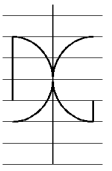




UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería de la Construcción y de  
Proyectos de Ingeniería Civil

IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA IMPACT  
2002+ PARA EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE UN  
EDIFICIO EJECUTADO CON ELEMENTOS  
PREFABRICADOS DE HORMIGÓN. PROPUESTA DE  
ALTERNATIVAS QUE SUPONGAN MEJORAS  
ENERGÉTICAS Y MEDIOAMBIENTALES

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería del Hormigón

AUTOR/A: Holguera Gutiérrez, Pablo

Tutor/a: Mellado Romero, Ana María

Cotutor/a: Paya Bernabeu, Jorge Juan

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



DEPARTAMENTO  
DE INGENIERÍA DE  
LA CONSTRUCCIÓN  
Y DE PROYECTOS DE  
INGENIERÍA CIVIL

# MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DEL HORMIGÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER  
CURSO ACADÉMICO 2023/2024

**IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA  
IMPACT 2002+ PARA EL ANÁLISIS DE CICLO  
DE VIDA DE UN EDIFICIO EJECUTADO CON  
ELEMENTOS PREFABRICADOS DE HORMIGÓN.  
PROPUESTA DE ALTERNATIVAS QUE  
SUPONGAN MEJORAS ENERGÉTICAS Y  
MEDIOAMBIENTALES.**

**Autor/a: Pablo Holguera Gutiérrez**

**Tutor/a: Ana María Mellado Romero**

**Cotutor/a: Jordi Payá Bernabeu**

Valencia, Julio de 2024

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y  
PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**



**MUIH**

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>6</b>
<b>1.1 LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL Y CONSECUENCIAS PRINCIPALES.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2 INDICADORES AMBIENTALES Y CATEGORÍAS DE IMPACTO .....</b>	<b>8</b>
<b>1.3 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y METODOLOGÍAS PRINCIPALES</b>	<b>10</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>12</b>
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>13</b>
<b>3.1 METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV) .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1.1 ETAPA DE DEFINICIÓN DE OBJETIVO Y ALCANCE.....</b>	<b>13</b>
<b>3.1.2 ETAPA DE ANÁLISIS DEL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA (ICV).....</b>	<b>15</b>
<b>3.1.3 ETAPA DE EVALUACIÓN DE IMPACTO DEL CICLO DE VIDA (EICV) .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1.4 ETAPA DE INTERPRETACIÓN .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2. METODOLOGÍA IMPACT 2002+.....</b>	<b>18</b>
<b>3.3 SOFTWARE DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA SIMAPRO .....</b>	<b>22</b>
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>23</b>
<b>4.1 MATERIALES.....</b>	<b>23</b>
<b>4.1.1 ETAPA 1: CIMENTACIÓN Y SOLERA .....</b>	<b>23</b>
<b>4.1.2 ETAPA 2: ESTRUCTURA PREFABRICADA.....</b>	<b>30</b>
<b>4.1.3 ETAPA 3: FORJADOS.....</b>	<b>34</b>
<b>4.1.4 ETAPA 4: ESCALERA IN SITU.....</b>	<b>40</b>
<b>4.2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>45</b>
<b>4.2.1 RESULTADOS DE LA ETAPA DE CIMENTACIÓN Y SOLERA....</b>	<b>45</b>
<b>4.2.2 RESULTADOS DE LA ETAPA DE ESTRUCTURA PREFABRICADA .....</b>	<b>56</b>
<b>4.2.3 RESULTADOS DE LA ETAPA DE FORJADOS .....</b>	<b>63</b>
<b>4.2.4 RESULTADOS DE LA ETAPA DE LA ESCALERA IN SITU.....</b>	<b>70</b>
<b>4.2.5 RESULTADOS DEL PROCESO COMPLETO .....</b>	<b>76</b>
<b>4.3 PLANTEAMIENTO DE MEDIDAS DE MEJORA PARA EL PROCESO DE CREACIÓN DE GRABADOS CALCOGRÁFICOS.....</b>	<b>86</b>
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>89</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>90</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Esquema de las relaciones entre categorías de daño medio y de daños finales	18
Figura 4.1. Plano de la cimentación del edificio	23
Figura 4.2. Planos en vista isométrica de la estructura del edificio	30
Figura 4.3. Planos en planta de los forjados de losa alveolar	35
Figura 4.4. Plano en planta de la escalera in situ	40
Figura 4.5. Plano en alzado de la escalera in situ	40
Figura 4.6. Diagrama de árbol para el daño a la salud humana de la etapa de cimentación y solera	45
Figura 4.7. Diagrama de árbol para el daño a la calidad del ecosistema de la etapa de cimentación y solera	46
Figura 4.8. Diagrama de árbol para el daño de impacto al cambio climático de la etapa de cimentación y solera	47
Figura 4.9. Diagrama de árbol para el daño a los recursos de la etapa de cimentación y solera	48
Figura 4.10. Gráfica de barras de las categorías de daño de punto medio de la etapa de cimentación y solera	50
Figura 4.11. Gráfica de barras de las categorías de daño final de la etapa de cimentación y solera	51
Figura 4.12. Gráfica de barras normalizada de las categorías de daño final de la etapa de cimentación y solera	53
Figura 4.13. Gráfica de barras normalizada de las categorías de daño de punto medio de la etapa de cimentación y solera	54
Figura 4.14. Diagrama de árbol para el daño a la salud humana de la etapa de la estructura prefabricada	56
Figura 4.15. Diagrama de árbol para el daño de impacto al cambio climático de la etapa de la estructura prefabricada	57

Figura 4.16. Diagrama de árbol para el daño a la calidad del ecosistema de la etapa de la estructura prefabricada	58
Figura 4.17. Diagrama de árbol para el daño a los recursos de la etapa de la estructura prefabricada	59
Figura 4.18. Gráfica de barras normalizada de las categorías de daño final de la etapa de la estructura prefabricada	60
Figura 4.19. Gráfica de barras normalizada de las categorías de daño de punto medio de la etapa de la estructura prefabricada	61
Figura 4.20. Diagrama de árbol para el daño a la salud humana de la etapa de los forjados	63
Figura 4.21. Diagrama de árbol para el daño a la calidad del ecosistema de la etapa de los forjados	64
Figura 4.22. Diagrama de árbol para el daño de impacto al cambio climático de la etapa de los forjados	65
Figura 4.23. Diagrama de árbol para el daño a los recursos de la etapa de los forjados	66
Figura 4.24. Gráfica de barras normalizada de las categorías de daño final de la etapa de los forjados	67
Figura 4.25. Gráfica de barras normalizada de las categorías de daño de punto medio de la etapa de los forjados	68
Figura 4.26. Diagrama de árbol para el daño a la salud humana de la etapa de la escalera in situ	70
Figura 4.27. Diagrama de árbol para el daño a la calidad del ecosistema de la etapa de la escalera in situ	71
Figura 4.28. Diagrama de árbol para el daño al cambio climático de la etapa de la escalera in situ	72
Figura 4.29. Diagrama de árbol para el daño a los recursos de la etapa de la escalera in situ	73
Figura 4.30. Gráfica de barras normalizada de las categorías de daño final de la etapa de la escalera in situ	74

Figura 4.31. Gráfica de barras normalizada de las categorías de daño de punto medio de la etapa de la escalera in situ	75
Figura 4.32. Diagrama de árbol para el daño a la salud humana del proceso completo	76
Figura 4.33. Diagrama de árbol para el daño a la calidad del ecosistema del proceso completo	77
Figura 4.34. Diagrama de árbol para el daño al cambio climático del proceso completo	78
Figura 4.35. Diagrama de árbol para el daño a los recursos de la etapa del proceso completo	79
Figura 4.36. Gráfica de barras normalizada de las categorías de daño final del proceso completo	81
Figura 4.37. Gráfica de barras normalizada de las categorías de daño de punto medio del proceso completo	82
Figura 4.38. Gráfica de puntuación única de las categorías de impacto de daño en cada etapa del proceso	84
Figura 4.39. Gráfica de puntuación única de las categorías de impacto de punto medio en cada etapa del proceso	85
Figura 4.40. Comparativa en categorías de impacto final de paneles con 10 y 16 cm de espesor	87

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Cálculo de excavación y hormigón para la cimentación	24
Tabla 4.2. Cálculo de masa y volumen de la armadura de la cimentación	24
Tabla 4.3. Cálculo del hormigón y acero de la solera	25
Tabla 4.4. Cálculo del XPS, la lámina anti-radón y el mortero de solera	25
Tabla 4.5. Resumen de los resultados obtenidos en la etapa 1	29
Tabla 4.6. Cálculo de hormigón y acero en la estructura prefabricada	31
Tabla 4.7. Resumen de los resultados obtenidos en la etapa 2	33
Tabla 4.8. Cálculo de hormigón y acero de la placa alveolar	35
Tabla 4.9. Cálculo de acero de la capa de compresión	36
Tabla 4.10. Resumen de los resultados obtenidos en la etapa 3	39
Tabla 4.11. Cálculo de acero de la cimentación de la escalera	41
Tabla 4.12. Cálculo de acero de la escalera in situ	41
Tabla 4.13. Resumen de los resultados obtenidos en la etapa 4	44

# 1. Introducción

## 1.1 LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL Y CONSECUENCIAS PRINCIPALES

El mundo y el medio ambiente son comprendidos como un sistema interconectado, donde la materia viva, tanto animal como vegetal, están entrelazadas con la materia inerte. Es inevitable separar la relación entre los seres humanos y la naturaleza, dado que formamos parte de ella y dependemos de su evolución continuamente. Con el avance tecnológico, la percepción del medio ambiente ha pasado de ser una amenaza, a considerarse un entorno en peligro debido a la actividad humana (Lezama, 2001).

El desarrollo industrial ha sido un punto de inflexión que ha influido en todos los aspectos de la vida del ser humano, desde las actividades más básicas como la obtención de alimento, hasta conceptos sociales muy complejos como la política o la economía. El ser humano ha transformado la naturaleza en función de sus necesidades, lo que ha provocado un rápido progreso tecnológico, a su vez que numerosas consecuencias negativas. La industrialización de los procesos productivos ha incrementado los niveles de contaminación ambiental a un ritmo alarmante en los últimos 100 años, y si no se toman medidas radicales para frenarlo, el planeta podría enfrentarse a unas consecuencias irreparables en el futuro.

La contaminación ambiental se define como cualquier emisión de sustancias o energía no deseada al medio ambiente, ya sea en la atmósfera, suelo o agua. Estas emisiones pueden alcanzar concentraciones que afectan el bienestar y la salud humana, así como a la interacción y aprovechamiento de los recursos naturales (Shafi, 2005).

Hay dos razones fundamentales para la preocupación actual por la contaminación ambiental: la salud humana y la protección del medio ambiente. El impacto negativo en la salud puede manifestarse a nivel individual, debido a los efectos nocivos de la contaminación en el aire, el agua y los alimentos; y a nivel global, con el deterioro del entorno. En España, se estima que alrededor del 11% de las muertes en personas mayores de 14 años son causadas por la contaminación atmosférica, cifra que se repite año tras año (Vohra *et al.*, 2021). Además, la contaminación es responsable de un alto porcentaje de enfermedades cardíacas y respiratorias, como paradas cardiorrespiratorias y el cáncer de pulmón, así como insuficiencia renal y otras infecciones (Rodríguez, 2009).



Otra de las consecuencias más importantes de la contaminación ambiental, que actualmente está ganando cada vez más importancia, es el cambio climático. Este se define como la variación en los patrones de tiempo atmosférico a largo plazo, que son los que determinan los diferentes climas. Aunque pueden variar debido a causas naturales (como los ciclos solares), desde la Revolución Industrial son principalmente provocados por la acción humana en el ecosistema (Díaz Cordero, 2012).

Durante el Acuerdo de París de 2015, la ONU propuso el objetivo de no superar un incremento de temperatura del planeta de 1,5° C en los siguientes 20 años (este incremento es con respecto a la época preindustrial). También se estimó que, si este incremento superase los 2° C, podría haber daños irreversibles en las climatologías de algunas zonas del planeta, volviendo imposible la tarea de un desarrollo resiliente al clima (UNEP, 2021). Este incremento en la temperatura del planeta se conoce como calentamiento global, y es provocado principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera. La emisión de estos gases puede ser un proceso natural, como la descomposición de animales y plantas, pero el mayor aporte es mediante procesos artificiales, como la quema de combustibles fósiles como el carbón o el petróleo, o también mediante determinadas actividades del sector agrícola (Saynes Santillán, 2016).

Sin embargo, la contaminación atmosférica no es el único tipo de contaminación preocupante: las contaminaciones acuática y terrestre no son factores que dejar de lado. La contaminación acuática supone un alto riesgo para la salud de las especies de fauna y flora que habiten zonas contaminadas, pudiendo afectar a factores como el comportamiento o la capacidad reproductiva. Las principales fuentes de contaminación del agua son las industrias agrícolas, alimenticias y de productos cosméticos y de cuidado personal. Se han encontrado cuerpos de agua contaminados con productos farmacéuticos y narcóticos, los cuales son capaces de dañar componentes bióticos en el medio ambiente (López-Pacheco *et al.*, 2019). La contaminación terrestre también es un factor crucial a considerar, ya que el suelo es considerado como un recurso natural no renovable, debido a la lenta y difícil recuperación de este. El suelo cumple funciones ambientales muy importantes, como lo son el almacenamiento de nutrientes y de materia orgánica, además de ser utilizado para fines de agricultura, ganadería y minería. El crecimiento del sector agroalimentario provoca un aprovechamiento cada vez más intensivo del terreno, y el uso de fertilizantes y plaguicidas lleva a la degradación del suelo, provocando en algunas ocasiones pérdidas irreversibles para determinadas actividades agrícolas y ganaderas (Silva Arroyave, 2009).

## 1.2 INDICADORES AMBIENTALES Y CATEGORÍAS DE IMPACTO

Los indicadores ambientales son una manera de evaluar el estado del medio ambiente. Su función principal es ofrecer información de los diferentes componentes ambientales, con el propósito de representar las condiciones medioambientales de una región determinada y poder conectar esta información con las pertinentes instituciones científicas, políticas o sociales (TheCircularCampus, 2024). Los indicadores pueden ser cuantitativos, que son basados en parámetros que pueden dar información sobre un determinado fenómeno; o cualitativos, que están más centrados en percepciones y observaciones. Estos indicadores ambientales son de suma importancia por los siguientes motivos:

- Facilitan la medición y el seguimiento de factores ambientales a lo largo del tiempo, permitiendo así identificar patrones y poder prevenir problemas en un futuro.
- Cuantifican los impactos de las acciones humanas en el medio ambiente.
- Facilitan el traslado de información a diferentes públicos, permitiendo la comprensión de problemas complejos de una manera sencilla.
- Ayudan a crear nuevas propuestas de medidas ambientales, ofreciendo datos y argumentos respaldados en información.
- Permiten evaluar la eficacia de propuestas ya vigentes, con el fin de realizar modificaciones de mejora.

Los indicadores ambientales pueden ser de tres tipos:

- Tipo I: Ofrecen datos disponibles en todo momento, debido a una continua monitorización, como por ejemplo la información meteorológica.
- Tipo II: Ofrecen información mediante cálculos de los datos con una continua monitorización, apoyados en otros datos adicionales
- Tipo III: Son indicadores conceptuales que carecen de una base matemática o de datos existentes.

Además de estos tipos, los indicadores se pueden subdividir en las siguientes categorías: aire y clima, naturaleza, sectores económicos, sostenibilidad y salud (MITECO, 2024). A modo de ejemplo, se plantean algunos de los indicadores ambientales más importantes:

- Índice de Bienestar Económico Sostenible (IBES): permite medir la sostenibilidad del bienestar de una población, aplicando un coeficiente de desigualdad socioeconómica (el coeficiente de Gini).
- Índice de sostenibilidad Ambiental (ISA): evalúa las emisiones de agentes contaminantes, la utilización de componentes agroquímicos, el volumen y calidad de aguas, el crecimiento de población y el consumo y eficiencia energética.
- Índice de Desempeño Ambiental (IDA): permite cuantificar el rendimiento ambiental de las políticas de un país.
- Huella de carbono: indica los gases de efecto invernadero emitidos de forma directa o indirecta por una persona, empresa o ciudad.

Se ha comentado que uno de los objetivos de los indicadores ambientales es cuantificar los impactos de las acciones humanas en el medio ambiente. Esto se realiza mediante las categorías de impacto, que son clasificaciones sistemáticas utilizadas para agrupar y analizar los efectos de una actividad puede tener sobre el medio ambiente. Estas categorías permiten evaluar el impacto ambiental y los estudios de sostenibilidad, ordenando los efectos potenciales y facilitando la comprensión. Se puede hacer una clasificación general de las categorías de impacto:

- Impacto sobre el aire: son efectos relacionados con la calidad del aire debido a la emisión de contaminantes atmosféricos, como gases de efecto invernadero o partículas en suspensión.
- Impacto sobre el agua: son efectos que afectan a la calidad y disponibilidad de los recursos hídricos, como la contaminación de cuerpos de agua por vertidos industriales o la alteración de caudales de ríos y lagos.
- Impacto sobre el suelo: afectan a la integridad física, química y biológica del suelo, como la contaminación con productos químicos y metales pesados.
- Impacto sobre la biodiversidad: son efectos sobre la diversidad biológica (flora, fauna y ecosistemas), como la destrucción de hábitats naturales o la pérdida de especies.
- Impacto sobre el clima: efectos que contribuyen al cambio climático, como el calentamiento global o los cambios en patrones atmosféricos.
- Impacto social y económico: efectos en la especie humana, su bienestar y su economía.

- Impacto paisajístico y cultural: son efectos sobre la estética del paisaje y el patrimonio cultural.

Las categorías de impacto permiten una evaluación comprensiva y estructurada, y la manera de aplicarlas a un estudio es mediante la metodología del análisis de ciclo de vida.

### **1.3 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA Y METODOLOGÍAS PRINCIPALES**

El análisis de ciclo de vida es una metodología que permite evaluar los impactos que un producto o proceso puede tener sobre el medio ambiente, desde las primeras etapas como son la obtención de la materia prima, hasta el final de su vida útil, incluyendo la gestión de residuos y reciclaje, si lo hubiera.

Esta técnica surge del hecho de que todas las actividades y procesos tienen algún tipo de impacto sobre el medio ambiente, consumen recursos y energía y generan algún tipo de residuo o emisión al medio ambiente. Tiene su origen en la década de los 60, donde se empieza a surgir el concepto de considerar los impactos ambientales de los productos a lo largo de su vida. El primer estudio data del año 1972, realizado por el Instituto de Investigaciones de Recursos y Medio Ambiente de EE. UU., realizado para la empresa Coca-Cola. Durante la década de los 80 comienza el desarrollo más formal de metodologías, donde se empiezan a introducir conceptos e ideas que hoy en día se entienden como básicos. En la década de los 90, la metodología del análisis de ciclo de vida se estandariza y gana reconocimiento internacional. La Organización Internacional de Normalización (ISO) desarrolla las normas que establecen los principios para llevar a cabo un ACV, siendo esta la serie ISO 14040. De la década de los 2000 en adelante, esta metodología se comienza a integrar cada vez más en las políticas públicas y en las empresas, además de expandirse a nuevas áreas como el diseño sostenible y la huella de carbono (Rodríguez Mazahua, 2016). En el contexto del análisis de ciclo de vida, las categorías de impacto definidas en el apartado anterior se clasifican en categorías de punto medio y categorías de punto final. Esta distinción se refiere al enfoque que se le da a cada tipo de impacto en el análisis:

- Las categorías de impacto de punto medio se centran en cambios ambientales específicos que se pueden medir directamente a partir de los inventarios de emisiones y el uso de recursos. Se denominan de punto medio porque se encuentran en un punto

intermedio en la cadena de causalidad entre las emisiones y los efectos finales sobre la salud humana o el ecosistema.

- Las categorías de impacto de punto final se refieren a los efectos finales que tienen las cargas ambientales sobre áreas clave como la salud humana o la calidad del ecosistema. Se denominan de punto final porque son las categorías más alejadas del inventario de emisiones y más cerca de los impactos que afectan directamente a las personas o al medio ambiente.

Existen diferentes metodologías de análisis de ciclo de vida, y cada una utiliza su propio enfoque sobre las categorías de impacto. Las más relevantes son:

- Metodología CML: fue desarrollada por el Instituto de Ciencias Medioambientales de la Universidad de Leiden, en Países Bajos. Este método se centra en el uso de las categorías de impacto de punto medio (Guinée, 2001).
- Método Eco-Indicator: fue desarrollado por PRé Sustainability, también en los Países Bajos, y se enfoca en las categorías de impacto de punto final (Goedkoop y Spriensma, 2000).
- Metodología IMPACT 2002+: esta metodología fue desarrollada en el Instituto de Tecnología de Lausanne (EPFL) en Suiza, y combina tanto categorías de impacto de punto medio como de punto final (Jolliet *et al.*, 2003).

Las categorías de impacto son un complemento al análisis que cada metodología puede moldear para ajustarse a sus necesidades. En este caso, la metodología IMPACT 2002+ es de las más completas debido a que proporciona una visión más detallada de los impactos específicos, así como una comprensión adicional en áreas de protección clave, debido a que combina ambos tipos de categorías de impacto.

## 2. Objetivos

El objetivo general del presente trabajo es analizar los impactos medioambientales del proceso de construcción de un edificio de dos plantas formado principalmente de elementos prefabricados de hormigón. Para ello, se realiza un análisis del ciclo de vida mediante la metodología IMPACT 2002+ utilizando el software SimaPro, que es un programa de análisis de ciclo de vida con esta metodología integrada.

No se analizará la totalidad del proceso constructivo, ya que la intención es estudiar principalmente los elementos estructurales. Más adelante, en el apartado de resultados, se explica con más exactitud lo que se ha tenido en cuenta en el estudio, y lo que se ha excluido.

Para la consecución del objetivo principal, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- El primer objetivo específico es determinar el impacto ambiental de las categorías de daño de punto medio definidas en la propia metodología. Estas categorías representan los efectos negativos del proceso situados en una posición intermedia entre los resultados del análisis y las categorías de impacto de daño final.
- El segundo objetivo específico es determinar el impacto ambiental de las categorías de daño final definidas en la propia metodología. Estos daños representan las consecuencias negativas finales del proceso, y a su vez sirven como una forma de agrupar y clasificar las distintas categorías de daño de punto medio.
- El último objetivo específico consiste en analizar los resultados obtenidos directamente del análisis de ciclo de vida, con el fin de hacer las valoraciones finales y poder proponer algunas mejoras que se puedan aplicar directamente al proceso, y que permitan reducir el impacto de este en el medio ambiente.

Se trata de un proceso cercano, lo que significa que todas las mediciones y datos se tomarán o bien de planos aprobados por la ingeniería que ha diseñado el edificio, o bien mediciones reales tomadas in situ.

## 3. Materiales y métodos

### 3.1 METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)

Para estudiar el impacto medioambiental del proceso constructivo objeto del trabajo, se decide utilizar la metodología del análisis de ciclo de vida. Esta es una técnica que permite obtener el impacto ambiental potencial de un proceso desde su etapa inicial (la obtención de la materia prima) hasta su disposición final, abarcando la producción, uso, transportes de materiales, consumo de energía y generación de residuos.

Actualmente hay dos normas europeas que definen el procedimiento de un análisis de ciclo de vida:

- Norma UNE-EN ISO 14040 Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia. ISO 14040:2006 (ISO, 2006a).
- Norma UNE-EN ISO 14044 Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Requisitos y Directrices. ISO 14044:2006 (ISO, 2006b).

Tal y como se indica en las normativas, la metodología se divide en cuatro etapas:

- 1) Etapa de definición de objetivo y alcance: varía en función del tipo de proceso, en este caso son las que constan en el apartado de objetivos del trabajo.
- 2) Etapa de análisis de inventario del ciclo de vida (ICV): consiste en recopilar todos los datos de entradas (materiales, transporte y energía) y salidas (residuos) del proceso.
- 3) Etapa de evaluación de impacto del ciclo de vida (EICV): aquí se realizan los cálculos pertinentes para evaluar los resultados ambientales en función del inventario.
- 4) Etapa de interpretación: se estudian los resultados obtenidos para sacar conclusiones del trabajo y realizar la toma de decisiones, en base al objetivo y alcance definidos.

#### 3.1.1 ETAPA DE DEFINICIÓN DE OBJETIVO Y ALCANCE

En esta fase inicial del ACV se exponen los motivos del desarrollo del estudio y se describe al destinatario. La definición de objetivos debe ser clara y coherente, y tiene que incluir los siguientes puntos:

- Identificación de quién realiza el estudio.
- Razones para llevar a cabo el análisis.
- Tipo de información que se espera obtener.

- Previsión de las aplicaciones del estudio y el uso que se dará a los resultados.
- Público objetivo al que se comunicarán los resultados.

El alcance también debe estar claramente definido para garantizar que la amplitud, profundidad y nivel de detalle sean adecuados al objetivo establecido. La etapa deberá de incluir lo siguiente:

- El sistema del proceso en estudio.
- La correcta definición de la unidad funcional.
- La definición de los límites del sistema.
- La de asignación de cargas ambientales, las categorías de impacto y la metodología de evaluación.
- Los requisitos de las fuentes y datos seleccionados, así como los requisitos de calidad correspondientes.
- Las suposiciones y limitaciones del sistema.

Un sistema puede tener múltiples funciones, y las que se elijan dependerán del objetivo y alcance definidos para el ACV. La unidad funcional es la referencia que permite cuantificar las funciones identificadas y sirve como base para establecer las relaciones entre las entradas y salidas del proceso, expresadas matemáticamente. El análisis del ciclo de vida se lleva a cabo definiendo los sistemas del producto, y los límites de estos sistemas determinan los procesos. Estos procesos unitarios incluyen las fases que se considerarán y los criterios para su selección. Hay 6 fases principales a considerar en el análisis:

- Obtención de materias primas: incluye todas las actividades relacionadas con la adquisición las de materias primas y la energía utilizada para ello.
- Manufactura y procesamiento de los materiales: abarca desde la introducción de las materias primas al proceso hasta la obtención del producto final.
- Transporte y distribución: esta fase cubre las operaciones de movimiento de materiales a lo largo del proceso. La distribución se refiere al transporte del producto final a sus destinatarios, pero en este caso, al ser un edificio y no un producto de mercado, esto no se tiene en cuenta.
- Uso, reutilización y mantenimiento: abarca desde la distribución del producto hasta el final de su vida útil, momento en el cual se convierten en residuos. También, en este caso esta fase hay que cogerla con pinzas, ya que, al ser un edificio, no se va a



tener en cuenta su fase de mantenimiento ni etapa de final de vida. El estudio se enfoca solo en la obtención de materiales y el proceso constructivo.

- Reciclaje: esta fase abarca la recolección de los residuos y su reincorporación a otro proceso de fabricación.
- Gestión de residuos: abarca el tratamiento de los residuos generados.

Por último, se deben asignar las cargas ambientales y los tipos de impacto que se quieran evaluar. Para ello se selecciona una metodología que se ajuste a los objetivos del estudio. Existen diversas metodologías para la evaluación del ACV, dependiendo de las cargas e impactos que se deseen interpretar.

En este trabajo se emplea la metodología IMPACT 2002+, desarrollada por el Instituto Federal Suizo de Tecnología de Lausana (EPFL) (Jolliet *et al.*, 2003). Con esta metodología se determina el impacto ambiental de los datos ingresados en el sistema, clasificados en 14 categorías de impacto de punto medio, a su vez agrupadas en 4 categorías de daño final. Más adelante, se detallará esta metodología en profundidad.

### **3.1.2 ETAPA DE ANÁLISIS DEL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA (ICV)**

En esta segunda etapa se recopilan todos los datos y se realizan los cálculos pertinentes para cuantificar con precisión las entradas y salidas del sistema. La recopilación de datos obtenida servirá como punto de partida para la etapa del EICV. Es recomendable que los datos a utilizar se obtengan directamente del proceso de estudio, a través de mediciones, estudios de balance de materia y energía, fuentes bibliográficas adecuadas, etc. El inventario tiene que abarcar los siguientes puntos:

- Diagramas de flujo que representen claramente el estudio.
- Las unidades deben de estar correctamente descritas, y con los respectivos datos que se asocien a cada una de ellas.
- Las metodologías utilizadas en la recolección de los datos y los métodos de cálculo empleados también deben de estar bien definidos.
- Las unidades de medida deben de estar especificadas en cada parámetro
- En casos especiales o de irregularidad, debe de existir una descripción detallada.

Como se ha descrito, todos los procedimientos de cálculo realizados deben de estar documentados y explicados adecuadamente, además de que sean coherentes. Los datos

tienen que estar validados y verificados de alguna forma. También es fundamental que los datos estén bien relacionados con los procesos descritos y con la unidad funcional. Para ello, los datos se calculan y exponen en base a la unidad funcional descrita en el proyecto.

### **3.1.3 ETAPA DE EVALUACIÓN DE IMPACTO DEL CICLO DE VIDA (EICV)**

En esta etapa se valoran los resultados de impacto medioambiental en base a los datos obtenidos en la etapa del inventario. Esto se logra relacionando estos datos con las categorías de daño establecidas por la metodología que se utilice. El “impacto” se trata como una anticipación a un efecto, es decir, no se está determinando un impacto real, sino que se cuantifica la contribución de cada uno de los datos a las diferentes categorías de impacto de la metodología en base a una serie de cálculos y estimaciones que se intentan acercar lo máximo posible a la realidad.

Esta etapa de evaluación está dividida en 4 fases:

- Selección de las categorías de impacto: varían en función de la metodología seleccionada, que en este caso es la IMPACT 2002+. Ésta abarca 14 categorías de daño medio agrupadas en 4 categorías de daño final. Todas ellas serán descritas en el apartado correspondiente.
- Asignación de los resultados del inventario: se trata de agrupar las cargas ambientales generadas por el consumo de recursos y la producción de residuos y emisiones, considerando los efectos ambientales de cada uno. Los resultados se pueden asignar a una o varias categorías de daño.
- Cálculo de resultados: se obtiene la contribución de cada dato del inventario a los diferentes efectos ambientales en los que participen.
- Elementos optativos: existen 3 maneras de estudiar y comparar los resultados: la normalización, que consiste en valorar la magnitud de los resultados en base a una referencia, con el fin de obtener magnitudes relativas; la agrupación, que consiste en asignar en conjuntos las distintas categorías por características similares o siguiendo una determinada jerarquía; y la ponderación, que convierte los resultados mediante procedimientos numéricos basados en juicios de valor (no tienen base científica)

Cabe destacar que, como se ha mencionado antes, no existe ninguna metodología que acepte una asociación exacta entre los datos obtenidos en el inventario, y los impactos ambientales.

### 3.1.4 ETAPA DE INTERPRETACIÓN

Esta última etapa consiste en analizar toda la información obtenida en el procedimiento, juntando los resultados del ICV y del EICV. Todos los resultados tienen que ser coherentes con los objetivos y el alcance del estudio, para poder llegar a unas conclusiones que se acerquen a una potencial solución real. En ocasiones, será necesario revisar iterativamente los datos utilizados y el alcance establecido para poder lograr una coherencia que, quizás al principio del estudio no se magnifique correctamente.

Esta etapa tiene 3 fases principales:

- Determinación de los aspectos más significativos: se identifican de tres maneras: haciendo un análisis de contribución, que contempla el aporte de cada etapa del proceso a los resultados finales del análisis; realizando un análisis de influencia, donde se valoran las influencias en los distintos aspectos ambientales; y una evaluación de anomalías, donde se detectan cambios inesperados en comparación con los resultados previstos.
- Evaluación: esta fase se realiza para aumentar la veracidad de los resultados obtenidos, y también hay tres metodologías: análisis de integridad, que consiste en valorar si los datos empleados en el análisis son suficientes como para poder sacar unas conclusiones coherentes; análisis de coherencia, que estudia si los datos, cálculos y métodos se han aplicado correctamente al ACV; y el análisis de sensibilidad, que valora el efecto de los datos en la variación de los resultados obtenidos.
- Conclusiones y recomendaciones: tienen como objetivo el entender las limitaciones del proceso y poder hacer una serie de recomendaciones de mejora para el público objetivo del análisis.

