



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL, ECONÓMICO Y EN SALUD
HUMANA DEL CONCRETO CON REEMPLAZO PARCIAL DE CEMENTO
ESTRUCTURAL CON CENIZAS VOLANTES Y ESCORIAS DE ALTO HORNO**

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
ÉNFASIS EN GERENCIA DE CONSTRUCCIONES

Presentado por:

FRANCISCO JAVIER RUIZ MILLÁN

ANÍBAL CÉSAR MAURY RAMÍREZ

Director

DANIELA MARTÍNEZ LÓPEZ

Co - directora

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Agosto de 2024

DATOS DEL ESTUDIANTE

Nombre completo: Francisco Javier Ruiz Millán *CC:* 1.234.195.117

Dirección: Cra 121ª 47ª -46 Ventura 2 Apto R103

Correo Electrónico: franciscoruiz@javerianacali.edu.co, fransruiz1@gmail.com

Teléfono Celular: 3026060111

Profesión: Ingeniero Civil

Empresa donde labora: Gobernación del Valle – Secretaria de Vivienda y Hábitat

Cargo: Profesional Universitario 1

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	12
1.1.	Definición del problema de investigación	13
1.1.1.	<i>Planteamiento del problema</i>	13
1.1.2.	<i>Pregunta de investigación</i>	14
1.1.3.	<i>Alcance del trabajo de grado</i>	14
1.2.	Objetivos del proyecto	15
1.2.1.	<i>Objetivo general</i>	15
1.2.2.	<i>Objetivos específicos</i>	15
1.3.	Justificación del trabajo de grado	15
2.	MARCO TEORICO.....	17
2.1.	Objetivos de Desarrollo Sostenible y Economía Circular	17
2.2.	Desarrollo del análisis de ciclo de vida.....	17
2.2.1.	<i>Fases del análisis de ciclo de vida</i>	19
2.3.	Análisis de ciclo de vida en el sector de la construcción	20
2.4.	Cenizas volantes y escorias de alto horno.....	24
2.5.	Evaluación del impacto a la salud humana y la producción de concreto.....	25
3.	METODOLOGÍA.....	27
3.1.	Evaluación del ciclo de vida	31
3.1.1.	<i>Definición del objetivo y el alcance</i>	32
3.1.2.	<i>Análisis de inventario</i>	33
3.1.3.	<i>Evaluación de los impactos</i>	36
3.1.4.	<i>Interpretación de los resultados:</i>	39
3.2.	ReCiPe 2016 para la obtención del impacto a la salud humana.	39
3.3.	Costo del ciclo de vida.....	41
3.3.1.	<i>Generalidades</i>	41
3.3.2.	<i>Análisis de Precios Unitarios</i>	44
3.3.3.	<i>Referencias de costos de materiales</i>	44
3.3.4.	<i>Costo de transporte</i>	45
3.3.5.	<i>Costo del carbono</i>	46

4.	RESULTADOS.....	47
4.1.	Impacto ambiental.....	47
4.2.	Impacto a la salud humana.....	53
4.3.	Impacto económico.....	60
4.4.	Selección de la mejor alternativa.....	65
5.	CONCLUSIONES.....	67
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69
7.	ANEXOS.....	75
8.	GLOSARIO DE TÉRMINOS ESPECIALES.....	95

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diseño de mezcla para concreto con diferentes cantidades de escoria y cenizas volantes para una resistencia a la compresión de 28 Mpa (4000 psi). Adaptado de Kneifel et al. (2019).	30
Tabla 2. Diseño de mezcla para concreto con diferentes cantidades de escoria y cenizas volantes para una resistencia a la compresión de 28 Mpa (4000 psi) (continuación). Adaptado de Kneifel et al. (2019).	31
Tabla 3. Composición del cemento. Fuente: comunicación personal con cementera.	35
Tabla 4. Composición química de ceniza volante. *LOI pérdida por ignición a 950 °C. (Prieto et al., 2018).	35
Tabla 5. Composición química de la escoria de alto horno (Malagón et al., 2023).	35
Tabla 6. Distancia de traslado de materiales para producción de concreto.	36
Tabla 7. Distribución energética de Colombia por fuente.	36
Tabla 8. Impactos ambientales considerados en Openconcrete. Adaptado de Kim et al. (2022).	37
Tabla 9. Análisis de precios unitarios para concreto de referencia (100 C).	63
Tabla 10. Costo de las diferentes mezclas de concreto analizadas.	64
Tabla 11. Variación % de Materiales y Transporte respecto a concreto referencia (100 C)	65
Tabla 12. Costo admisible de cenizas volantes y escorias de alto horno por cada mezcla analizada.	65
Tabla 13. Matriz de ponderación de las diferentes mezclas de concreto analizadas.	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metas ODS 12 y 13 para Colombia (Departamento Nacional de Planeación de Colombia (DNP), 2018).....	16
Figura 2. Número de informes de responsabilidad corporativa que relacionan el uso del ACV en el periodo 2000 al 2015 (Hauschild et al., 2018).....	19
Figura 3. Metodología de evaluación del ciclo de vida e impactos ambientales, económicos y a la salud humana. Fuente: Propia.	28
Figura 4. Alcance del análisis de ciclo de vida usando la Herramienta Openconcrete. Adaptado de Kim et al. (2022). Acceso libre bajo licencia CC BY 4.0.....	29
Figura 5. Etapas del LCA definidas por la Organización Internacional de Normalización ISO en el año 2006 Adaptado de: Maury-Ramírez et al. (2022).	32
Figura 6. Límites del sistema de producción de los productos de concreto usando la Herramienta Openconcrete. Adaptado de Kim et al. (2022). Acceso libre bajo licencia CC BY 4.0.	33
Figura 7. Diagrama de flujo de los datos de usuario y de inventario a través de la herramienta Openconcrete. Adaptado de Kim et al. (2022).	34
Figura 8. Visión general de las categorías de impacto que abarca la metodología ReCiPe2016 y su relación con los ámbitos de protección. Tomado de Huijbregts et al. (2017) Acceso libre bajo licencia CC BY 4.0.	40
Figura 9. Resumen de las categorías de impacto que se cubren en el método ReCiPe2016 y su relación con las áreas de protección. Adaptado de Huijbregts et al. (2017).....	41
Figura 10. Límite del sistema en CCV. Adaptado de ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas (2022).....	43
Figura 11. Descripción del alcance del CCV. Adaptado de Abushanab & Alnahhal (2023).	43
Figura 12. Interfaz de usuario Costos Eficientes SITEC-TAC. (Ministerio de Transporte, 2024a).	46
Figura 13. Impacto ambiental en CO ₂ -eq de las diferentes mezclas de concreto analizadas.	47
Figura 14. Impacto ambiental en NO _x de las diferentes mezclas de concreto analizadas.	48

Figura 15. Impacto ambiental en SO _x de las diferentes mezclas de concreto analizadas.....	48
Figura 16. Impacto ambiental en PM ₁₀ de las diferentes mezclas de concreto analizadas.	49
Figura 17. Impacto ambiental en PM _{2.5} de las diferentes mezclas de concreto analizadas.....	49
Figura 18. Impacto ambiental en VOC de las diferentes mezclas de concreto analizadas.	50
Figura 19. Impacto ambiental en CO de las diferentes mezclas de concreto analizadas.....	50
Figura 20. Impacto ambiental en Pb de las diferentes mezclas de concreto analizadas.	51
Figura 21. Impacto ambiental: agua consumida de las diferentes mezclas de concreto analizadas.	51
Figura 22. Impacto ambiental: agua captada para las diferentes mezclas de concreto analizadas.	52
Figura 23. Impacto ambiental en energía demandada (MJ) de las diferentes mezclas de concreto analizadas.....	53
Figura 24. Impacto a la salud humana por la emisión de GEI (CO _{2-eq}) para cada mezcla de concreto propuesta.	54
Figura 25. Impacto a la salud humana por la emisión de PM _{2.5} de las diferentes mezclas de concreto analizadas.....	55
Figura 26. Impacto a la salud humana por la emisión de NO _x de las diferentes mezclas de concreto analizadas.....	56
Figura 27. Impacto a la salud humana por la emisión de Pb de las diferentes mezclas de concreto analizadas.....	57
Figura 28. Impacto a la salud humana por el consumo de agua de las diferentes mezclas de concreto analizadas.....	58
Figura 29. Impacto total a la salud humana en DALY de las diferentes mezclas de concreto analizadas.....	59
Figura 30. Análisis del costo de transporte de Cenizas Volantes mediante la herramienta SICE- TAC.....	61

Figura 31. Análisis del costo de transporte de Escorias mediante la herramienta SICE-TAC.... 62

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Inventario de la bases de datos de Openconcrete. Fuente: Kim et al. (2022).	75
Anexo B. Inventario de la bases de datos de Openconcrete (continuación). Fuente: Kim et al. (2022).....	76
Anexo C. Inventario de la bases de datos de Openconcrete (continuación 2). Fuente: Kim et al. (2022).....	77
Anexo D. Factores de emisión por cada MJ producido de diferentes fuentes de energía térmica. Adaptado de Kim et al. (2022).....	78
Anexo E. Factores de emisión por MJ de electricidad y proporciones de las diferentes fuentes de electricidad. Adaptado de Kim et al. (2022).	79
Anexo F. Eficiencia producción del Clinker. Adaptado de: Kim et al. (2022).....	80
Anexo G. Resultados de impacto por unidad de los procesos y materiales. Adaptado de: Kim et al. (2022).	81
Anexo H. Resultados de impacto por transporte de los materiales. Adaptado de: Kim et al. (2022).	82
Anexo I. Cálculos impacto a la salud humana. Elaboración propia.	83
Anexo J. Costos detallados del transporte de Cenizas Volantes mediante la herramienta SICE-TAC.....	84
Anexo K. Costos detallados del transporte de Cenizas Volantes mediante la herramienta SICE-TAC (continuación).	85
Anexo L. Costos detallados del transporte de Escorias mediante la herramienta SICE-TAC	86
Anexo M. Costos detallados del transporte de Escorias mediante la herramienta SICE-TAC (continuación).	87
Anexo N. Análisis de precios unitarios para concreto 20% CV.	88
Anexo O. Análisis de precios unitarios para concreto 30% CV.	89
Anexo P. Análisis de precios unitarios para concreto 40% CV.....	90

Anexo Q. Análisis de precios unitarios para concreto 30% E.	91
Anexo R. Análisis de precios unitarios para concreto 40% E.	92
Anexo S. Análisis de precios unitarios para concreto 50% E.	93
Anexo T. Análisis de precios unitarios para concreto 30% E - 20% CV.	94

RESUMEN

Para cumplir con el Acuerdo de París, es crucial reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), por lo tanto, la industria de la construcción y principalmente del concreto debe buscar alternativas para la reducción de emisiones. Entre las soluciones se plantean la utilización de cementantes suplementarios, tales como las cenizas volantes y las escorias de alto horno, como reemplazo parcial del cemento estructural. Sin embargo, la selección de los cementantes suplementarios, residuos provenientes de otros sectores productivos, suele ser compleja considerando que cada variedad tiene un impacto ambiental, económico y social diferente en la producción de concreto. Por lo anterior, este trabajo, se centra en el análisis del ciclo de vida de diferentes mezclas de concreto con reemplazo parcial del cemento estructural con cenizas volantes y escorias para determinar su impacto ambiental, económico y social en términos de salud humana, lo anterior utilizando como caso de estudio la ciudad de Santiago de Cali (Colombia).

De acuerdo con los resultados, para la muestra con 30% de escoria y 20% de cenizas volantes (30E20CV) se cuantificó una emisión de 187 kg GEI (CO₂-eq) por metro cúbico de concreto, lo cual es un 38,9% menor al CO₂-eq producido por el concreto de referencia sin reemplazo, de igual forma esta mezcla obtuvo un impacto a la salud humana de 2,37E-03 DALY (años de vida ajustados por discapacidad) por m³ y una reducción del 38,8% respecto a la mezcla de referencia. Lo anterior, bajo el supuesto de una producción mensual uniforme de 44,3 mil m³ de concreto en el Valle del Cauca, representaría una afectación a la salud humana de 105,7 DALY, esto es 66,5 años menos que el concreto de referencia. Por otro lado, la muestra con 50% de escorias (50E) obtuvo el menor impacto económico con un valor de \$ 431.018,56 pesos colombianos por metro cúbico, lo cual es un 23.5% menor que la mezcla de referencia.

