexto de Chile. Los resultados podrían cambiar para otros países con otras fuentes eléctricas, medios de transporte, tecnologías empleadas, etc.
- Resultados de la cuna a la puerta: Los límites del sistema excluyen las etapas de construcción, uso, mantención y fin de vida. Se asume que estas etapas no varían significativamente entre usar árido natural o silicato de hierro porque no se encontraron datos específicos. Sin embargo, estudios futuros podrían mostrar diferencias que causen cambios significativos de impacto (por ejemplo, usar silicato de hierro podría reducir en la mitad la necesidad de mantención).
- Alta incertidumbre: se usaron exclusivamente datos secundarios y se hicieron múltiples supuestos (fundados y justificados) para conducir el estudio. Por esto, la incertidumbre es alta y los valores reportados no deben ser tomados como taxativos. Los resultados son solamente direccionales. Esto podría ser mejorado levantando datos locales y primarios de las actividades analizadas.
- Categorías de impacto: las categorías de impacto presentadas son aquellas que tienen modelos científicos para ser analizadas. Además, los impactos son modelados con promedios globales. Esto puede excluir otros impactos que son locales y también relevantes al problema, como el impacto de los vertederos a los humedales vecinos.



Referencias

Referencias

1. **EcoEd.** *Estado del Arte: Uso de silicato de hierro (escoria de cobre) como reemplazo de áridos en la construcción.* 2023.
2. **ISO.** *21930: Sostenibilidad en la construcción de edificios. Declaración ambiental de productos de construcción.* 2010.
3. **EN 15804:2012+A2:2020.** *Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción.* 2020.
4. **EPD System.** *PCR 2019:14 Construction Products.* 2021.
5. *Environmental Benefit Assessment of Blended Cement with Modified Granulated Copper Slag.* **Zhang, Qinli, Zhang, Bingyi y Wang, Daolin.** 2022, Materials.
6. **Sphera.** *LCA summary report for Iron Silicate Application.* 2022.
7. **ASTM.** *ASTM D8-02 - Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements.* 2010.
8. **INN.** *NCh163.of79 - Aridos para morteros y hormigones - Requisitos generales.* Santiago de Chile : s.n., 1999.
9. **ISO 14044.** *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines.* Geneva, Switzerland : International Organization for Standardization, 2006.
10. **ASTM.** *ASTM C219-20a - Standard Terminology Relating to Hydraulic and Other Inorganic Cements.* 2020.
11. **Dhir, Ravindra K., y otros.** *Sustainable Construction Materials: Copper Slag.* s.l. : Woodhead Publishing, 2017.
12. **Mejías, Yaichi Pérez.** *Escoria de cobre de CODELCO Ventanas como agregado pétreo para tratamientos superficiales asfálticos simples.* s.l. : Memoria de título Universidad Federico Santa María, 2017.
13. **Wang, G.C.** Slag use as an aggregate in concrete and cement-based materials. [aut. libro] G.C. Wang. *The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction.* 2016, págs. 239–274. .
14. **INN.** *NCh 170 "Hormigón - Requisitos generales".* Santiago : s.n., 2016.
15. **ASTM.** *Product Category Rule for Environment Product Declarations- PCR for Slag Cement v2.0 (UN CPC 3744 – Slag Cement).* Michigan : NSF, 2020.
16. **Dirección de Vialidad.** *Manual de Carreteras.* Santiago, Chile : s.n., 2002.