### 3.2. METODOLOGÍA IMPACT 2002+

Como se ha mencionado anteriormente, la metodología escogida para realizar el análisis de ciclo de vida será la IMPACT 2002+, que ha sido desarrollada por el Instituto Federal Suizo de Tecnología de Lausana (EPFL) (Jolliet *et al.*, 2003). IMPACT 2002+ hace una combinación de dos metodologías que existían previamente: la CML (Guinée, 2001), que categoriza los resultados según sus efectos a edades tempranas, denominados daños de punto medio; y la Eco-indicator 99 (Goedkoop y Spriensma, 2000), que asocia los daños al final del ciclo causa-efecto, denominados daños finales. Esta combinación se realiza relacionando los daños de punto medio con los daños finales. En la Figura 3.1 se muestra un croquis de cómo están relacionadas ambas categorías de daño.

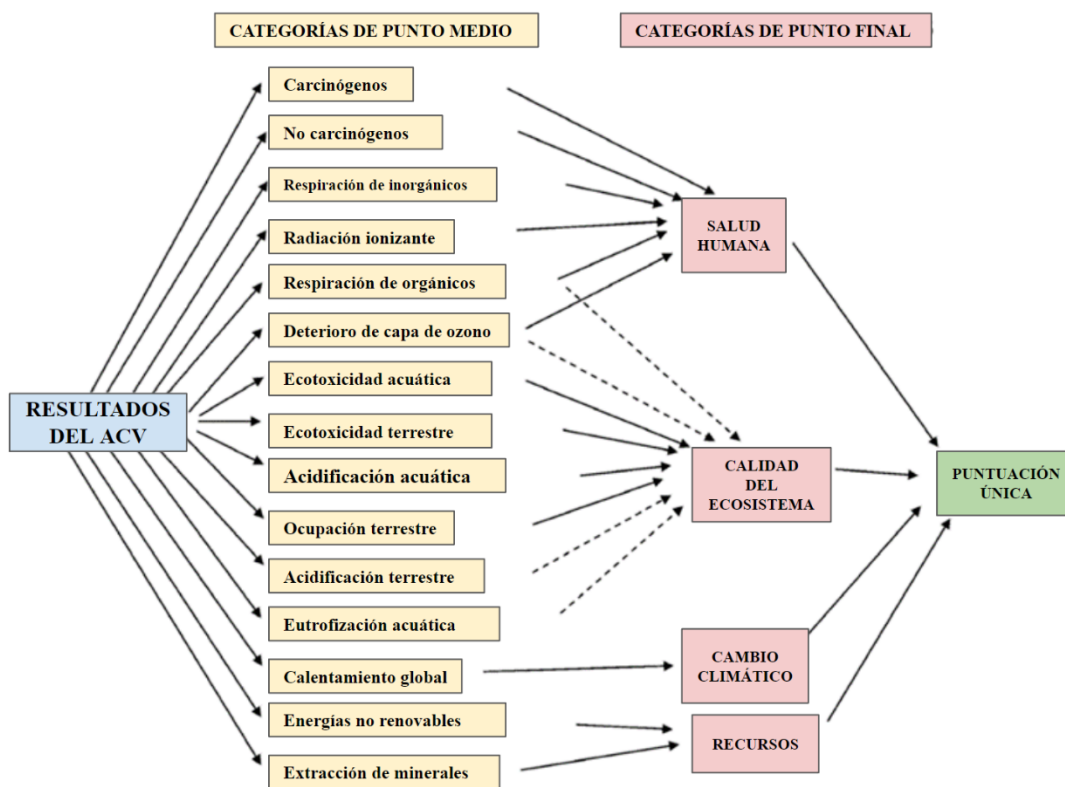


Figura 3.1. Esquema de las relaciones entre categorías de daño medio y de daños finales

A continuación, se describen brevemente todas las categorías de daño de punto medio:

- Toxicidad humana: esta categoría representa los efectos en la salud humana provocados por elementos carcinógenos y no carcinógenos (a veces se pueden separar, como en la figura anterior). Hay algunas excepciones que cuentan con su propia categoría de daño, que se verán a continuación. Este daño de punto medio se

- asocia con la categoría de daño final de impacto a la salud humana y sus unidades son  $\text{kg}_{\text{eq}}$  de cloroetileno en el aire. Esta categoría ha sido desarrollada por el propio método IMPACT 2002+.
- Efectos respiratorios provocados por compuestos inorgánicos: implica los daños causados por elementos inorgánicos emitidos exclusivamente al aire. Este daño de punto medio se asocia con la categoría de daño final de impacto a la salud humana y sus unidades son  $\text{kg}_{\text{eq}}$  de  $\text{PM}_{2.5}$  en el aire. Esta categoría se extrae de la metodología Eco-indicator 99.
  - Radiación ionizante: esta categoría abarca los daños producidos por la emisión de radiación, tanto al aire como al agua. Este daño de punto medio se asocia con la categoría de daño final de impacto a la salud humana y sus unidades son  $\text{Bq}_{\text{eq}}$  de carbono-14 en el aire. Esta categoría se extrae de la metodología Eco-indicator 99.
  - Degradación de la capa de ozono: implica el agotamiento de la capa de ozono provocado por sustancias emitidas a la atmósfera. Este daño de punto medio se asocia con la categoría de daño final de impacto a la salud humana y sus unidades son  $\text{kg}_{\text{eq}}$  de CFC-11 en el aire. Esta categoría se extrae de la metodología Eco-indicator 99.
  - Oxidación fotoquímica: esta categoría únicamente abarca emisiones al aire. Este daño de punto medio se asocia con las categorías de daño final de impacto a la salud humana e impacto a la calidad del ecosistema, y sus unidades son  $\text{Bq}_{\text{eq}}$  de carbono-14 en el agua. Esta categoría se extrae de la metodología Eco-indicator 99.
  - Ecotoxicidad acuática: cuantifica la influencia de la ecotoxicidad en superficies de ríos y lagos, no se contemplan emisiones al océano y aguas subterráneas. Este daño de punto medio se asocia con la categoría de daño final de impacto a la calidad del ecosistema y sus unidades son  $\text{kg}_{\text{eq}}$  de trietilenglicol en el agua. Esta categoría ha sido desarrollada por el propio método IMPACT 2002+.
  - Ecotoxicidad terrestre: es similar a la categoría anterior, pero con la ecotoxicidad a suelo terrestre. Este daño de punto medio se asocia con la categoría de daño final de impacto a la calidad del ecosistema y sus unidades son  $\text{kg}_{\text{eq}}$  de trietilenglicol en el aire. Esta categoría ha sido desarrollada por el propio método IMPACT 2002+.
  - Acidificación acuática: abarcan los efectos provocados por emisiones al aire, agua y suelo, a la acidificación del agua. Este daño de punto medio se asocia con la categoría de daño final de impacto a la calidad del ecosistema y sus unidades son  $\text{kg}_{\text{eq}}$  de  $\text{SO}_2$  en el aire. Esta categoría se extrae de la metodología CML.

- Acidificación acuática: como en la anterior, abarcan los efectos provocados por emisiones al aire, agua y suelo, pero esta vez a la eutroficación del agua. Este daño de punto medio se asocia con la categoría de daño final de impacto a la calidad del ecosistema y sus unidades son  $\text{kg}_{\text{eq}}$  de  $\text{PO}_4^{-3}$  en el aire. Esta categoría se extrae de la metodología CML.
- Acidificación/nitrificación terrestre: en este caso, solo se consideran las emisiones al aire que provocan este efecto. Este daño de punto medio se asocia con la categoría de daño final de impacto a la calidad del ecosistema y sus unidades son  $\text{kg}_{\text{eq}}$  de  $\text{SO}_2$  en el aire. Esta categoría se extrae de la metodología Eco-indicator 99.
- Ocupación terrestre: esta categoría originalmente abarcaba tanto la ocupación de terreno como la conversión de la tierra, en la metodología inicial que la desarrolla, que en este caso es la Eco-indicator 99. Sin embargo, el método IMPACT 2002+ ha modificado esta categoría, únicamente considerando la ocupación. Este daño de punto medio se asocia con la categoría de daño final de impacto a la calidad del ecosistema y sus unidades son  $\text{m}^2_{\text{eq}}$  de tierra orgánica cultivable al año.
- Calentamiento global: en esta categoría únicamente se consideran emisiones al aire. Este daño de punto medio es el único que se asocia con la categoría de daño final de impacto al cambio climático y sus unidades son  $\text{kg}_{\text{eq}}$  de  $\text{CO}_2$  en el aire. Esta categoría se extrae del IPCC 2001 y del IPCC 2007.
- Energías no renovables: esta categoría incluye el consumo energético mediante fuentes no renovables. Este daño de punto medio se asocia con la categoría de daño final de impacto a los recursos y sus unidades pueden ser MJ o  $\text{kg}_{\text{eq}}$  de petróleo crudo. Esta categoría se extrae de Ecoinvent.
- Extracción de minerales: la categoría abarca la extracción de elementos minerales. Este daño de punto medio se asocia con la categoría de daño final de impacto a los recursos y sus unidades pueden ser MJ adicionales o  $\text{kg}_{\text{eq}}$  de hierro. Esta categoría se extrae de la metodología Eco-indicator 99.

A continuación, se describen las categorías de daño final. Todas se han mencionado en las descripciones anteriores, y son cuatro:

- Impacto a la salud humana: Se representa con la unidad DALY (del inglés Disability Adjusted Life Years), la cual representa de una manera general la mortalidad de enfermedades, en años de vida que se han perdido debido a muertes prematuras; y la

morbilidad, que son los años que han sufrido un deterioro de la calidad de vida debido a enfermedad.

- Impacto a la calidad del ecosistema: se representa con la unidad  $\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{año}$ , la cual indica potencialmente las especies desaparecidas por unidad de superficie en un año. Son unas unidades extrañas, que sirven para unificar de alguna forma las categorías de daño medio y poder compararlas en “igualdad de condiciones”.
- Impacto al cambio climático: esta categoría es exactamente la misma que el daño de punto medio de calentamiento global definido anteriormente, y se expresa en las mismas unidades, en  $\text{kg}_{\text{eq}}$  de  $\text{CO}_2$ .
- Impacto a los recursos: abarca la extracción de minerales y el consumo de energías no renovables, representados con las unidades MJ.

Como se puede ver a partir de las categorías de daño, tanto de punto medio como de daños finales, se puede deducir que la metodología de análisis de ciclo de vida IMPACT 2002+ es innovadora en términos de evaluación comparativa, principalmente en lo que se refiere a toxicidad en el ser humano y medio ambiente. No obstante, algunos impactos, como los efectos en el entorno marino y el ruido, no han sido considerados. Esto se debe a que no es un método que pueda considerarse completo al 100%, principalmente porque hay determinados aspectos con los que no se ha logrado establecer una fórmula para relacionarlos entre sí de una manera exacta. A pesar de ello, no cabe duda de que es una técnica muy completa que ha integrado información planteada en métodos anteriores, y por ello se ha decidido su utilización en este estudio.

Para comenzar con la parte más práctica del estudio, lo primero es obtener una lista con los materiales de construcción empleados, con el mayor nivel de detalle que sea posible. Una vez definidos los datos iniciales, se introducen en el software SimaPro. Es necesario emparejar todos los datos calculados a mano con los “inputs” disponibles en las diferentes bases de datos, así que en algunos casos será imperativo el hacer aproximaciones a las definiciones que más se parezcan a las reales.

Para definir correctamente la unidad funcional del estudio, primero hay que comentar que el nivel de detalle en el análisis de ciclo de vida de un elemento tan grande y complejo es demasiado elevado como para abarcarlo en su totalidad.

Con el fin de reducir el alcance del trabajo, se han decidido excluir del análisis elementos ajenos a la función estructural correspondientes a: cableado y elementos de iluminación, tuberías y componentes sanitarios, y muebles de todo tipo.

Otro motivo de peso para excluir estos elementos es que los datos se están obteniendo de la construcción en tiempo real del edificio, el cual todavía se encuentra en una fase intermedia, por tanto, sería una tarea muy tediosa el obtener esta información y que tenga un carácter realista. El edificio se ha visitado todos los días durante el proceso de construcción y todas las mediciones se han obtenido o bien utilizando instrumentos de medida a pie de campo, o en su lugar de los planos aprobados por la ingeniería involucrada en la obra. Para las entradas de energía eléctrica, se han revisado las facturas de los meses correspondientes. Una vez obtenidos todos los datos, se introducen en el software de análisis de ciclo de vida SimaPro.

### **3.3 SOFTWARE DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA SIMAPRO**

El software escogido para la realización del análisis de ciclo de vida es el SimaPro, el cual ha sido desarrollado por la organización PRé Sustainability. El programa se ha diseñado siguiendo las bases establecidas en las normativas UNE-EN ISO 14040 (ISO, 2006a) y UNE-EN ISO 14044 (ISO, 2006b), que se han expuesto en apartados anteriores. Actualmente es una de las mejores opciones para la realización de análisis de ciclo de vida, debido a las siguientes características:

- Permite generar, editar y analizar ciclos de vida muy complejos de una forma sencilla, completa y sistemática.
- Permite obtener mediciones precisas de una gran cantidad de impactos ambientales de cada proceso en todo su ciclo de vida.
- Permite, de una manera sencilla, identificar los puntos clave de los sistemas de producción, para cada categoría de impacto.
- Permite representar de manera clara y gráfica los resultados obtenidos del análisis, en forma de diagramas de árbol y diagramas de barras.

Además, el software cuenta con las bases de datos medioambientales más importantes, como lo son Ecoinvent v3.5 (Ecoinvent, 2018) o Agri-footprint v4.0 (Blonk, 2017). También incluye numerosas metodologías de cálculo como CML (Guinée, 2001), Eco-Indicator 99 (Goedkoop y Spriensma, 2000) y la elegida IMPACT 2002+ (Jolliet et al., 2003). Se trata de un programa muy completo y por eso se ha escogido para el análisis de ciclo de vida.



## 4. Resultados

### 4.1 MATERIALES

La unidad funcional es la construcción de un edificio con una estructura principalmente conformada por elementos prefabricados, para la maicería y arrocería Dacsa . Este trabajo se centra en abarcar principalmente la estructura del edificio, y para obtener los materiales se subdivide el elemento en 4 partes: la cimentación, la estructura prefabricada (pilares, vigas y fachada), la parte de la estructura mixta (forjados de losa alveolar) y la escalera in situ.

#### 4.1.1 ETAPA 1: CIMENTACIÓN Y SOLERA

La cimentación del edificio está comprendida por 8 zapatas correspondientes a los 8 pilares existentes, y una riostra que conecta todas ellas. Será necesario contabilizar la excavación realizada en el terreno para albergar la cimentación, así como el hormigón y las armaduras de todos los elementos.

En la figura 4.1 se muestra un plano con la cimentación del edificio, comprendida únicamente con las 8 zapatas y la riostra de unión, con un hormigón HA-30.

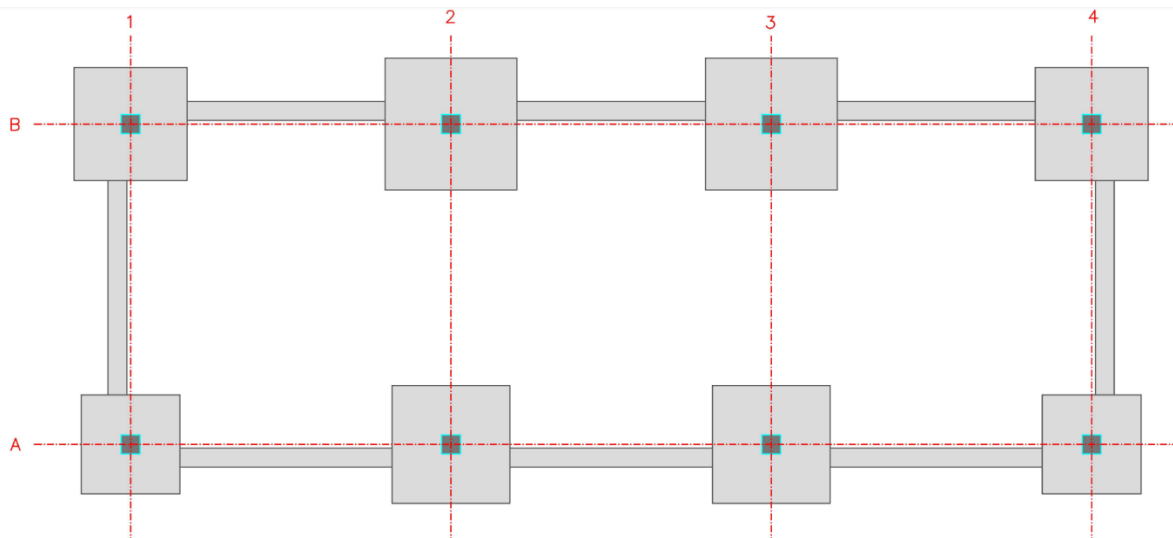


Figura 4.1. Plano de la cimentación del edificio

Se realiza una tabla en una hoja de cálculo para obtener los valores necesarios. En la tabla 4.1 se muestran los valores calculados de la excavación realizada, el hormigón de limpieza y el hormigón de la cimentación.

Tabla 4.1. Cálculo de excavación y hormigón para la cimentación

Cimentación						
Zapata	L [m]	b [m]	h [m]	Vexc [m3]	Vhor [m3]	Vlimp [m2]
A1	2,1	2,1	1	4,41	3,969	0,44
A2	2,5	2,5	1	6,25	5,625	0,63
A3	2,5	2,5	1	6,25	5,625	0,63
A4	2,1	2,1	1	4,41	3,969	0,44
B1	2,4	2,4	1	5,76	5,184	0,58
B2	2,8	2,8	1	7,84	7,056	0,78
B3	2,8	2,8	1	7,84	7,056	0,78
B4	2,4	2,4	1	5,76	5,184	0,58
C1	33,9	0,4	0,5	6,78	5,424	1,36
Total				55,30	49,09	6,21
Total may.				60,83	54,00	6,83

Estos valores se han mayorado un 10% debido a las pérdidas producidas por la excavación (siempre se excava de más en la realidad) y el hormigón (también se acaba echando de más). Este incremento del 10% se aplicó a todos los cálculos de hormigón realizados durante el estudio. Para obtener el volumen de hormigón, se restó a la excavación el volumen de los cálices para los pilares prefabricados, de 0,15 m<sup>3</sup>.

Aún con los valores obtenidos, al volumen de hormigón hay que restarle el volumen de las armaduras, que se calcula a continuación. Se realiza la tabla 4.2 en Excel para obtener los datos totales de la armadura.

Tabla 4.2. Cálculo de masa y volumen de la armadura de la cimentación

Armadura				
Zapata	N	D [m]	L [cm]	m [kg]
ZAP A1	24	16	224	87,63
ZAP A2	18	20	272	124,85
ZAP A3	18	20	272	124,85
ZAP A4	24	16	224	87,63
ZAP B1	18	20	262	120,26
ZAP B2.1	20	20	302	154,02
ZAP B2.2	12	12	120	13,25
ZAP B3.1	20	20	302	154,02
ZAP B3.2	12	12	120	13,25
ZAP B4	18	20	262	120,26
CÁLIZ.1	128	16	120	250,37
CÁLIZ.2	72	10	320	147,46
BAJO CÁLIZ	64	12	150	88,32
C1	8	12	750	55,20
ESTRIBOS	56	8	132	30,31
Total				1571,66
Volumen				0,20

Las densidades lineales utilizadas son las mismas que usa la empresa que fabrica la armadura, y se han obtenido de las planillas:  $\rho_{\phi 20} = 2,55 \text{ kg/m}$ ,  $\rho_{\phi 16} = 1,63 \text{ kg/m}$ ,  $\rho_{\phi 12} = 0,92 \text{ kg/m}$ ,  $\rho_{\phi 10} = 0,64 \text{ kg/m}$  y  $\rho_{\phi 8} = 0,41 \text{ kg/m}$ . Se utilizarán las mismas densidades lineales del acero para todos los cálculos posteriores.

Como se ha comentado, será necesario restar el volumen del acero al de hormigón. También se obtiene la masa total:

$$\begin{aligned} V_{hor} &= (V_{cim} + V_{lim}) - V_{acero} ; \\ V_{hor} &= 54 + 6,83 - 0,2 \text{ m}^3 ; \\ V_{hor} &= 60,63 \text{ m}^3 ; \\ m_{hor} &= 151574,47 \text{ kg} ; \end{aligned}$$

A continuación, se calcularon todos los valores correspondientes a la solera de la planta baja del edificio. Esta solera está compuesta por una losa de hormigón HA-25 de 10 cm de canto, una capa de poliestireno extruido de 5 cm de canto, una lámina anti-radón y una capa de mortero de 8 cm de canto, que supondrá el acabado de la solera. En la tabla 4.3 se muestran los cálculos realizados en Excel para el hormigón y el acero de la solera.

Tabla 4.3. Cálculo del hormigón y acero de la solera

Hormigón		Mallazos	
Asol	136,78 m <sup>2</sup>	umallas	14 u 15x15x8
Vhor	13,678 m <sup>3</sup>		
Vhor exacto	13,5744 m <sup>3</sup>	mmallas	<b>813,58 kg</b>
mhor	<b>33935,90 kg</b>	Vmallas	0,1036 m <sup>3</sup>

Del mismo modo, se calculan las masas del poliestireno extruido (o XPS), de la lámina anti-radón (la densidad superficial se obtiene de la ficha técnica) y del mortero de acabado. Estos cálculos se presentan en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Cálculo del XPS, la lámina anti-radón y el mortero de solera

XPS		Lámina antiradón		Mortero	
A	136,78 m <sup>2</sup>	A	136,78 m <sup>2</sup>	A	136,78 m <sup>2</sup>
e	0,05 m	$\rho$	4 kg/m <sup>2</sup>	e	0,08 m
V	6,839 m <sup>3</sup>	m	<b>547,12 kg</b>	V	10,9424 m <sup>3</sup>
$\rho$	32 kg/m <sup>2</sup>			mmor	<b>27356,00 kg</b>
m	<b>218,848 kg</b>				

Más adelante se realizará una tabla a modo de recopilación de todos los datos del apartado. El siguiente paso es obtener las salidas conocidas a la tecnosfera. En el caso del hormigón, ya se ha considerado un 10% de excedente en las entradas, y como esas sobras no se tiran, si no que forman parte de la zapata aunque no estén contempladas en los planos de proyecto, no se pueden considerar un residuo como tal. Para el acero, las piezas correspondientes a las zapatas y la riostra se piden exactamente las necesarias en tamaño y forma para evitar recortes y excedente. En el caso del armado de la solera, se piden mallazos de un tamaño de 6x2,2 m, por tanto, sí que hay recortes sobrantes. Se presupone un 5% del valor calculado a modo de residuos, por tanto será:

$$m_{res,acero} = m_{acero} \cdot 0,05 = 813,58 \cdot 0,1 = 40,68 \text{ kg}$$

Para el aislamiento de XPS y la lámina anti-radón, también se estima un 5% de pérdidas a modo de recortes, por tanto las masas de residuos serán:

$$m_{res,XPS} = m_{XPS} \cdot 0,05 = 218,85 \cdot 0,05 = 10,94 \text{ kg}$$

$$m_{res,radón} = m_{radón} \cdot 0,05 = 547,12 \cdot 0,05 = 27,36 \text{ kg}$$

El transporte de los materiales es el siguiente punto a considerar. Se tendrá en cuenta la distancia recorrida por los vehículos desde la salida de la fábrica correspondiente hasta la llegada a la obra. A la hora de introducir los datos en el software, se considera un camión de entre 10-20 toneladas y categoría EURO5 (catalogación europea con las emisiones más bajas). Se tiene en cuenta que el camión está cargado al 100% de su capacidad, y solo se considera el trayecto de ida cargado (se excluye el regreso del vehículo descargado a la fábrica). Este cálculo será el mismo en posteriores apartados.

- *Transporte de hormigón:* el hormigón proviene de una planta cercana a la obra, situándose únicamente a 5,5 km (Hormigones Caleta, Sagunto). Las unidades correspondientes para esta entrada son toneladas\*km, por tanto habrá que multiplicar la distancia recorrida por el vehículo por la masa de carga que lleva. La expresión es la siguiente:

$$\begin{aligned} tkm_{hor} &= (m_{hor,cim} + m_{hor,solera}) \cdot \text{Distancia recorrida} ; \\ tkm_{hor} &= (151574,47 + 33935,9) \text{ kg} \cdot 10^{-3} \text{ t} \cdot 5,5 \text{ km} ; \\ tkm_{hor} &= 1020,31 \text{ tkm} \end{aligned}$$

- *Transporte de mortero:* el mortero proviene de la misma planta que el hormigón, a 5,5 km de distancia. La expresión es la siguiente:

$$\begin{aligned} tkm_{mor} &= m_{mor} \cdot \text{Distancia recorrida} ; \\ tkm_{mor} &= 27356 \text{ kg} \cdot 10^{-3} \text{ t} \cdot 5,5 \text{ km} ; \\ tkm_{mor} &= 150,46 \text{ tkm} \end{aligned}$$

- *Transporte de acero:* El acero lo suministra una industria situada a 34,5 km de la obra (HifeCruz, Catarroja). En este caso, hay que tener en cuenta el acero utilizado y el acero de los residuos. La expresión es:

$$\begin{aligned} tkm_{acero} &= (m_{acero,cim} + m_{acero,solera} + m_{res,acero}) \cdot \text{Distancia recorrida} ; \\ tkm_{acero} &= (1571,66 + 813,58 + 40,68) \text{ kg} \cdot 10^{-3} \text{ t} \cdot 34,5 \text{ km} ; \\ tkm_{acero} &= 83,69 \text{ tkm} \end{aligned}$$

- *Transporte de aislamiento:* Tanto el poliestireno extruido como la lámina anti-radón son suministradas desde un centro logístico a 21 km de distancia (Ismael Natividad Alpuente, Masamagrell). El cálculo es:

$$\begin{aligned} tkm_{aislamiento} &= (m_{XPS} + m_{radón} + m_{res,XPS} + m_{res,radón}) \cdot \text{Distancia} ; \\ tkm_{aislamiento} &= (218,85 + 547,12 + 10,94 + 27,36) \text{ kg} \cdot 10^{-3} \text{ t} \cdot 21 \text{ km} ; \\ tkm_{aislamiento} &= 16,89 \text{ tkm} \end{aligned}$$

Por último, es necesario obtener la energía utilizada en el proceso. Para ello, se analizan las facturas de la luz de los meses de enero y febrero, tiempo en el que se ha construido el edificio. En enero se han consumido en la obra 803 kWh, y en febrero 809 kWh, dándose un promedio de 806 kWh, repartidos en 21 días laborales. Se puede obtener la energía promedio consumida en 1 día de trabajo:

$$\text{Energía diaria consumida} = \frac{806 \text{ kWh}}{21 \text{ días}} = 38,38 \text{ kWh/día} ;$$

Para esta primera etapa, se consideran 2 semanas de trabajo, o lo que es lo mismo, 10 días. Como en la obra se realizan otros trabajos simultáneamente, no tiene sentido adjudicar la totalidad de la energía a únicamente este edificio. Se decide multiplicar la energía obtenida por 0,5, adjudicando la mitad de la energía utilizada a este trabajo (quedándose del lado de la seguridad, ya que es probable que sea menor cantidad).

$$\text{Energía etapa 1} = 38,38 \frac{\text{kWh}}{\text{día}} \cdot 10 \text{ días} \cdot 0,5 = 191,9 \text{ kWh}$$

La empresa suministradora es Iberdrola, la cual produce electricidad de diferentes fuentes. Para introducir los datos en SimaPro, será necesario desglosar la procedencia de la energía en sus respectivas categorías. Para ello, se obtienen los datos del informe anual de la propia Iberdrola, publicado en abril de 2024 (Iberdrola, 2024). En España durante 2023 (los datos más recientes disponibles), la electricidad se genera con los siguientes porcentajes: 17,5 % de energía eólica, 25,9 % de energía hidroeléctrica, 4,7 % de energía solar fotovoltaica, 38,8 % de energía nuclear, 10,5% de energía generada con ciclos combinados de gas natural y 2,6 % de cogeneración.

Este cálculo será el mismo en posteriores apartados, por lo que se omitirá esta explicación.

Para esta primera etapa de cimentación y solera, el cálculo de energía será el siguiente:

- La energía eólica se obtiene:

$$\begin{aligned}E_{Eólica} &= E_{Total} \cdot \%Eólica ; \\E_{Eólica} &= 191,90 \cdot 0,175 ; \\E_{Eólica} &= 33,58 kWh\end{aligned}$$

- La energía hidroeléctrica se obtiene:

$$\begin{aligned}E_{Hidroeléctrica} &= E_{Total} \cdot \%Hidroeléctrica ; \\E_{Hidroeléctrica} &= 191,90 \cdot 0,259 ; \\E_{Hidroeléctrica} &= 49,7 kWh\end{aligned}$$

- La energía solar fotovoltaica se obtiene:

$$\begin{aligned}E_{Solar} &= E_{Total} \cdot \%Solar ; \\E_{Solar} &= 191,90 \cdot 0,047 ; \\E_{Solar} &= 9,02 kWh\end{aligned}$$

- La energía nuclear se obtiene:

$$\begin{aligned}E_{Nuclear} &= E_{Total} \cdot \%Nuclear ; \\E_{Nuclear} &= 191,90 \cdot 0,388 ; \\E_{Nuclear} &= 74,46 kWh\end{aligned}$$

- La energía de ciclos combinados de gas natural se obtiene:

$$\begin{aligned}E_{CC} &= E_{Total} \cdot \%CC ; \\E_{CC} &= 191,90 \cdot 0,105 ; \\E_{CC} &= 20,15 kWh\end{aligned}$$

- La energía de cogeneración se obtiene:

$$\begin{aligned}E_{Cogeneración} &= E_{Total} \cdot \%Cogeneración ; \\E_{Cogeneración} &= 191,90 \cdot 0,026 ; \\E_{Cogeneración} &= 4,99 kWh\end{aligned}$$

En la tabla 4.5 se recopilan todos los datos obtenidos en el apartado.

Tabla 4.5. Resumen de los resultados obtenidos en la etapa 1

<b>Entradas desde la tecnosfera</b>	<b>Resultados [kg]</b>
Hormigón de la cimentación HA-30	151574,47
Acero de la cimentación	1571,66
Hormigón de la solera HA-25	33935,90
Acero de la solera	813,58
Poliestireno extruido XPS	218,85
Lámina anti-radón	547,12
Mortero de la solera	27356
<b>Salidas a la tecnosfera</b>	<b>Resultados [kg]</b>
Residuo de acero	40,68
Residuo de XPS	10,94
Residuo de lámina anti-radón	27,36
<b>Entradas de transporte</b>	<b>Resultados [tkm]</b>
Transporte del hormigón	1020,31
Transporte del mortero	150,46
Transporte del acero	83,69
Transporte del aislamiento	16,89
<b>Energía consumida</b>	<b>Resultados [kWh]</b>
Energía total de la fase (10 días)	191,9
Energía eólica	33,58
Energía hidroeléctrica	49,7
Energía solar fotovoltaica	9,02
Energía nuclear	74,46
Energía por ciclos combinados	20,15
Energía por cogeneración	4,99

#### 4.1.2 ETAPA 2: ESTRUCTURA PREFABRICADA

Para las entradas conocidas de la tecnosfera, esta etapa abarca los elementos de la estructura de hormigón prefabricado (excluyendo el forjado, que se explica en la etapa siguiente). La estructura está compuesta por un sistema aporticado de pilares y vigas de hormigón prefabricado, además de que todo el cerramiento de fachada también está formado por paneles de hormigón prefabricado. Como en el apartado anterior, se obtendrán todos los datos necesarios de entradas y salidas de materiales a la tecnosfera, transporte y energía de toda la etapa. También se estima una duración de 2 semanas, o 10 días laborales.

En la figura 4.2 se muestran unos croquis de los planos realizados por la empresa encargada de hacer los elementos prefabricados de la estructura.