En consecuencia, se revela que la utilización de cenizas volantes y escorias de alto horno reducen los impactos ambientales (e.g. potencial de calentamiento global, formación de material particulado y esmog), económicos y a la salud humana, calculado en años de vida perdidos debido a la emisión de contaminantes durante el ciclo de vida de las alternativas de diseño de mezcla analizados.

Palabras clave: Análisis de ciclo de vida, cenizas volantes, escorias de alto horno, cemento estructural, concreto.

ABSTRACT

To meet the Paris Agreement, it is crucial to reduce greenhouse gas (GHG) emissions; therefore, the construction industry, particularly the concrete sector, must seek alternatives to reduce emissions. Among the solutions are the use of supplementary cementitious materials, such as fly ash and blast furnace slag, as a partial replacement of structural cement. However, the selection of supplementary cementitious materials, waste from other productive sectors, is often complex considering that each variety has a different environmental, economic and social impact on concrete production. Therefore, this work focuses on the analysis of the life cycle of different concrete mixes with partial replacement of structural cement with fly ash and slag to determine their environmental, economic and social impact in terms of human health, using the city of Santiago de Cali (Colombia) as a case study.

Results indicate that the mix containing 30% slag and 20% fly ash (30E20CV) exhibited GHG emissions of 187 kg CO₂-eq per cubic meter of concrete, representing a 38,9% reduction compared to the reference mix without replacements. Similarly, this mix resulted in a human health impact of 2,37E-03 DALYs per cubic meter, a 38,8% reduction compared to the reference mix. Assuming a uniform monthly production of 44,3 cubic meters of concrete in the Valle del Cauca region, this would equate to a human health impact of 105,7 DALYs, or 66,5 fewer years compared to the reference mix. Moreover, the mix containing 50% slag (50E) yielded the lowest economic impact at COP 431.018,56 per cubic meter, a 23,5% reduction compared to the reference mix.

In conclusion, the utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag reduces environmental impacts (e.g. global warming potential, particulate matter formation, and smog), economic costs, and human health impacts, as measured by years of life lost due to pollutant emissions, across the life cycle of the analyzed mix designs.

Keywords: *Life cycle analysis, fly ash, blast furnace slag, structural cement, concrete.*

1. INTRODUCCIÓN

Para cumplir con el Acuerdo de París del 2015 sobre el cambio climático se deben reducir las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) a la mitad para el año 2030 y llegar a la neutralidad en carbono en el año 2050 (ONU, 2015a). En el marco de este compromiso, la industria de la construcción debe reducir significativamente sus emisiones, que se calculan en un 22% de las emisiones globales totales de GEI (GLOBE, 2022); lo que hace necesario identificar a los diferentes actores de la industria, buscar las fuentes y desarrollar alternativas de materiales con baja generación de GEI durante sus procesos productivos.

Por lo anterior, reconociendo que para el Valle del Cauca y Colombia el cemento es uno de los materiales de construcción más utilizados y que según GLOBE (2022) las emisiones globales promedio relacionadas con el cemento comprenden entre el 7% y el 8% de los GEI, se plantea la utilización de materiales suplementarios que, siendo residuos de otros sectores productivos, reduzcan las emisiones de GEI en el cemento.

Con este fin se ha identificado la utilización de cenizas volantes, residuo de la quema del carbón en las termoeléctricas y a su vez, la utilización de las escorias de alto horno, residuo de la producción del acero en las siderúrgicas; teniendo ambos compuestos el potencial de reemplazar parcialmente al cemento estructural sin disminuir el desempeño en las propiedades mecánicas y durabilidad de los materiales de construcción, e incluso en algunos casos particulares se reportan mejoras en estas mismas propiedades. Sin embargo, la investigación se ha centrado en la viabilidad técnica (i.e. resistencia mecánica y durabilidad), desconociendo los impactos ambientales, económicos, y en la salud humana de dichos materiales, los cuales resultan muy importantes para la selección adecuada en el diseño de edificaciones e infraestructura sostenibles.

Por este motivo, en este proyecto de grado se desarrolla el enfoque de ciclo de vida para evaluar los impactos en la sostenibilidad a través de indicadores ambientales, económicos y afectación a la salud humana durante el ciclo de vida del concreto con reemplazo parcial del cemento estructural con cenizas volantes y escorias de alto horno.

1.1. Definición del problema de investigación

1.1.1. Planteamiento del problema

Con el ánimo de cumplir con el Acuerdo de París, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2019) establece que las emisiones de gases efecto invernadero deben reducirse en un 45% para el año 2030 respecto a los niveles de 2010 y seguir disminuyendo hasta alcanzar el “cero neto” en 2050, por lo tanto, es importante reconocer el papel que juega la industria de la construcción en la emisión de GEI y cómo puede contribuir a dicha reducción y gradual neutralidad.

“El 22 % de las emisiones globales de GEI se relacionan con la construcción (sin considerar la fase de operación de edificaciones e infraestructura), de este porcentaje, dos materiales, el cemento y el acero, representan el 75 % de las emisiones” (GLOBE, 2022). Considerando que la industria del acero presenta altos índices de circularidad mediante el reciclaje y siendo el cemento base fundamental del concreto, principal material de construcción a nivel mundial resulta necesario desarrollar cementantes alternativos con menores emisiones de GEI.

En el departamento del Valle del Cauca (Colombia), el cemento ocupa un lugar importante entre los materiales de construcción, por ejemplo, para el año 2023 la producción de este material registró un total de 1099 miles de toneladas (DANE, 2024). Por lo que es evidente que, a pesar de ser un material altamente contaminante debido a su proceso de transformación y transporte, representa parte fundamental del desarrollo de la economía regional, nacional y en general del sur global (i.e. países en vías de desarrollo), donde se prevé que para el 2050 sean necesarios construir 4.25 millones de metros cuadrados de superficie para atender las necesidades de la población (GLOBE, 2022). El cemento, también conocido como cemento portland convencional o OPC (del inglés *Ordinary Portland Cement*), requiere grandes cantidades de materia prima mineral, altos consumos de energía y emite grandes cantidades de GEI durante el proceso de clinkerización. Por ejemplo, la producción de cemento emite en promedio alrededor de 0,8 a 1,0 toneladas de CO₂ por cada tonelada de cemento Portland a nivel mundial (Ige et al., 2022).

Por consiguiente, atendiendo las necesidades de construcción en la población y en el marco de los objetivos de desarrollo sostenible, una de las principales iniciativas para la reducción de los GEI producidos por la industria del cemento, es la utilización del concreto con reemplazo parcial

del cemento con cenizas volantes y escorias de alto horno, que son generalmente residuos valorizados del sector energético y siderúrgico; sin embargo, la investigación existente se ha centrado en su resistencia mecánica y durabilidad, desconociendo los impactos ambientales, económicos y en la salud humana de dichos materiales, factores que son determinantes en el diseño de edificaciones e infraestructura que cumplan con principios de sostenibilidad.

Cuantificar los GEI incorporados y otros impactos de los materiales de construcción es un proceso complejo por el gran volumen de datos y su correspondiente análisis, por lo que en este trabajo de grado se propone y desarrolla el enfoque de ciclo de vida como herramienta para determinar los impactos ambientales, económicos y sociales en términos de salud humana del concreto con reemplazo parcial de cenizas volantes y escorias de alto horno.

1.1.2. Pregunta de investigación

De acuerdo con lo anterior, este proyecto de grado tiene como objetivo dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es el impacto ambiental, económico y social en términos de salud humana del reemplazo parcial del cemento estructural con cenizas volantes y escorias de alto horno en el concreto?

1.1.3. Alcance del trabajo de grado

En este proyecto de grado se determinan de manera cuantitativa los impactos ambientales, económicos y a la salud humana a nivel local, de la producción de eco-concretos utilizando escorias de alto horno y cenizas volantes, mediante el enfoque de ciclo de vida. A su vez, para desarrollar el análisis de ciclo de vida de los eco-concretos propuestos se utilizan dos herramientas de acceso libre: Openconcrete y ReCiPe con las bases de datos de los procesos y materiales de los diferentes productos a analizar.

Una vez se determinen los impactos ambientales, económicos y a la salud humana, se brindan recomendaciones con criterio (del tipo científico y tecnológico) para la selección de diferentes productos de concreto con reemplazo parcial del cemento estructural con cenizas volantes y escorias de alto horno, lo anteriormente expuesto, utilizando como caso de estudio la producción de concreto en la ciudad de Santiago de Cali (Colombia).

1.2. Objetivos del proyecto

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar el análisis del ciclo de vida al concreto con reemplazo parcial del cemento estructural con cenizas volantes y escorias de alto horno para estimar su impacto ambiental, económico y en la salud humana utilizando como caso de estudio la producción de concreto en la ciudad de Santiago de Cali (Colombia).

1.2.2. Objetivos específicos

1. Analizar el ciclo de vida del concreto con reemplazo parcial del cemento estructural con cenizas volantes y escorias para determinar su impacto ambiental.
2. Evaluar el análisis de ciclo de vida del concreto con reemplazo parcial del cemento estructural con cenizas volantes y escorias para estimar su impacto económico.
3. Determinar el impacto a la salud humana del concreto con reemplazo parcial del cemento estructural con cenizas volantes y escorias de alto horno.

1.3. Justificación del trabajo de grado

El Departamento Administrativo de Planeación Municipal en cabeza de la Alcaldía Municipal y con el apoyo de la Pontificia Universidad Javeriana Seccional Cali, recientemente desarrollaron el Manual de Construcción Sostenible y el Sello Cali Construye Sostenible que impulsa el desarrollo urbano considerando los impactos ambientales, sociales y económicos en la región. En el marco de estas políticas públicas se presenta un portafolio de productos sostenibles que aún son objeto de estudio y de mejora continua, entre ellos se encuentran los eco-concretos, que buscan el remplazo de los componentes más importantes del concreto como el cemento, por cementantes suplementarios como las cenizas volantes y/o escorias de alto horno, los cuales son subproductos de otros sectores productivos como la termoeléctricas y la industria del acero (Osuna Motta I et al., 2023).

En la literatura, el concreto con reemplazo parcial del cemento con cenizas y/o escorias han sido ampliamente evaluadas técnicamente (i.e. resistencia mecánica y durabilidad), no

obstante, con el ánimo de garantizar la sostenibilidad de los productos, se desarrolla su respectivo análisis de ciclo de vida y se determina su impacto económico, ambiental y a la salud humana, ello permitirá tomar decisiones con un criterio integral al momento de escoger los materiales de construcción para edificaciones e infraestructura.

Por otro lado, la investigación del remplazo de cemento por cenizas volantes y/o escorias provenientes del sector energético y siderúrgico, permiten un mayor conocimiento y confianza en la utilización de subproductos de otras industrias, lo anterior en el marco del desarrollo sostenible y más exactamente indicado en los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) número 12 y 13 sobre el consumo y producción sostenible, y acción por el clima (Figura 1), los cuales mediante la economía circular y simbiosis industrial promueven la eficiencia en el uso de los materiales, agua y energía para entre otros reducir las emisiones de GEI.

La industria de la construcción y más específicamente la industria del cemento es responsable entre el 7% y el 8% de las emisiones globales de gases efecto invernadero responsables del cambio climático (GLOBE, 2022), por lo que el análisis de ciclo de vida para los eco-concretos se vuelve una herramienta importante para determinar las posibilidades de reducción de emisiones totales en Colombia, el cual en su indicador nacional para el año 2030 busca una reducción de los GEI del 20% (Figura 1).