17. **Comisión Nacional de Áridos.** *Industria del Árido en Chile Tomo 1: Sistematización de Antecedentes Técnicos y Ambientales.* s.l. : Convenio MOP, MINVU y Cámara Chilena de la Construcción, 2001.
18. **Revista Nueva Minería y Energía.** *Áridos: los minerales olvidados en Chile.* [En línea] 26 de septiembre de 2022. [Citado el: 18 de septiembre de 2023.] <https://www.nuevamineria.com/revista/aridos-los-minerales-olvidados-en-chile/>.
19. *Valorización de residuos mediante procesos metalúrgicos: Experiencias locales.* **San Martín, Alejandro, y otros.** 2022, Revista Nueva Minería y Energía.
20. *The Consequences of Substituting Sand with Used Copper Slag in Construction.* **Kua, Harn Wei.** 6, 2013, Journal of Industrial Ecology, Vol. 17, págs. 869-879.
21. *Characterization and evaluation of the pozzolanic activity of granulated copper slag modified with CaO.* **Feng, Yan, y otros.** 2019, Journal of Cleaner Production, Vol. 232, págs. 1112-1120.
22. **Control Hidráulico Chile Limitada.** *Desarrollo de elementos constructivos de hormigón, reemplazando áridos por escoria de fundición de cobre.* 2023.
23. **Ministerio de Obras Públicas.** *Evaluación de la factibilidad técnica del uso de escoria de Cobre proveniente de la Fundición Chagres de Anglo American, para la construcción de terraplenes.* 2015.
24. **Orizola Gómez, Sebastián Andrés.** *Uso de Escoria de Cobre en Cementos.* Santiago : s.n., 2006.
25. **Morales Pizarro, Carlos.** *Influencia de la incorporación de escoria de cobre sobre la durabilidad de hormigones.* Valparaíso : s.n., 2013.
26. *The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology.* **Wernet, G, y otros.** 9, 2016, The International Journal of Life Cycle Assessment [online], Vol. 21, págs. 1218-1230.
27. **Maripanguí, José.** *Rediseño del proceso de distribución de productos para una empresa de áridos.* Santiago : s.n., 2009.
28. **ChileTransporte.** *Diagnóstico Sectorial APL Transporte de Carga por Carretera.* 2016.
29. **Boletín N° 15.096-09.** *Proyecto de ley, iniciado en moción de los Honorables Senadores señor De Urresti, señora Sepúlveda y señor Soria, que regula la extracción de áridos.* s.l. : Senado de Chile, 2022.
30. **Ecoinvent 3.9.1.** gravel production, crushed. [En línea] 2017. [Citado el: 03 de 11 de 2023.] <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.9.1/cutoff/dataset/21575/documentation>.

31. **Comisión Nacional de Energía.** Generación Bruta SEN. *Estadísticas de Electricidad*. [En línea] 2022. [Citado el: 18 de December de 2023.] <https://www.cne.cl/normativas/electrica/consulta-publica/electricidad/>.
32. **Ecoinvent 3.9.1.** sand quarry operation, extraction from river bed. *Ecoquery*. [En línea] [Citado el: 21 de 11 de 2023.] <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.9.1/cutoff/dataset/20138/documentation>.
33. —. rock crushing. *Ecoquery*. [En línea] [Citado el: 2023 de 11 de 21.] <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.9.1/cutoff/dataset/9014/documentation>.
34. —. copper mine operation and beneficiation, sulfide ore. [En línea] 2020. <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.9.1/cutoff/dataset/23264/documentation>.
35. —. smelting of copper concentrate, sulfide ore. [En línea] 2020. <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.9.1/cutoff/dataset/23352/documentation>.
36. —. treatment of copper slag, residual material landfill. [En línea] 2019. <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.9.1/cutoff/dataset/20900/documentation>.
37. **Comisión Chilena del Cobre, Ministerio de Minería.** *Precio de los Metales*. [En línea] 2023. [Citado el: 20 de noviembre de 2023.] <https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Bases%20de%20Datos/Precio-de-los-Metales.aspx>.
38. **Sistema de Impuestos Internos.** *Dólar Observado 2012*. [En línea] 2012. [Citado el: 20 de noviembre de 2023.] <https://www.sii.cl/pagina/valores/dolar/dolar2012.htm>.
39. *Characteristics and utilisation of copper slag—a review*. **Gorai, Bipra, Jana, R.K. y Premchand.** 4, 2003, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 39, págs. 299-313.
40. *Mechanism of composite additive in promoting reduction of copper slag to produce direct reduction iron for weathering resistant steel*. **Guo, Zhengqi, y otros.** 2018, Powder Technology, Vol. 329, págs. 55-64.
41. **Soezen, K.** The future of non-ferrous slag market forecast to 2029. *Smithers*. [En línea] 2019. [Citado el: 21 de 11 de 2023.] <https://www.smithers.com/services/market-reports/materials/the-future-of-non-ferrous-slag-to-2029>.
42. **PUCV, Centro de Minería y Escuela de Ingeniería Química.** *Caracterización química de baldosas fabricadas a partir de Escorias de Fundición*. Valparaíso : s.n., 2022.
43. **Ecoinvent 3.9.1.** cement production, Portland. *Ecoquery*. [En línea] [Citado el: 2023 de 11 de 21.] <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.9.1/cutoff/dataset/1580/documentation>.
44. —. tap water production, conventional treatment. *Ecoquery*. [En línea] [Citado el: 23 de 11 de 2023.] <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.9.1/cutoff/dataset/20430/documentation>.