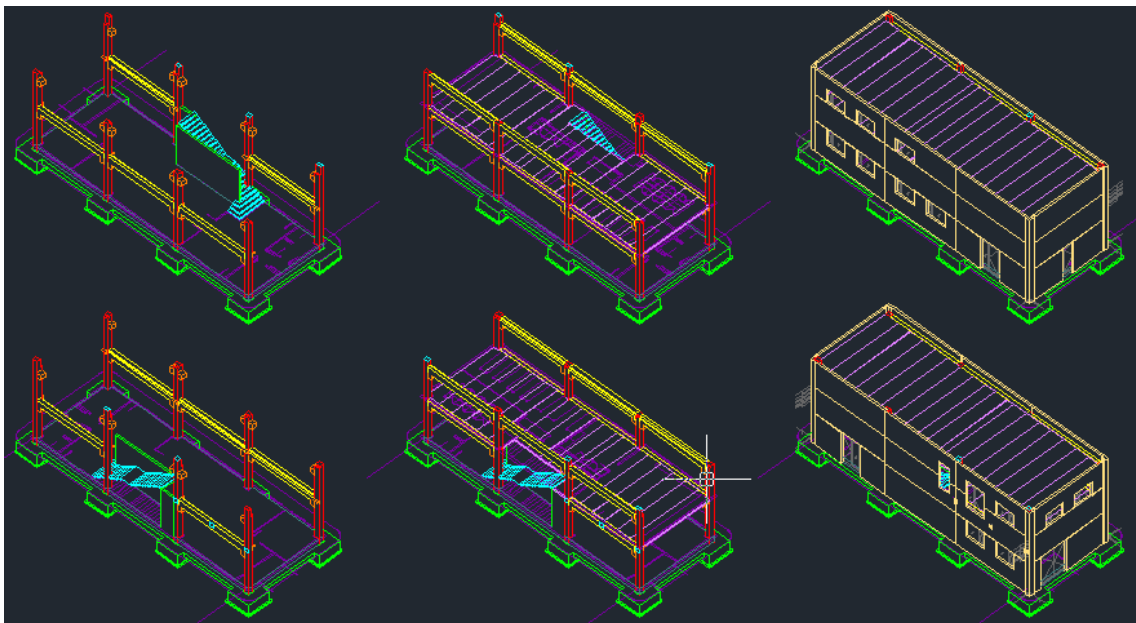


Figura 4.2. Planos en vista isométrica de la estructura del edificio

A continuación, se presenta una lista con los elementos que se aprecian en el plano:

- Los elementos de color rojo son los pilares de hormigón HA-30, habiendo 8 unidades de 8,61 m de longitud y una sección transversal de 0,16 m<sup>2</sup>.
- Los pilares cuentan con unas ménsulas, representadas en naranja en el plano, de las cuales hay 22 unidades, también de hormigón HA-30. Estas tienen un ancho de 40 cm y una sección de 0,167 m<sup>2</sup>.
- Las vigas están dibujadas en amarillo, y hay 11 unidades de HP-40. Todas las vigas tienen 6,36 m de longitud y una sección transversal en L de 0,202 m<sup>2</sup>.



- Los paneles se observan en los dibujos de la derecha, coloreados en un tono ocre. Son paneles de 16 cm de espesor y HA-25, que forman una superficie de 398,25 m<sup>2</sup>, descontando los huecos de ventanas y puertas.

En este caso no se conoce la cantidad exacta de armadura que tienen los elementos. Se estima que el acero ocupa un 1% del volumen total del elemento, valor estimado en función de la relación en volumen de acero/hormigón de lo calculado en el apartado anterior. En la tabla 4.6 se muestran los valores calculados para estos elementos:

Tabla 4.6. Cálculo de hormigón y acero en la estructura prefabricada

	Pilares	Ménsulas	Vigas	Paneles
<b>Vhor [m3]</b>	10,91	1,45	13,99	61,80
<b>Vacero [m3]</b>	0,11	0,01	0,14	0,62
<b>mhor [kg]</b>	27276,48	3626,37	34976,50	154489,38
<b>macero [kg]</b>	865,13	115,02	1109,36	4899,97

Los pilares se unen a la cimentación mediante un cáliz liso, esto es, las zapatas tienen un hueco de 50x50 cm donde luego entra el pilar de 40x40 cm, y el espacio que queda se rellena con mortero. Este hueco tiene 60 cm de altura. Los valores de este mortero son:

$$\begin{aligned}
 V_{mor} &= (V_{hueco} - V_{pilar}) \cdot h \cdot n; \\
 V_{mor} &= (0,5^2 - 0,4^2) \cdot 0,6 \cdot 8; \\
 V_{mor} &= 0,432 \text{ m}^3; \\
 m_{mor} &= 1080 \text{ kg};
 \end{aligned}$$

Las juntas entre paneles se sellan con masilla de poliuretano. En todo el edificio hay 172,87 m de juntas en panel, para las cuales se utilizaron 58 botes de masilla con una capacidad de 0,3 litros cada uno. La masilla tiene una densidad de 1,2 g/cm<sup>3</sup>, por tanto, se han usado 20,74 kg de masilla de poliuretano.

Para las salidas conocidas a la tecnosfera, será necesario tener en cuenta los botes de la masilla utilizada. Un bote de aluminio de ese tamaño pesa en torno a 100 gramos, por lo que se contabilizan 5,8 kg de aluminio como residuo.

En cuanto al transporte de la etapa:

- *Transporte de elementos prefabricados:* todos estos elementos son suministrados por una empresa ubicada a 191 km de distancia (Berma, Quintanar del Rey). Los cálculos son:

$$\begin{aligned}tkm_{pre} &= (m_{hor} + m_{acero}) \cdot Distancia recorrida ; \\tkm_{pre} &= (220369 + 6989,47) \text{ kg} \cdot 10^{-3} \text{ t} \cdot 191 \text{ km} ; \\tkm_{pre} &= 43425,46 \text{ tkm}\end{aligned}$$

- *Transporte de mortero:* el mortero proviene de la misma planta que el del apartado anterior, a 5,5 km de distancia. La expresión es la siguiente:

$$\begin{aligned}tkm_{mor} &= m_{mor} \cdot Distancia recorrida ; \\tkm_{mor} &= 1080 \text{ kg} \cdot 10^{-3} \text{ t} \cdot 5,5 \text{ km} ; \\tkm_{mor} &= 5,94 \text{ tkm}\end{aligned}$$

- *Transporte de masilla:* la masilla viene del centro logístico del apartado anterior, a 21 km de distancia. El cálculo es:

$$\begin{aligned}tkm_{masilla} &= m_{masilla} \cdot Distancia recorrida ; \\tkm_{masilla} &= 26,54 \text{ kg} \cdot 10^{-3} \text{ t} \cdot 21 \text{ km} ; \\tkm_{masilla} &= 0,56 \text{ tkm}\end{aligned}$$

Para la segunda etapa, como se ha comentado, también se consideran 2 semanas de trabajo, o lo que es lo mismo, 10 días. De igual modo que en el apartado anterior:

$$Energía \text{ etapa } 2 = 38,38 \frac{kWh}{día} \cdot 10 \text{ días} \cdot 0,5 = 191,9 \text{ kWh}$$

Como entradas de energía en la etapa 2, al tener el mismo número de días, los cálculos son los mismos:

- La energía eólica se obtiene:

$$\begin{aligned}E_{Eólica} &= E_{Total} \cdot \%Eólica ; \\E_{Eólica} &= 191,90 \cdot 0,175 ; \\E_{Eólica} &= 33,58 \text{ kWh}\end{aligned}$$

- La energía hidroeléctrica se obtiene:

$$\begin{aligned}E_{Hidroeléctrica} &= E_{Total} \cdot \%Hidroeléctrica ; \\E_{Hidroeléctrica} &= 191,90 \cdot 0,259 ; \\E_{Hidroeléctrica} &= 49,7 \text{ kWh}\end{aligned}$$

- La energía solar fotovoltaica se obtiene:

$$\begin{aligned} E_{Solar} &= E_{Total} \cdot \%Solar ; \\ E_{Solar} &= 191,90 \cdot 0,047 ; \\ E_{Solar} &= 9,02 kWh \end{aligned}$$

- La energía nuclear se obtiene:

$$\begin{aligned} E_{Nuclear} &= E_{Total} \cdot \%Nuclear ; \\ E_{Nuclear} &= 191,90 \cdot 0,388 ; \\ E_{Nuclear} &= 74,46 kWh \end{aligned}$$

- La energía de ciclos combinados de gas natural se obtiene:

$$\begin{aligned} E_{CC} &= E_{Total} \cdot \%CC ; \\ E_{CC} &= 191,90 \cdot 0,105 ; \\ E_{CC} &= 20,15 kWh \end{aligned}$$

- La energía de cogeneración se obtiene:

$$\begin{aligned} E_{Cogeneración} &= E_{Total} \cdot \%Cogeneración ; \\ E_{Cogeneración} &= 191,90 \cdot 0,026 ; \\ E_{Cogeneración} &= 4,99 kWh \end{aligned}$$

En la tabla 4.7 se recopilan todos los datos obtenidos en el apartado.

Tabla 4.7. Resumen de los resultados obtenidos en la etapa 2

Entradas desde la tecnosfera	Resultados [kg]
Hormigón de pilares HA-30	27276,48
Hormigón de ménsulas HA-30	3626,37
Hormigón de vigas HP-40	34976,5
Hormigón de paneles HA-25	154489
Acero total	6989,47
Mortero de cálices	1080
Masilla de poliuretano	20,74
Salidas a la tecnosfera	Resultados [kg]
Residuo de aluminio	5,8

<b>Entradas de transporte</b>	<b>Resultados [tkm]</b>
Transporte de prefabricados	43425,46
Transporte del mortero	5,94
Transporte de masilla	0,56
<b>Energía consumida</b>	<b>Resultados [kWh]</b>
Energía total de la fase (10 días)	191,9
Energía eólica	33,58
Energía hidroeléctrica	49,7
Energía solar fotovoltaica	9,02
Energía nuclear	74,46
Energía por ciclos combinados	20,15
Energía por cogeneración	4,99

#### 4.1.3 ETAPA 3: FORJADOS

La tercera etapa del proceso es la relativa a los forjados de planta primera y cubierta. Ambos están formados por una losa alveolar de hormigón prefabricado de 15 cm de canto, la cual lleva encima una capa de compresión de hormigón de 7 centímetros. El acabado de los suelos se remata con una capa de 5 cm de mortero. En la unión entre el forjado y la vigueta prefabricada, hay una tira perimetral de porexpan de 4 cm de espesor y 20 cm de alto. En la figura 4.3 se pueden ver los planos de planta primera y cubierta.

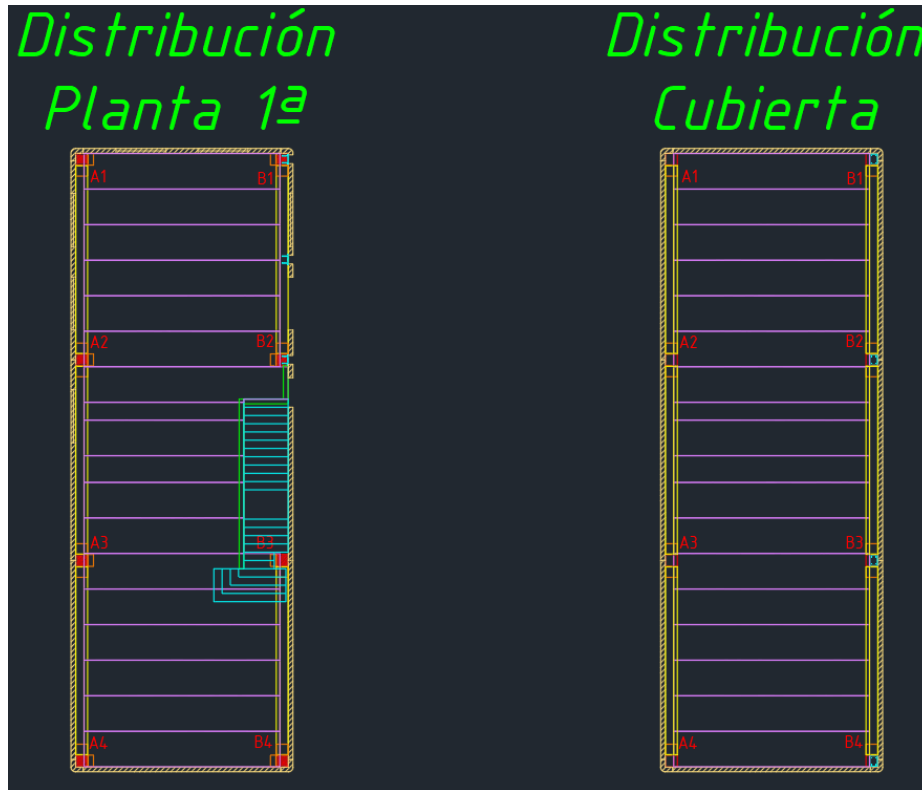


Figura 4.3. Planos en planta de los forjados de losa alveolar

Las líneas horizontales de color lila representan las placas alveolares de 1,2 m de ancho, que ocupan un área de 291,98 m<sup>2</sup>. Con la ficha técnica del elemento, se obtienen los cálculos mostrados en la tabla 4.8.

Tabla 4.8. Cálculo de hormigón y acero de la placa alveolar

Losa Alveolar 15+5 T7		
Atotal	291,975	m2
peso panel	356,12	kg/m2
Peso total	103978,85	kg
phor	2500	kg/m3
Vpanel	41,59	m3
%acero	0,01	
Vhor	41,18	m3
Vacero	0,42	m3
mhor	<b>102939,06</b>	kg
macero	<b>3264,94</b>	kg

Para la capa de compresión, se calcula el volumen de hormigón en toda el área del forjado multiplicándola por el canto. Pero primero se calcula la cantidad de acero. Toda la superficie está cubierta con mallazo de tipo 20x20x6, además de negativos de 50 cm y diámetro 10 mm en todo el perímetro, cada 50 cm. Los cálculos del acero se muestran en la tabla 4.9.

Tabla 4.9. Cálculo de acero de la capa de compresión

Capa de compresión		
Afor	291,975	m2
mallas	11	m2
nmallas	27	u 20x20x6
mmallas	26,64	kg
Lnegativos	83,2	m
nnegativos	333	u
ρ10	0,64	kg/m
<b>macero</b>	<b>7965,33</b>	<b>kg</b>
Vacero	1,01	m3

El volumen de acero se le descuenta al de hormigón. La expresión del cálculo será:

$$\begin{aligned}
 V_{hor} &= (A_{for} \cdot e - V_{acero}); \\
 V_{hor} &= (291,98 \cdot 0,07 - 1,01); \\
 V_{hor} &= 19,42 \text{ m}^3; \\
 m_{hor} &= 48558,9 \text{ kg};
 \end{aligned}$$

A continuación, se calcula el mortero de acabado:

$$\begin{aligned}
 V_{mor} &= (A_{for} \cdot e); \\
 V_{mor} &= (291,98 \cdot 0,05); \\
 V_{mor} &= 14,60 \text{ m}^3; \\
 m_{mor} &= 36496,88 \text{ kg};
 \end{aligned}$$

Por último, se obtiene la cantidad de porexpan (o EPS) perimetral utilizado:

$$\begin{aligned}
 V_{EPS} &= L \cdot e \cdot h; \\
 V_{EPS} &= 119,1 \cdot 0,04 \cdot 0,2; \\
 V_{hor} &= 0,953 \text{ m}^3; \\
 m_{hor} &= 20,96 \text{ kg};
 \end{aligned}$$

Como salidas conocidas a la tecnosfera, únicamente se tendrá en cuenta un residuo del 5% de la masa de porexpan debido a recortes.

$$m_{res,EPS} = m_{EPS} \cdot 0,05 = 20,96 \cdot 0,05 = 1,048 \text{ kg}$$

En cuanto al transporte de la etapa:

- *Transporte de elementos prefabricados:* las placas alveolares son suministradas por la empresa del apartado anterior, ubicada a 191 km de distancia (Berma, Quintanar del Rey). Los cálculos son:

$$\begin{aligned} tkm_{pre} &= (m_{hor} + m_{acero}) \cdot \text{Distancia recorrida} ; \\ tkm_{pre} &= (102939 + 3264,94) \text{ kg} \cdot 10^{-3} \text{ t} \cdot 191 \text{ km} ; \\ tkm_{pre} &= 20284,96 \text{ tkm} \end{aligned}$$

- *Transporte de hormigón:* el hormigón es suministrado por la misma planta hormigonera de antes, a 5,5 km. Los cálculos son:

$$\begin{aligned} tkm_{hor} &= m_{hor} \cdot \text{Distancia recorrida} ; \\ tkm_{hor} &= 48559 \text{ kg} \cdot 10^{-3} \text{ t} \cdot 5,5 \text{ km} ; \\ tkm_{hor} &= 267,07 \text{ tkm} \end{aligned}$$

- *Transporte de acero:* El acero lo suministra la industria de la primera etapa, situada a 34,5 km de la obra. La expresión es:

$$\begin{aligned} tkm_{acero} &= m_{acero} \cdot \text{Distancia recorrida} ; \\ tkm_{acero} &= 7965,33 \text{ kg} \cdot 10^{-3} \text{ t} \cdot 34,5 \text{ km} ; \\ tkm_{acero} &= 274,8 \text{ tkm} \end{aligned}$$

- *Transporte de mortero:* el mortero proviene de la misma planta que el hormigón, a 5,5 km de distancia. La expresión es la siguiente:

$$\begin{aligned} tkm_{mor} &= m_{mor} \cdot \text{Distancia recorrida} ; \\ tkm_{mor} &= 36496,88 \text{ kg} \cdot 10^{-3} \text{ t} \cdot 5,5 \text{ km} ; \\ tkm_{mor} &= 2200,73 \text{ tkm} \end{aligned}$$

- *Transporte del porexpan:* el porexpan procede del centro logístico a 21 km de distancia del primer apartado. El cálculo es:

$$\begin{aligned} tkm_{aislamiento} &= (m_{EPS} + m_{res,EPS}) \cdot \text{Distancia} ; \\ tkm_{aislamiento} &= (20,96 + 1,048) \text{ kg} \cdot 10^{-3} \text{ t} \cdot 21 \text{ km} ; \\ tkm_{aislamiento} &= 22,01 \text{ tkm} \end{aligned}$$

Para esta tercera etapa se consideran 3 semanas de trabajo, o lo que es lo mismo, 15 días:

$$\text{Energía etapa } r = 38,38 \frac{kWh}{\text{día}} \cdot 15 \text{ días} \cdot 0,5 = 287,86 kWh$$

Los cálculos de la energía son:

- La energía eólica se obtiene:

$$\begin{aligned} E_{Eólica} &= E_{Total} \cdot \%Eólica ; \\ E_{Eólica} &= 287,86 \cdot 0,175 ; \\ E_{Eólica} &= 50,38 kWh \end{aligned}$$

- La energía hidroeléctrica se obtiene:

$$\begin{aligned} E_{Hidroeléctrica} &= E_{Total} \cdot \%Hidroeléctrica ; \\ E_{Hidroeléctrica} &= 287,86 \cdot 0,259 ; \\ E_{Hidroeléctrica} &= 74,56 kWh \end{aligned}$$

- La energía solar fotovoltaica se obtiene:

$$\begin{aligned} E_{Solar} &= E_{Total} \cdot \%Solar ; \\ E_{Solar} &= 287,86 \cdot 0,047 ; \\ E_{Solar} &= 13,53 kWh \end{aligned}$$

- La energía nuclear se obtiene:

$$\begin{aligned} E_{Nuclear} &= E_{Total} \cdot \%Nuclear ; \\ E_{Nuclear} &= 287,86 \cdot 0,388 ; \\ E_{Nuclear} &= 111,69 kWh \end{aligned}$$

- La energía de ciclos combinados de gas natural se obtiene:

$$\begin{aligned} E_{CC} &= E_{Total} \cdot \%CC ; \\ E_{CC} &= 287,86 \cdot 0,105 ; \\ E_{CC} &= 30,23 kWh \end{aligned}$$

- La energía de cogeneración se obtiene:

$$\begin{aligned} E_{Cogeneración} &= E_{Total} \cdot \%Cogeneración ; \\ E_{Cogeneración} &= 287,86 \cdot 0,026 ; \\ E_{Cogeneración} &= 7,48 kWh \end{aligned}$$

En la tabla 4.10 se recopilan todos los datos obtenidos en el apartado.



Tabla 4.10. Resumen de los resultados obtenidos en la etapa 3

<b>Entradas desde la tecnosfera</b>	<b>Resultados [kg]</b>
Hormigón de losa alveolar	102939,06
Acero de losa alveolar	3264,94
Hormigón de capa de compresión	36496,88
Acero de capa de compresión	7965,33
Mortero de acabado	36496,88
Porexpan	20,96
<b>Salidas a la tecnosfera</b>	<b>Resultados [kg]</b>
Residuo de porexpan	1,048
<b>Entradas de transporte</b>	<b>Resultados [tkm]</b>
Transporte de prefabricados	20284,96
Transporte del hormigón	267,07
Transporte del acero	274,8
Transporte del mortero	2200,73
Transporte del porexpan	22,01
<b>Energía consumida</b>	<b>Resultados [kWh]</b>
Energía total de la fase (10 días)	287,86
Energía eólica	50,38
Energía hidroeléctrica	74,56
Energía solar fotovoltaica	13,53
Energía nuclear	111,69
Energía por ciclos combinados	30,23
Energía por cogeneración	7,48

#### 4.1.4 ETAPA 4: ESCALERA IN SITU

La última etapa es la más corta de todas, y corresponde a la escalera in situ realizada para subir de la planta baja a la planta primera. En la figura 4.4 se puede ver un plano en planta, y en la figura 4.5 la vista en alzado. Lo dibujado en azul es la escalera in situ, y las líneas verdes corresponden a un muro de bloque de hormigón que encaja la escalera, y que también habrá que calcular.

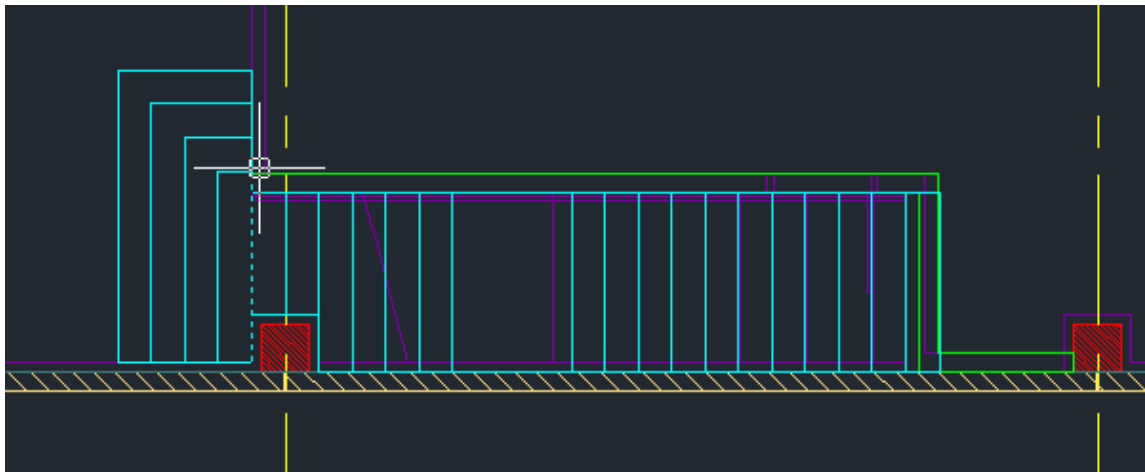


Figura 4.4. Plano en planta de la escalera in situ

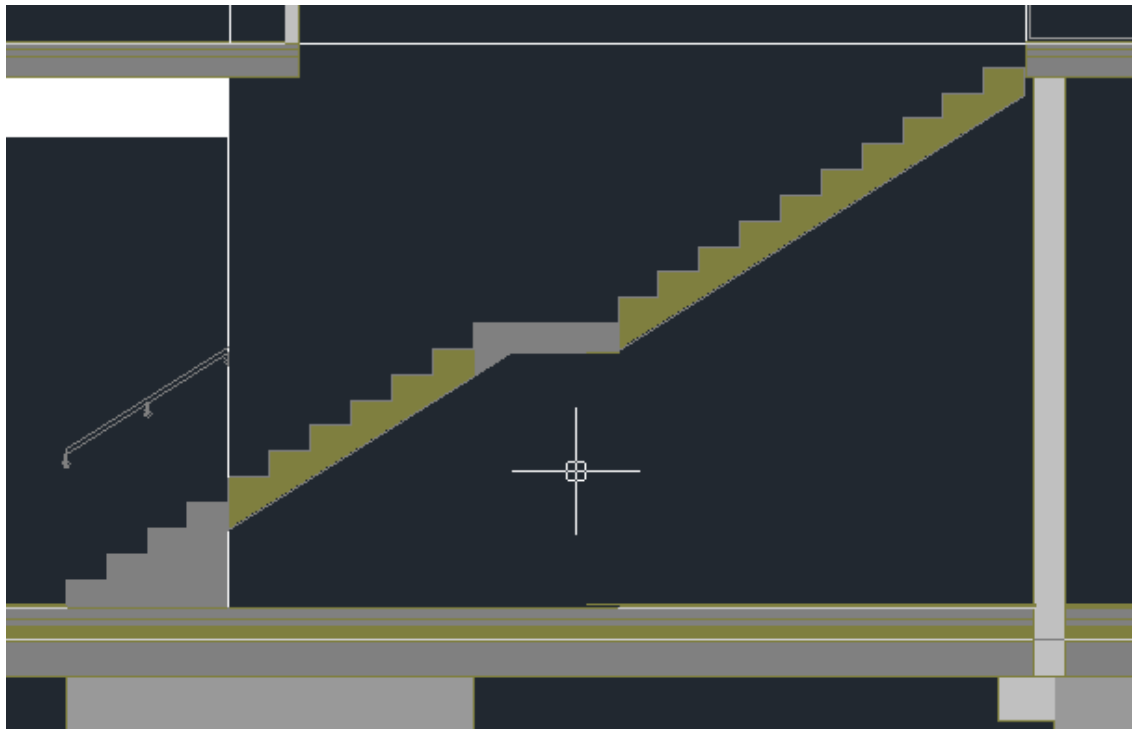


Figura 4.5. Plano en alzado de la escalera in situ

La cimentación de la escalera es una riostra de hormigón de sección 30x70 cm y 8,41 m de longitud, que da un volumen de 1,77 m<sup>3</sup>. Como va enterrada, se le da un 10% adicional por pérdidas, quedándose en 1,94 m<sup>3</sup>. A partir de la planilla, se obtiene la tabla 4.11.

Tabla 4.11. Cálculo de acero de la cimentación de la escalera

Armadura				
Zapata	N	D [m]	L [cm]	Kg
CIM ESC A.1	3	12	169	4,66
CIM ESC A.2	3	12	145	4,00
CIM ESC A.3	5	12	180	8,28
CIM ESC B.1	3	12	639	17,64
CIM ESC B.2	3	12	615	16,97
CIM ESC B3	25	12	180	41,40
CIM ESC C.1	3	12	209	5,77
CIM ESC C.2	3	12	185	5,11
CIM ESC C.3	7	12	180	11,59
<b>Total</b>				<b>115,42 kg</b>
<b>Vacero</b>				<b>0,0147 m3</b>

Hay que restarle el volumen del acero al total para sacar el hormigón:

$$\begin{aligned}
 V_{hor} &= V_{hor,tot} - V_{acero}; \\
 V_{hor} &= 1,942 - 0,014 \text{ m}^3; \\
 V_{hor} &= 1,928 \text{ m}^3; \\
 m_{hor} &= 4820,02 \text{ kg};
 \end{aligned}$$

Para la escalera en sí, se cubica su volumen a partir de los planos de AutoCad, obteniéndose un resultado de 3,75 m<sup>3</sup> de escalera. A partir de las planillas se obtiene la Tabla 4.12.

Tabla 4.12. Cálculo de acero de la escalera in situ

Armadura				
Zapata	N	D [m]	L [cm]	Kg
BARRA 1	6	12	449	24,78
BARRA 2	8	12	359	26,42
BARRA 3	8	10	384	19,66
BARRA 4	6	10	384	14,75
BARRA 5	8	10	135	6,91
BARRA 6	30	8	136	16,73
BARRA 7	92	10	124	73,01
<b>Total</b>				<b>182,26</b>
<b>Vacero</b>				<b>0,0232</b>

Hay que restarle el volumen del acero al total para sacar el hormigón:

$$\begin{aligned} V_{hor} &= V_{tot} - V_{acero} ; \\ V_{hor} &= 3,75 - 0,023 \text{ m}^3 ; \\ V_{hor} &= 3,729 \text{ m}^3 ; \\ m_{hor} &= 9322,38 \text{ kg} ; \end{aligned}$$

En cuanto al muro de bloques de hormigón, este supone un área de 26,52 m<sup>2</sup>, que dividiendo por el área de 1 bloque de hormigón de 20x20x40, sale una cantidad total de 319 bloques. Como cada bloque pesa 14 kg, resulta en una masa de 4454,89 kg de bloques de hormigón. Los bloques van unidos con pasta de cemento, pero es complicado calcular con precisión la que se ha utilizado. Para simplificar las cosas, se estima la cantidad de pasta de un 5% de la masa de los bloques, es decir, 222,75 kg.

Como salidas conocidas a la tecnosfera, en este caso se tiene en cuenta un excedente de bloques de hormigón, debido a recortes. También se valora un excedente de pasta. Para ambos casos, se estima una pérdida del 10%.

Como en el primer apartado, el hormigón de cimentación ya se ha mayorado y no genera residuo como tal, y las armaduras van justas debido a que se han fabricado con las medidas exactas.

$$\begin{aligned} m_{res,bloque} &= m_{bloque} \cdot 0,1 = 4454,89 \cdot 0,1 = 445,489 \text{ kg} \\ m_{pasta} &= m_{pasta} \cdot 0,1 = 222,74 \cdot 0,1 = 22,274 \text{ kg} \end{aligned}$$

En cuanto al transporte de la etapa:

- *Transporte de hormigón:* el hormigón es suministrado por la misma planta hormigonera de antes, a 5,5 km. Los cálculos son:

$$\begin{aligned} tkm_{hor} &= m_{hor} \cdot \text{Distancia recorrida} ; \\ tkm_{hor} &= 14142 \text{ kg} \cdot 10^{-3} \text{ t} \cdot 5,5 \text{ km} ; \\ tkm_{hor} &= 77,78 \text{ tkm} \end{aligned}$$

- *Transporte de acero:* El acero lo suministra la industria de la primera etapa, situada a 34,5 km de la obra. La expresión es:

$$\begin{aligned} tkm_{acero} &= m_{acero} \cdot \text{Distancia recorrida} ; \\ tkm_{acero} &= 297,69 \text{ kg} \cdot 10^{-3} \text{ t} \cdot 34,5 \text{ km} ; \\ tkm_{acero} &= 10,27 \text{ tkm} \end{aligned}$$

- *Transporte de bloques y pasta:* estos materiales vienen del mismo centro logístico centro logístico de apartados anteriores, a 21 km de distancia. El cálculo es:

$$tkm_{b,p} = (m_{blo} + m_{pas} + m_{res,blo} + m_{res,pas}) \cdot Distancia recorrida ;$$

$$tkm_{b,p} = (4454,88 + 445,488 + 222,78 + 22,278) kg \cdot 10^{-3}t \cdot 21 km ;$$

$$tkm_{b,p} = 108,05 tkm$$

Para esta última etapa, se estiman 5 días de trabajo. Igual que antes:

$$Energía etapa 4 = 38,38 \frac{kWh}{día} \cdot 5 días \cdot 0,5 = 95,95 kWh$$

Como entradas de energía en la etapa 4, los cálculos son:

- La energía eólica se obtiene:

$$E_{Eólica} = E_{Total} \cdot \%Eólica ;$$

$$E_{Eólica} = 95,95 \cdot 0,175 ;$$

$$E_{Eólica} = 16,79 kWh$$

- La energía hidroeléctrica se obtiene:

$$E_{Hidroeléctrica} = E_{Total} \cdot \%Hidroeléctrica ;$$

$$E_{Hidroeléctrica} = 95,95 \cdot 0,259 ;$$

$$E_{Hidroeléctrica} = 24,85 kWh$$

- La energía solar fotovoltaica se obtiene:

$$E_{Solar} = E_{Total} \cdot \%Solar ;$$

$$E_{Solar} = 95,95 \cdot 0,047 ;$$

$$E_{Solar} = 4,51 kWh$$

- La energía nuclear se obtiene:

$$E_{Nuclear} = E_{Total} \cdot \%Nuclear ;$$

$$E_{Nuclear} = 95,95 \cdot 0,388 ;$$

$$E_{Nuclear} = 37,23 kWh$$

- La energía de ciclos combinados de gas natural se obtiene:

$$E_{CC} = E_{Total} \cdot \%CC ;$$

$$E_{CC} = 95,95 \cdot 0,105 ;$$

$$E_{CC} = 10,08 kWh$$

- La energía de cogeneración se obtiene:

$$E_{Cogeneración} = E_{Total} \cdot \%Cogeneración ;$$

$$E_{Cogeneración} = 95,95 \cdot 0,026 ;$$

$$E_{Cogeneración} = 2,49 kWh$$

En la tabla 4.13 se recopilan todos los datos obtenidos en el apartado.