 <p>12 PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES</p>	<p>Indicador nacional: tasa de reciclaje y nueva utilización de residuos sólidos (%)</p>
	<p>Línea base (2015): 8,6 %</p> <p>Meta nacional a 2018: 10,0 %</p> <p>Meta nacional a 2030: 17,9 %</p>
 <p>13 ACCIÓN POR EL CLIMA</p>	<p>Indicador nacional: reducción de emisiones totales de gases efecto invernadero (%)</p>
	<p>Línea base (2015): 0,0 %</p> <p>Meta nacional a 2018: No aplica</p> <p>Meta nacional a 2030: 20,0 %</p>

Figura 1. Metas ODS 12 y 13 para Colombia (Departamento Nacional de Planeación de Colombia (DNP), 2018).

2. MARCO TEORICO

2.1. Objetivos de Desarrollo Sostenible y Economía Circular

Actualmente la humanidad enfrenta varios retos que van desde la degradación ambiental, el lento crecimiento económico mundial, hasta las grandes desigualdades sociales. En respuesta a estos retos, la Asamblea General de las Naciones Unidas en representación de la comunidad internacional acordó 17 objetivos de Desarrollo Sostenible y 169 metas que empezaron a implementarse desde el año 2015 y deben concretarse en 2030. Con esta agenda se pretende retomar y fortalecer los Objetivos de Desarrollo del Milenio planteados en el año 2000 (ONU, 2015b).

Lo anterior, muestra un cambio de paradigma en la forma como se debe dar el desarrollo de la economía mundial, los patrones de producción, uso de agua, energía y recursos no renovables (ONU, 2018), por lo tanto, en el marco del nuevo paradigma de desarrollo sostenible se propone el modelo de economía circular el cual Osuna Motta I. et al. (2023) lo define en el Manual de construcción sostenible como “un sistema de producción y consumo que promueve la eficiencia en el uso de materiales, agua y energía, teniendo en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas y el uso circular de los flujos de materiales a través de la implementación de innovaciones tecnológicas, alianzas y colaboraciones entre los actores”.

De acuerdo con la economía circular y en favor de una producción más limpia, se plantea la utilización de materiales de construcción sostenibles, como es el caso del desarrollo de eco-concretos, los cuales utilizan cementantes suplementarios como escorias de alto horno y cenizas volantes en remplazo de cemento, los cuales son residuos valorizados de otras industrias, fomentando así la simbiosis industrial en la economía circular (Osuna Motta I, 2023).

2.2. Desarrollo del análisis de ciclo de vida

En el marco de lo anterior, además de la evaluación técnica (i.e. resistencia mecánica y durabilidad), se plantea el desarrollo respectivo del análisis de ciclo de vida (ACV) para el eco-concreto en investigación; siendo el ACV una herramienta innovadora para tomar decisiones destinadas a mejorar el desempeño ambiental, económico y social a lo largo de las diferentes etapas de ciclo de vida (Mesa et al., 2021), mediante la cuantificación de los recursos (energía, agua y materiales) y emisiones ambientales al aire, agua y suelo asociados al sistema que se está

evaluando (Pacheco Torgal et al., 2013); lo anterior, para garantizar que los productos realmente están aportando a los objetivos de desarrollo sostenible trazados.

La idea de los ACV (también conocidos como LCA, del inglés *Life Cycle Assessment*) surge en la década de 1960 cuando la degradación ambiental y el acceso limitado a los recursos comenzó a convertirse en una preocupación tanto para el sector público como el privado (Hauschild et al., 2018).

Los métodos orientados al concepto de ciclo de vida que fueron precursores del ACV se desarrollaron en la década de 1960 gracias a la colaboración entre universidades y la industria, principalmente en Estados Unidos y el norte de Europa; se centraban en el flujo de los materiales y recursos, emisiones y generación de recursos, luego a medida que los inventarios se volvieron más complejos, el enfoque inicial de cálculo de flujo de entradas y salidas se amplió a convertir los datos de los inventarios en impactos ambientales potenciales, surgiendo los diferentes métodos de evaluación de impacto de ciclo de vida o LCIA (del inglés *Life Cycle Impact Assessment*), entre ellos se encuentra por ejemplo ReCiPe, TRACI y PCR.

Posteriormente, en la década de 1990, se inició un proceso de estandarización formal bajo el patrocinio de la Organización Internacional de Normalización (ISO) para desarrollar un estándar global para LCA, el cual resultó en la publicación de cuatro estándares, empezando con la norma ISO 14040, publicada en el año 1997 la cual aborda los principios y el marco de ACV.

Según un estudio realizado en el 2011, con una tendencia creciente la mayoría de los reportes de ACV realizados son para productos del sector agrícola y alimentos (62%) y en otras industrias como bienes de consumo y energía (38%) (Hauschild et al., 2018), además las aplicaciones de ACV sigue aumentando cada año como se puede apreciar en la Figura 2 donde se evidencia un aumento de la aplicación del método en los informes de responsabilidad corporativa de las empresas.

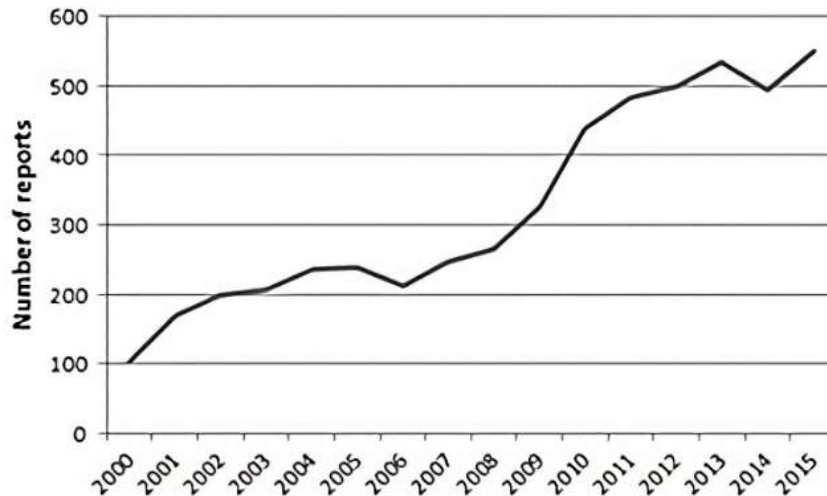


Figura 2. Número de informes de responsabilidad corporativa que relacionan el uso del ACV en el periodo 2000 al 2015 (Hauschild et al., 2018).

2.2.1. Fases del análisis de ciclo de vida

a) Definición del objetivo y el alcance: Se estandarizó mediante la norma ISO 14041 en el año 1997, busca establecer el contexto del estudio del ACV, se realiza la definición de la unidad funcional como base para determinar el flujo de referencia del producto. Por otro lado, se determina el alcance del sistema, definiendo las actividades y procesos que se tienen en cuenta en el ciclo de vida del producto de estudio; simultáneamente se definen los límites del sistema.

b) Análisis de inventario: Esta etapa de igual forma se estandarizó mediante la norma ISO 14041, y requiere la estimación de entradas y salidas del proceso unitario dentro de un sistema de productos, por ejemplo, para la producción de un material, la generación de calor, residuos, emisiones, entre otros. El resultado del análisis de inventario es una lista de flujos elementales cuantificados para el sistema del producto asociado.

c) Evaluación de los impactos: Se estandarizó mediante la norma ISO 14042 en el año 2000, tomando el inventario del ciclo de vida como punto de partida, la evaluación de impacto traduce los flujos físicos y las intervenciones del sistema del producto en impactos sobre el medio ambiente (Hauschild et al., 2018).

d) Interpretación de los resultados: Se estandarizó mediante la norma ISO 14043 en el año 2000, es la última fase del ACV en la que se analizan conjuntamente los resultados teniendo en

cuenta la definición del objetivo, alcance y las limitaciones a la interpretación de estos, debido a los supuestos geográficos, temporales o tecnológicos (Hauschild et al., 2018).

2.3. Análisis de ciclo de vida en el sector de la construcción

La contribución global de las emisiones de gases efecto invernadero del sector de la construcción asciende a un total del 22% de las emisiones totales. Tres cuartas partes de esas emisiones son originadas por el concreto y el acero, debido a sus grandes volúmenes de producción, por lo que se debe usar menos material o usar materiales con menos carbono incorporado (GLOBE, 2022), dado lo anterior, el análisis del ciclo de vida de estos materiales se vuelve indispensable para evaluar y mejorar su impacto ambiental.

Con base en la literatura el ACV ha sido implementado para evaluar la utilización de Residuos de Construcción y Demolición (RCD); los artículos al respecto se enfocan en evaluar las propiedades mecánicas y los impactos ambientales para brindar información útil en la selección de materiales, como por ejemplo la selección de agregados vírgenes o agregados reciclados, a su vez lo utilizan para determinar la estrategia de gestión de residuos más adecuada: reciclaje en el sitio, fuera del sitio y/o vertedero (Mesa et al., 2021). Como ejemplo, Estanqueiro et al. (2018) expone que el beneficio ambiental de utilizar agregados reciclados en comparación con agregados naturales puede ascender a un 37.3%, a su vez concluye que los resultados de ACV son muy sensibles a cambios en las distancias de los materiales.

En otro estudio desarrollado por Hossain et al. (2016) se evaluó el impacto ambiental de eco-bloques de concreto para pavimentos fabricados con residuos de construcción y demolición utilizando el análisis de ciclo de vida. Se concluyó que respecto a los bloques producidos con materiales naturales se utilizó entre un 26% y un 32% menos de energía y se emitieron entre un 17% y un 20% menos de gases de efecto invernadero, demostrando que los bloques ecológicos tienen ganancias ambientales significativas. Por otro lado, Mah et al. (2017) se enfoca en la evaluación ambiental del uso residuos de concreto utilizando ACV para varios escenarios. En el escenario 1 se utiliza un enfoque de la cuna a la puerta, donde los residuos se envían al vertedero sin tratamiento, en el escenario 2 y 3 se utiliza un enfoque de la cuna a la cuna, donde se reciclan cíclicamente como agregados para concreto y como material base para carreteras; finalmente el análisis permitió determinar que el reciclaje de residuos de concreto tiene el menor impacto de GEI en el medio ambiente con 0.094 toneladas de CO₂.

Sin embargo, en el marco de una economía circular, especialmente bajo el principio de simbiosis industrial es importante que se articulen otras industrias como el sector energético y siderúrgico para la utilización de subproductos como las cenizas volantes y escorias de alto horno en la fabricación del concreto. Cabe aclarar, que las investigaciones respecto a este tema aún son limitadas, además que sus resultados dependen de la localización y los métodos empleados, como se aprecia a continuación:

- Van Den Heede & De Belie (2012) en su artículo presentan una revisión sistemática de la literatura acerca del impacto ambiental del “concreto verde”, donde evidencian que en el concreto con remplazo parcial del cemento portland con escoria de alto horno y cenizas volantes tiene un impacto ambiental menor que el concreto sin remplazo parcial del cemento portland tradicional.

- Dong & Ng (2015) proponen el análisis de ciclo de vida para proyectos de construcción considerando su impacto social, según el estudio realizado en Hong Kong se concluye que la seguridad y salud de los trabajadores es uno de los aspectos más importantes en la parte social, además de que las actividades de construcción in situ son más respetuosas con el medio ambiente y beneficiosas socialmente.

- Chen et al. (2019) estudiaron las propiedades mecánicas e hidráulicas del concreto permeable con cenizas volantes y escorias de alto horno, y mediante el análisis del ciclo de vida determinaron su impacto ambiental y ahorro de costos. El concreto permeable con cenizas volantes exhibió el desempeño general más alto considerando todos los factores: propiedades, ahorros en costos, energía y reducción de GEI.

- Panesar et al. (2019) presentan en su artículo el análisis del impacto del transporte de las cenizas volantes en el concreto con adición de dicho material, el estudio revela que los impactos ambientales asociados al transporte de las cenizas son más severos que el costo asociado a su tratamiento.

- Arrigoni et al. (2020) en su artículo indican que: si el mercado de materiales cementantes suplementarios (MCS) está restringido (es decir, los subproductos ya se utilizan en su totalidad) y la alternativa no restringida en el mercado es el cemento Portland, los beneficios de utilizar MCS se reducen en gran medida, o incluso se invierten, si se adopta el enfoque de sustitución. Por el contrario, los MCS sin restricciones suponen un ahorro considerable de GEI, a menos que reduzcan

significativamente la relación agua/aglomerante para alcanzar una resistencia prescrita y requieran un transporte de larga distancia.