45. —. bitumen adhesive compound production, hot. *Ecoquery*. [En línea] [Citado el: 2023 de 11 de 21.] <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.9.1/cutoff/dataset/219/documentation>.
46. —. mastic asphalt production. *Ecoquery*. [En línea] [Citado el: 21 de 11 de 2023.] <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.9.1/cutoff/dataset/219/documentation>.
47. **Yepes, Víctor**. Materiales que se pueden emplear en un terraplén. *Blogs de la Universidad Politécnica de Valencia*. [En línea] <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/terraplenes/>.
48. *Environmental assessment of roads constructed with and without bottom ash from municipal solid waste incineration*. **Birgisdóttir, H., y otros**. 5, 2006, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Vol. 11, págs. 358-368.
49. **Ecoinvent 3.9.1**. road construction. [En línea] 2012. [Citado el: 11 de nov de 2023.] <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.9.1/cutoff/dataset/5630/documentation>.
50. —. diesel, burned in building machine. [En línea] 2011. [Citado el: 11 de nov de 2023.] <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.9.1/cutoff/dataset/5904/documentation>.
51. **Innovation, Science and Economic Development Canada**. Volume correction factors — diesel fuel. *Measurement Canada*. [En línea] 2018. [https://www.ic.gc.ca/eic/site/mc-mc.nsf/vwapj/VCF_Diesel.pdf/\\$file/VCF_Diesel.pdf](https://www.ic.gc.ca/eic/site/mc-mc.nsf/vwapj/VCF_Diesel.pdf/$file/VCF_Diesel.pdf).
52. **Ecoinvent**. transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6. *Ecoquery*. [En línea] 2023. [Citado el: 2023 de 11 de 22.] <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.9.1/cutoff/dataset/11593/documentation>.
53. **GreenDelta**. openLCA – the Life Cycle and Sustainability Modeling Suite. *openLCA*. [En línea] 2022. [Citado el: 21 de 03 de 2023.] <https://www.openlca.org/openlca/>.
54. **IPCC**. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA : Cambridge University Press, 2021. pág. 2391.
55. *Country-dependent Characterisation Factors for Acidification and Terrestrial Eutrophication Based on Accumulated Exceedance as an Impact Category Indicator*. **Seppälä, J, y otros**. 6, 2006, International Journal of Life Cycle, Vol. 11, págs. 403-416.
56. **Goedkoop, M, y otros**. ReCiPe 2008 A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Report I Characterisation factors. 2008, 6.
57. *Scientific Assessment of Ozone Depletion*. **WMO**. 4, Geneva : s.n., 1999, Global Ozone Research and Monitoring Project.

58. *European characterization factors for human health damage of PM10 and ozone in life cycle impact assessment*. **Van Zelm, R, y otros**. 42, 2008, Atmospheric, págs. 441-453.
59. **CML - Department of Industrial Ecology**. CML-IA Characterisation Factors. *Leiden University*. [En línea] 05 de 09 de 2016. [Citado el: 07 de 02 de 2023.] <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors#downloads>.
60. *The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: Assessing impacts of water consumption based on available water remaining*. **Boulay, AM., Bare, J., Benini, L. et al**. 2018, Int J Life Cycle Assess , Vol. 23, págs. 368-378.
61. **Cámara Chilena de la Construcción**. Índice Despacho de Hormigón. [En línea] 2023. <https://cchc.cl/centro-de-informacion/indicadores/indice-despacho-de-hormigon>.
62. —. Índice de despacho de cemento. [En línea] 2023. <https://cchc.cl/centro-de-informacion/indicadores/indice-despacho-de-cemento>.
63. **Melón**. Ficha técnica de Cemento Melón Especial. [En línea] 2023. <https://www.melon.cl/wp-content/uploads/2016/12/Ficha-cemento-especial-Melon-1.pdf>.
64. **Fortune Business Insights**. *Green cement market size, share & COVID-19 impact analysis by type, by application, and regional forecast 2020-2030*. 2023.
65. **Observatorio Logístico**. Infraestructura: Red vial. *Datos de interés: Red vial nacional según categoría*. [En línea] 2021. [Citado el: 14 de dic de 2023.] <https://www.observatoriologistico.cl/infraestructura/red-vial/?id=5d719224d2c6f20029110412>.
66. **Orrego, Juan Pablo**. *La invisibilizada extracción de áridos: mirada de un abuso a los ecosistemas fluviales*. s.l. : El Mostrador, 2022.
67. *Aluviones históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur*. **Vargas, Gabriel, Ortlieb, Luc y Rutllant, José**. 2, s.l. : Revista geológica de Chile, 2000, Vol. 27.
68. **Jiménez, Jordan Morales**. Tesis de Magister en Territorio y Paisaje. *Humedales afectados por la industria minera: Recuperación y puesta en valor del Humedal Campiche como Parque Ecológico para la zona de sacrificio Quintero - Puchuncaví*. s.l. : Universidad Diego Portales, 2019.
69. **Weidema, Bo P, y otros**. *Overview and methodology. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3*. s.l. : Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2013.