Tabla 4.13. Resumen de los resultados obtenidos en la etapa 4

<b>Entradas desde la tecnosfera</b>	<b>Resultados [kg]</b>
Masa de hormigón HA-25	14142
Masa de acero	297,69
Masa de bloques	4454,89
Masa de pasta	222,74
<b>Salidas a la tecnosfera</b>	<b>Resultados [kg]</b>
Residuo de bloques	445,489
Residuo de pasta	22,274
<b>Entradas de transporte</b>	<b>Resultados [tkm]</b>
Transporte de hormigón	77,78
Transporte de acero	10,27
Transporte de bloques y pasta	108,05
<b>Energía consumida</b>	<b>Resultados [kWh]</b>
Energía total de la fase (5 días)	95,95
Energía eólica	16,79
Energía hidroeléctrica	24,85
Energía solar fotovoltaica	4,51
Energía nuclear	37,23
Energía por ciclos combinados	10,08
Energía por cogeneración	2,49

## 4.2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tras introducir todos los datos calculados en el software, el propio programa realiza los cálculos con la metodología seleccionada y entrega los resultados de diferentes formas. A continuación, se muestran esos resultados explicados para cada etapa, en forma de diagramas de árbol y de barras.

### 4.2.1 RESULTADOS DE LA ETAPA DE CIMENTACIÓN Y SOLERA

Como se ha comentado en apartados anteriores, a través del programa se pueden obtener diagramas de árbol en los que se puede ver de forma gráfica el flujo de los procesos que intervienen en las distintas etapas. Para cada apartado, se presentan los diagramas correspondientes a las categorías de daño final. En la figura 4.6 se muestra el diagrama correspondiente a la categoría de daño final de impacto a la salud humana:

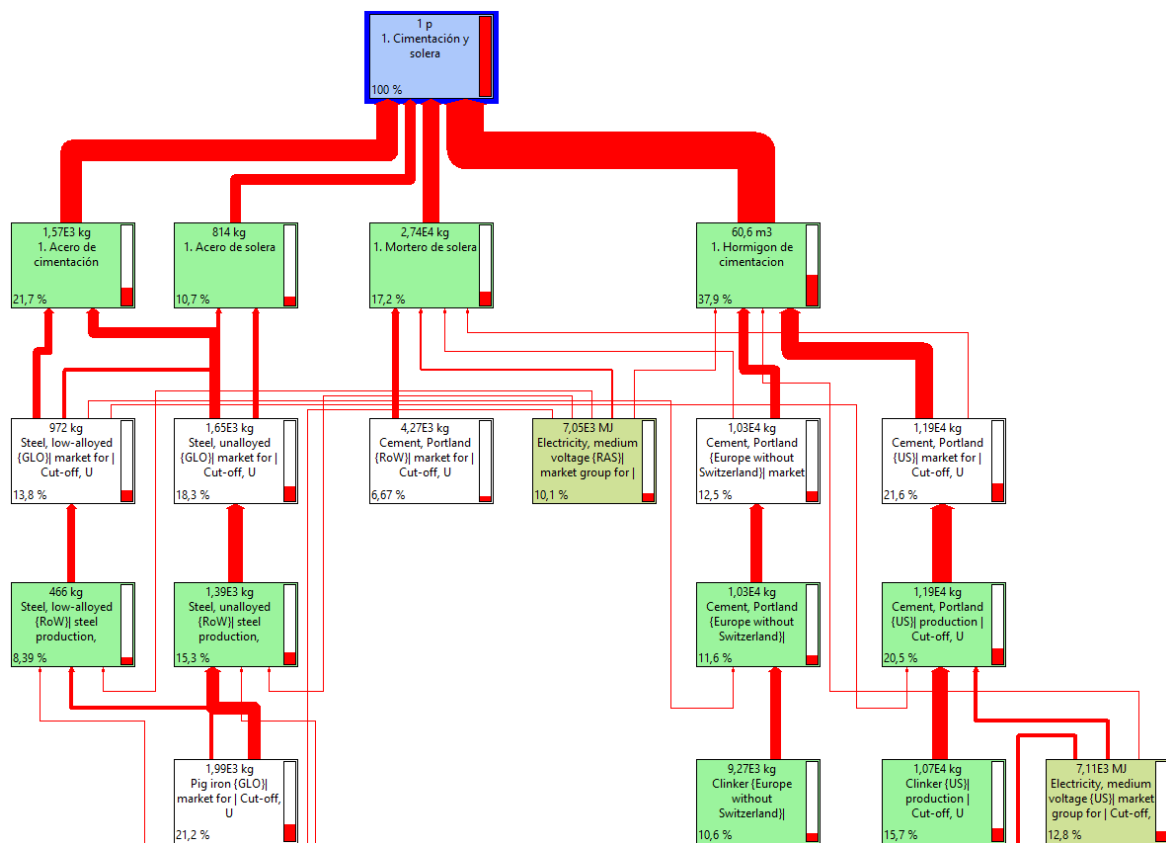


Figura 4.6. Diagrama de árbol para el daño a la salud humana de la etapa de cimentación y solera

En este tipo de diagramas, las flechas que van de un proceso a otro indican la participación del proceso del que sale la misma en el proceso al que llega. Por otra parte, el grosor de las

líneas indica la influencia en el proceso en el que participan, es decir, a más gruesa es la flecha, más impacto tiene un proceso en el total, en comparación con otros que contribuyen a lo mismo.

En el diagrama de árbol de la figura 4.6 se aprecia claramente que el hormigón de la cimentación es la parte más influyente en esta categoría de daño. Nótese que en el esquema no aparecen representadas todas las partes de la etapa. Esto se debe a que en el programa se puede poner un filtro de lo que se muestra en el diagrama. En este caso, el porcentaje a filtrar fue del 7,6 %, lo que indica que las partes del proceso que influyan menos de ese valor en el total, no aparecen. Esto se hace para poder apreciar con claridad el diagrama, ya que si salieran todas las fases se complicaría mucho la visualización del mismo (esta etapa tiene más de 15000 entradas determinadas por el propio sistema).

A continuación, en la figura 4.7 se muestra el diagrama correspondiente a la categoría de daño final de impacto a la calidad del ecosistema:

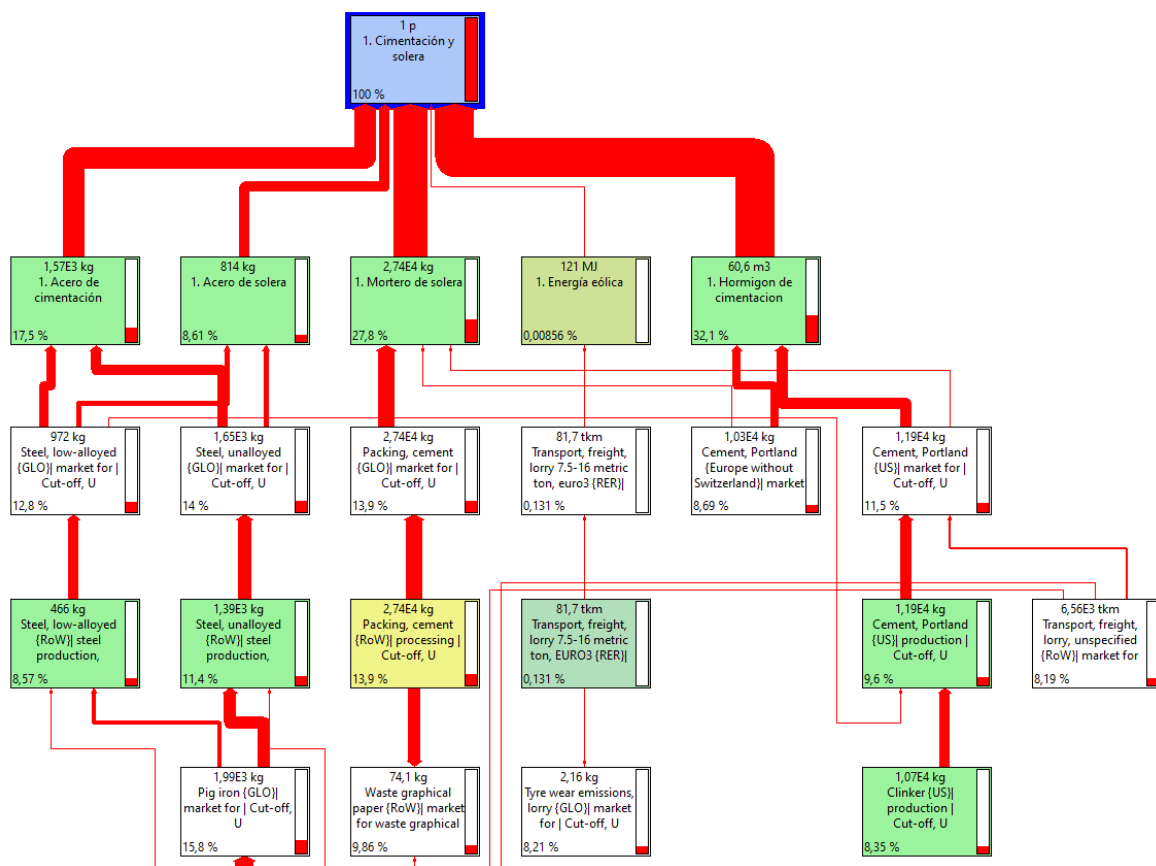


Figura 4.7. Diagrama de árbol para el daño a la calidad del ecosistema de la etapa de cimentación y solera



Al igual que antes, en esta categoría de daño el hormigón de la cimentación es el elemento más influyente de todos. En este caso, los porcentajes también están a la par con el mortero de la solera. Para dar un breve análisis inicial, con solo dos diagramas se puede inferir la dinámica que va a observarse en el análisis: los procesos más influyentes en el resultado final van a ser los que lleven cemento incorporados. Esto se debe a que la producción del clinker es un proceso altamente contaminante. Tal y como se ha comentado en el apartado 3 del trabajo, esta categoría de daño se mide en kg de CO<sub>2</sub> emitidos a la atmósfera, y es bien sabido que el principal problema de la producción del clinker es la emisión de gases de efecto invernadero liberados en el proceso de combustión. En un segundo plano, se aprecia que estarán presentes las armaduras de acero de los distintos elementos. En este caso, se ha determinado un porcentaje próximo al 30% de participación entre las armaduras de cimentación y solera.

La figura 4.8 muestra el diagrama correspondiente a la categoría de daño final de impacto al cambio climático:

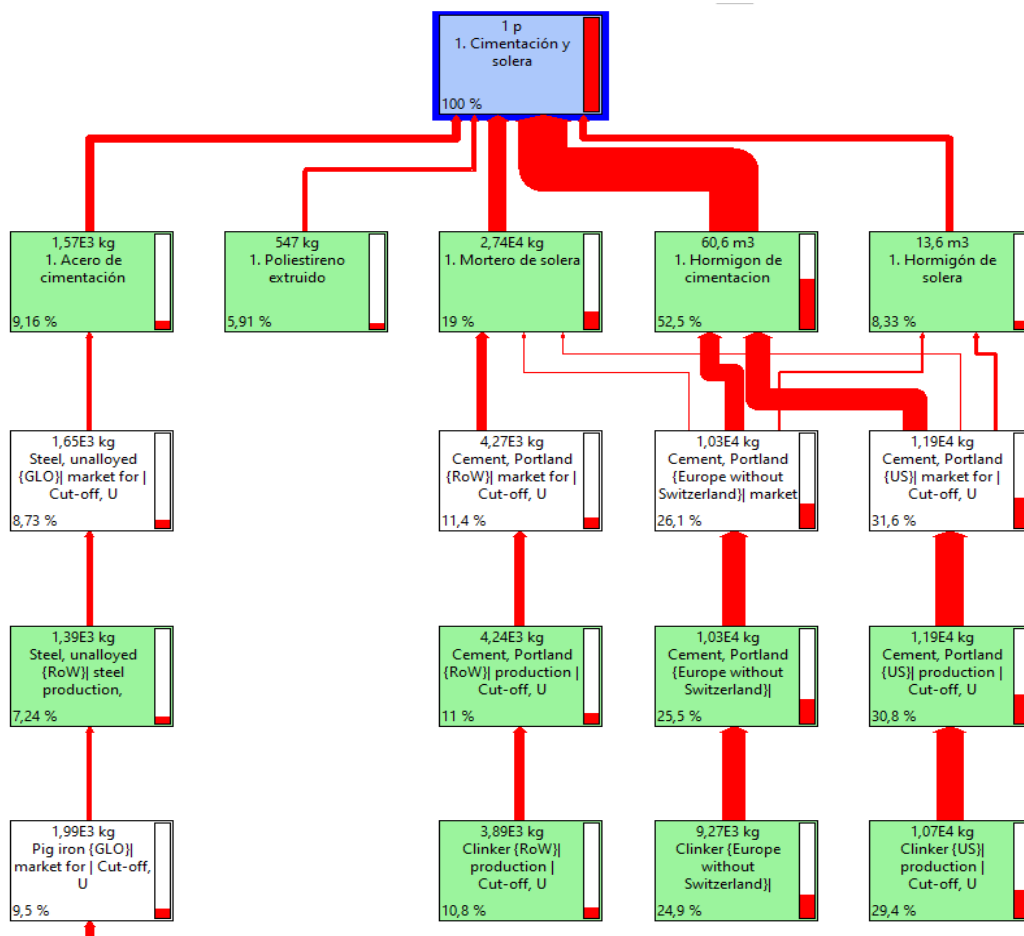


Figura 4.8. Diagrama de árbol para el daño de impacto al cambio climático de la etapa de cimentación y solera

Al igual que en los casos anteriores, se puede apreciar la gran influencia de la producción del clinker tal y como se puede comprobar en el diagrama, este alcanza más de un 60 % de contribución a la etapa entre los hormigones y el mortero., Cabe mencionar que también aparece el poliestireno extruido, pero en un porcentaje pequeño.

Por último, La figura 4.9 muestra el diagrama correspondiente a la categoría de daño final de impacto a los recursos:

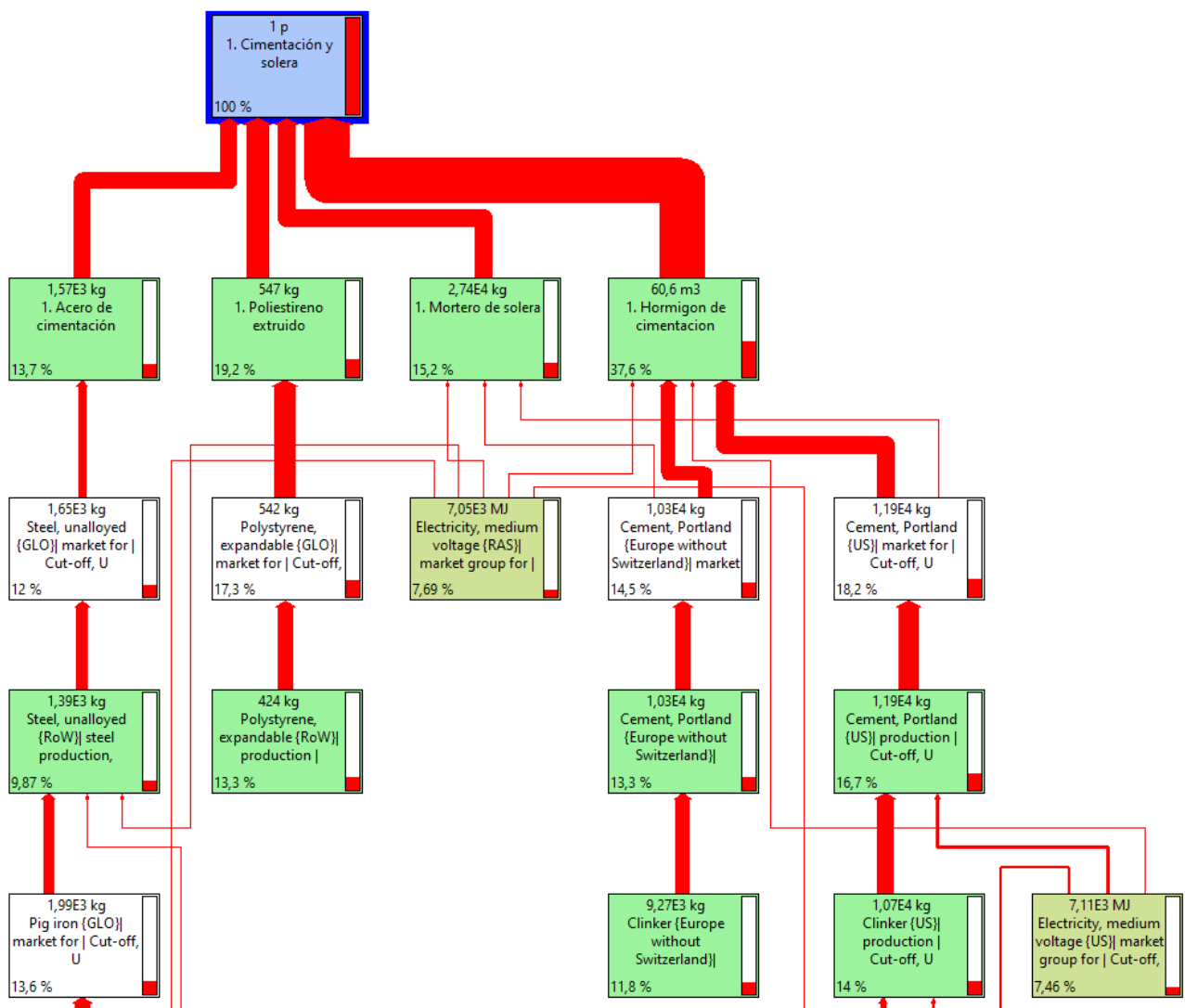


Figura 4.9. Diagrama de árbol para el daño a los recursos de la etapa de cimentación y solera

Como en las otras tres categorías, predomina la influencia del hormigón de la cimentación. Sin embargo, se puede apreciar la aparición del poliestireno extruido con un porcentaje de casi el 20 %. Como este material es un derivado del benceno, el cual es un subproducto de la destilación del carbón, la influencia de este proceso en la etapa se debe a la extracción de este carbón. También se observa la participación de la energía eléctrica con porcentajes significativos. Esto se puede deber a que esta energía provenga de fuentes no renovables, en la cual la extracción de los recursos necesarios para generar la electricidad (principalmente combustibles fósiles) es una parte importante del proceso.

Para poder analizar las categorías de daño de punto medio, no resulta adecuado presentar la información mediante diagramas de árbol, ya que estos serían enormes y la mayoría de los elementos no se apreciarían. En su lugar, se decidió utilizar la opción de los diagramas de barras, donde se pueden apreciar con una mayor claridad los resultados del estudio.

En la figura 4.10, se expone la gráfica para todas las categorías de impacto de punto medio:

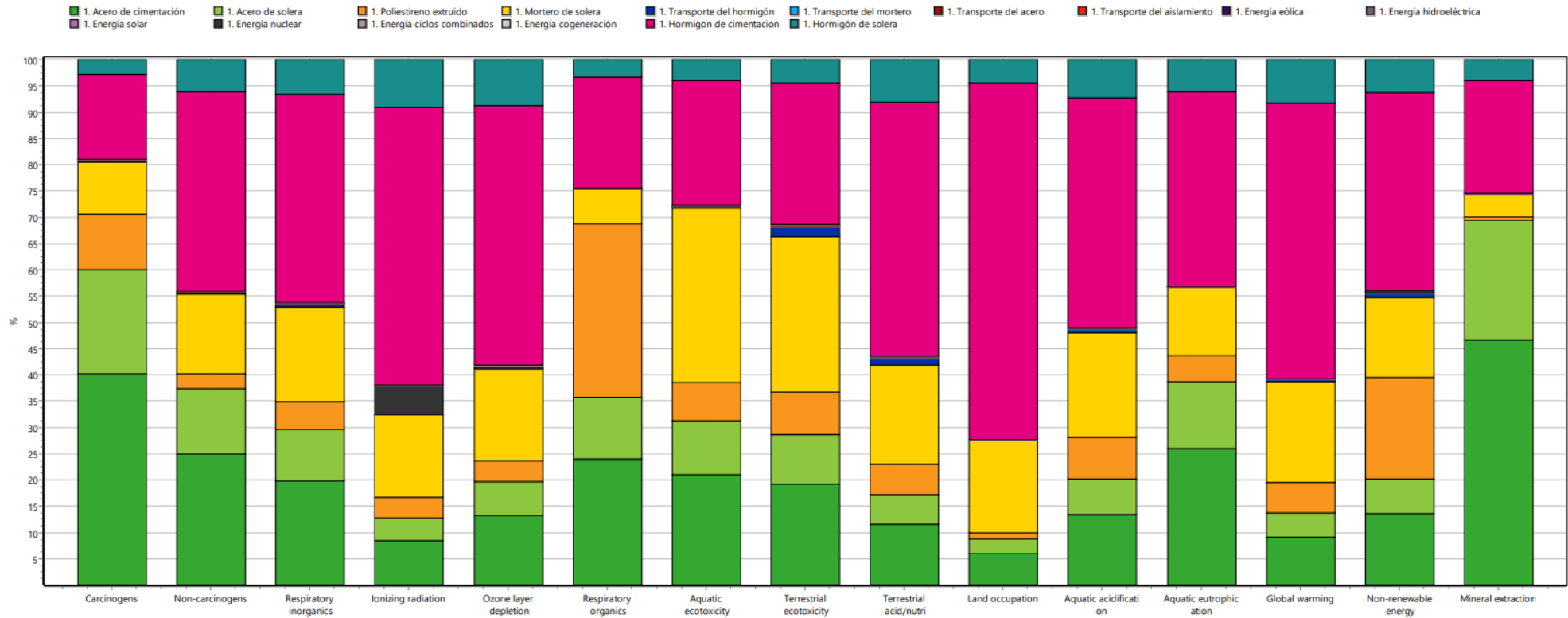


Figura 4.10. Gráfica de barras de las categorías de daño de punto medio de la etapa de cimentación y solera

Como ya se comprobó en los diagramas de árbol presentados anteriormente, en la mayoría de categorías predomina el impacto del hormigón de la cimentación, seguido del acero de la cimentación y el hormigón de la solera, principalmente. En algunas categorías específicas esto puede variar, como es el caso de la respiración de compuestos orgánicos, donde predomina el poliestireno. Esto se puede deber a la emisión de sustancias en el proceso de polimerización del estireno. En la categoría de radiación ionizante también aparece la energía nuclear, debido a los elementos radiactivos utilizados para la producción de energía de esta forma.

En la figura 4.11, se expone la gráfica para todas las categorías de impacto de daño final:

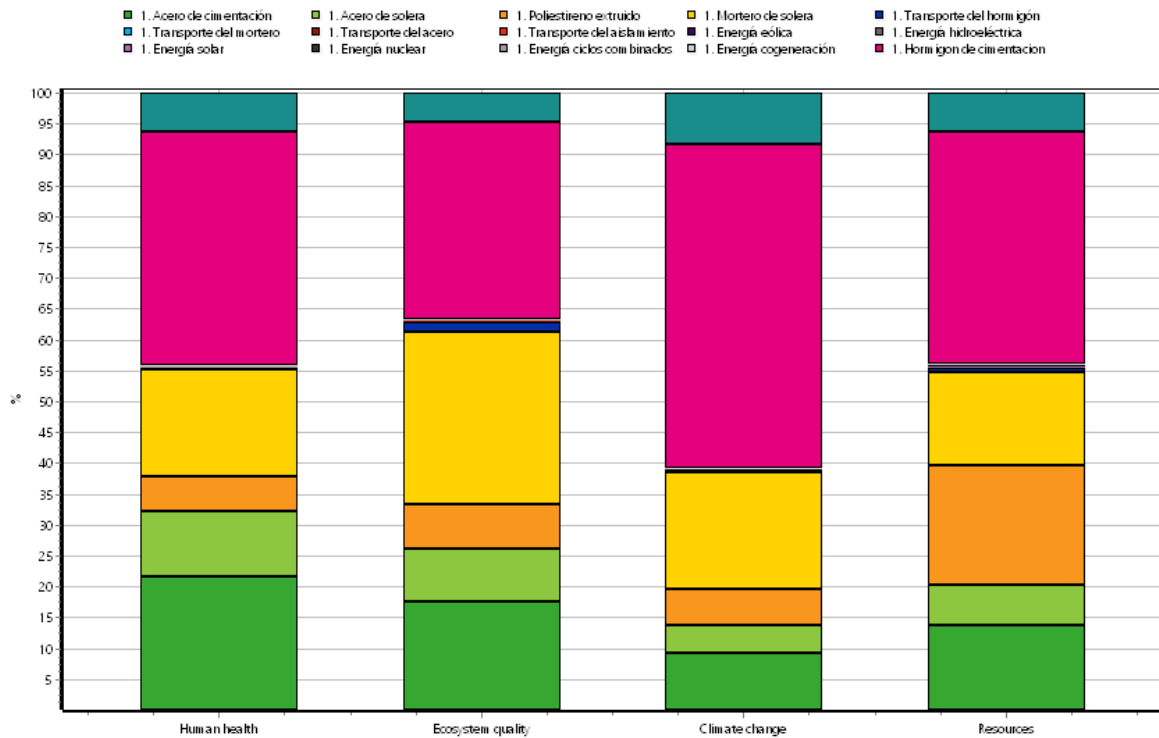


Figura 4.11. Gráfica de barras de las categorías de daño final de la etapa de cimentación y solera

Esta gráfica recoge los resultados de la anterior. Aquí también se aprecia la influencia del poliestireno en el impacto a los recursos. De nuevo el hormigón es predominante en todas las categorías, lo que es coherente con los resultados anteriores, ya que los daños finales son una recopilación de los daños medios. También es importante remarcar la presencia de las armaduras que, aunque los volúmenes sean del orden de 100 veces menor que el hormigón, siguen teniendo una participación importante.

En las gráficas normalizadas se podrán observar con mayor exactitud las categorías más afectadas por estos procesos.

Para finalizar con el apartado, se presentan gráficas normalizadas. Estas gráficas se han modificado utilizando unos factores de normalización que permiten el poder comparar el impacto de varias categorías, aunque estas estén referidas a tipos de impacto diferentes. Cada categoría tiene su expresión para el factor de normalización, que viene dado por la metodología en la que se desarrolle.

Las figuras 4.12 y 4.13 muestran estas gráficas de barras normalizadas para las categorías de daño de punto medio y de daño final.

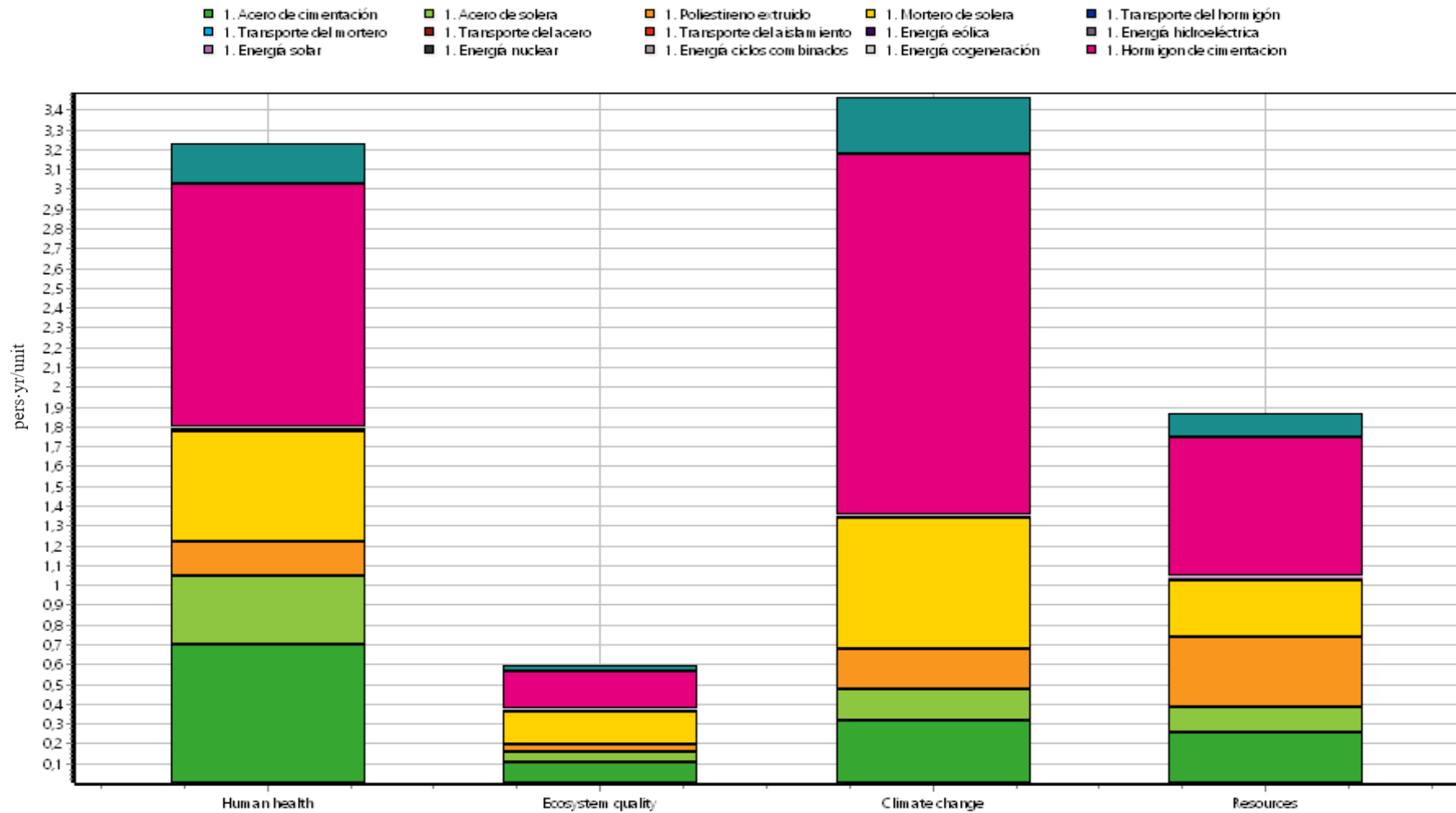


Figura 4.12. Gráfica de barras normalizada de las categorías de daño final de la etapa de cimentación y solera

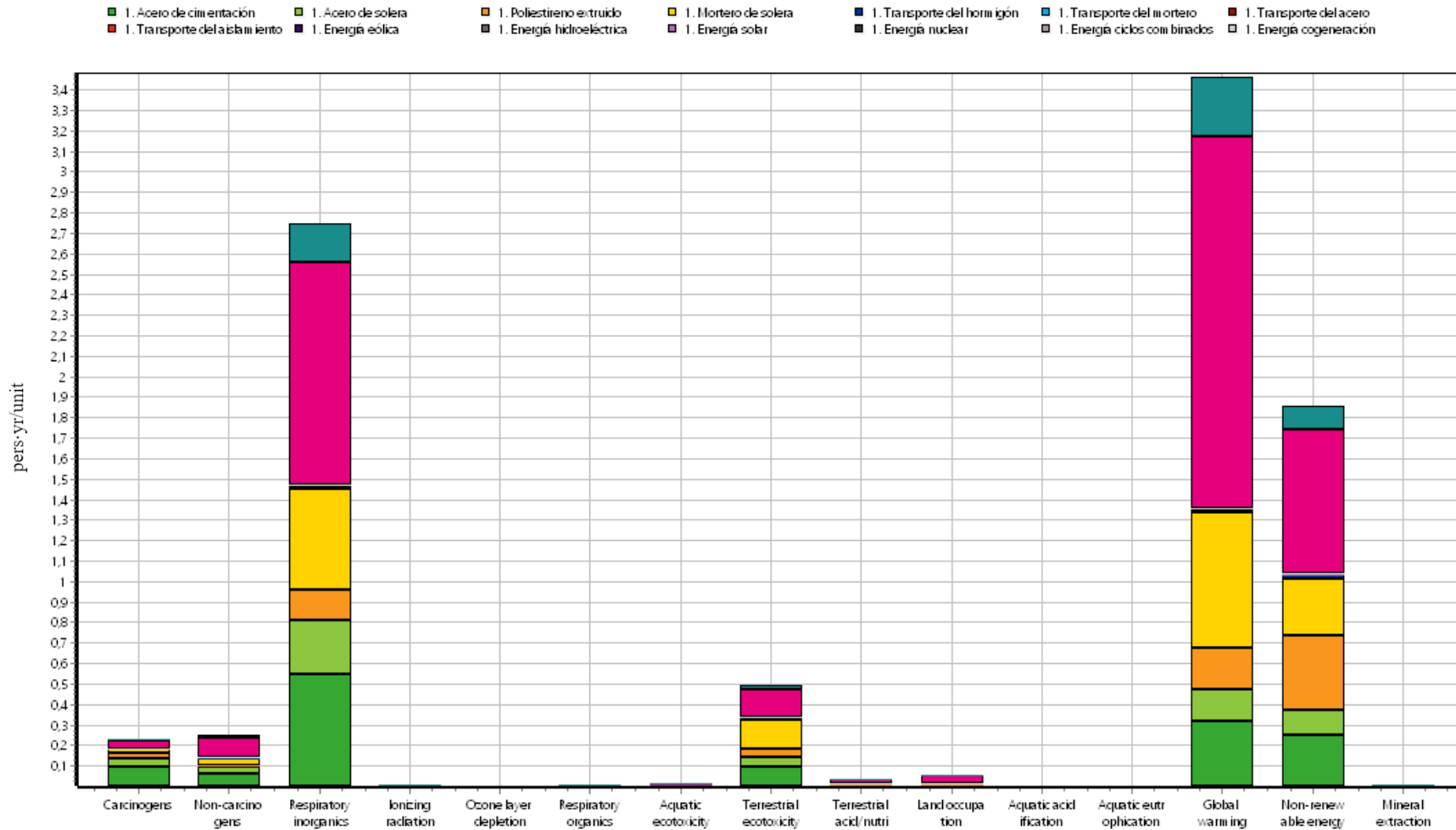


Figura 4.13. Gráfica de barras normalizada de las categorías de daño de punto medio de la etapa de cimentación y solera



Estas dos gráficas de barras son más realistas que las anteriores, permitiendo mejores comparaciones entre las contribuciones globales de las categorías de impacto estudiadas. Aquellas estaban representadas en porcentaje, de forma que cada categoría aparece como el 100%, lo que no permite una comparación adecuada. En las gráficas normalizadas, a cada categoría de daño se le ha aplicado un factor de normalización, con el fin de que todas tengan las mismas unidades, lo que permite así poder compararlas. Estas unidades se representan en el eje de ordenadas como persona\*año/unidad (pers\*yr/unit), y definen el impacto de un tipo de emisión que equivale al impacto producido por un número de personas durante 1 año. Para poner un ejemplo: si un proceso produce 20 DALY/kg de cloroetileno en la categoría de impacto a la salud humana, y el factor de normalización es, por ejemplo, 5 DALY/pers\*yr, el daño normalizado a la salud humana será  $20/5 = 4$  pers\*yr/kg de cloroetileno. Como esto se aplica a todas las categorías, se pueden comparar daños entre sí.