- Chen & Wang (2022) presentan la evaluación ambiental y económica mediante la herramienta de análisis de ciclo vida del concreto permeable con uso de cenizas volantes. Los estudios revelaron que el uso de las cenizas volantes puede generar mayor o menor impacto ambiental, dependiendo de las propiedades mecánicas del concreto permeable.

- Tushar et al. (2022) presentan un método de evaluación económica y ambiental del ciclo de vida de los concretos con sustitución del cemento portland por cementantes alternativos más específicamente por cenizas volantes y escorias. El análisis demostró que es factible una reducción total de 2745 megatonnes de CO₂ y un ahorro monetario de 209 mil millones de dólares reemplazando el 50% del cemento producido con cementante alternativo.

- Das et al. (2022) evalúan el ciclo de vida ambiental del concreto con 100% de escoria de ferrocromo como agregado grueso y cenizas volantes como sustituto parcial del cemento (0-40% de remplazo) obteniendo un 50% de ahorros ambientales respecto al concreto convencional de referencia.

- Mocharla et al. (2022) presentan el desempeño estructural e impacto ambiental de la mezcla de concreto con cenizas volantes y escoria, se concluye que la inclusión de estos materiales llevó a la producción de un concreto ecológico muy deseable a nivel local en la India.

- Sathiparan et al. (2022) estudiaron el uso combinado de agregados reciclados en remplazo de arena y cenizas volantes en remplazo del cemento, para la fabricación de bloques. La utilización de cenizas volantes redujo significativamente el costo total, la energía incorporada y las emisiones de CO₂.

- Du et al. (2022) presentan la viabilidad y los beneficios de utilizar cenizas volantes en concreto de ultra alto desempeño. El análisis económico y ambiental mostró que se redujo el costo, la huella de carbono y el consumo de energía.

- En el artículo “Economía circular en el sector de la construcción: un estudio de caso de Santiago de Cali (Colombia)”, Maury-Ramírez et al. (2022) presentan las estrategias que mediante el Manual de Construcción Sostenible y Sello Cali Construye Sostenible se impulsan como materiales de construcción, entre ellos, definen los eco-concretos para sustituir los materiales más

críticos del concretos, como lo es el cemento, por subproductos de otras industrias (cenizas y escorias), además se propone el análisis de ciclo de vida para medir y tomar decisiones soportadas en relación al desempeño sostenible. Además, los autores enfatizan en la importancia de utilizar herramientas de análisis de ciclo de vida social o S-LCA del inglés *Social Life Cycle Assessment* para la evaluación de aspectos sociales y sociológicos a partir de los diferentes productos y procesos para la selección de los materiales de construcción.

- Mas recientemente Maury-Ramírez et al. (2023) desarrollan la evaluación del ciclo de vida en concretos con remplazo parcial de cemento portland por escorias de alto horno y cenizas volantes utilizando el software BEES del inglés *Building for Environmental and Economic Sustainability* y la metodología ACV planteada por la ISO 14040 a 14043. De los resultados aplicados a un proyecto de infraestructura residencial sostenible en Santiago de Cali (Colombia) se destaca que el equivalente de concreto con 50% por ciento de remplazo por escoria tiene un 27% menos de cantidad de CO₂ equivalente que el concreto tradicional con 100% cemento portland.

- Shobeiri et al. (2023) evalúan el ciclo de vida del concreto con cenizas volantes y escoria en Australia para optimizar su uso, garantizando un menor impacto ambiental y costo. Los resultados mostraron que puede reducirse el potencial de calentamiento global en un 60% y reducir el costo en un 40%.

- Liu et al. (2023) estudiaron el impacto ambiental del concreto con cenizas volantes y agregado grueso reciclado y la implementación del método de biomineralización; los resultados mostraron que el uso de cenizas volantes disminuyó el impacto ambiental, mientras que, el uso de agregado reciclado no disminuyó significativamente su impacto.

- Orozco et al. (2023) evaluaron los impactos ambientales, económicos y sociales en términos de salud humana de la utilización de cenizas volantes en mezclas de concreto de alta resistencia temprana para su utilización en puentes de Filipinas. Para la evaluación de los impactos emplearon el ACV según las norma ISO 14040, mediante la utilización del software SimaPro, la base de datos de EcoInvent y la metodología ReCiPe. Se evaluaron tres mezclas representativas con diferentes resistencias a la compresión: 55 MPa a los 7 días sin adiciones (7OPC), 55 MPa a los 28 días (28OPC) y 55 MPa a los 7 días con 20% de cenizas volantes como remplazo del cemento (7FA20), dando como resultado que la utilización de cenizas volantes disminuyó el daño

a los recursos en un 11%, mientras que a la salud humana y al medio ambiente fue de 16%. Destaca que la utilización de cenizas volantes disminuyó el potencial de calentamiento global en aproximadamente 17% equivalentes a 530 kg de $\text{CO}_2\text{-eq}$ respecto a las mezcla de concreto sin remplazo de cemento.

- Abellan-Garcia et al. (2023) evaluaron el desempeño mecánico resultante del uso de cenizas de cascara de arroz (RHA) como cementante suplementario (SCM) en un concreto de ultra alto desempeño (UHPC), además de analizar el impacto ambiental mediante un análisis de ciclo de vida utilizando la herramienta denominada Openconcrete. El estudio tuvo como resultado que la resistencia a la compresión disminuyo alrededor del 7%, pero la huella de carbono en términos de kg CO_2 disminuyo un 10%.

2.4. Cenizas volantes y escorias de alto horno

a) Cenizas volantes: De acuerdo con C618 – 23, se define la ceniza volante como un producto de la combustión del carbón molido o en polvo obtenido de la producción actual de las centrales termoeléctricas. Según ASTM (2023) se definen tres clases de cenizas volantes:

Ceniza clase N: Puzolanas naturales calcinadas o sin calcinar, como algunas tierras diatomáceas; pedernales, opalinos y pizarras; tobas y cenizas volcánicas o pumicitas, calcinadas o sin calcinar; y materiales varios que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas y lutitas.

Ceniza clase F: Ceniza volante normalmente producida de la calcinación del carbón antracítico o bituminoso. Esta clase de ceniza volante tiene propiedades puzolánicas.

Ceniza clase C: Ceniza volante normalmente producida de la calcinación del carbón sub bituminoso o lignito. Esta clase de ceniza volante además de tener propiedades puzolánicas tiene propiedades cementicias.

El uso de las cenizas volantes en las mezclas de concreto ha sido explorado en varios países, llegando a aplicarse en las grandes productoras de concreto. En Colombia, puntualmente la cenizas provienen de la quema del carbón, principalmente de las termoeléctricas e industrias con autogeneración de energía. El tipo de ceniza volante que se encuentra en el país es la proveniente de la quema de carbón bituminoso, y es generada por las principales termoeléctricas que abastecen

parcialmente de energía al país. Es importante conocer el tipo de carbón, ya que de este depende el desempeño de las cenizas dentro del concreto (Manchego, 2015).

Para el año 2022, Colombia contaba con 19 plantas de generación eléctrica a carbón que sumaban 1.659 MW de capacidad instalada, dichas plantas se concentran en los departamentos de Boyaca, Cordoba, Cundinamarca, La Guajira, Norte de Santander y Sucre. (Laura Flechas Mejía et al., 2022). Produciendo aproximadamente 200 kg de cenizas volantes por cada tonelada de carbón quemado en las centrales termoeléctricas, recogidas de los tolvas de los precipitadores electrostáticos, donde son transportados a lugares de almacenamiento, situados en balsas de decantación. (Aperador et al., 2015). Destacan cuatro termoeléctricas en el país, operadas por las empresas EMGESA S.A. E.S.P., GESTION ENERGETICA S.A. E.S.P. TERMOCHAGOTA E.S.P. y TERMOTASAJERO S.A., las cuales se localizan en los municipios de Tocancipá, Paipa y Cúcuta respectivamente. (Leonardo Augusto Fonseca Barrera, 2016).

b) Escorias de alto horno: La escoria de alto horno es un subproducto de la industria del acero fundido en alto horno, consistiendo principalmente de silicatos y aluminosilicatos, se distinguen cuatro tipos según el método empleado para su enfriamiento: la escoria de alto horno enfriada al aire; la escoria expandida o espumada; la escoria paletizada y la escoria de alto horno granulada.

Es de interés, la escoria granulada ya que es procesada por medio de un secado previo y posteriormente sometida a molienda con molino rotatorio de bolas, hasta obtener un polvo muy fino, el cual es conocido como cemento de escoria de alto horno de grano molido (GGBS por sus siglas en inglés) (Cabrera-Madrid et al., 2016). Las especificaciones para la escoria granulada de alto horno como material cementante se encuentran en la ASTM C989/C989M-24. En Colombia, la empresa Acerías Paz del Río es la única industria que genera este subproducto con una producción estimada en 180 mil toneladas al mes (Malagón et al., 2023).

2.5. Evaluación del impacto a la salud humana y la producción de concreto

En 1946, en la constitución de la Organización Mundial de la Salud (OMS) se definió la salud como “un estado de completo bienestar físico, mental y social y no simplemente la ausencia de enfermedad o dolencia” (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2024). Hoy en día, las medidas disponibles para evaluar la salud de la población son la morbilidad, la mortalidad y la discapacidad, no obstante, para la evaluación del estado general de la salud se emplean métricas que combinan

datos de morbilidad, mortalidad y discapacidad. Una de las métricas más utilizadas es el DALY que según Thacker et al. (2006) se define como los años de vida ajustados por discapacidad, la cual permite resumir la carga de enfermedad entre las poblaciones que combina medidas de mortalidad y morbilidad.

El concepto DALY fue introducido en el análisis del ciclo de vida por Patrick Hofstetter a mediados de la década de 1990, cuando buscaba una medida unificada para expresar el alcance de los daños a la salud humana, siendo adoptado por muchos métodos conocidos de evaluación del impacto, como ReCiPe e Impact2002, principalmente destinada para cuantificar la carga de enfermedades humanas causadas por la contaminación ambiental (Laura Golsteijn, 2016).

La creciente necesidad de infraestructura en todo el mundo, principalmente en el sur global, aumentan la demanda de concreto, siendo este material foco de investigación por sus altas cargas contaminantes, autores como Miller & Moore (2020) cuantifican los años de vida ajustados por discapacidad por la producción de concreto, determinando que, dentro de la producción global, la producción de los agregados es responsable del 53,4% de la afectación a la salud humana en DALY, seguido del cemento con un 28,4%, el proceso de dosificación y mezclado del concreto con 17,1%, adiciones minerales con 0,9% y aditivos con 0.1%.

Orozco et al. (2023) evaluaron los impactos ambientales, económicos y sociales en términos de salud humana de la utilización de cenizas volantes en mezclas de concreto de alta resistencia temprana para su utilización en puentes de Filipinas, dando como resultado que la utilización de cenizas volantes disminuyó en un 16% los daños a la salud humana, disminuyendo el daño en $1,25E-04$ DALY por metro cubico de concreto.

3. METODOLOGÍA

Para desarrollar la evaluación del impacto ambiental, económico y en la salud humana del concreto con reemplazo parcial del cemento estructural con cenizas y escorias se articularon, bajo el enfoque de ciclo de vida, las metodologías ISO 14000, ReCiPe, y LCC, las cuales fueron propuestas por la ISO (del inglés *Internacional Organization for Standardization*), el Instituto Nacional de Salud Pública y Ambiente de Países Bajos, y la ASTM (del inglés *American Society for Testing and Materials*). La articulación de las metodologías se desarrolló considerando las siguientes fases: (a) definición de objetivo y alcance, (b) análisis de inventario, (c) evaluación de impactos y (d) interpretación de resultados, tal como se plantea en la Figura 3.