70. *Life cycle assessment of cement: Are existing data and models relevant to assess the cement industry's climate change mitigation strategies? A literature review.* **Dahanni, H, y otros.** 2024, *Construction and Building Materials*, Vol. 411.

71. **Ministerio de Medio Ambiente.** *Res. 497 exenta aprueba anteproyecto de normas de emisión aplicables a vehículos motorizados pesados, elaborado a partir de la revisión del decreto supremo n° 55, de 1994, del ministerio de transportes y telecomunicaciones y lo somete a consulta pública.* Santiago, Chile : s.n., 2022.

72. —. *Diagnóstico Sectorial APL Transporte de Carga por Carretera.* ChileTransporte. Santiago de Chile : s.n., 2023.

73. *Environmental analysis of different construction techniques and maintenance activities for a typical local road.* **Celauro, Clara, y otros.** 2017, *Journal of Cleaner Production*, Vols. 142, parte 4, págs. 3482-3489.

Anexo A: Resultados de incertidumbre

Las tablas a continuación muestran los valores mínimos y máximos del rango con confianza de 90% para cada categoría de impacto para 1 m³ de hormigón y para una mezcla asfáltica de 100 m² de TSS.

Tabla 16: Valores reportados de impacto ambiental y rangos de incertidumbre para el análisis de ciclo de vida de 1 m³ de hormigón, línea base.

Categoría de impacto	Unidad	Percentil 5%	Reportado	Percentil 95%
Cambio climático	kg CO ₂ eq.	402,5	460,6	548,4
Acidificación	mol H ⁺ eq.	1,260	1,416	1,824
Eutrofización, agua dulce	kg P eq	0,031	0,066	0,244
Eutrofización, marina	kg N eq	0,388	0,452	0,603
Eutrofización, terrestre	mol N eq	4,719	5,489	7,331
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC 11 eq.	2,9*10 ⁻⁶	3,1*10 ⁻⁶	3,9*10 ⁻⁶
Formación de ozono fotoquímico	kg NMVOC eq.	1,277	1,430	1,900
Uso de recursos, fósiles	MJ	2.677	2.943	3.508
Uso de recursos, minerales y metales	kg Sb eq	3,5*10 ⁻⁴	4,4*10 ⁻⁴	9,3*10 ⁻⁴
Privación del agua	m ³	-2325	178	1866

Tabla 17: Valores reportados de impacto ambiental y rangos de incertidumbre para el análisis de ciclo de vida de 1 m³ de hormigón, silicato en uso – precio cero.

Categoría de impacto	Unidad	Percentil 5%	Reportado	Percentil 95%
Cambio climático	kg CO ₂ eq.	397,06	456,49	541,21
Acidificación	mol H ⁺ eq.	1,17	1,31	1,67
Eutrofización, agua dulce	kg P eq	0,03	0,07	0,21
Eutrofización, marina	kg N eq	0,35	0,41	0,55
Eutrofización, terrestre	mol N eq	4,25	4,97	6,51
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC 11 eq.	2,6*10 ⁻⁶	2,9*10 ⁻⁶	3,7*10 ⁻⁶
Formación de ozono fotoquímico	kg NMVOC eq.	1,14	1,30	1,72
Uso de recursos, fósiles	MJ	2.511	2.801	3.329
Uso de recursos, minerales y metales	kg Sb eq	3,4*10 ⁻⁴	4,4*10 ⁻⁴	8,9*10 ⁻⁴
Privación del agua	m ³	-2,5*10 ³	166,08	2011

Tabla 18: Valores reportados de impacto ambiental y rangos de incertidumbre para el análisis de ciclo de vida de 1 m³ de hormigón, silicato en uso – precio árido natural.

Categoría de impacto	Unidad	Percentil 5%	Reportado	Percentil 95%
Cambio climático	kg CO ₂ eq.	405,91	467,49	558,63
Acidificación	mol H ⁺ eq.	2,81	3,05	3,52
Eutrofización, agua dulce	kg P eq	0,10	0,14	0,32
Eutrofización, marina	kg N eq	0,40	0,46	0,61
Eutrofización, terrestre	mol N eq	4,89	5,69	7,42
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC 11 eq.	2,8*10 ⁻⁶	3,1*10 ⁻⁶	3,9*10 ⁻⁶
Formación de ozono fotoquímico	kg NMVOC eq.	1,38	1,55	1,99
Uso de recursos, fósiles	MJ	2.621	2.925	3.479
Uso de recursos, minerales y metales	kg Sb eq	0,02	0,02	0,02
Privación del agua	m ³	-3,3*10 ³	187,97	2550

Tabla 19: Valores reportados de impacto ambiental y rangos de incertidumbre para el análisis de ciclo de vida de la mezcla asfáltica para 100 m² de tratamiento superficial simple (TSS), línea base.