Para la primera etapa, las categorías de daño final más importantes son la salud humana y el cambio climático, seguidas de el impacto a los recursos, quedando la calidad del ecosistema en un segundo plano. Observando la figura 4.13, existen tres causantes principales: la respiración de compuestos inorgánicos, el calentamiento global y las energías no renovables. Los tres daños de punto medio tienen su origen en el mismo proceso: la combustión de productos mediante la quema de combustibles fósiles, en este caso principalmente para producir Clinker; y en una segunda instancia para alear el acero de las armaduras. Esto afecta a las tres categorías que destacan: a la respiración de compuestos inorgánicos por la emisión de gases como el CO<sub>2</sub> y el CO, entre otros; al calentamiento global porque estos gases son considerados de efecto invernadero, y a la energía no renovable por la utilización de este tipo de energías en todo el proceso, desde la extracción de la propia materia prima hasta la fabricación de los materiales finales.

Las otras tres categorías que participan son la respiración de elementos carcinógenos y no carcinógenos; y la ecotoxicidad terrestre, todas ellas afectadas por la emisión de gases a la atmósfera, aunque en menor medida.

### 4.2.2 RESULTADOS DE LA ETAPA DE ESTRUCTURA PREFABRICADA

En este apartado y los siguientes, se sigue la misma estructura de representar los resultados que en el apartado anterior. En la figura 4.14 se muestra el diagrama correspondiente a la categoría de daño final de impacto a la salud humana:

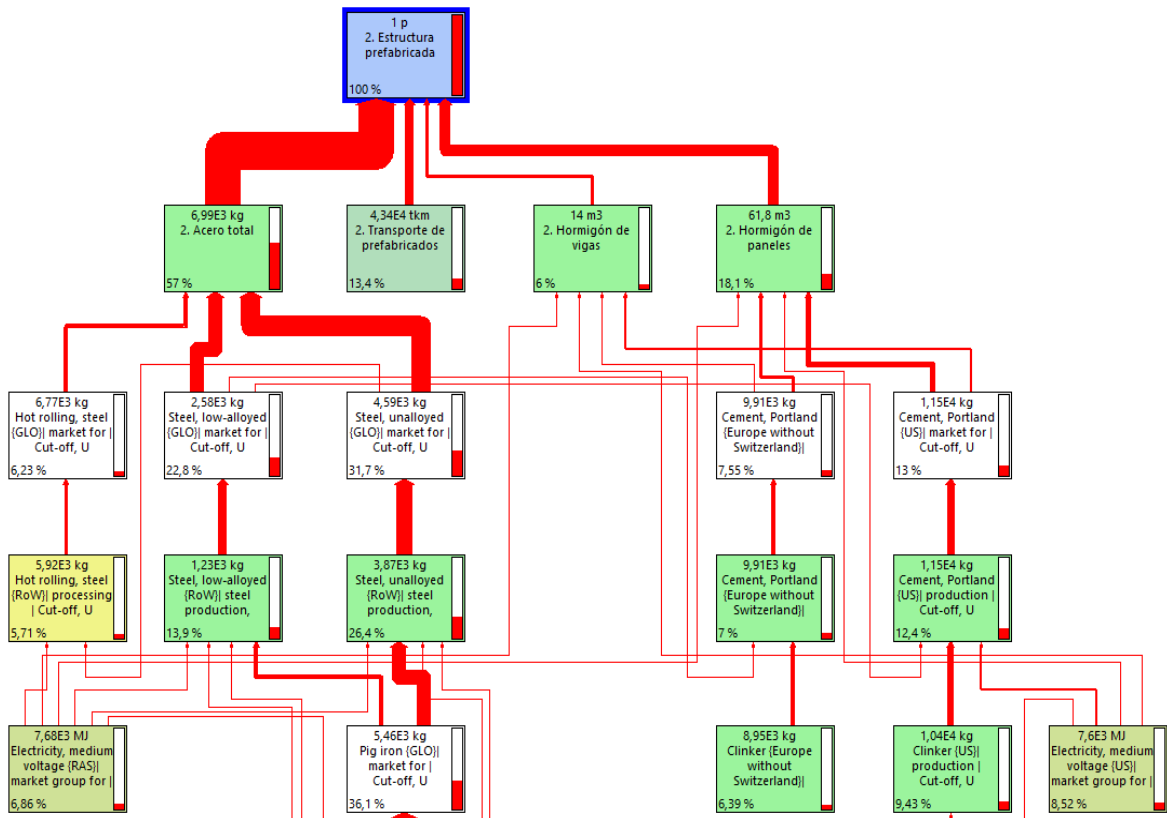


Figura 4.14. Diagrama de árbol para el daño a la salud humana de la etapa de la estructura prefabricada

Se puede apreciar que los resultados de esta segunda etapa son algo diferentes que los obtenidos en la primera. En el diagrama de árbol para el daño a la salud humana se observa que el acero es con diferencia el material que más influye en la categoría, con un 57 % de participación en el total de toda la etapa. La explicación de este hecho es que la relación en volumen de acero/hormigón es mucho más alta que antes. Aun suponiendo un 1% de volumen de acero en las piezas (aunque es probable que, al haber elementos pretensados, este valor sea más elevado), supera con creces al porcentaje de acero en la cimentación y la solera. También aparece la entrada del transporte de los elementos prefabricados, lo cual es

lógico debido a la enorme masa de estos elementos y a la larga distancia que tienen que recorrer desde la fábrica hasta la obra.

A continuación, en la figura 4.15 se muestra el diagrama correspondiente a la categoría de daño final de impacto a la calidad del ecosistema:

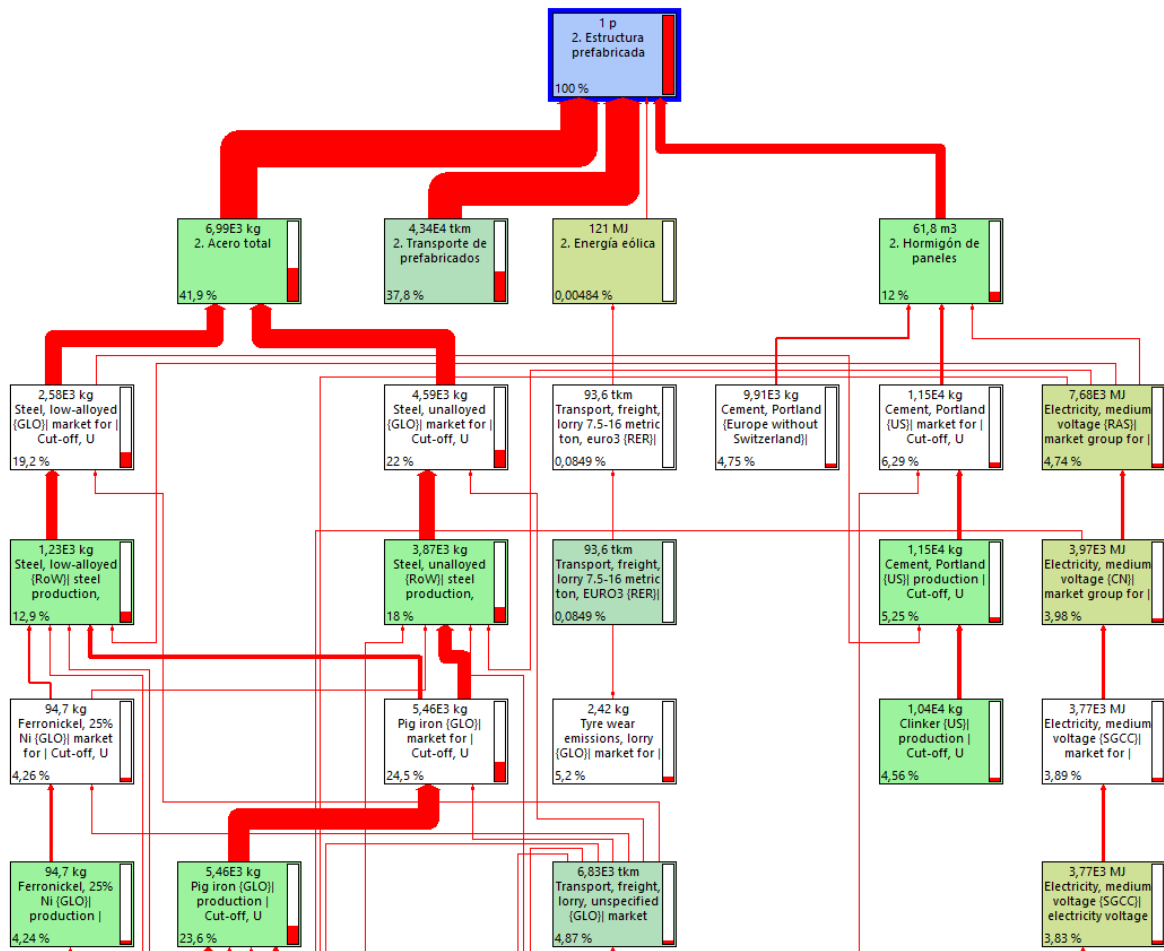


Figura 4.15. Diagrama de árbol para el daño de impacto al cambio climático de la etapa de la estructura prefabricada

En esta categoría de daño a la calidad del ecosistema, el impacto del transporte de los elementos prefabricados es incluso mayor que en la anterior. Esto es debido principalmente a las emisiones producidas por los vehículos de transporte, ya que, aunque sean de la categoría más baja de emisiones, al ser una distancia tan larga el impacto es significativo. No obstante, el impacto del acero sigue siendo el mayor de la etapa. Cabe mencionar que en esta categoría de impacto y con los datos de este trabajo, prácticamente la mayoría de los

daños pertenecen a la categoría de daño de punto medio de ecotoxicidad terrestre, ya que esta también tiene en cuenta emisiones al aire (que luego decantan a la tierra). El resto de las categorías de punto medio dentro de la calidad del ecosistema están referidas a emisiones directamente en la tierra y el agua.

La figura 4.16 muestra el diagrama correspondiente a la categoría de daño final de impacto al cambio climático:

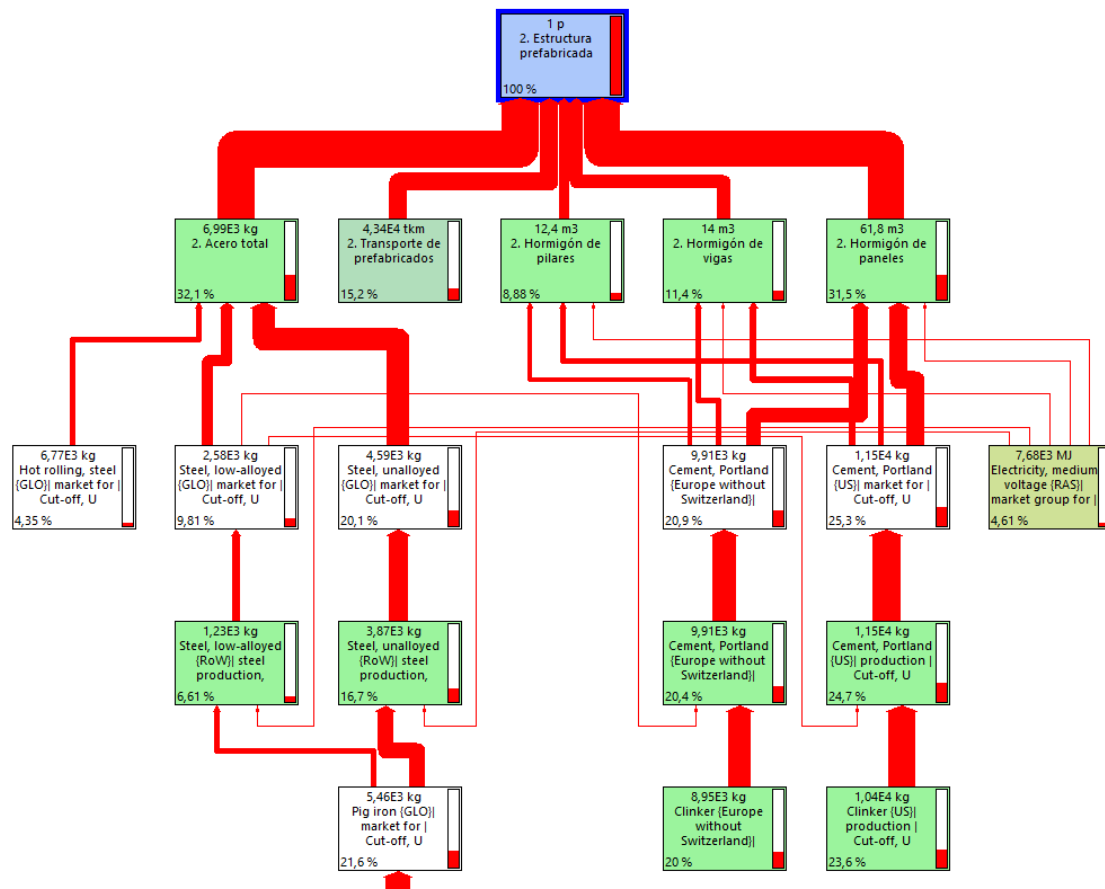


Figura 4.16. Diagrama de árbol para el daño a la calidad del ecosistema de la etapa de la estructura prefabricada

Como se observa, en esta categoría de daño vuelve a aparecer la gran influencia del hormigón utilizado para los paneles de la fachada. Como se ha comentado en la primera etapa, y siguiendo la tónica general de los resultados del estudio, las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera provocadas por la combustión de combustibles fósiles es un aspecto muy importante a tener en cuenta.

Por último, la figura 4.17 muestra el diagrama correspondiente a la categoría de daño final de impacto a los recursos:

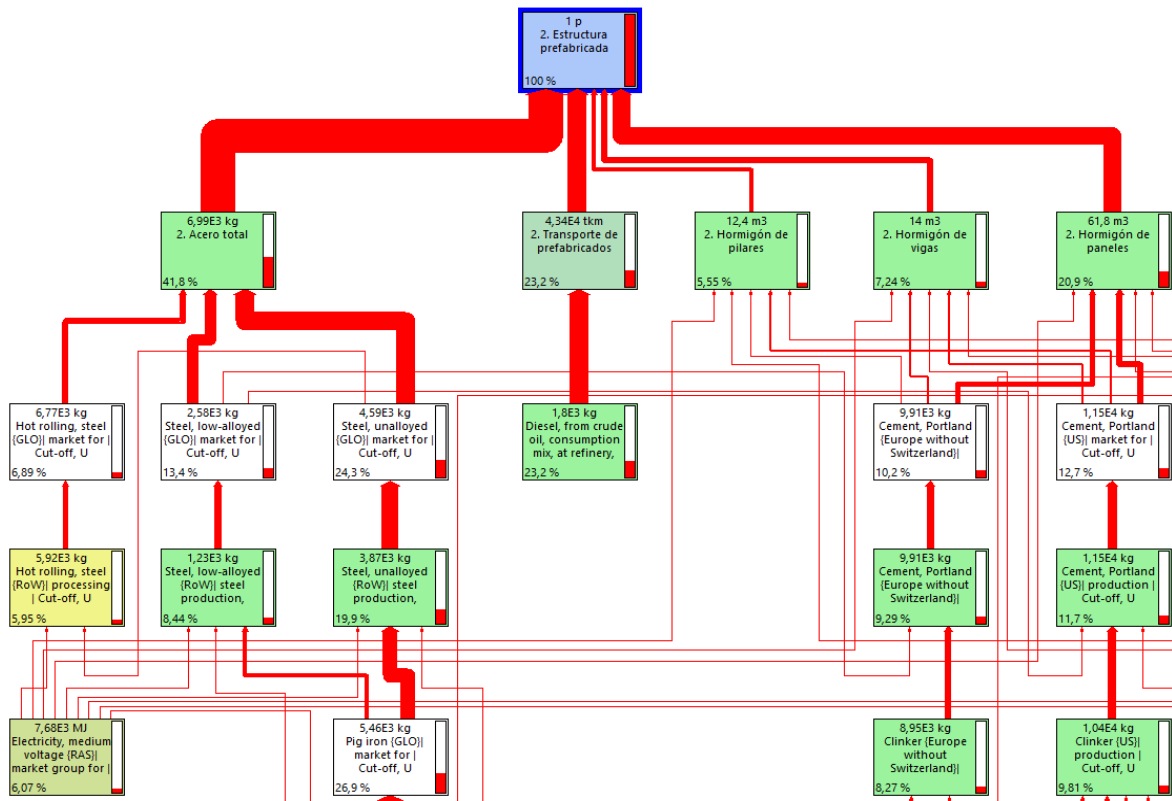


Figura 4.17. Diagrama de árbol para el daño a los recursos de la etapa de la estructura prefabricada

Al igual que en las anteriores categorías de daño, el acero sigue siendo la categoría predominante. Podemos afirmar que esta va a ser la línea general del trabajo. En todas las categorías de daño van a predominar las mismas entradas de materiales. Esto se explica porque no hay demasiados materiales que influyan significativamente y, prácticamente, siempre van a ser el acero y/o el hormigón. Sobre el diagrama, se aprecia que en la categoría de recursos principalmente influye el uso de energías no renovables, las cuales se utilizan para los procesos de aleación del acero y de creación del clinker, aparte del combustible de los vehículos.

Por último, la figura 4.18 y la figura 4.19 muestran las gráficas de barras de las categorías de daño y de punto medio en función de los respectivos factores de normalización de cada categoría:

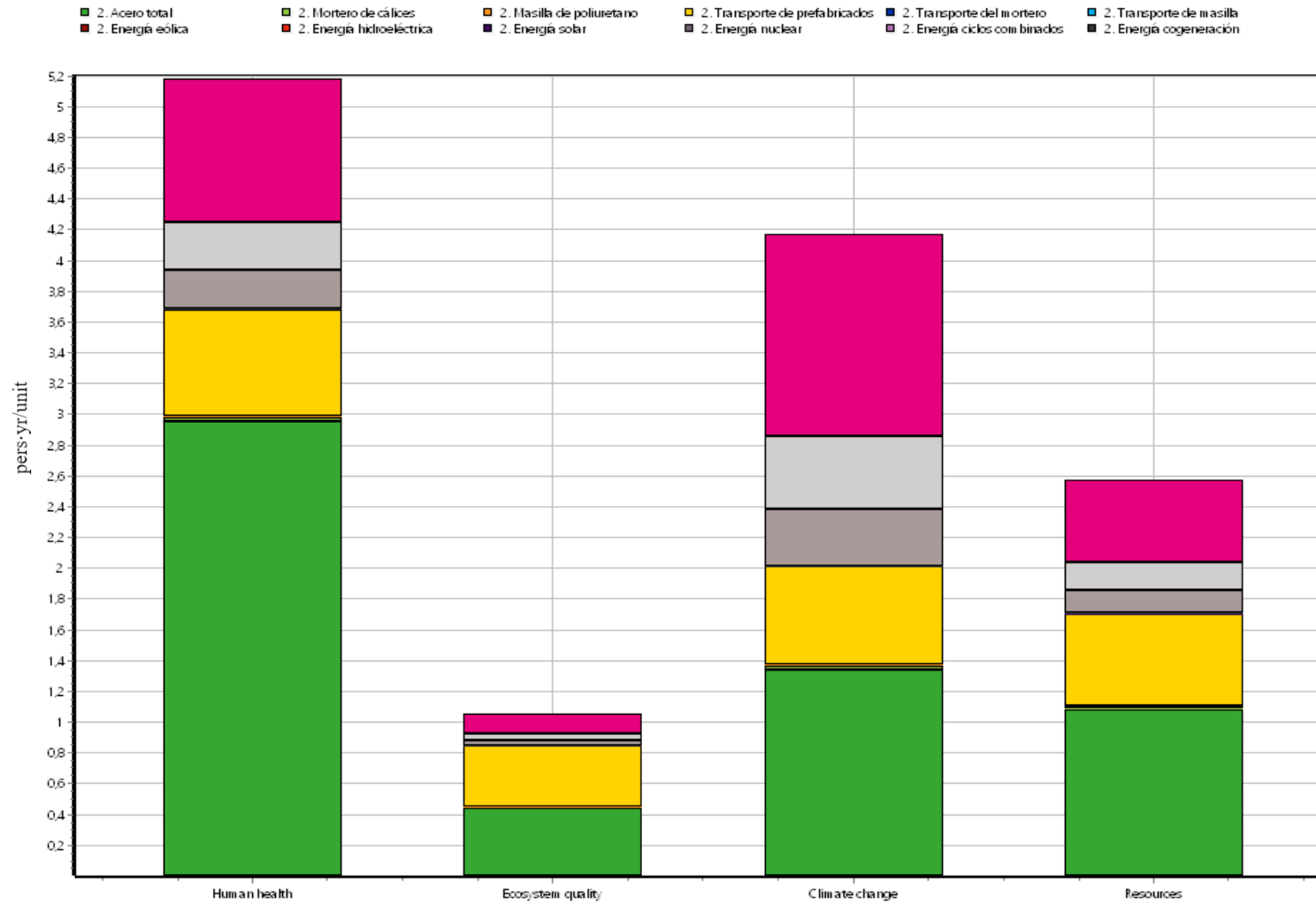


Figura 4.18. Gráfica de barras normalizada de las categorías de daño final de la etapa de la estructura prefabricada

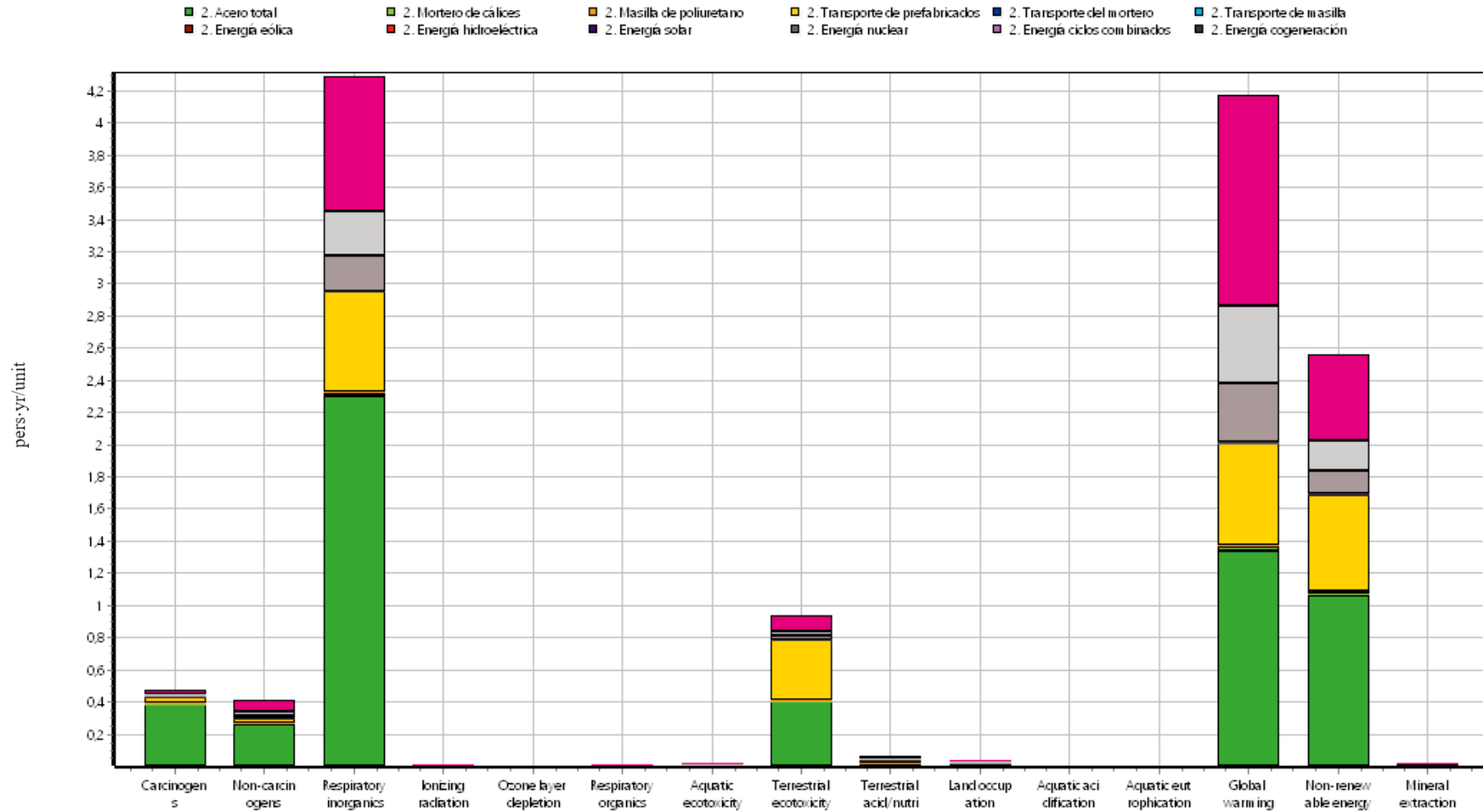


Figura 4.19. Gráfica de barras normalizada de las categorías de daño de punto medio de la etapa de la estructura prefabricada

En esta etapa y para todas las restantes, se ha decidido no presentar las gráficas de daños no normalizadas, ya que no aportan información suficientemente significativa. Se han presentado en la primera etapa para mostrar la capacidad del software de representar datos de diferentes maneras, pero se ha decidido filtrar la información para centrarse en estudiar los datos de mayor interés.

En cuanto al impacto de la etapa, las conclusiones son similares a la etapa anterior: las categorías de daño final con más presencia son de nuevo la salud humana y el cambio climático, seguidas del impacto a los recursos y la calidad del ecosistema. A diferencia de la cimentación y solera, aquí predomina el acero de las armaduras. Como se ha comentado antes, este incremento con respecto al hormigón es debido a que la relación en volumen de acero/hormigón es mayor que en la cimentación. Se ha considerado un 1% de volumen de acero en los elementos prefabricados, aunque se considera que este valor podría ser mayor debido a que hay elementos pretensados. También destaca el transporte, ya que al venir desde una distancia tan lejana y tener tanta masa, las unidades de tkm aumentan considerablemente. Al igual que se comentó en la etapa 1, la quema de combustibles fósiles durante el proceso afecta a las tres categorías que destacan: a la respiración de compuestos inorgánicos por la emisión de gases como el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{CO}$ , entre otros; al calentamiento global porque estos gases son considerados de efecto invernadero; y a la energía no renovable por la utilización de este tipo de energías en todo el proceso, desde la extracción de la propia materia prima hasta la fabricación de los materiales finales.

Con los resultados obtenidos hasta ahora en el trabajo, se pueden predecir en cierta medida que las siguientes etapas van a seguir en la misma línea: el hormigón y el acero son materiales con un elevado impacto en el medio ambiente.