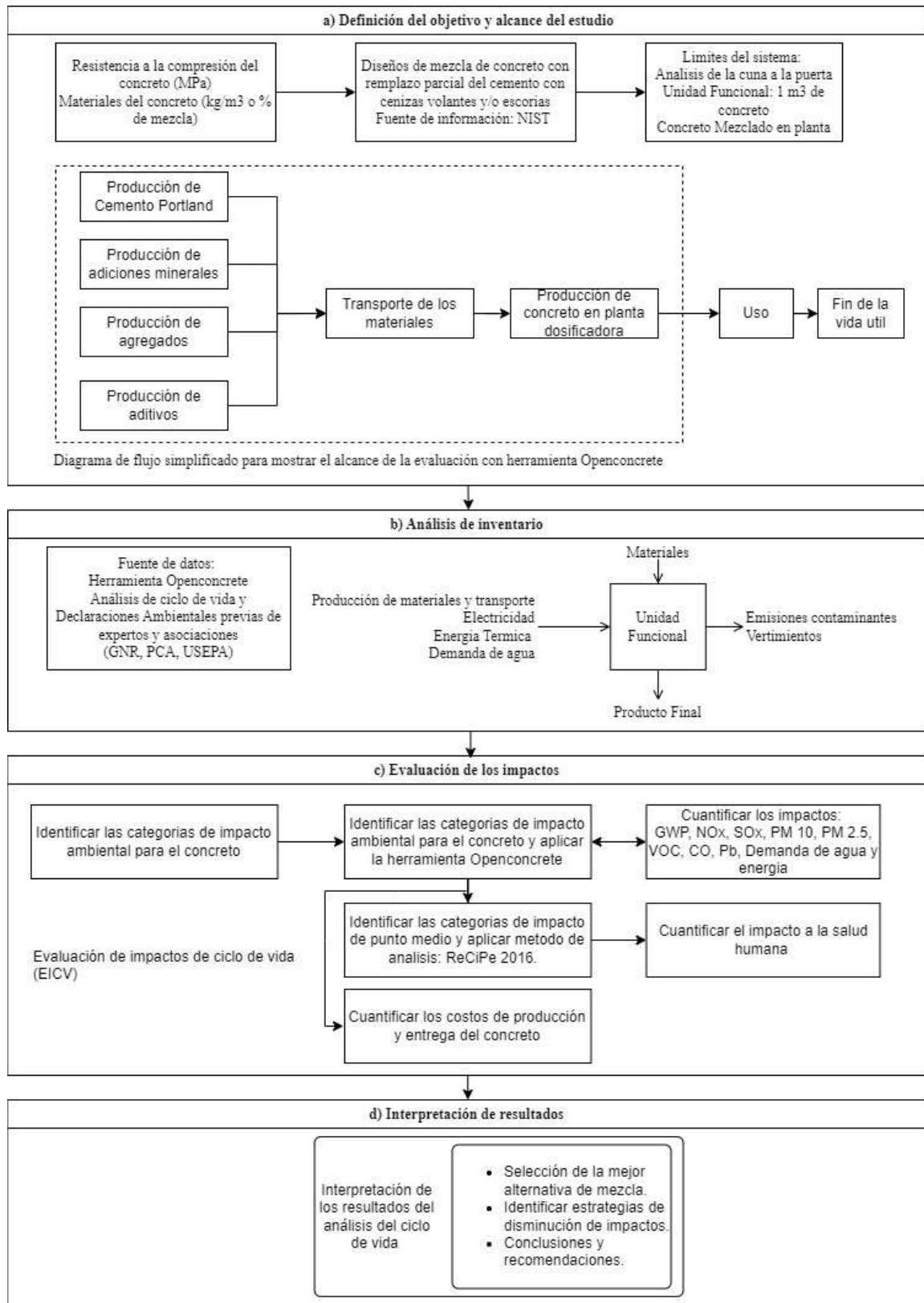


Figura 3. Metodología de evaluación del ciclo de vida e impactos ambientales, económicos y a la salud humana. Fuente: Propia.

Adicionalmente, con el ánimo de validar la metodología propuesta se seleccionó como caso de estudio la producción de concreto en la ciudad de Santiago de Cali (Colombia). Con la planta de concreto ubicada al norte de la ciudad de Cali exactamente en Arroyohondo (Yumbo), la producción de cemento y agregados de igual forma en el sector de Yumbo; como fuente de cenizas volantes se consideró las producidas por las termoeléctricas del municipio de Tocancipá (Cundinamarca) y como fuente de las escorias las producidas en la siderúrgica ubicada en el municipio de Sogamoso (Boyacá). Finalmente, de acuerdo, a la metodología de estudio de la cuna a la puerta (Figura 4), se seleccionó como punto de entrega del concreto a 23 kilómetros desde la concretetera, al sur de la Ciudad de Santiago de Cali.



Figura 4. Alcance del análisis de ciclo de vida usando la Herramienta Openconcrete. Adaptado de Kim et al. (2022). Acceso libre bajo licencia CC BY 4.0.

En detalle, esta investigación parte del marco conceptual ACV desarrollado por la ISO, utilizando como base de datos el software abierto Openconcrete desarrollado por Kim et al. (2022), de la Universidad de California en Davis (Estados Unidos), la cual es una herramienta para calcular los impactos ambientales de la producción del concreto. Para el caso de estudio, se evaluaron diferentes mezclas de concreto con una resistencia a la compresión de 28 MPA utilizando cemento estructural tipo ART, cenizas volantes y escoria de alto horno (Tablas 1 y 2), los datos provienen de la NRMCA – Asociación Nacional de Concreto Premezclado, la SLA - Asociación de Cemento de Escoria y compilados en el manual BEES desarrollado por el NIST - Instituto nacional de Estándares y Tecnología de Estados Unidos.

Tabla 1. Diseño de mezcla para concreto con diferentes cantidades de escoria y cenizas volantes para una resistencia a la compresión de 28 Mpa (4000 psi). Adaptado de Kneifel et al. (2019).

<i>Mezcla</i>	<i>100C</i>		<i>20CV - 20% Cenizas Volantes</i>		<i>30CV - 30% Cenizas Volantes</i>		<i>40CV - 40% Cenizas Volantes</i>	
	<i>kg/m³</i>	<i>lb/yd³</i>	<i>kg/m³</i>	<i>lb/yd³</i>	<i>kg/m³</i>	<i>lb/yd³</i>	<i>kg/m³</i>	<i>lb/yd³</i>
Cemento	365,2	615,5	307,3	518	276,5	466	243,2	410
Escoria	0	0	0	0	0	0	0	0
Cenizas Volantes	0	0	77,1	130	118,7	200	162,6	274
Agregado grueso Triturado	678,6	1143,8	678,6	1143,8	678,6	1143,8	678,6	1143,8
Agregado grueso Natural	316,2	532,9	316,2	532,9	316,2	532,9	316,2	532,9
Agregado fino Triturado	87,4	147,3	87,4	147,3	87,4	147,3	87,4	147,3
Agregado fino Natural	656,4	1106,4	656,4	1106,4	656,4	1106,4	656,4	1106,4
Agregado Ligero	0	0	0	0	0	0	0	0
Aditivo Acelerante	0,37	0,63	0,56	0,94	0,56	0,94	0,93	1,56
Aditivo incorporador de aire	0,04	0,06	0,04	0,06	0,06	0,09	0,06	0,09
Aditivo reductor de agua y acelerante	0,11	0,19	0,11	0,19	0,11	0,19	0,11	0,19
Agua	154,8	261	154,8	261	154,8	261	154,8	261

Tabla 2. Diseño de mezcla para concreto con diferentes cantidades de escoria y cenizas volantes para una resistencia a la compresión de 28 Mpa (4000 psi) (continuación). Adaptado de Kneifel et al. (2019).

<i>Material</i>	<i>30E - 30% Escoria</i>		<i>40E - 40% Escoria</i>		<i>50E - 50% Escoria</i>		<i>30E20CV 30% Escoria-20% Cenizas Volantes</i>	
	<i>kg/m³</i>	<i>lb/yds</i>	<i>kg/m³</i>	<i>lb/yds</i>	<i>kg/m³</i>	<i>lb/yds</i>	<i>kg/m³</i>	<i>lb/yds</i>
Cemento	255,6	430,9	219,1	369,3	182,6	307,8	192,2	324
Escoria	109,6	184,7	146,1	246,2	182,6	307,8	115,1	194
Cenizas Volantes	0	0	0	0	0	0	77,1	130
Agregado grueso Triturado	678,6	1143,8	678,6	1143,8	678,6	1143,8	678,6	1143,8
Agregado grueso Natural	316,2	532,9	316,2	532,9	316,2	532,9	316,2	532,9
Agregado fino Triturado	87,4	147,3	87,4	147,3	87,4	147,3	87,4	147,3
Agregado fino Natural	656,4	1106,4	656,4	1106,4	656,4	1106,4	656,4	1106,4
Agregado Ligero	0	0	0	0	0	0	0	0
Aditivo Acelerante	0,56	0,94	0,93	1,56	1,11	1,88	1,11	1,88
Aditivo incorporador de aire	0,04	0,06	0,04	0,06	0,04	0,06	0,04	0,06
Aditivo reductor de agua y acelerante	0,11	0,19	0,11	0,19	0,11	0,19	0,11	0,19
Agua	154,8	261	154,8	261	154,8	261	154,8	261

3.1. Evaluación del ciclo de vida

ISO indica las siguientes cuatro fases para la ACV: (a) definición del objetivo y alcance del estudio (ISO 14041), (b) análisis de inventario de las entradas y salidas de la unidad del proceso (ISO 14041), (c) evaluación de los impactos (ISO 14042) y (d) interpretación de resultados (ISO 14043), lo anterior, como se indica en la Figura 5.

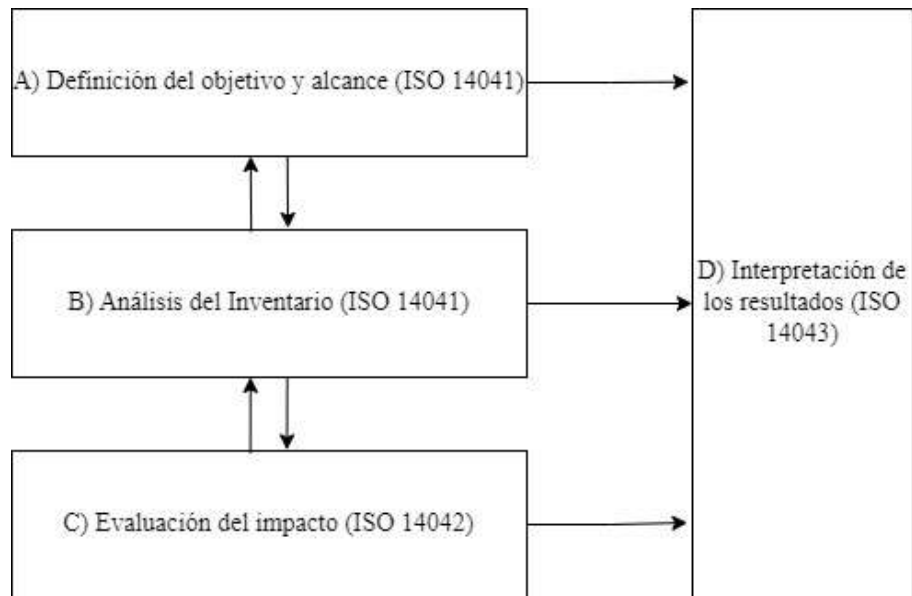


Figura 5. Etapas del LCA definidas por la Organización Internacional de Normalización ISO en el año 2006 Adaptado de: Maury-Ramírez et al. (2022).

3.1.1. Definición del objetivo y el alcance

La investigación se realizó utilizando un enfoque de la cuna a la puerta y una unidad funcional de 1 m³, por otro lado, los límites del sistema incluyen todos los componentes de la mezcla de concreto (cemento, agregados gruesos y finos, cenizas volantes, escorias de alto horno y aditivos). El diagrama de flujo de la Figura 6 describe todos los elementos y procesos de la producción de concreto considerados dentro de la base datos de Openconcrete.