Categoría de impacto	Unidad	Percentil 5%	Reportado	Percentil 95%
Cambio climático	kg CO ₂ eq.	128,38	150,57	204,85
Acidificación	mol H ⁺ eq.	0,72	0,83	1,25
Eutrofización, agua dulce	kg P eq	9,4*10 ⁻³	0,01	0,04
Eutrofización, marina	kg N eq	0,19	0,22	0,34
Eutrofización, terrestre	mol N eq	2,07	2,48	3,89
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC 11 eq.	5,4 *10 ⁻⁶	7,0 *10 ⁻⁶	1,0 *10 ⁻⁵
Formación de ozono fotoquímico	kg NMVOC eq.	1,30	1,57	2,44
Uso de recursos, fósiles	MJ	4.618	5.985	8.212
Uso de recursos, minerales y metales	kg Sb eq	1,9 *10 ⁻⁴	2,1 *10 ⁻⁴	4,5 *10 ⁻⁴
Privación del agua	m ³	-9,0 *10 ²	45,01	681,97

Tabla 20: Valores reportados de impacto ambiental y rangos de incertidumbre para el análisis de ciclo de vida de la mezcla asfáltica para 100 m² de tratamiento superficial simple (TSS), silicato en uso – precio cero.

Categoría de impacto	Unidad	Percentil 5%	Reportado	Percentil 95%
Cambio climático	kg CO ₂ eq.	135,50	161,52	226,11
Acidificación	mol H ⁺ eq.	0,59	0,71	1,07
Eutrofización, agua dulce	kg P eq	0,01	0,01	0,05
Eutrofización, marina	kg N eq	0,14	0,17	0,26
Eutrofización, terrestre	mol N eq	1,41	1,68	2,64
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC 11 eq.	5,7*10 ⁻⁶	7,4*10 ⁻⁶	1,1*10 ⁻⁵
Formación de ozono fotoquímico	kg NMVOC eq.	1,23	1,57	2,78
Uso de recursos, fósiles	MJ	4.836	6.362	8.756
Uso de recursos, minerales y metales	kg Sb eq	1,8*10 ⁻⁴	2,3*10 ⁻⁴	5,1*10 ⁻⁴
Privación del agua	m ³	-1,5*10 ³	22,65	852,71

Tabla 21: Valores reportados de impacto ambiental y rangos de incertidumbre para el análisis de ciclo de vida de la mezcla asfáltica para 100 m² de tratamiento superficial simple (TSS), silicato en uso – precio árido natural.

Categoría de impacto	Unidad	Percentil 5%	Reportado	Percentil 95%
Cambio climático	kg CO ₂ eq.	159,08	185,92	252,29
Acidificación	mol H ⁺ eq.	4,21	4,57	5,24
Eutrofización, agua dulce	kg P eq	0,14	0,17	0,29
Eutrofización, marina	kg N eq	0,25	0,28	0,38
Eutrofización, terrestre	mol N eq	2,97	3,28	4,36
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC 11 eq.	6,0*10 ⁻⁶	7,8*10 ⁻⁶	1,1*10 ⁻⁵
Formación de ozono fotoquímico	kg NMVOC eq.	1,75	2,11	3,32
Uso de recursos, fósiles	MJ	5.089	6.637	9.198
Uso de recursos, minerales y metales	kg Sb eq	0,04	0,05	0,05
Privación del agua	m ³	-3,6*10 ³	71,18	2435

Tabla 22: Valores reportados de impacto ambiental y rangos de incertidumbre para el análisis de ciclo de vida del núcleo del terraplén de 1 metro de largo, 6 metros de ancho y 60 centímetros de espesor, línea base.

Categoría de impacto	Unidad	Percentil 5%	Reportado	Percentil 95%
Cambio climático	kg CO ₂ eq.	163,4	228,6	285,2
Acidificación	mol H ⁺ eq.	2,08	2,56	4,92
Eutrofización, agua dulce	kg P eq	0,012	0,025	0,051
Eutrofización, marina	kg N eq	0,59	0,89	1,53
Eutrofización, terrestre	mol N eq	7,64	11,57	20,84
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC 11 eq.	2,4 *10 ⁻⁶	4,8 *10 ⁻⁶	1,1 *10 ⁻⁵
Formación de ozono fotoquímico	kg NMVOC eq.	1,90	3,00	4,66
Uso de recursos, fósiles	MJ	3.061	4.248	6.688
Uso de recursos, minerales y metales	kg Sb eq	2,3 *10 ⁻⁴	3,7 *10 ⁻⁴	6,6 *10 ⁻⁴
Privación del agua	m ³	-1,0 *10 ³	191,7	750,6

Tabla 23: Valores reportados de impacto ambiental y rangos de incertidumbre para el análisis de ciclo de vida del núcleo del terraplén de 1 metro de largo, 6 metros de ancho y 60 centímetros de espesor, silicato en uso – precio cero.