### 4.2.3 RESULTADOS DE LA ETAPA DE FORJADOS

La figura 4.20 muestra el diagrama de árbol correspondiente para la categoría de impacto de daño a la salud humana:

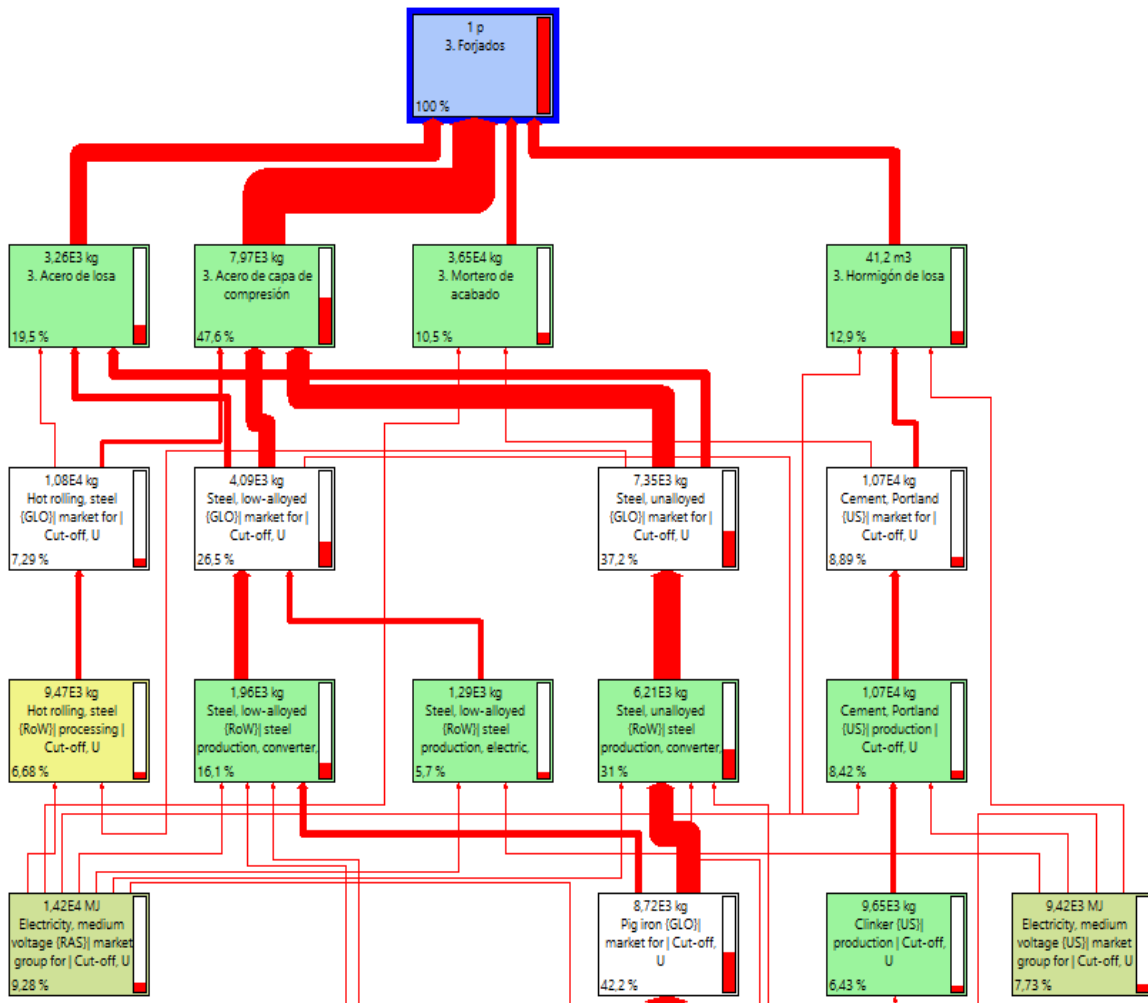


Figura 4.20. Diagrama de árbol para el daño a la salud humana de la etapa de los forjados

Para empezar con la etapa de los forjados, se vuelve a observar que la situación es la misma que en apartados anteriores. En esta etapa destaca aún más el acero, en específico el de la capa de compresión. Este armado destaca debido a la gran cantidad de armadura de negativos que tiene, concretamente 333 barras además del propio mallazo que lleva de base, incrementan mucho la relación acero/hormigón.

A continuación, en la figura 4.21, se muestra el diagrama de árbol para la categoría de impacto de daño a la calidad del ecosistema:

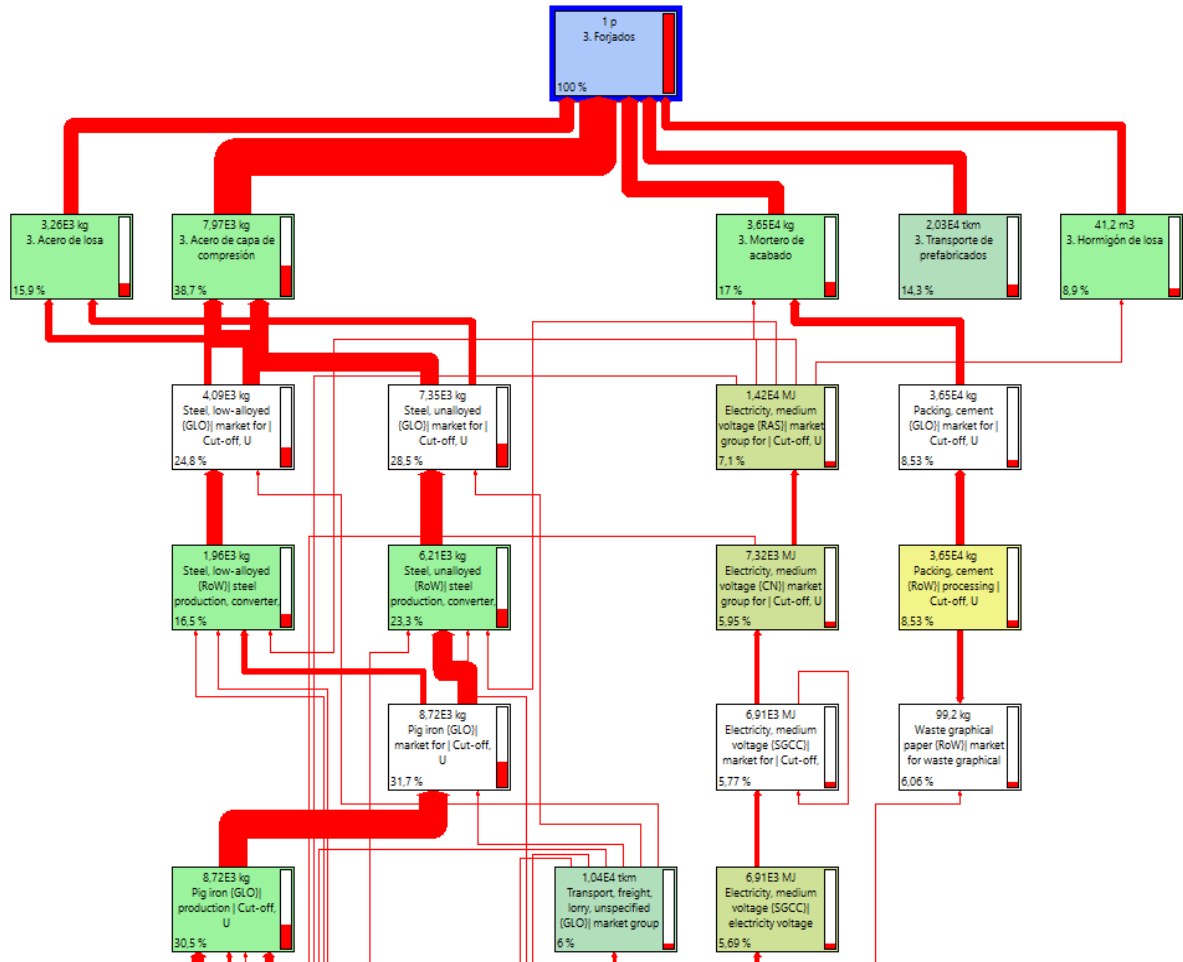


Figura 4.21. Diagrama de árbol para el daño a la calidad del ecosistema de la etapa de los forjados

Los resultados para esta categoría de daño a la calidad del ecosistema son prácticamente idénticos a la categoría anterior. En este caso también aparece el transporte de los elementos prefabricados que, como se ha comentado en la etapa de la estructura prefabricada, al venir desde una larga distancia y tratarse de cantidades elevadas, la influencia de esta categoría aumenta considerablemente. Una posible idea de solución a esto sería comprar los elementos a industrias más cercanas, aunque lo normal es que las empresas se decanten por la opción que resulte más económica.

La figura 4.22 muestra el diagrama de árbol correspondiente para la categoría de impacto de daño al cambio climático:

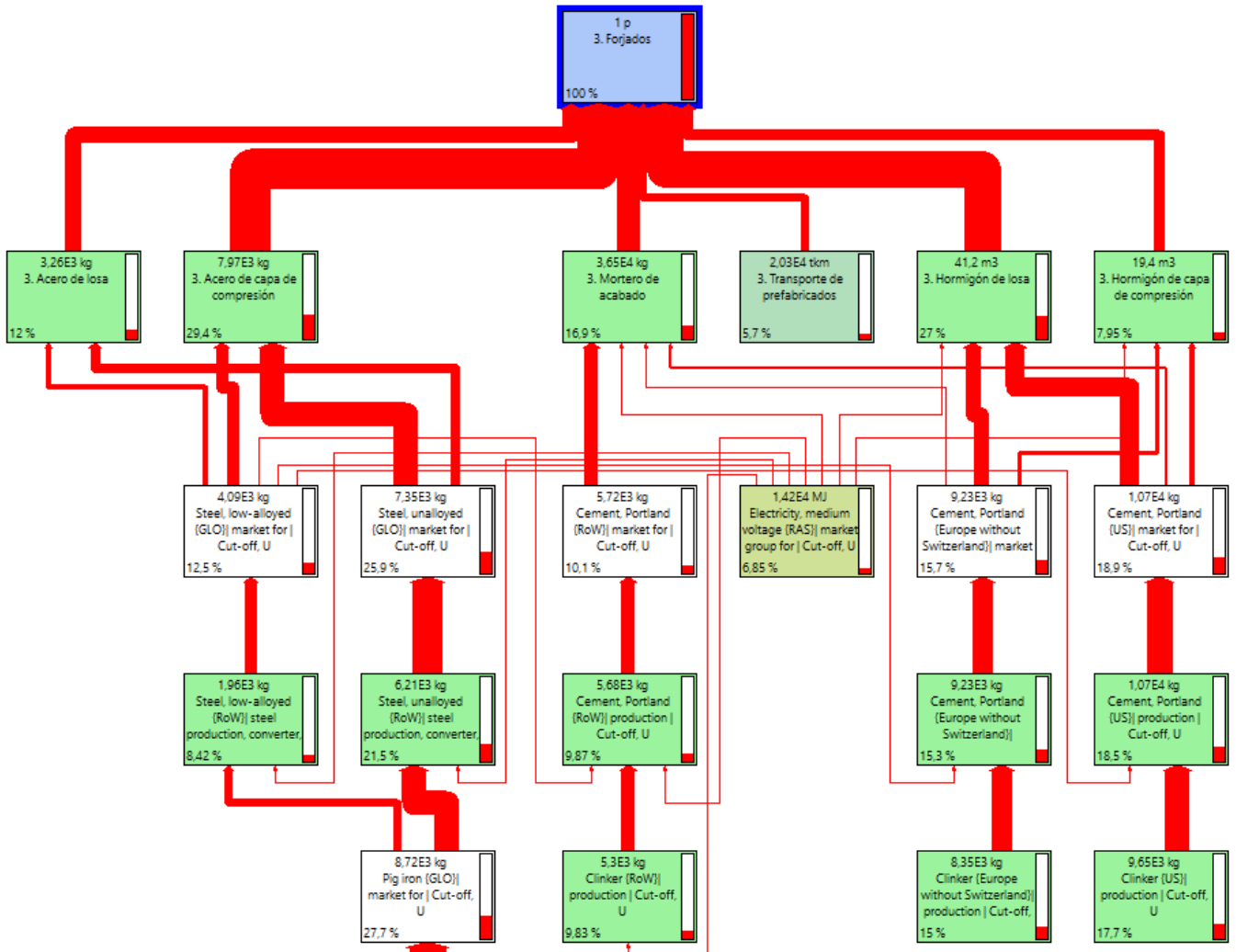


Figura 4.22. Diagrama de árbol para el daño de impacto al cambio climático de la etapa de los forjados

En la categoría del cambio climático la tendencia cambia, siendo en este caso el hormigón de la losa alveolar más influyente que el acero. Cabe mencionar que, en el programa SimaPro, las entradas de hormigón prefabricado y hormigón in situ se consideran por separado. Esto se debe a que la propia base de datos tiene información tanto de hormigón in situ como de hormigón comprado a una fábrica de elementos prefabricados.

Por último, en la figura 4.23 muestra el diagrama de árbol correspondiente para la categoría de impacto de daño a los recursos:

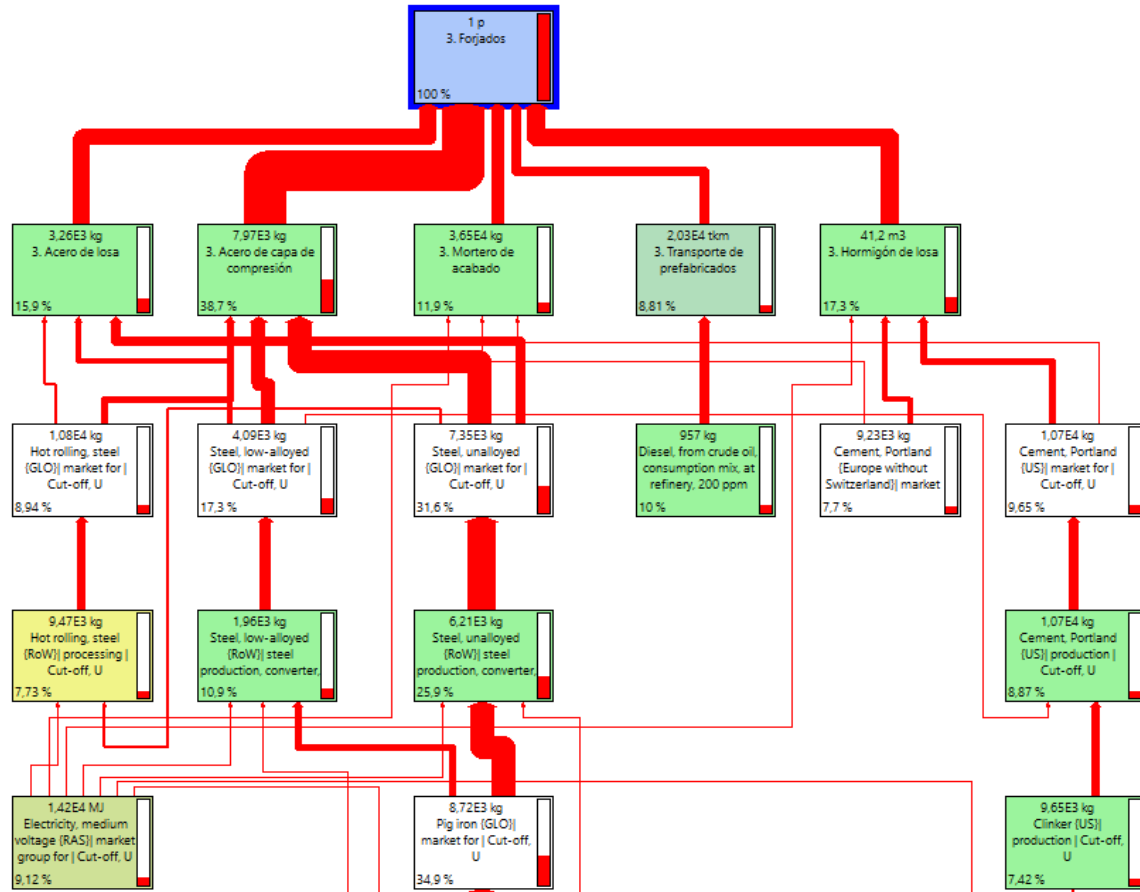


Figura 4.23. Diagrama de árbol para el daño a los recursos de la etapa de los forjados

Por último, la categoría de daño restante sigue la misma tendencia que las anteriores. Como se ha explicado anteriormente, a este daño final le influye en mayor grado la utilización de energía producida con fuentes no renovables. El uso de este tipo de energías está muy arraigado en la sociedad, pero hay que ser conscientes de que, si se quiere provocar un cambio y empezar a reducir el calentamiento global, es necesario reducir el uso de este tipo de energías y buscar otras alternativas más verdes.

Por último, la figura 4.24 y la figura 4.25 muestran las gráficas de barras de las categorías de daño y de punto medio en función de los respectivos factores de normalización de cada categoría:

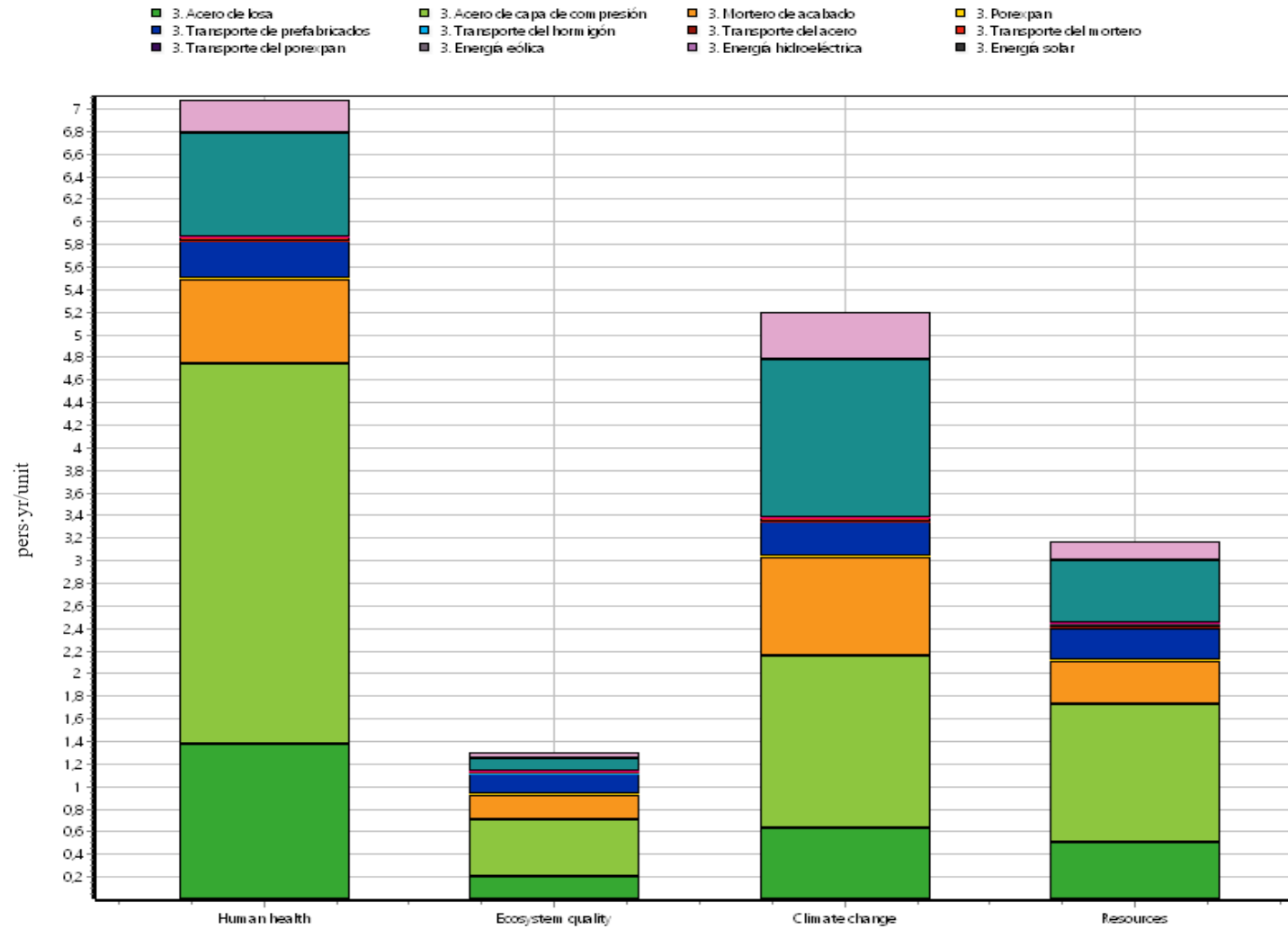


Figura 4.24. Gráfica de barras normalizada de las categorías de daño final de la etapa de los forjados

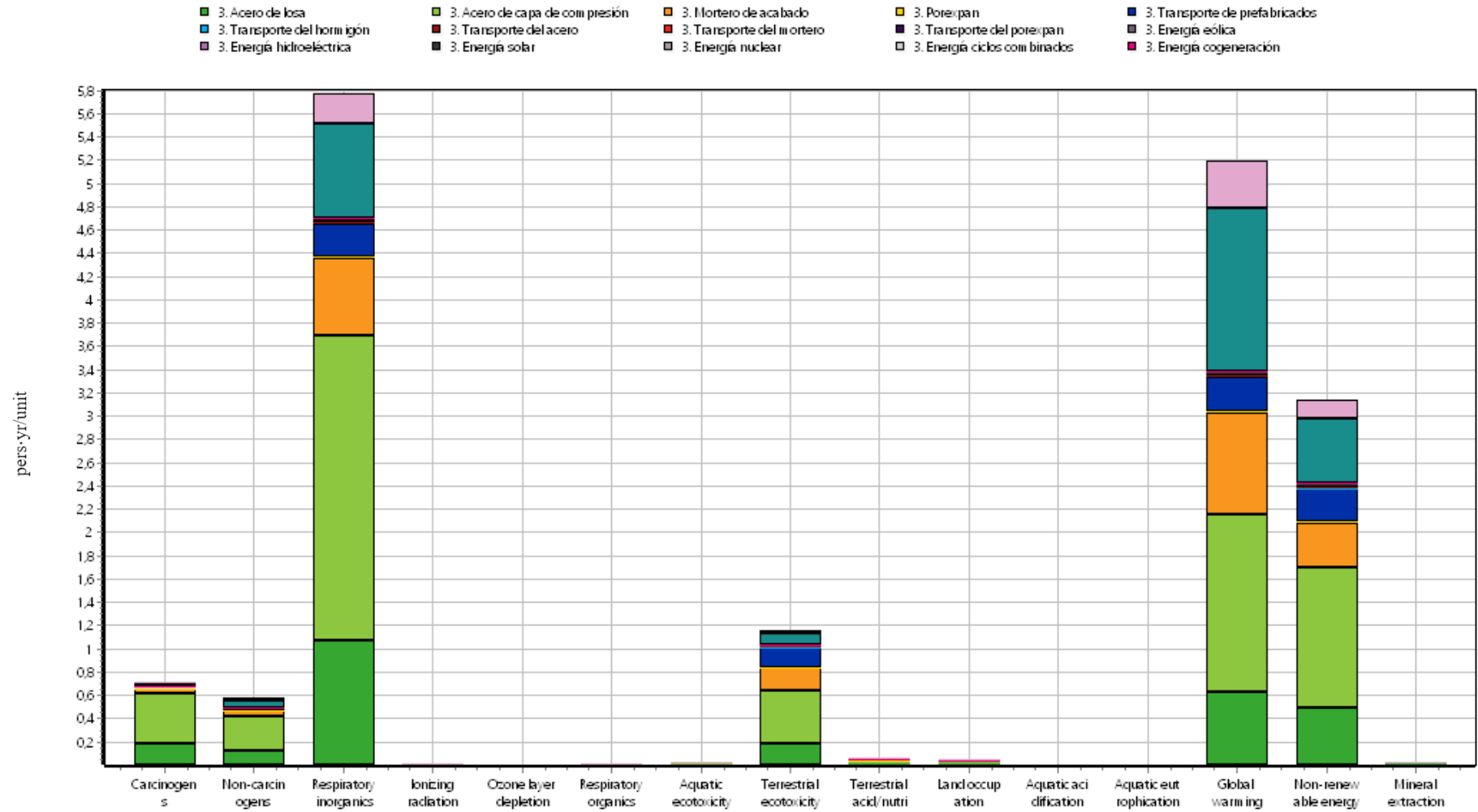


Figura 4.25. Gráfica de barras normalizada de las categorías de daño de punto medio de la etapa de los forjados

De la misma forma que en las etapas anteriores, las categorías de daño final con más presencia son de nuevo la salud humana y el cambio climático, seguidas de el impacto a los recursos y la calidad del ecosistema.

Como se ha visto en los diagramas de árbol, en esta etapa también predomina el acero de las armaduras, incluso más que en la etapa de la estructura prefabricada. Esto se debe a la gran cantidad de armadura de negativos que se coloca en toda la capa de compresión. Estos negativos no venían representados en el plano que se mostró anteriormente, pero son barras de 1,5 metros colocadas en todo el perímetro de ambos forjados cada 25 cm que, en comparación con el tamaño de la propia capa de compresión, es mucha cantidad de acero. También aparece el transporte de las placas alveolares, pero este es mucho menor que en la etapa anterior debido a que la masa es mucho menor, y aunque esté a la misma distancia, el valor expresado en tkm es menor.

De nuevo, como se ha comentado en las otras dos etapas, las categorías que destacan lo hacen porque están altamente influenciadas por la quema de combustibles fósiles y las emisiones que esa combustión producen, afectando a las categorías de la siguiente manera: a la respiración de compuestos inorgánicos por la emisión de gases como el CO<sub>2</sub> y el CO, entre otros; al calentamiento global porque estos gases son considerados de efecto invernadero; y a la energía no renovable por la utilización de este tipo de energías en todo el proceso, desde la extracción de la propia materia prima hasta la fabricación de los materiales finales.

#### 4.2.4 RESULTADOS DE LA ETAPA DE LA ESCALERA IN SITU

La figura 4.26 muestra el diagrama de árbol correspondiente para la categoría de impacto de daño a la salud humana:

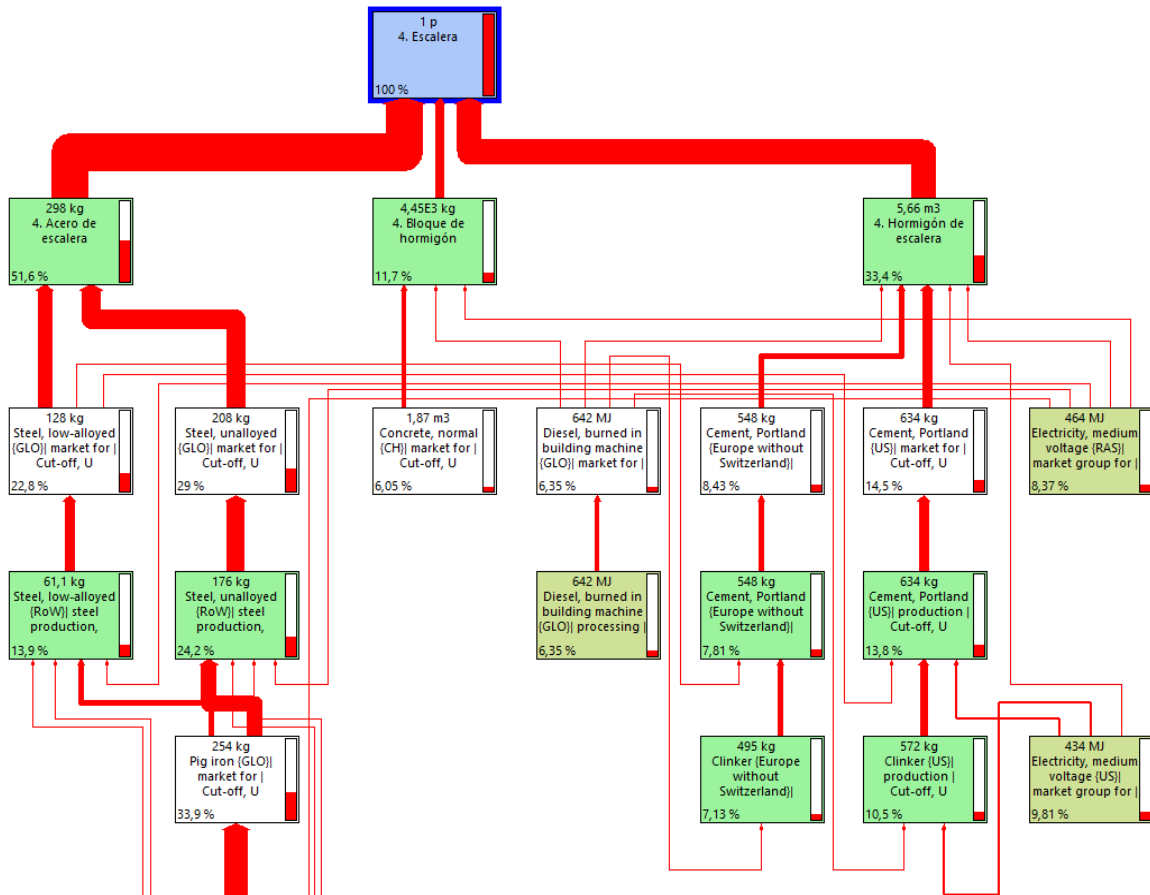


Figura 4.26. Diagrama de árbol para el daño a la salud humana de la etapa de la escalera in situ

De nuevo, esta última etapa sigue la línea de las anteriores, además de que en general hay menos materiales. El acero es la parte más influyente de la etapa, seguida del hormigón. No se aprecia la influencia de otros factores, ya que se comprueba que las energías prácticamente no aparecen en los diagramas, y los transportes tampoco, a excepción del de los elementos prefabricados.



A continuación, en la figura 4.27, se muestra el diagrama de árbol para la categoría de impacto de daño a la calidad del ecosistema:

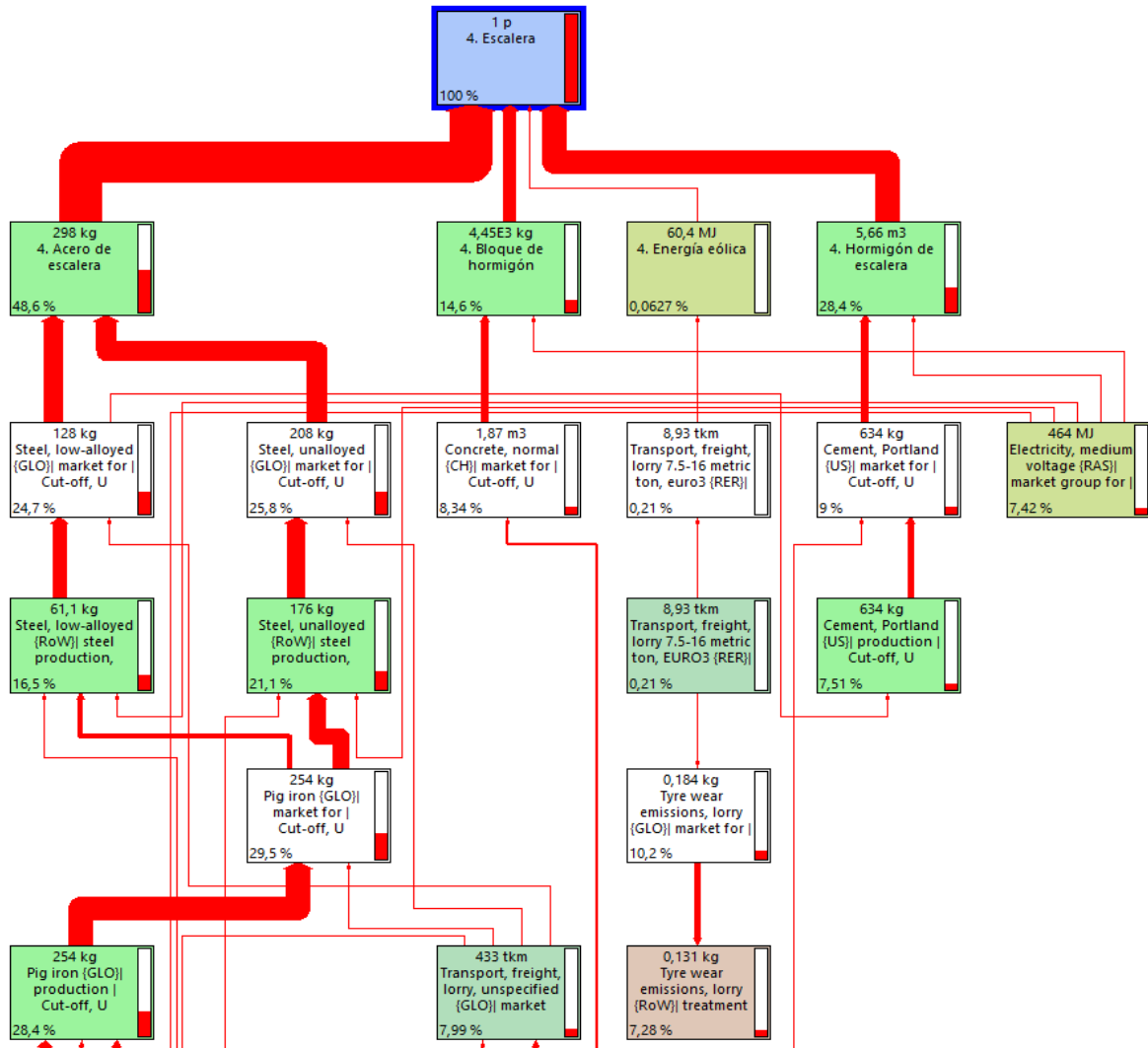


Figura 4.27. Diagrama de árbol para el daño a la calidad del ecosistema de la etapa de la escalera in situ

Para la etapa de la escalera, se aprecian únicamente las entradas del acero, bloque y hormigón de escalera; esto es debido a que el corte de porcentaje es elevado con el fin de que se vean bien los diagramas. En este caso del daño a la calidad del ecosistema, se ve que aparece la energía eólica, pero no por su aporte como tal a la etapa, sino por los residuos que produce. Estos residuos están en rojo al final del diagrama, y en este caso indican las emisiones producidas por ruedas neumáticas. Se sabe que son emisiones porque las flechas apuntan en dirección contraria a la que deberían.