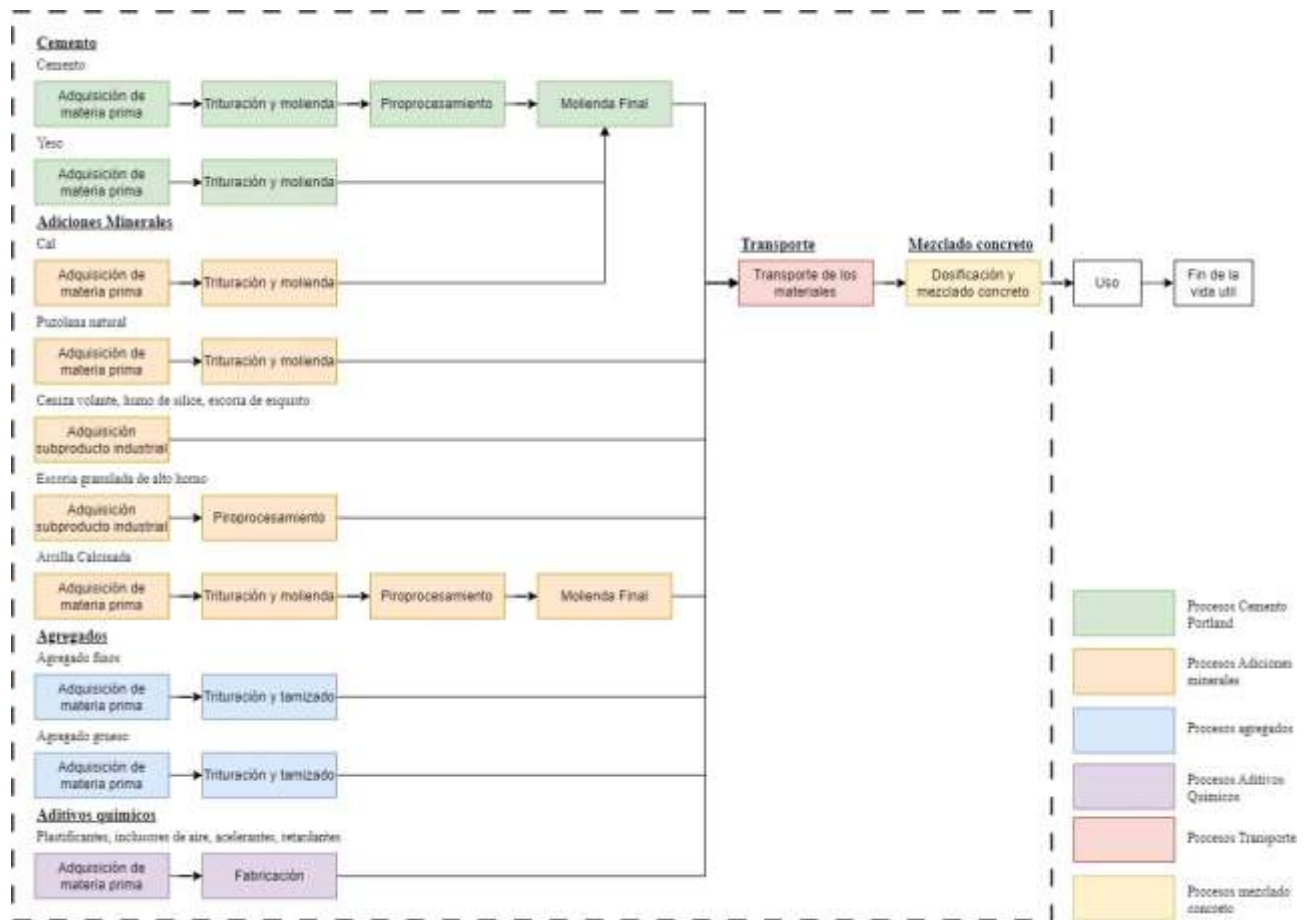


Figura 6. Límites del sistema de producción de los productos de concreto usando la Herramienta Openconcrete. Adaptado de Kim et al. (2022). Acceso libre bajo licencia CC BY 4.0.

3.1.2. Análisis de inventario

El análisis de inventario requiere la estimación de entradas y salidas del proceso unitario dentro de un sistema de productos. En el caso de herramienta Openconcrete utiliza de datos de entrada proporcionados por usuario de acuerdo con la región de estudio y en conjunto con el inventario de datos de impacto por procesos, transporte, electricidad, entre otros que brinda la propia herramienta, se calculan los diferentes impactos ambientales definidos en diferentes categorías; el flujo de datos que permite el cálculo de los diferentes impactos por medio de la herramienta Openconcrete se muestra en la Figura 7.

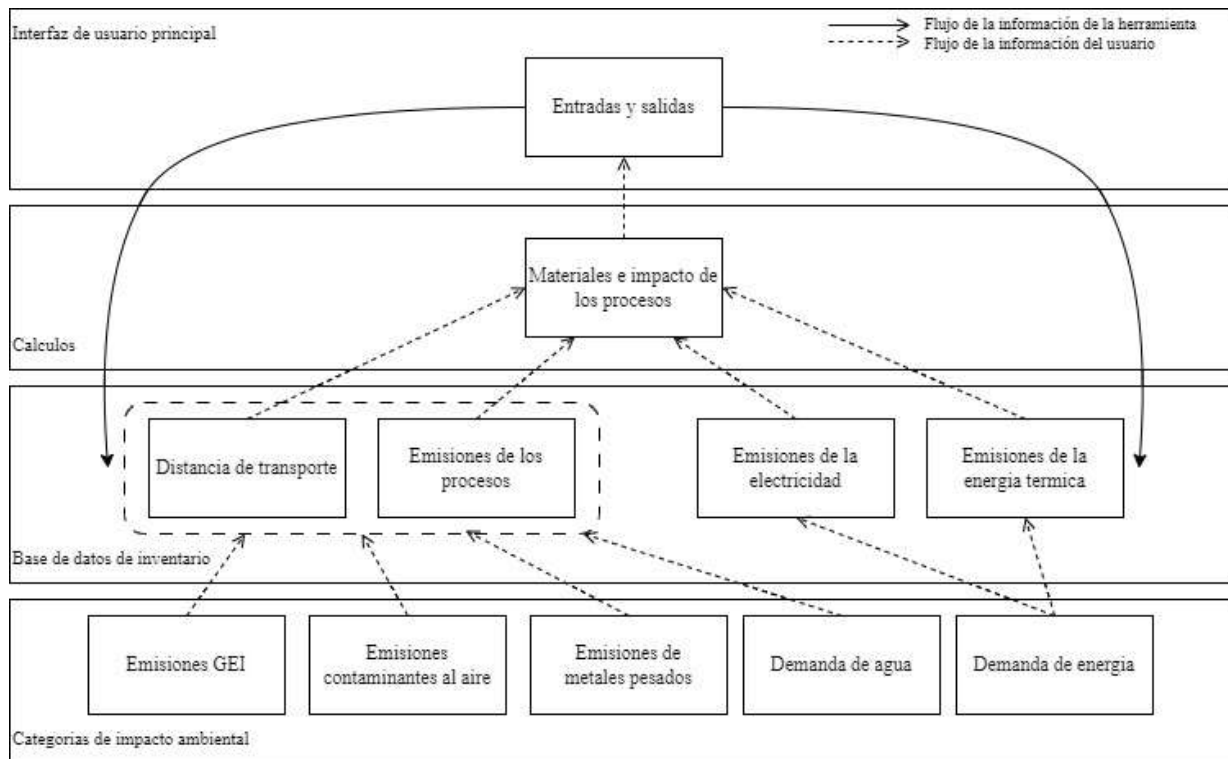


Figura 7. Diagrama de flujo de los datos de usuario y de inventario a través de la herramienta Openconcrete. Adaptado de Kim et al. (2022).

a) Fuente de cemento, cenizas escorias y escorias de alto horno: Debido a la disponibilidad cada vez menor de cemento Portland (o Tipo I) en América Latina que empezó a cambiar el mercado y que principalmente en Colombia donde adoptaron la clasificación de los cementos según su desempeño, se opta por utilizar un cemento estructural tipo ART según la norma colombiana NTC 121, el cual tiene un alto desarrollo de resistencia a edades tempranas.

Toda vez que en Colombia los cementos presentan en su composición cementantes suplementarios, para la evaluación del impacto ambiental se considera la siguiente composición del cemento (Tabla 3).

Tabla 3. Composición del cemento. Fuente: comunicación personal con cementera.

Ingrediente del cemento	Porcentaje
Clinker	90
Yeso	5
Escoria	5

El presente trabajo considera la utilización de cenizas volantes producto de la quema del carbón de las termoeléctricas de Tocanzipa (Cundinamarca), estas cenizas que producto de su finura y peso son arrastradas por el flujo de gases de combustión son extraídas por un precipitador electrostático el cual las acumula en tolvas. La ceniza volante planteada tiene la siguiente composición química (Tabla 4), ya que la sumatoria de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃ es superior al 70% se caracterizan como cenizas clase F (sílico-aluminosas) de acuerdo con la norma ASTM C18.

Tabla 4. Composición química de ceniza volante. *LOI pérdida por ignición a 950 °C. (Prieto et al., 2018).

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	MnO	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅	LOI*
50,38	24,14	9,50	5,60	0,59	2,15	1,93	0,09	1,04	0,48	0,58	3,30

Se considera como segundo cementante suplementario la escoria de alto horno producida por Acerías paz del río, esta materia prima es utilizada principalmente en las industrias cementaras de Boyaca, sin embargo, existe la oportunidad de utilizar las GBFS como materias primas de adoquines, baldosas, ladrillos, estabilización de suelos, vitrocerámicas y concretos, muchas investigaciones son llevadas a cabo acerca de estos usos. (Malagón et al., 2023). De igual forma se presenta su composición química en la Tabla 5.

Tabla 5. Composición química de la escoria de alto horno (Malagón et al., 2023).

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	K ₂ O
42,05	32,96	12,48	3,32	3,14	0,60	0,49	0,44

b) Transporte: las distancias recorridas para cada uno de los materiales se estimaron en función de la ubicación de cada material, siendo los más cercanos los agregados pétreos y cemento debido a su producción en el centro industrial de Yumbo (norte Santiago de Cali) (Tabla 6).

Tabla 6. Distancia de traslado de materiales para producción de concreto.

Material	Distancia en camión (km)
Cemento	7,5
Cenizas Volantes	491,5
Escoria de alto Horno	676,1
Agregado fino	6
Agregado grueso	6
Aditivos	500

c) **Matriz de energía:** Para la Matriz energética se estableció las diferentes fuentes renovables y no renovables establecidos en el Boletín energético #284 de XM: operador del mercado eléctrico colombiano (Tabla 7).

Tabla 7. Distribución energética de Colombia por fuente.

Tipo de fuente energética	Generación (GWh-día)
Carbón	12,2%
Petróleo	0,9%
Gas Natural	25,1%
Biomasa	1,1%
Nuclear	0,0%
Hidroeléctrica	58,9%
Geotérmica	0,0%
Solar	1,8%
Eólica	0,1%

Sin embargo, para la producción del clínker, materia prima del cemento, debido a la falta de información local, se utiliza el promedio de la matriz energética de la industria de Estados Unidos para la producción, utilizando a su vez, la eficiencia de horno de cementeras del Estado de Florida, donde la industria cementera colombiana es líder.

3.1.3. Evaluación de los impactos

Para la evaluación de los impactos de igual forma, se utiliza la herramienta Openconcrete, la cual considera 11 impactos ambientales listados en la Tabla 8.

Tabla 8. Impactos ambientales considerados en Openconcrete. Adaptado de Kim et al. (2022).

Impactos Ambientales	
· Kg GHG (CO ₂ -eq)	· Kg CO
· Kg NO _x	· Kg Pb
· Kg SO _x	· Kg Water Consumption
· Kg PM ₁₀	· Kg Water Withdrawal
· Kg PM _{2.5}	· MJ
· Kg VOC	

- kg GHG: Kilogramos de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Se consideran gases de efecto invernadero a los gases que atrapan el calor en la atmosfera y en consecuencia inciden en el cambio climático. Según EPA (2024) son GEI: el Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido nitroso (N₂O) y Gases fluorados. Las emisiones de GEI se cuantifican en CO₂-eq (CO₂ equivalente) y para convertir las emisiones de un gas en equivalente de CO₂, se multiplican las emisiones por el potencial de calentamiento global (GWP) del gas.