Categoría de impacto	Unidad	Percentil 5%	Reportado	Percentil 95%
Cambio climático	kg CO ₂ eq.	93,5	109,2	136,4
Acidificación	mol H ⁺ eq.	0,52	0,61	0,95
Eutrofización, agua dulce	kg P eq	0,006	0,024	0,026
Eutrofización, marina	kg N eq	0,14	0,21	0,29
Eutrofización, terrestre	mol N eq	1,52	2,21	3,25
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC 11 eq.	9,3*10 ⁻⁷	1,7*10 ⁻⁶	3,6*10 ⁻⁶
Formación de ozono fotoquímico	kg NMVOC eq.	0,43	0,71	0,91
Uso de recursos, fósiles	MJ	1.090	1.505	1.693
Uso de recursos, minerales y metales	kg Sb eq	1,5*10 ⁻⁴	1,9*10 ⁻⁴	4,7*10 ⁻⁴
Privación del agua	m ³	-3,1*10 ²	21,7	199,7

Tabla 24: Valores reportados de impacto ambiental y rangos de incertidumbre para el análisis de ciclo de vida del núcleo del terraplén de 1 metro de largo, 6 metros de ancho y 60 centímetros de espesor, silicato en uso – precio árido natural.

Categoría de impacto	Unidad	Percentil 5%	Reportado	Percentil 95%
Cambio climático	kg CO ₂ eq.	267,3	279,9	341,2
Acidificación	mol H ⁺ eq.	24,98	27,67	31,83
Eutrofización, agua dulce	kg P eq	0,628	1,144	3,992
Eutrofización, marina	kg N eq	0,82	0,98	1,26
Eutrofización, terrestre	mol N eq	11,42	13,38	17,07
Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC 11 eq.	2,5*10 ⁻⁶	3,9*10 ⁻⁶	7,2*10 ⁻⁶
Formación de ozono fotoquímico	kg NMVOC eq.	3,76	4,45	5,19
Uso de recursos, fósiles	MJ	3.295	3.434	4.223
Uso de recursos, minerales y metales	kg Sb eq	0,28	0,32	0,36
Privación del agua	m ³	-9,6*10 ³	361,2	8.128

Anexo B: Desglose de los impactos por procesos

Las tablas a continuación muestran el desglose de los impactos por proceso para cada escenario.

Tabla 25: Desglose de los impactos por procesos para 1 m³ de hormigón.