La figura 4.28 muestra el diagrama de árbol correspondiente para la categoría de impacto de daño al cambio climático:



Figura 4.28. Diagrama de árbol para el daño de impacto al cambio climático de la etapa de la escalera in situ

En este caso, a diferencia de en las dos categorías de daño anteriores, el hormigón predomina por encima del acero de la armadura. Esto puede ser porque la producción de clinker afecta bastante más a la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera que el procesamiento del acero. La influencia de los bloques se mantiene igual, en torno al 15 %.

Por último, en la figura 4.29 muestra el diagrama de árbol correspondiente para la categoría de impacto de daño a los recursos:

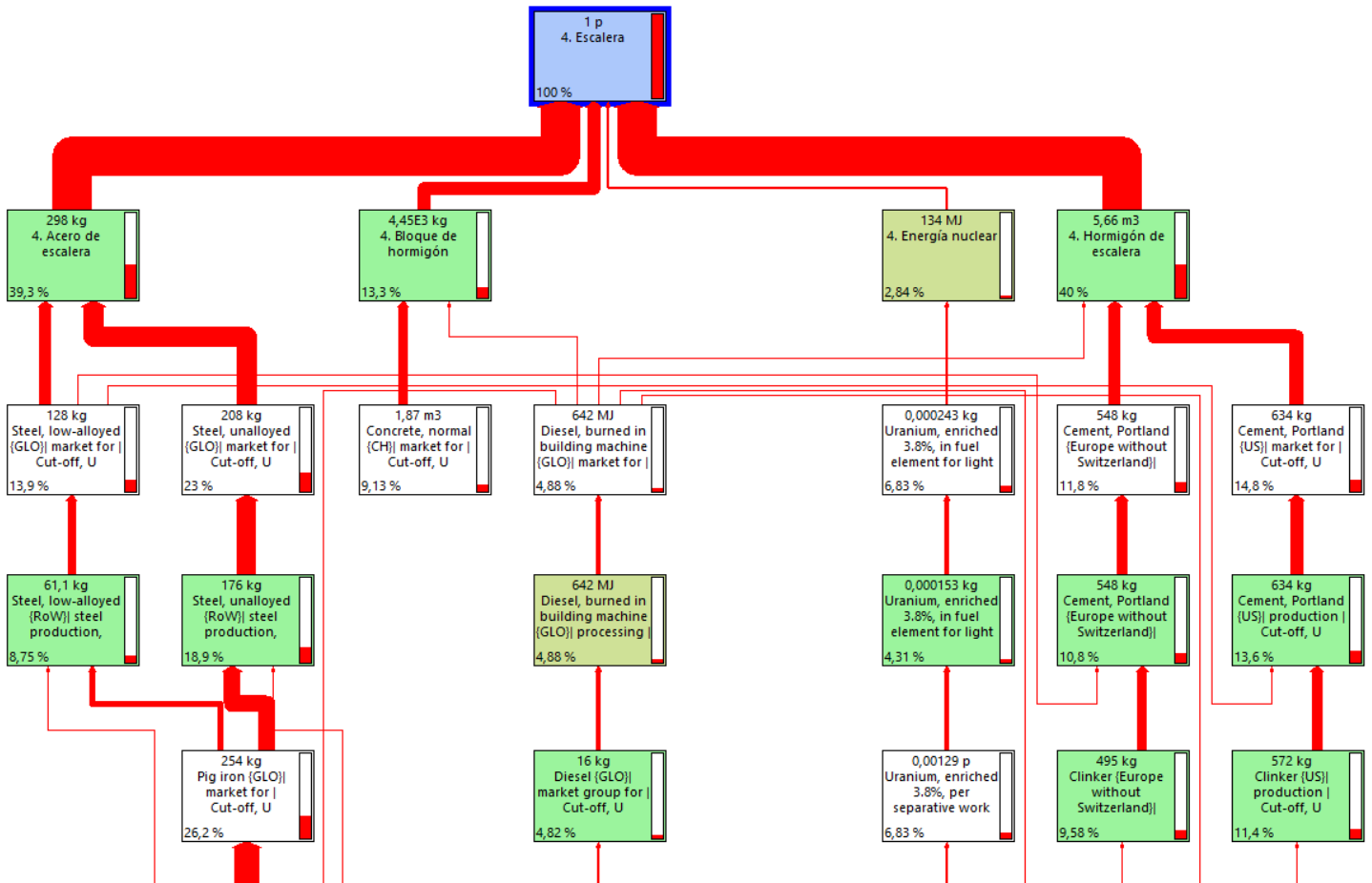


Figura 4.29. Diagrama de árbol para el daño a los recursos de la etapa de la escalera in situ

En el diagrama aparece por primera vez la energía nuclear, y eso puede indicar la baja participación de los materiales de esta etapa a las emisiones totales. Llegados a este punto, se considera innecesario seguir comentando diagramas de árbol para categorías en específico, ya que ha quedado demostrado que los resultados son siempre los mismos: el acero y el hormigón eclipsan totalmente la mayoría de los diagramas, debido a que las cantidades de estos materiales son mucho mayores que en el resto.

Por último, la figura 4.30 y la figura 4.31 muestran las gráficas de barras de las categorías de daño y de punto medio en función de los respectivos factores de normalización de cada categoría:

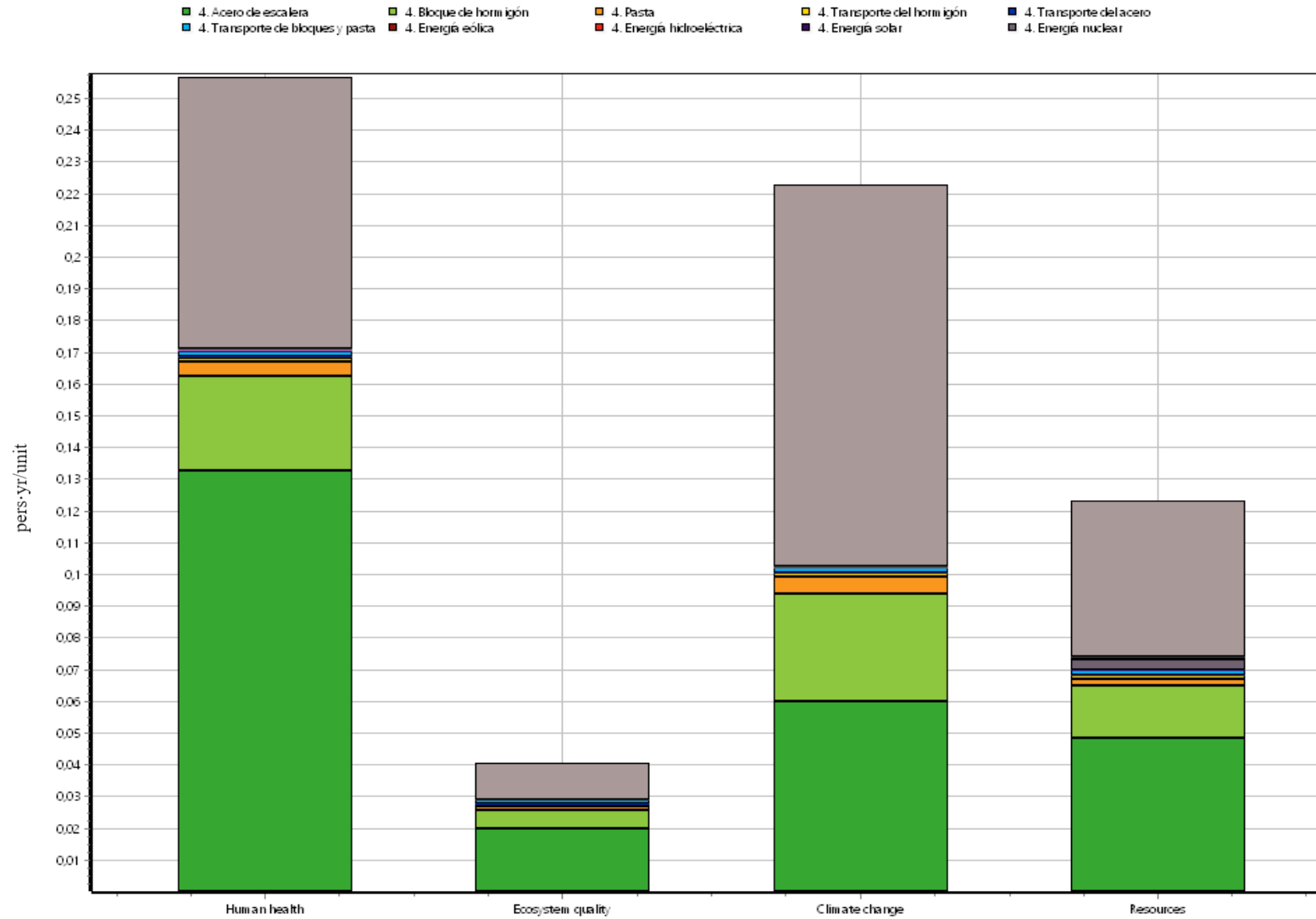


Figura 4.30. Gráfica de barras normalizada de las categorías de daño final de la etapa de la escalera in situ

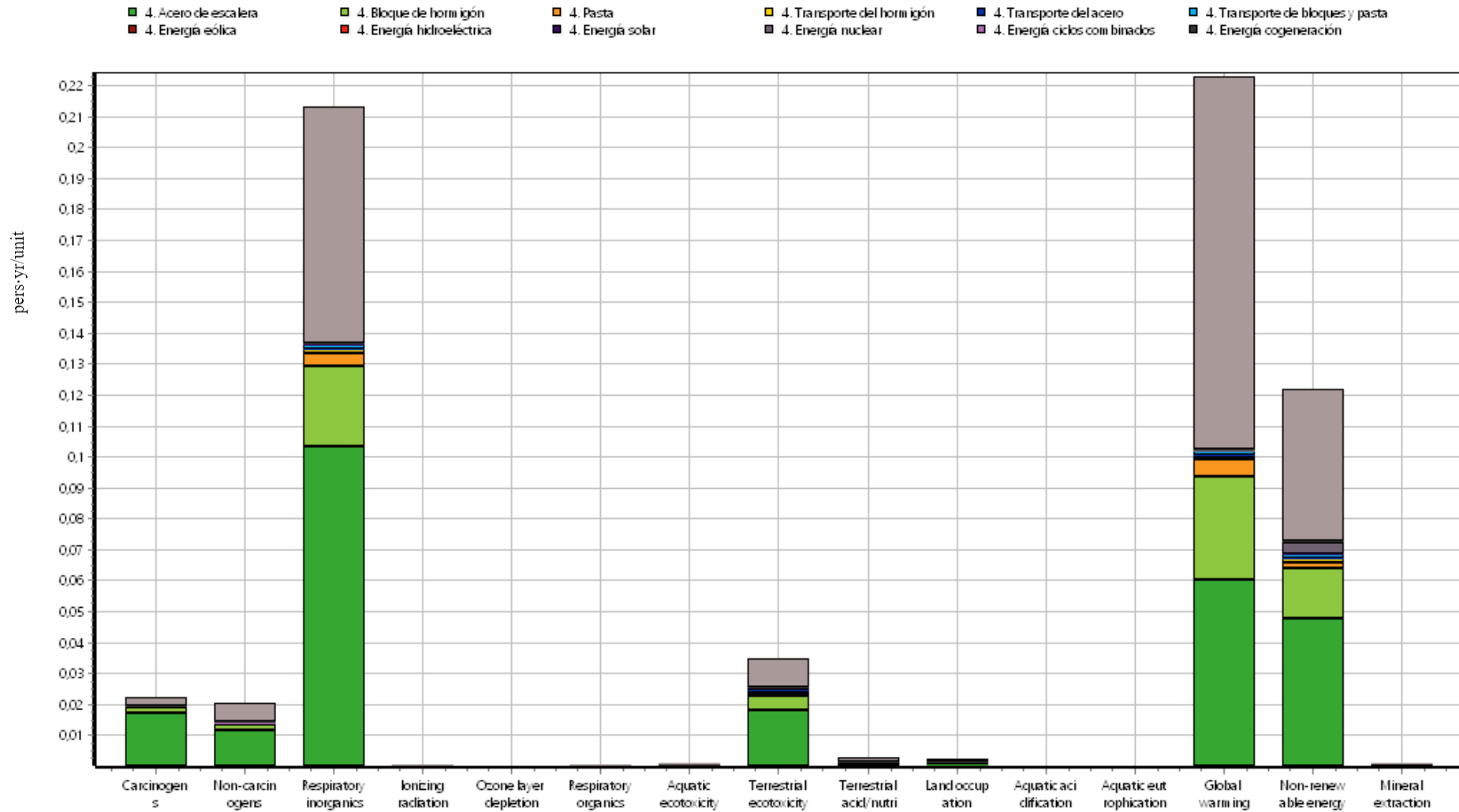


Figura 4.31. Gráfica de barras normalizada de las categorías de daño de punto medio de la etapa de la escalera in situ

Como se ha comentado, no tiene mucho sentido reescribir varias veces las mismas conclusiones que se sacan en todas las etapas. A continuación, se terminará la parte de análisis de gráficas mostrando los diagramas del proyecto completo.

#### 4.2.5 RESULTADOS DEL PROCESO COMPLETO

La figura 4.32 muestra el diagrama de árbol correspondiente para la categoría de impacto de daño a la salud humana:

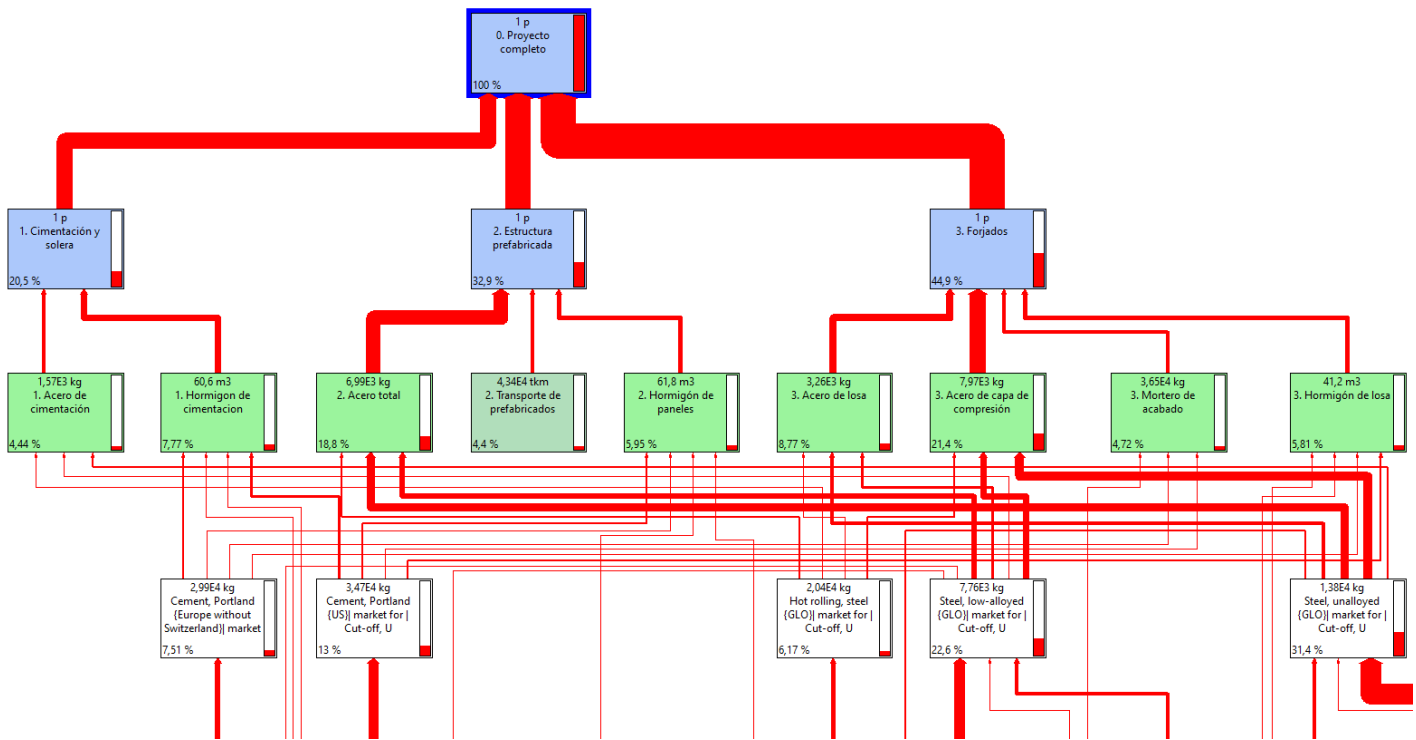


Figura 4.32. Diagrama de árbol para el daño a la salud humana del proceso completo

Con las cuatro etapas incluidas en el diagrama, se pueden comparar mejor las partes más influyentes del proceso. Aunque todas estén incluidas, la etapa de la escalera in situ no aparece en la figura, debido a que el porcentaje de corte para la visualización del diagrama es más alto que el aporte de la etapa al total.

Del resto de etapas, la parte más influyente es el acero de la capa de compresión de los forjados que, como se ha comentado en su correspondiente apartado, la razón es la gran cantidad de acero en la armadura de negativos. La siguiente que más destaca es el acero de

la estructura prefabricada conjunta de paneles, vigas y pilares, lo cual tiene sentido al haber abarcado los tres elementos. El resto de los materiales se encuentran entre el 9 % y el 4,4 %, el cual fue el porcentaje de corte en este caso. Cabe destacar que la única entrada que aparece y que no es un material es el transporte de los elementos prefabricados de la segunda etapa, lo cual indica que los transportes de los materiales en general no son un aporte tan importante de emisiones como lo puede ser el acero o el hormigón.

A continuación, en la figura 4.33, se muestra el diagrama de árbol para la categoría de impacto de daño a la calidad del ecosistema:

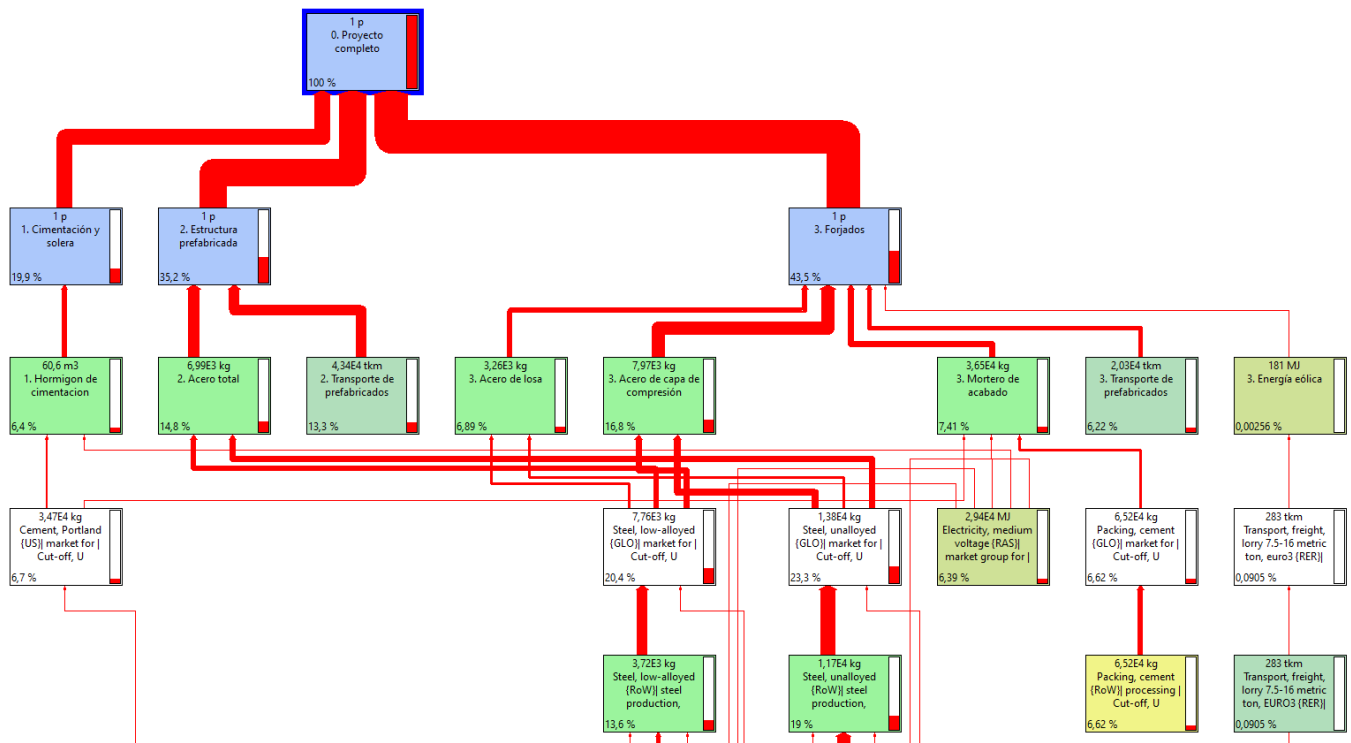


Figura 4.33. Diagrama de árbol para el daño a la calidad del ecosistema del proceso completo

De nuevo, el acero de la capa de compresión es la parte más influyente del diagrama. En este caso, cabe mencionar que el transporte de los elementos prefabricados, tanto de la segunda etapa como de la tercera, destaca sobre el resto de materiales. De este dato se puede deducir que los transportes influyen principalmente a la calidad del ecosistema, más específicamente a la categoría de daño de punto medio de la ecotoxicidad terrestre. Es posible que se deba a

que los motores de los camiones emitan una serie de compuestos que tiendan a decantar del aire y se filtren a la tierra y al agua. En el diagrama también se puede ver que aparece la energía eólica, pero como se comentó en el apartado correspondiente, esto se debe a las emisiones producidas por ruedas neumáticas, las cuales no aparecen porque no entran en el diagrama.

La figura 4.34 muestra el diagrama de árbol correspondiente para la categoría de impacto de daño al cambio climático:

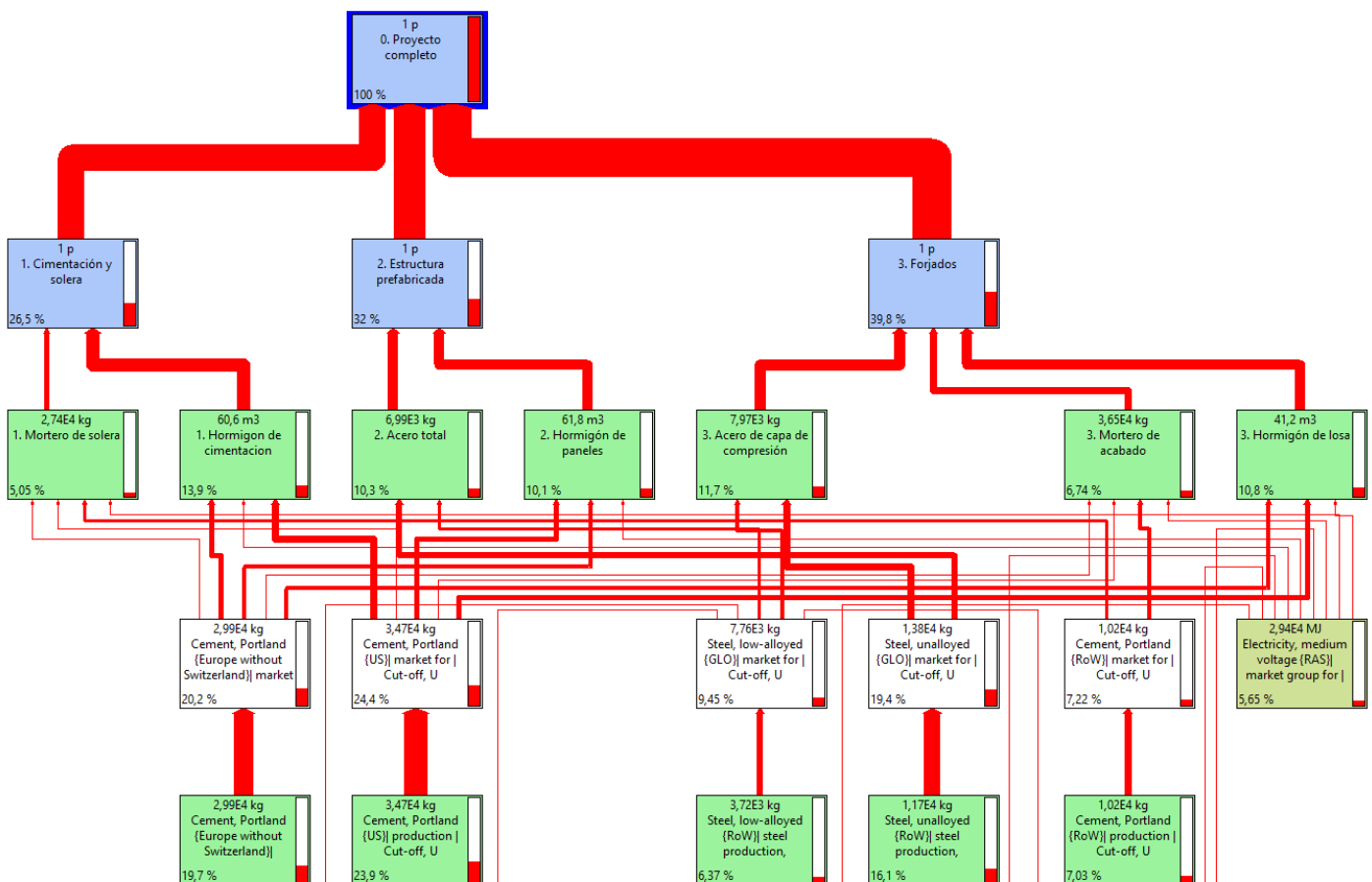


Figura 4.34. Diagrama de árbol para el daño al cambio climático del proceso completo

Para la calidad de daño al cambio climático, los resultados son algo diferentes de las categorías mostradas anteriormente. En este caso, el impacto del hormigón supera al del acero, siendo la parte más influyente la del hormigón de la cimentación. Aun así, el acero de las etapas 2 y 3 sigue teniendo un porcentaje alto. De esta información, se puede deducir que el proceso de combustión para la obtención de clinker es más contaminante en términos de



emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera que el proceso de fundición del acero. El acero es más importante en otras de las categorías, por lo que es probable que en su proceso de formación se emitan otro tipo de elementos diferentes al CO o CO<sub>2</sub> que puedan ser incluso más dañinos para la salud humana y el ecosistema.

Por último, en la figura 4.35 muestra el diagrama de árbol correspondiente para la categoría de impacto de daño a los recursos:

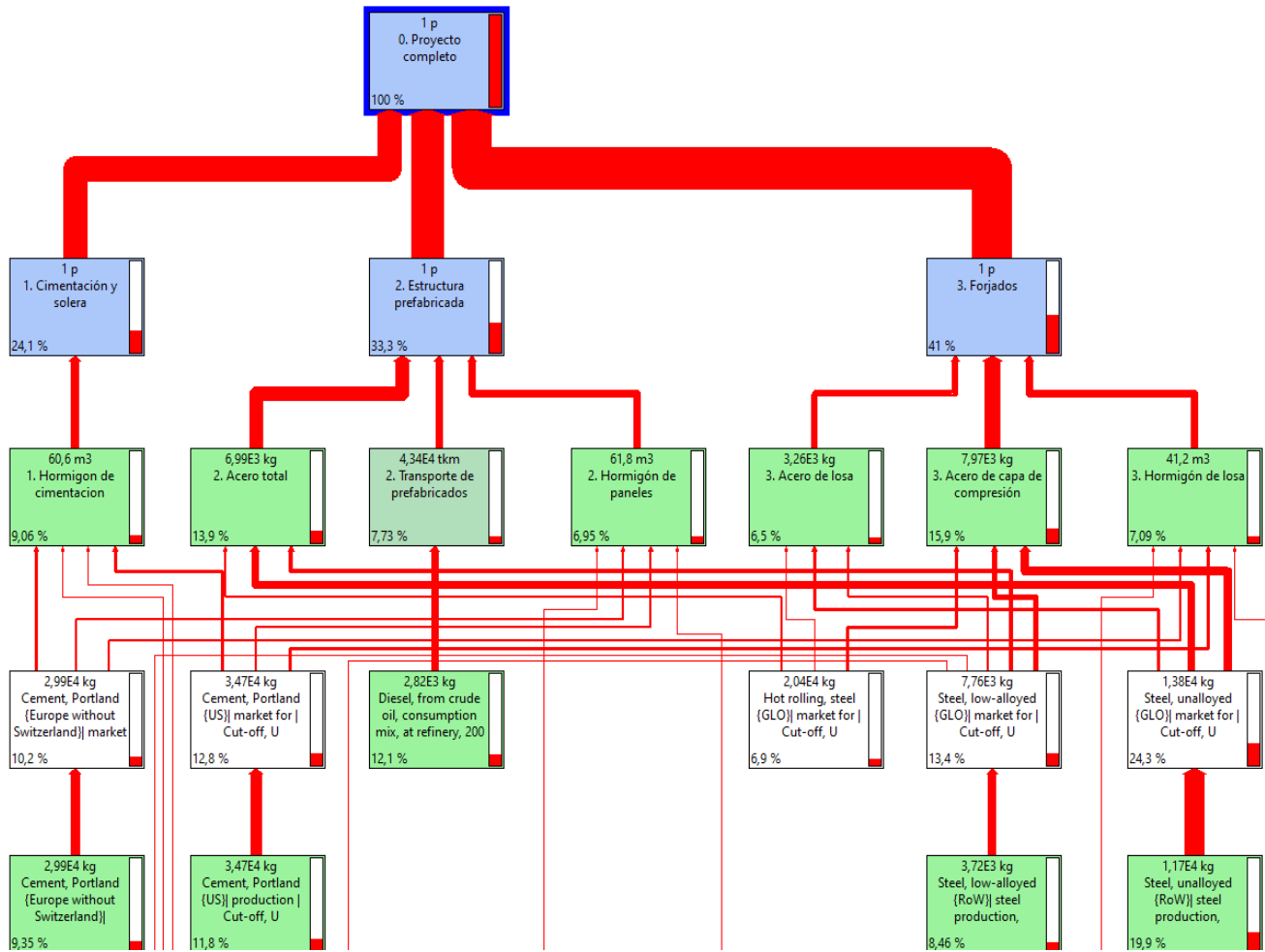


Figura 4.35. Diagrama de árbol para el daño a los recursos de la etapa del proceso completo

Como última categoría de daño final, el acero vuelve a ser el material que más influye del proceso. En el caso del daño a los recursos, principalmente es debido al uso de energías no renovables. Se deduce a que, como el acero tiene un punto de fusión más alto que la temperatura de creación de clinker, se necesita más energía para fundir el acero que para preparar cemento Portland.

Por último, la figura 4.36 y la figura 4.37 muestran las gráficas de barras de las categorías de daño y de punto medio en función de los respectivos factores de normalización de cada categoría. Estas dos gráficas suponen un buen resumen del proyecto completo. En los diagramas de árbol se pueden ver los flujos de los materiales más influyentes, pero con estos diagramas de barras normalizados es donde realmente se puede observar las influencias de las etapas y realizar comparaciones coherentes.