- kg NO_x: Kilogramos de Óxidos de Nitrógeno. Estos gases tóxicos se forman durante la combustión de combustibles fósiles y contribuyen principalmente a la formación fotoquímica de smog y a la formación de lluvia acida, afectando la salud humana y los ecosistemas.

- kg SO_x: Kilogramos de Óxidos de Azufre. Al igual que los NO_x, los SO_x contribuyen a la formación de lluvia ácida y a la contaminación del aire. Según EPA (2024) las exposiciones a corto plazo a SO_x pueden dañar el sistema respiratorio humano y dificultar la respiración; las personas con asma, particularmente los niños, son sensibles a estos efectos de SO_x.

- kg PM₁₀: Kilogramos de partículas menores a 10 micrómetros. Indica la emisión de materia particulada inhalable con diámetros de menos de 10 micrómetros, según EPA (2024) algunas partículas, como el polvo, el hollín o el humo, son lo suficientemente grandes y oscuras como para ser vistas a simple vista, mientras otras son tan pequeñas que sólo pueden ser detectados usando un microscopio electrónico. Estas partículas afectan en gran medida a la salud humana, ya que tiene el potencial de penetrar profundamente en los pulmones y algunas incluso pueden entrar en su torrente sanguíneo.

- kg PM_{2.5}: Kilogramos de partículas menores a 2.5 micrómetros. Indica la emisión de materia particulada inhalable con diámetros de menos de 2,5 micrómetros. Estas partículas representan aun mayor riesgo para la salud por enfermedades respiratorias que las PM₁₀, por lo que se consideran dentro de los análisis de impacto a salud humana como indicador del potencial de formación de partículas.

- kg VOC: Kilogramos de Compuestos Orgánicos Volátiles: Estos compuestos son gases compuestos de carbono, con exclusión del CO, CO₂, ácido carbónico, carburos metálicos y de amonio, carbonatos emitidos por muchos productos y procesos industriales, y pueden contribuir a la formación de ozono troposférico o smog. Según EPA (2024) aun es más preocupante el potencial de afectación a la salud de la personas al exponerse a estos compuestos al interior que, respecto al aire libre, por lo que VOC se utiliza principalmente en la evaluación de la calidad del aire interior.

- kg CO: Kilogramos de Monóxido de Carbono. Este gas es altamente tóxico y puede causar asfixia, al inhalarse en altas concentraciones y reducir la cantidad de oxígeno que puede transportar el torrente sanguíneo; en ambientes cerrados, la exposición a CO puede ocasionar mareos, inconsciencia y muerte (EPA, 2024).

- kg Pb: Kilogramos de Plomo. El plomo es un metal pesado altamente tóxico que puede acumularse en el cuerpo y causar daños a la salud. La emisión persistente de plomo en el medio ambiente puede contaminar suelos y sedimentos, que finalmente afectan a la población en general por su potencial cancerígeno. Según (EPA, 2024) el plomo se distribuye por la sangre y se acumula en los huesos y dependiendo del nivel de exposición, el plomo puede afectar negativamente al sistema nervioso, el sistema inmunológico, la función renal, los sistemas de reproducción y el sistema cardiovascular.

- kg Water Consumption: Kilogramos de Agua Consumida. Según Wada et al. (2016) es la parte del agua retirada permanentemente perdida de su fuente, esta agua ya no está disponible porque se evaporó, se inspiró o usó. En otras palabras, representa la cantidad de agua neta utilizada en todo el sistema de producción de un producto o el proceso analizado.

- kg Water Withdrawal: Kilogramos de Agua Captada: Según Wada et al. (2016) describe la cantidad total de agua retirada de una fuente de agua superficial o subterránea. En otras palabras, representa la cantidad de agua bruta extraída de la fuente y utilizada en todo el sistema de producción de un producto o proceso analizado y que en parte retorna a la fuente o el sistema

hídrico. Comprender la diferencia entre extracción y consumo es fundamental para la gestión de los recursos hídricos, ya que permite determinar el impacto de un producto o sistema en la disponibilidad del agua.

- MJ Energy Demand: Megajulios de Energía Demandada. Abarca la energía utilizada para todo el sistema de producción y la energía incorporada en los productos. Su cálculo brinda información valiosa para implementar mejoras y reducir el consumo energético, ya que a menudo el consumo de energía es requerido por normas ambientales o etiquetado en los países.

3.1.4. Interpretación de los resultados:

La interpretación de los resultados es la última fase del análisis de ciclo de vida, donde se consideran conjuntamente todos los impactos y se analizan de acuerdo con los datos de entrada aplicados y a los supuestos, además, considerando el alcance y límites del sistema preestablecidos. Además, en esta fase se permite seleccionar la mejor alternativa de mezcla, se brindan conclusiones y recomendaciones.

3.2. ReCiPe 2016 para la obtención del impacto a la salud humana.

ReCiPe proporciona un método de última generación para convertir los inventarios del ciclo de vida en un número limitado de puntajes de impacto del ciclo de vida en el nivel medio y final (Figura 8).

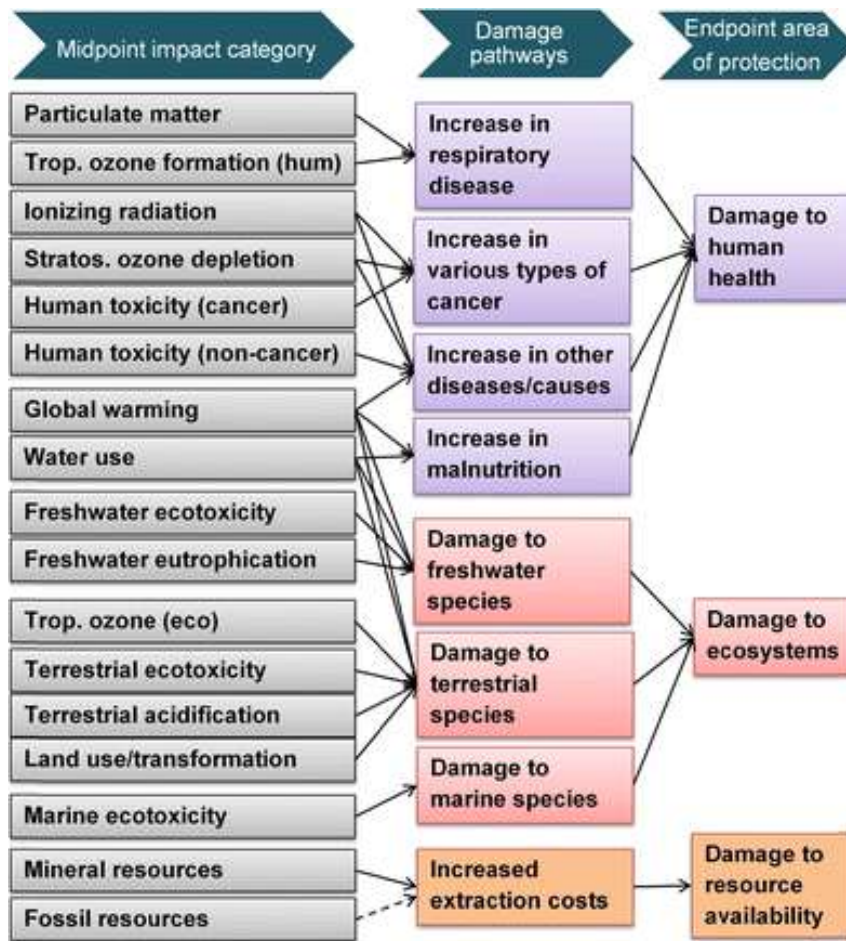


Figura 8. Visión general de las categorías de impacto que abarca la metodología ReCiPe2016 y su relación con los ámbitos de protección. Tomado de Huijbregts et al. (2017) Acceso libre bajo licencia CC BY 4.0.

En el caso del impacto de punto final para la parte social, ReCiPe propone DALY como indicador de impacto en la salud humana, el cual representa los años que se pierden o que una persona queda discapacitada a causa de enfermedad o accidente (Huijbregts et al., 2017), en este caso ocasionadas por los diferentes impactos de punto medio del marco propuesto bajo el ACV utilizando la herramienta Openconcrete.

DALY se obtiene mediante la conversión de los diferentes impactos ambientales anteriormente calculados, esto mediante la siguiente fórmula (Ecuación 1).

$$CF_e = CF_m \times F_m$$

Ecuación 1.

Donde C_{fe} , es el resultado en DALY para la categoría de impacto seleccionada, CF_m es el resultado del indicador de punto medio calculado previamente y F_m es el factor que permite la conversión de punto medio a punto final, en este caso DALY.

Las diferentes categorías de daño de punto medio (calentamiento global, uso del agua, toxicidad cancerígena y no cancerígena, entre otros impactos) se relacionan con una vías de daño indicadas en la columna del medio de la Figura 9 (incremento en la enfermedades respiratorias, incremento en varios tipos de cáncer, incremento en la mal nutrición e incremento de enfermedades de otro tipo); finalmente estas vías de daño se relacionan con una sola categoría de impacto final en términos de daño a la salud humana y en valor de DALY calculados como se indica anteriormente.

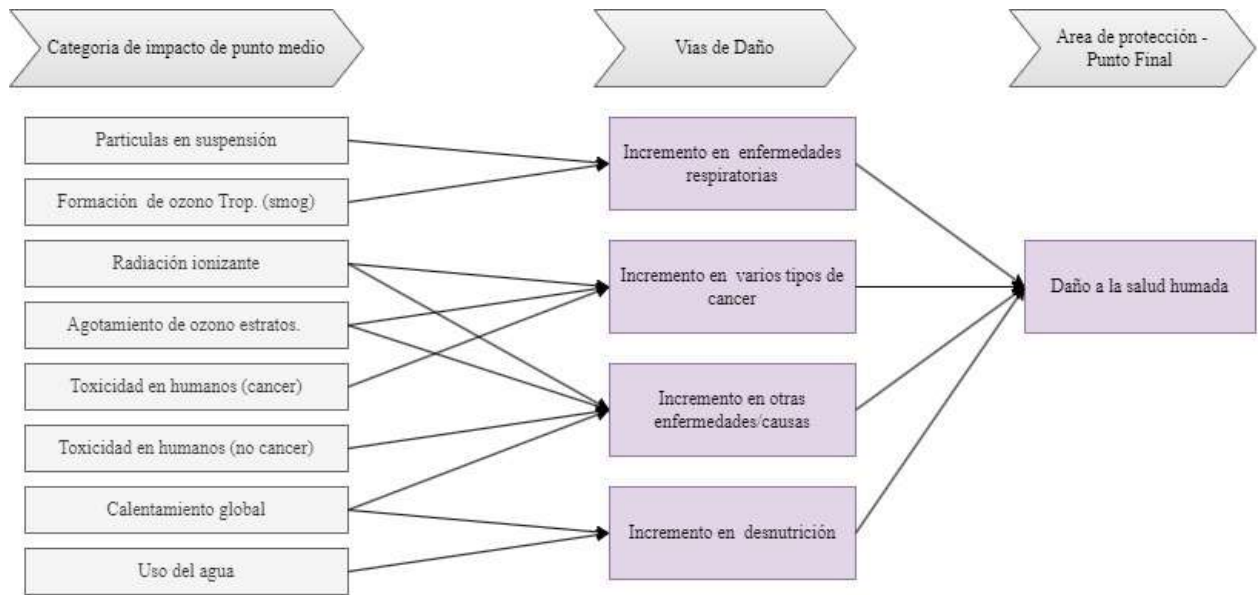


Figura 9. Resumen de las categorías de impacto que se cubren en el método ReCiPe2016 y su relación con las áreas de protección. Adaptado de Huijbregts et al. (2017).

3.3. Costo del ciclo de vida

3.3.1. Generalidades

El costo de ciclo de vida (CCV) es una herramienta que permite evaluar el impacto económico de un producto o sistema, identificando todos los costos durante su ciclo de vida, el

análisis dependerá del objeto y alcance del estudio como se identificó previamente en el ACV: en términos de límite de sistema, unidad funcional y pasos metodológicos.