	CC	Acid	E.ADU	E.Mar	E.Ter	Ozo	Smog	Fósil	Min	H2O
Línea Base										
Fin de Vida Silicato de Hierro	1.63%	3.47%	1.21%	3.74%	3.27%	7.18%	4.78%	6.69%	2.33%	5.64%
Mezclado Hormigón	0.22%	0.53%	0.87%	0.40%	0.35%	0.61%	0.36%	0.43%	0.36%	0.25%
Producción Agua	0.01%	0.03%	0.04%	0.01%	0.01%	0.06%	0.01%	0.02%	0.31%	4.77%
Producción Árido fino (arena)	0.69%	2.01%	0.19%	2.88%	2.59%	1.59%	2.93%	1.37%	0.37%	3.03%
Producción Árido grueso (grava)	1.42%	12.20%	1.69%	12.85%	15.52%	3.12%	12.29%	2.63%	2.99%	3.37%
Producción Cemento	82.42%	66.46%	88.44%	64.35%	64.31%	57.83%	59.24%	59.52%	61.43%	79.40%
Transporte Árido fino (arena)	0.65%	0.73%	0.36%	0.75%	0.65%	1.41%	0.97%	1.39%	1.53%	0.17%
Transporte Árido grueso (grava)	1.19%	1.34%	0.66%	1.38%	1.20%	2.59%	1.78%	2.56%	2.82%	0.31%
Transporte Cemento	1.81%	2.03%	1.00%	2.09%	1.82%	3.92%	2.70%	3.88%	4.27%	0.47%
Transporte Hormigón	9.97%	11.20%	5.54%	11.54%	10.07%	21.68%	14.92%	21.42%	23.58%	2.59%
Uso silicato - precio cero										
Chancado Silicato de Hierro	0.41%	0.99%	1.81%	0.72%	0.63%	1.19%	0.66%	0.98%	0.72%	0.57%
Mezclado Hormigón	0.22%	0.58%	0.87%	0.44%	0.39%	0.65%	0.40%	0.45%	0.36%	0.27%
Producción Agua	0.01%	0.03%	0.04%	0.02%	0.01%	0.06%	0.02%	0.02%	0.32%	5.10%
Producción Árido fino (arena)	0.69%	2.17%	0.19%	3.14%	2.85%	1.68%	3.21%	1.44%	0.37%	3.24%
Producción Árido grueso (grava)	0.72%	6.60%	0.84%	7.01%	8.57%	1.65%	6.74%	1.38%	1.51%	1.81%
Producción Cemento	83.16%	71.84%	88.14%	70.18%	71.22%	61.11%	64.94%	62.65%	61.84%	84.94%
Transporte Árido fino (arena)	0.65%	0.79%	0.36%	0.82%	0.72%	1.49%	1.06%	1.46%	1.54%	0.18%
Transporte Árido grueso (grava)	0.60%	0.72%	0.33%	0.75%	0.66%	1.37%	0.98%	1.34%	1.42%	0.17%
Transporte Cemento	1.82%	2.19%	1.00%	2.28%	2.01%	4.15%	2.96%	4.08%	4.30%	0.50%
Transporte Hormigón	10.90%	13.11%	5.98%	13.64%	12.04%	24.81%	17.72%	24.38%	25.72%	3.00%
Transporte Silicato de Hierro	0.81%	0.97%	0.44%	1.01%	0.89%	1.84%	1.32%	1.81%	1.91%	0.22%
Uso silicato - precio árido natural										
Chancado Silicato de Hierro	0.40%	0.43%	0.86%	0.64%	0.55%	1.14%	0.55%	0.94%	0.02%	0.51%
Mezclado Hormigón	0.21%	0.25%	0.41%	0.39%	0.34%	0.62%	0.33%	0.43%	0.01%	0.24%
Producción Agua	0.01%	0.01%	0.02%	0.01%	0.01%	0.06%	0.01%	0.02%	0.01%	4.51%
Producción Árido fino (arena)	0.68%	0.93%	0.09%	2.80%	2.49%	1.60%	2.71%	1.38%	0.01%	2.86%
Producción Árido grueso (grava)	0.70%	2.83%	0.40%	6.26%	7.49%	1.57%	5.69%	1.32%	0.03%	1.60%
Producción Cemento	81.20%	30.80%	42.05%	62.61%	62.21%	58.29%	54.79%	59.99%	1.30%	75.03%
Producción Silicato de Hierro	2.35%	57.12%	52.29%	10.78%	12.65%	4.61%	15.63%	4.25%	97.90%	11.64%
Transporte Árido fino (arena)	0.64%	0.34%	0.17%	0.73%	0.63%	1.42%	0.90%	1.40%	0.03%	0.16%
Transporte Árido grueso (grava)	0.59%	0.31%	0.16%	0.67%	0.58%	1.31%	0.82%	1.29%	0.03%	0.15%
Transporte Cemento	1.78%	0.94%	0.48%	2.03%	1.76%	3.96%	2.50%	3.90%	0.09%	0.44%
Transporte Hormigón	10.64%	5.62%	2.85%	12.17%	10.51%	23.67%	14.95%	23.35%	0.54%	2.65%
Transporte Silicato de Hierro	0.79%	0.42%	0.21%	0.90%	0.78%	1.76%	1.11%	1.73%	0.04%	0.20%

Tabla 26: Desglose de los impactos por procesos de una mezcla asfáltica para 100 m² de tratamiento superficial simple (TSS).