Para empezar, la etapa de los forjados es la más influyente en todas las categorías de daño, tanto finales como de punto medio. Razonando el por qué, se deduce que al tratarse de un forjado de losa alveolar con capa de compresión que tiene que salvar unas distancias de más de 7 metros de longitud, las armaduras deberán de ser elevadas. También se destaca que la relación acero/hormigón de este sistema es bastante elevada, tanto en la losa alveolar (tiene un gran volumen de aligeramientos, además de armadura activa y pasiva) como en la capa de compresión (los negativos suben mucho la relación).

En cuanto a las otras etapas, la cimentación y solera y la estructura prefabricada no se alejan mucho de la etapa de forjado. Esto se debe a que tanto la cimentación como la estructura tiene una gran cantidad de hormigón que, aunque el volumen de acero sea menor, el hormigón sólo eleva los daños. En cuanto a la escalera, las cantidades son tan pequeñas que los daños quedan completamente eclipsados por las otras etapas.

En cuanto a las categorías de daño, principalmente destacan la salud humana (principalmente por la categoría de daño de respiración de compuestos inorgánicos), el cambio climático (únicamente comprende la categoría de calentamiento global) y en un segundo plano el daño a recursos (prácticamente solo influye la categoría de energía no renovable). La categoría de daño a la calidad del ecosistema queda muy atrás, esto se puede deber a que los daños de punto medio comprenden más los tipos de emisiones a la tierra y al agua, que se dan en otros tipos de procesos y residuos que aquí no están. Como se ha comentado en las distintas etapas, las categorías influyentes están afectadas por la quema de combustibles fósiles en los procesos de producción del clinker y de aleación del acero, y afectan principalmente a: la respiración de compuestos inorgánicos por la emisión de gases como el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{CO}$ , entre otros, al calentamiento global porque estos gases son considerados de efecto invernadero, y a la energía no renovable por la utilización de este tipo de energías en todo el proceso, desde la extracción de la propia materia prima hasta la fabricación de los materiales finales.

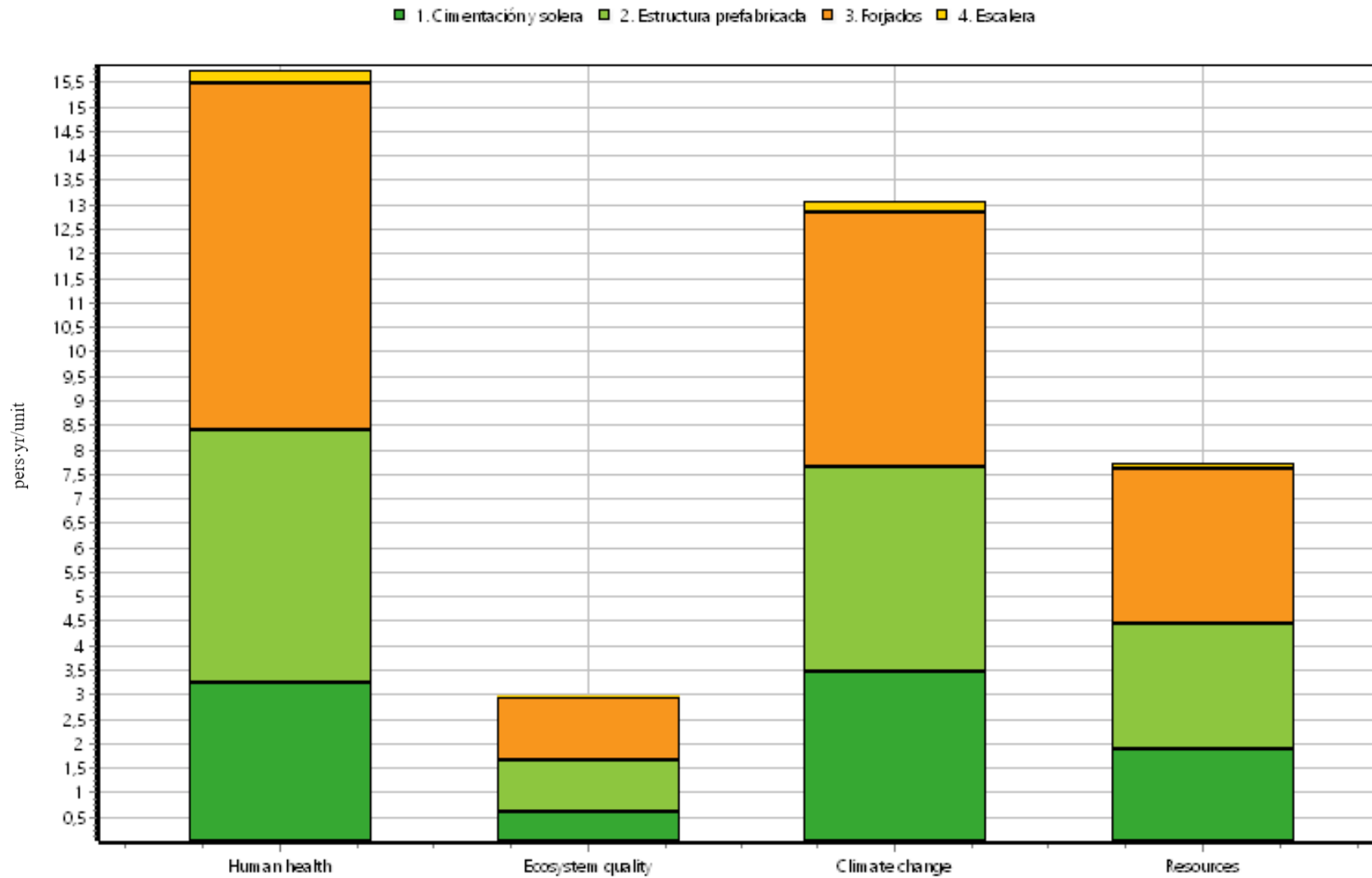


Figura 4.36. Gráfica de barras normalizada de las categorías de daño final del proceso completo

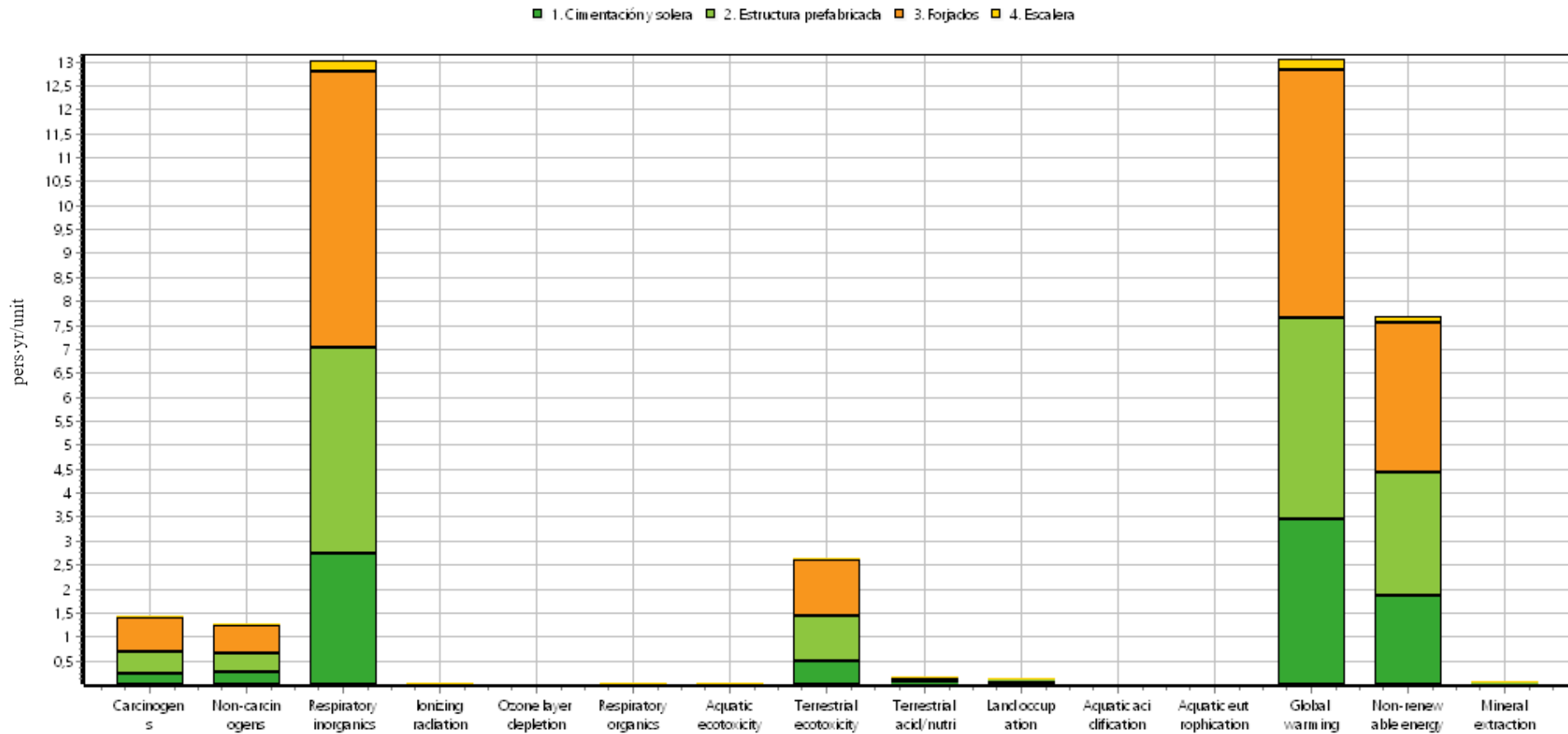


Figura 4.37. Gráfica de barras normalizada de las categorías de daño de punto medio del proceso completo

Para finalizar el análisis de resultados, en las figuras 4.38 y 4.39 se muestran las gráficas de puntuación de las categorías de daño final y de daño de punto medio, respectivamente, en cada etapa del proceso. Es una manera de ver los resultados con la perspectiva contraria. En este caso, las unidades en el eje de ordenadas vienen representadas por puntos, que equivalen al impacto del número de personas indicado durante un año. Por ejemplo, en la etapa de los forjados, el impacto total una vez aplicados los factores de normalización correspondientes sería equivalente a las emisiones de unas 17 personas durante un año. Este tipo de gráficas permite ver los resultados del estudio de una forma más simple. Como se ve, la etapa más influyente en el proceso es la de los forjados, seguida de la estructura prefabricada y de la cimentación, siendo la escalera prácticamente inexistente. En este caso, y como se ha visto anteriormente, las principales categorías de impacto de daño de punto medio son la respiración de compuestos inorgánicos, el calentamiento global y el uso de energías no renovables, información que ya se había estudiado en la gráfica anterior, pero representada de otra forma.

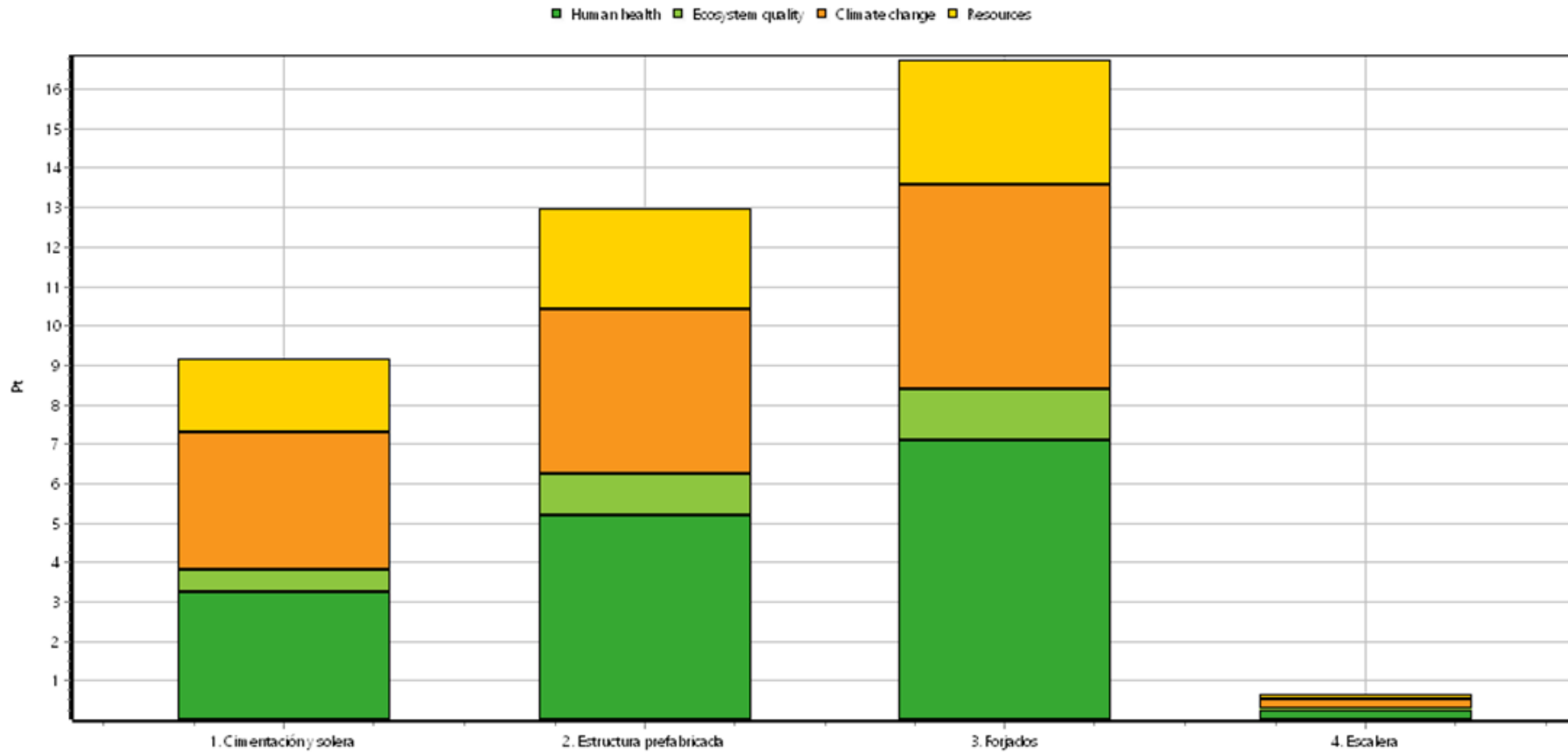


Figura 4.38. Gráfica de puntuación única de las categorías de impacto de daño en cada etapa del proceso

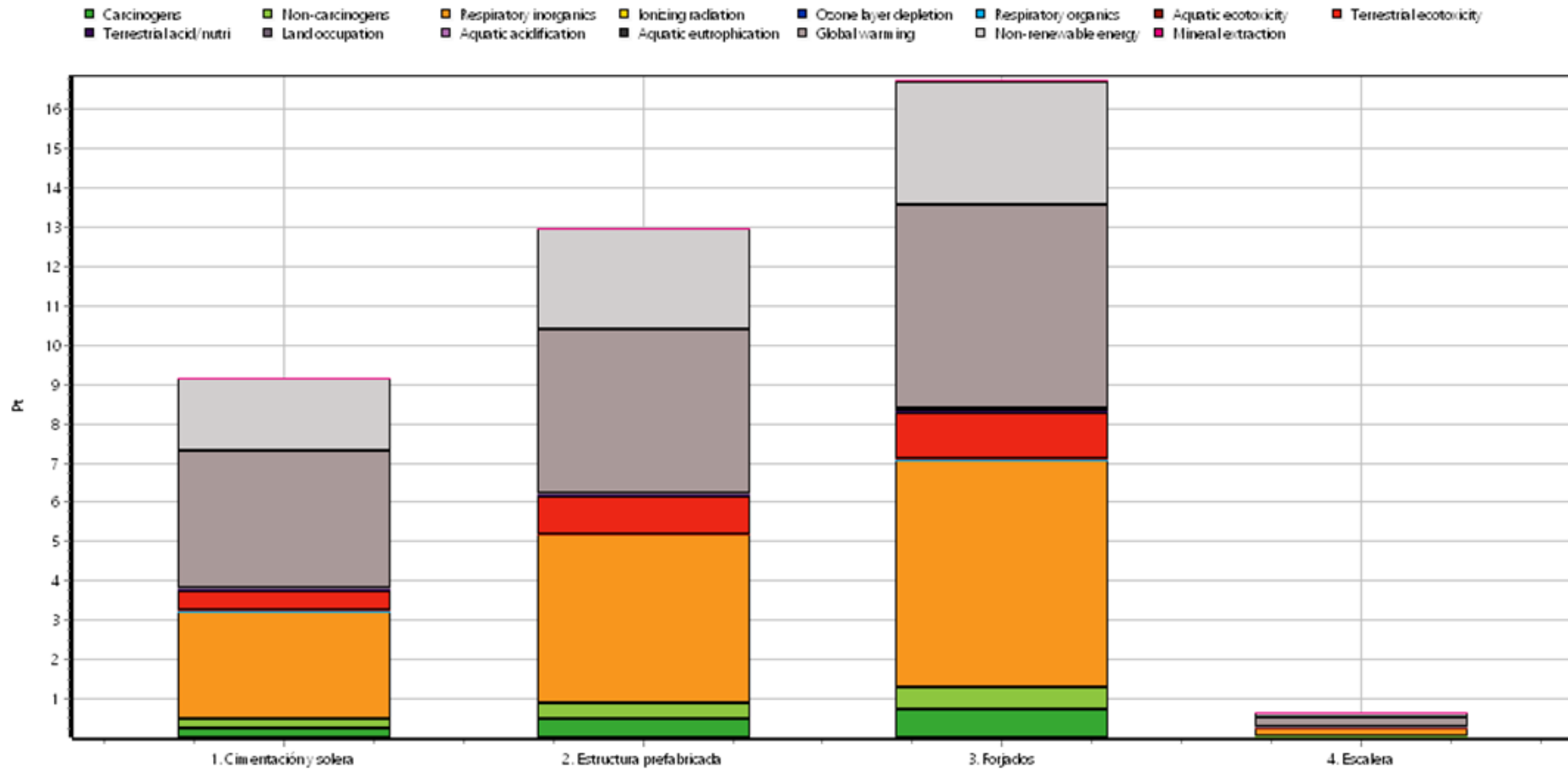


Figura 4.39. Gráfica de puntuación única de las categorías de impacto de punto medio en cada etapa del proceso

### 4.3 PLANTEAMIENTO DE MEDIDAS DE MEJORA

Una vez se han analizado los resultados obtenidos del programa SimaPro, el último objetivo específico es proponer unas medidas alternativas que supongan una mejora en el impacto medioambiental del proceso constructivo analizado. Hay dos puntos de vista a la hora de proponer soluciones: de forma directa, siendo estos cambios que la propia constructora realiza directamente sobre el proceso constructivo, como cambios en los materiales o en el proceso de ejecución; o de forma indirecta, que son acciones que no dependen directamente de las acciones de la constructora, y suelen estar relacionadas con la obtención de energía eléctrica o recursos.

En la actualidad, el mundo de la construcción está bastante asentado en términos de materiales estructurales, siendo prácticamente las únicas opciones el hormigón y el acero. En un primer momento se había planteado una propuesta de cambio total de la estructura de hormigón prefabricado por una de acero, pero tras analizar los resultados del estudio se observa que el acero en menores cantidades supera con creces el impacto medioambiental del hormigón. Su uso extendido en las naves industriales se debe a la capacidad de salvar grandes distancias entre pilares con elementos estrechos, aunque últimamente se están popularizando las naves industriales de hormigón prefabricado. En el caso del edificio de estudio, las distancias entre pilares son relativamente pequeñas y se pueden salvar utilizando elementos de hormigón. Además, con una estructura metálica el sistema de forjado de losa alveolar es más complicado, y se suele utilizar un forjado de chapa colaborante, el cual lleva más hormigón y más acero que la losa alveolar.

Una vez descartada la opción de la estructura metálica, se proponen las siguientes medidas directas:

- Cambio del sistema de fachada: el cerramiento de fachada está realizado con paneles de hormigón macizo de 16 cm de espesor. Se considera que estos paneles, al carecer completamente de función estructural, se podrían modificar. Se proponen tres soluciones: utilización de paneles no macizos, los cuales llevan en su interior un aligeramiento de poliestireno expandido (EPS) que reducen su masa una cantidad importante; una reducción del espesor de los paneles macizos, por ejemplo, a espesores de 10 o 12 cm; o un cambio total del sistema de cerramiento, como a un muro de bloques de hormigón, o un panel sándwich. En la figura 4.40 se presenta una comparativa entre paneles de espesor 16 cm y espesor 10 cm.



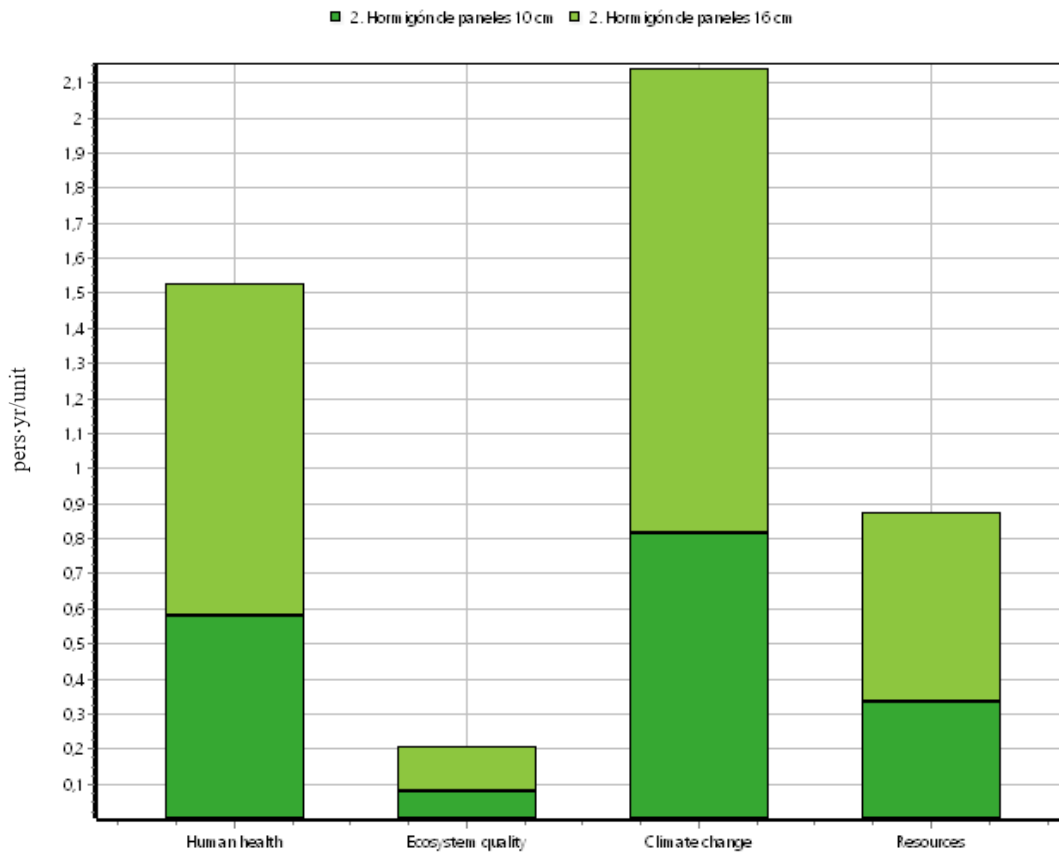


Figura 4.40. Comparativa en categorías de impacto final de paneles con 10 y 16 cm de espesor

Como se observa en la figura, hay una diferencia importante en los impactos cuando se disminuye el espesor. Calculando proporcionalmente utilizando los pesos, se estima que reducir el espesor de los paneles a 10 cm reduce los impactos de daño en un 39%, por tanto, sería una medida a considerar.

- Optimizar las armaduras: como se ha visto, el acero supone una parte bastante importante del proceso en cuanto a impacto se refiere. Es común que, cuando se diseña un proyecto tan grande, se utilizan las secciones y las armaduras que ofrecen los programas de cálculo como resultado, sin estudiar debidamente las posibilidades existentes. Al aplicar los coeficientes de seguridad a los cálculos de esfuerzos se mayor la cantidad de armado, y al elegir personalmente la tipología de la armadura, se tiende a elegir modulaciones de armaduras de 2 en 2 o 4 en 4, con los diámetros que cumplan en cada caso. Un estudio intensivo de estas posibilidades podría resultar en un diseño de armado con geometría más complicada, pero que supusiera una reducción importante en el volumen de hierro, el cual es el objetivo. También podría

influir el ajustar los solapes, empalmes y estribos al milímetro, ya que, en una disposición tan grande, la reducción podría ser importante.

- Optimizar el transporte de los materiales: como última medida directa, la búsqueda de industrias cercanas para el suministro de materiales puede reducir notablemente las emisiones de los vehículos de transporte. En el caso de este proceso constructivo, hay elementos muy pesados que están recorriendo distancias de casi 200 km. El correcto estudio de posibles empresas aledañas que puedan cumplir el trabajo debería ser una actividad imperativa cuando se trabaja con elementos de este tipo. Sin embargo, desde el punto de vista empresarial, interesa más la opción que resulte más económica. Esta es una mentalidad que, si se quiere lograr un cambio real que beneficie al medio ambiente, se debería de cambiar.

En cuanto a las medidas indirectas, se plantean los siguientes casos:

- Producción de clinker: el proceso de producción de clinker es uno de los mayores focos de emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, debido a la quema de combustibles fósiles realizada para alcanzar las temperaturas necesarias para generar el material (hasta 1450° C). Este calentamiento es necesario y no se puede evitar directamente, por lo que es necesario reducir el uso de este elemento, o bien buscar una solución de otro tipo. En los últimos años, el sector de la producción de cemento se ha centrado en mejorar la sostenibilidad del hormigón, aplicando medidas como las siguientes: optimización de los sistemas de producción, utilización de combustibles secundarios, mejora en el sector de las adiciones al cemento y optimización de sistemas de control y calidad, entre otros (Cagiao Villar *et al.*, 2010).
- Energía eléctrica: el uso de electricidad es obligatorio en prácticamente cualquier tipo de proceso. En el caso de este estudio, se ha visto que una gran parte de los impactos viene por el uso de energías no renovables, por tanto, se vuelve una tarea imperativa el optimizar el uso de la energía eléctrica y fomentar energías limpias. Además de la energía eléctrica consumida en el proceso constructivo, la producción de clinker también requiere de grandes cantidades de electricidad, el cual es otro motivo para optimizar su uso. Afortunadamente, en España cada año aumenta el empleo de energías renovables en la generación de energía eléctrica (Iberdrola, 2024), y ese es el camino a seguir si se quiere frenar el cambio climático antes de que se produzcan daños irreparables.

## 5. Conclusiones

En este estudio se ha realizado el análisis de ciclo de vida del proceso constructivo de un edificio de dos plantas formado principalmente por elementos de hormigón prefabricado. El motivo de realización del trabajo es el preocupante aumento de las emisiones de elementos nocivos para el medio ambiente, donde la búsqueda de alternativas que reduzcan este impacto se vuelve una tarea imperativa, con el fin de reducir daños y prevenir cambios negativos irreversibles en el planeta.

El objetivo principal del estudio ha sido la realización del análisis de ciclo de vida del proceso constructivo del edificio, utilizando la metodología de análisis de ciclo de vida IMPACT 2002+, y el software de ACV y cálculo de impactos medioambientales SimaPro. También se han cumplido los objetivos específicos de análisis de las categorías de impacto de punto medio, de impacto de punto final, y la propuesta de mejoras medioambientales.

Como medidas de mejora directa, se ha planteado la reducción del espesor de los elementos de hormigón que conforman la fachada del edificio, planteando una comparativa que demuestra una reducción importante en el impacto ambiental. También se propone la optimización de las armaduras en los elementos de hormigón in situ, donde un correcto estudio de la tipología de armado puede dar lugar a reducciones del volumen de acero importantes. Además, se propone la búsqueda de empresas de suministro de materiales próximas al lugar de ejecución, lo que reduciría notablemente las emisiones de los vehículos de transporte.

Por último, se ha presentado la importancia de la producción del clinker como foco de emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, debido a la quema de combustibles fósiles. La búsqueda de alternativas para reducir el impacto de este proceso es de suma importancia, ya sea reduciendo la cantidad de clinker utilizada o, en su lugar, optimizando todo lo posible el proceso de producción. También se ha reflexionado acerca del uso de energías no renovables, actividad que también supone un elevado impacto negativo en el medio ambiente. El fomento de las energías limpias debe de ser una tarea obligatoria en los próximos años, con el fin de reducir al mínimo la quema de combustibles fósiles. Cabe destacar que no se ha tratado el tema económico en ningún momento del trabajo, ya que en general las medidas planteadas supondrían pérdidas económicas que no interesan desde el punto de vista empresarial, aunque la clave de la mejora es el cambio de esta mentalidad.

## 6. Bibliografía

- Blonk (2017). *Agri-footprint*. Blonk Sustainability. Países Bajos. Disponible en: <https://blonksustainability.nl/tools/agri-footprint>
- Cagiao Villar, Juan (2010). “Huella ecológica del cemento”. Laboratorio de energía sostenible.
- Díaz Cordero, G. (2012). “El cambio climático”, *Ciencia y sociedad*, 37(2), 227-240.
- Ecoinvent (2018). *ecoinvent v3.5*. Instituto Federal Suizo de Tecnología de Zúrich. Zúrich, Suiza.
- Goedkoop M. J. y Spriensma, R. (2000). *Eco-indicator 99, a damage oriented method for lifecycle impact assessment, Methodology Report*. Second edition. Pré Consultants, Amersfoort (NL), Netherlands.
- Guinée, J. (2001). “Handbook on life cycle assessment--operational guide to the ISO standards. The international journal of life cycle assessment”. 6(5), 255.
- Iberdrola (2024). *Presentación de resultados del primer trimestre*. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/accionistas-inversores/informacion-operativa-financiera/resultados> (Accedido: 1 de junio de 2024)
- ISO (2006a). Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia. (Norma UNE-EN ISO 14040).
- ISO (2006b). Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Requisitos y Directrices. (Norma UNE-EN ISO 14044).
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., y Rosenbaum, R. (2003). “IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology”. *The international journal of life cycle assessment*, 8(6), 324-330.
- López-Pacheco I. Y., Silva-Núñez A., Salinas-Salazar C., Arévalo-Gallegos A. *et al.* (2019). “Anthropogenic contaminants of high concern: Existence in water resources and their adverse effects”, *Science of The Total Environment*, 690, 1068-1088.
- Rodríguez, B. E. S. (2009). “*La contaminación ambiental y sus consecuencias toxicológicas*”, DOI:10.13140/2.1.4989.2645
- MITECO (2024). *Portal de indicadores ambientales: informe interactivo*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/informacion->

[ambiental-indicadores-ambientales/indicadores-ambientales/portal-indicadores-ambientales.html](#) (Accedido: 29 de junio de 2024)

Rodríguez Mazahua, Nidia. (2016). *Historia y Análisis del Ciclo de Vida de Producto ACV*. Recuperado de <https://www.gestiopolis.com/historia-analisis-del-ciclo-vida-producto-acv/>

Saynes Santillán, V., Etchevers Barra, J. D., Paz Pellat, F. y Alvaredo Cárdenas L. o: (2016). “Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México”, *Terra Latinoamericana*, 34(1), 83-96.

Shafi, S. M. (2005). *Environmental Pollution*. 1ª ed. Atlantic Publishers and Distributors.

Silva Arroyave, S. M., y Correa Restrepo, F. J. (2009). “Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica”. *Semestre económico*, 12(23), 13-34.

TheCircularCampus (2024). *Indicadores ambientales*. Disponible en: <https://www.ecoemesthecircularcampus.com/indicadores-ambientales-que-son-y-para-que-sirven/> (Accedido: 29 de junio de 2024)

UNEP (2021). *Emissions Gap Report 2021: The Heat Is On – A World of Climate Promises Not Yet Delivered*. United Nations Environmental Programme, Nairobi.

Vohra, K., Vodonos, A., Schwartz, J., Marais, E. A. *et al.* (2021). “Global mortality from outdoor fine particle pollution generated by fossil fuel combustion: Results from GEOS-Chem”, *Environmental Research*, 195, 1-8.