	CC	Acid	E.ADU	E.Mar	E.Ter	Ozo	Smog	Fósil	Min	H2O
Línea Base										
Producción Ligante (emulsión asfáltica)	59.04%	49.62%	45.66%	36.34%	29.77%	83.88%	53.29%	83.36%	47.03%	28.81%
Transporte Ligante (emulsión asfáltica)	1.34%	0.83%	1.35%	1.02%	0.97%	0.42%	0.59%	0.46%	2.20%	0.45%
Producción Árido grueso (grava)	4.18%	20.02%	9.05%	24.98%	33.06%	1.33%	10.79%	1.24%	6.16%	12.83%
Transporte Árido grueso (grava)	3.51%	2.19%	3.54%	2.68%	2.56%	1.10%	1.56%	1.21%	5.80%	1.18%
Mezclado Mezclado ligante+agregado	5.50%	4.61%	9.99%	6.52%	6.38%	1.40%	17.24%	1.11%	2.36%	2.18%
Transporte Mezclado ligante+agregado	15.38%	9.61%	15.52%	11.73%	11.21%	4.83%	6.85%	5.31%	25.40%	5.15%
Fin de Vida Silicato de Hierro	11.05%	13.11%	14.90%	16.73%	16.05%	7.04%	9.66%	7.30%	11.05%	49.40%
Uso silicato - precio cero										
Chancado Silicato de Hierro	2.58%	4.09%	18.82%	3.85%	4.11%	1.04%	1.21%	0.96%	3.10%	9.34%
Producción Ligante (emulsión asfáltica)	61.51%	65.43%	42.88%	53.13%	49.13%	88.06%	59.38%	87.65%	48.05%	64.00%
Transporte Ligante (emulsión asfáltica)	1.39%	1.10%	1.27%	1.49%	1.61%	0.44%	0.66%	0.48%	2.25%	0.99%
Transporte Silicato de Hierro	5.07%	4.01%	4.61%	5.43%	5.86%	1.60%	2.42%	1.77%	8.22%	3.62%
Mezclado Mezclado ligante+agregado	7.76%	8.22%	12.70%	12.90%	14.25%	2.00%	26.00%	1.58%	3.26%	6.55%
Transporte Mezclado ligante+agregado	21.68%	17.15%	19.72%	23.20%	25.05%	6.86%	10.33%	7.56%	35.12%	15.49%
Uso silicato - precio árido natural										
Chancado Silicato de Hierro	2.25%	0.63%	1.52%	2.34%	2.11%	0.99%	0.90%	0.92%	0.02%	2.97%
Producción Ligante (emulsión asfáltica)	53.44%	10.09%	3.46%	32.24%	25.21%	84.51%	44.31%	84.01%	0.24%	20.37%
Producción Silicato de Hierro	13.12%	84.58%	91.93%	39.31%	48.69%	4.04%	25.38%	4.15%	99.50%	68.18%
Transporte Ligante (emulsión asfáltica)	1.21%	0.17%	0.10%	0.90%	0.82%	0.42%	0.49%	0.46%	0.01%	0.32%
Transporte Silicato de Hierro	4.41%	0.62%	0.37%	3.29%	3.01%	1.54%	1.80%	1.69%	0.04%	1.15%
Mezclado Mezclado ligante+agregado	6.74%	1.27%	1.03%	7.83%	7.31%	1.91%	19.40%	1.52%	0.02%	2.09%
Transporte Mezclado ligante+agregado	18.84%	2.64%	1.59%	14.08%	12.85%	6.58%	7.71%	7.24%	0.17%	4.93%

Tabla 27: Desglose de los impactos por procesos de un núcleo de terraplén con 1 metro de largo, 6 metros de ancho y 60 cm de espesor.

	CC	Acid	E.ADU	E.Mar	E.Ter	Ozo	Smog	Fósil	Min	H2O
Línea base										
Maquinaria Diésel		9.9%	8.0%	2.7%	10.7%	9.0%	7.3%	10.2%	6.8%	1.8%
Producción Árido grueso (grava)		25.4%	60.0%	39.6%	38.0%	65.5%	17.7%	52.1%	16.2%	31.7%
Transporte Árido grueso (grava)		21.3%	6.6%	15.5%	6.2%	5.1%	14.7%	7.6%	15.8%	29.8%
Producción Silicato de Hierro		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Chancado Silicato de Hierro		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Transporte Silicato de Hierro		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Fin de Vida Silicato de Hierro		43.3%	25.4%	42.1%	25.1%	20.5%	60.4%	30.1%	61.2%	36.7%
Silicato 100% - precio cero										
Maquinaria Diésel		20.8%	34.0%	2.9%	46.2%	46.9%	20.4%	43.5%	19.3%	3.7%
Producción Árido grueso (grava)		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Transporte Árido grueso (grava)		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Producción Silicato de Hierro		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Chancado Silicato de Hierro		26.7%	33.3%	78.0%	22.3%	21.9%	31.2%	18.8%	28.4%	26.4%
Transporte Silicato de Hierro		52.5%	32.7%	19.1%	31.5%	31.2%	48.4%	37.7%	52.3%	69.9%
Fin de Vida Silicato de Hierro		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Silicato 100% - precio árido natural										
Maquinaria Diésel		8.1%	0.7%	0.1%	9.7%	7.7%	9.0%	6.9%	8.5%	0.0%
Producción Árido grueso (grava)		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Transporte Árido grueso (grava)		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Producción Silicato de Hierro		61.0%	97.8%	97.9%	79.0%	83.5%	55.9%	84.1%	56.2%	99.9%
Chancado Silicato de Hierro		10.4%	0.7%	1.6%	4.7%	3.6%	13.8%	3.0%	12.5%	0.0%
Transporte Silicato de Hierro		20.5%	0.7%	0.4%	6.6%	5.2%	21.3%	6.0%	22.9%	0.0%
Fin de Vida Silicato de Hierro		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