Normalmente se considera que un costo es sinónimo de precio de algo, es decir el valor monetario que alguien tiene que pagar por algo, no obstante, en un CCV, se identifican todos los costos a lo largo del ciclo de vida del producto y puede contener la monetización de externalidades, incluidos impactos ambientales y sociales, como, por ejemplo, los costos relativos a la emisión de gases invernadero.

El CCV se considera una técnica versátil capaz de aplicarse para una variedad de propósitos y en diferentes etapas del ciclo de vida del proyecto o activo para respaldar la toma de decisiones (Hauschild et al., 2018), permitiendo comprender de forma integral la sostenibilidad de un producto o servicio, comparando sus diferentes dimensiones desde el punto de vista ambiental, económico e incluso social.

El análisis del costo de ciclo de vida propuesto para las diferentes mezclas es el CCV convencional también conocido como CCV financiero, el cual puede considerar los costos de adquisición, impuestos, transporte, mantenimiento e incluso los costos e ingresos (por reventa) al final de la vida útil (Hauschild et al., 2018). Por otro lado, la aplicación del CCV en las edificaciones ha sido estandarizado mediante ISO 15686-5 y ASTM-E917-17, lo que facilita su aplicación.

La NTC-ISO 15686-5 (2022) define el alcance de los costos incluidos en el análisis de CCV como los costos de construcción, operación, mantenimiento y fin de vida útil, además de los flujos de dinero por aspectos ambientales los cuales pueden ser negativos (impuestos) o positivos (por ejemplo, debido a la generación de energías renovables, por ejemplo). Los costos del proyecto antes del comienzo del diseño para construcción (como los estudios de factibilidad) forman parte del ciclo de vida completo ó WLC (del inglés *whole life costing*), no del CCV (Figura 10).

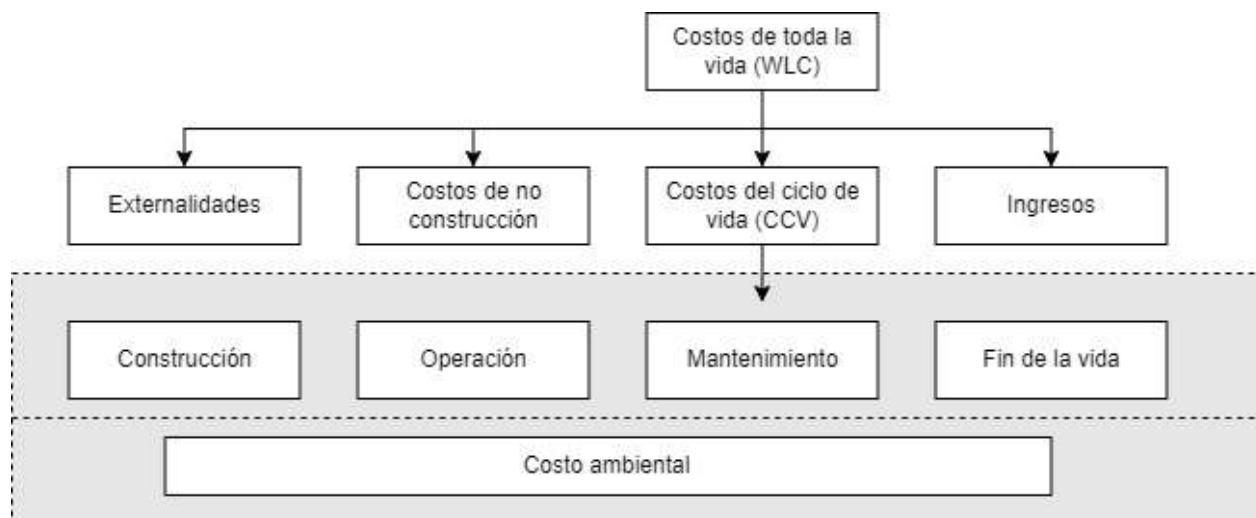


Figura 10. Límite del sistema en CCV. Adaptado de ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas (2022).

De acuerdo con lo anterior, Abushanab & Alnahhal (2023) indican que el LCC es una herramienta para evaluar la viabilidad económica de un determinado producto durante el periodo operativo y en principio se compone de cuatro categorías principales de costos: construcción, operación, mantenimiento, rehabilitación y final de vida, que a su vez se puede describir mediante una serie de actividades más precisas como las establecidas en la Figura 11.

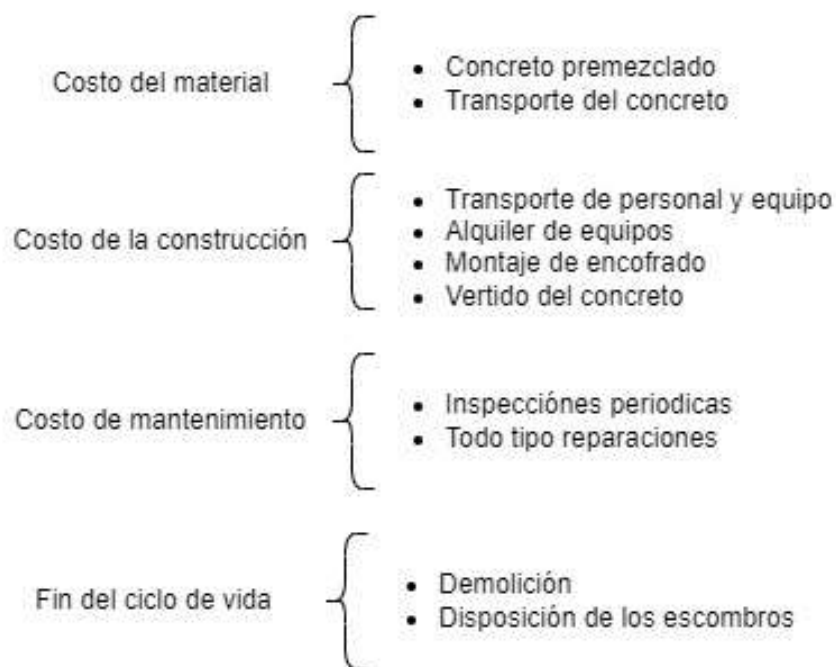


Figura 11. Descripción del alcance del CCV. Adaptado de Abushanab & Alnahhal (2023).

Finalmente, CCV se define en la norma ISO 15686 como la cantidad de dinero gastada en un producto y llevada al valor presente durante el periodo de diseño, mediante la siguiente formula:

$$CCV = VPN = \sum_{n=1}^p \left(\frac{C_n}{(1+d)^n} \right)$$

Ecuación 2. Costo de Ciclo de Vida. Adaptado de ICONTEC (2022).

en donde

CCV = Costo del ciclo de vida

VPN = Valor presente neto

n = número de años entre la fecha de base y la aparición del costo

p = periodo de analisis

C_n = Costo en el año n

d = tasa de descuento real esperada por año

Ya que el límite del sistema de análisis de ciclo de vida se estableció de la cuna a la puerta, se considera el costo de producción del concreto incluyendo la entrega del concreto en obra. Para lo anterior fue necesario hacer un análisis de costos de adquisición y transporte de los materiales, considerando el costo de tratamiento y transformación necesario para su utilización dentro del concreto como parte del costo unitario de cada producto analizado.

3.3.2. Análisis de Precios Unitarios

Se planteo la estructura de costos de producción del concreto en cada una de las dosificaciones propuestas como la suma de los costos materiales, equipo y transporte necesarios. Para el caso del equipo se consideró una planta dosificadora (mezcladora) de concreto de una producción de concreto por hora de 80 metros cúbicos. Para efectos del presente análisis se consideran los demás gastos de operación, mantenimiento, mano de obra y demás gastos dentro de AIU (Administración, Imprevistos y Utilidad) necesarios para el funcionamiento de la planta.

3.3.3. Referencias de costos de materiales

Para los costos de los materiales como cemento, agregados gruesos y finos, aditivo acelerante, aditivo incorporador de aire y aditivo reductor de agua se considera el promedio de hasta 3

consultas a fuentes de datos regionalizados. Como primer fuente el Análisis de precios regionalizados 2024-1 para el Valle del Cauca – Sur, realizado por la Dirección técnica y de estructuración del Instituto Nacional de Vías de Colombia, como segunda fuente la herramienta ConstruData de Legis Colombia y como tercer fuente cotizaciones a proveedores locales y cadena de comercios de la construcción. Por otro lado, ya que las cenizas volantes y escorias pueden considerarse un material barato puesto es un residuo de otras industrias y el principal costo es el transporte, no se considera el precio por adquisición y procesamiento de estos materiales suplementarios; no obstante, se realiza un análisis de sensibilidad para determinar el costo admisible de adquisición de estos productos si se considera como precio máximo el del concreto de referencia.

3.3.4. Costo de transporte

Para el análisis del transporte de los materiales pétreos y cemento se consideró los precios establecidos por INVIDATA en sus bases de datos para el Sur del Valle del Cauca, toda vez que este recorrido será realizado dentro esta región.

Para el caso del transporte de las cenizas volantes y escorias de alto horno, al considerarse trayectos más largos se realiza un análisis mucho más detallado y preciso determinando la tarifa para cada trayecto realizado. El análisis del transporte considera variables como combustible, salarios, peajes, repuestos, mantenimiento, seguros, impuestos, entre otros que influyen en el índice ICTC (Índice de Costos del Transporte de Carga por Carretera), lo anterior se logra mediante la utilización de una herramienta de acceso libre y de utilidad, denominada SICE-TAC (Figura 12) del Ministerio del Transporte de Colombia, la cual es una herramienta que permite medir o calcular los costos de operación de transporte de acuerdo a las características propias de cada viajes: tipo de vehículo, tipo de carga, origen/destino, horas estimadas de espera, cargue y descargue. Esta herramienta lleva más de 10 años en funcionamiento y consolida encuestas en terreno y estadísticas de entidades como DANE Y DNP, con fecha de última actualización 2024/06/29 (Ministerio de Transporte, 2024b).

Para lo anterior se define como tipo de vehículo de referencia el Tractocamión de tres ejes con semirremolque de tres ejes, para carga a granel de minerales y otros, con horas estimadas de espera, cargue y descargue máxima de 12 horas según decreto 1079 de 2015.

Transporte

RINDC SICE-TAC ESTADÍSTICAS ALIANZAS CORREDORES PUBLICACIONES

Costos Eficientes

Cuál es la configuración de su vehículo?

Qué tipo de carga va a transportar?

Qué tipo de unidad de transporte va a emplear?

Donde se origina el viaje?

Cual es el destino?

Cual vía va a utilizar para el viaje?

Horas acordadas para la actividad del cargue? Horas acordadas para la actividad del descargue?

Horas de espera en el cargue? Horas de espera en el descargue?

Cual es el periodo?

Cuánto es 3B + 3

CALCULAR

Ultima actualización: 2024/06/29

El cálculo de los costos eficientes en el SICE TAC, no incluye un porcentaje de intermediación para las empresas de transporte, al igual que no incluye utilidades, valor del cargue y valor del descargue de la carga.

Los precios unitarios indicados en la herramienta son referencia de mercado y se encuentran avalados por el observatorio de transporte de carga por carretera DTCC.

[Dar clic aquí para verificar fechas de ingreso y actualización de rutas en SICE-TAC](#)

Figura 12. Interfaz de usuario Costos Eficientes SITEC-TAC. (Ministerio de Transporte, 2024a).

3.3.5. Costo del carbono

El Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de Estados Unidos (NIST) en el manual BEES propone la adición de un costo adicional al análisis económico: la inclusión del costo de las emisiones de GEI en CO₂-eq, el cual se estima en un valor de 12 dólares por tonelada, según promedio publicado en el Grupo de Trabajo Interinstitucional del Gobierno de los Estados Unidos sobre el Costo Social de los Gases de Efecto Invernadero en el año 2016 (Kneifel et al., 2019).

4. RESULTADOS

4.1. Impacto ambiental

Desde la Figura 13 a la 23 se muestran los resultados de los impactos ambientales representados en emisiones de GEI, NO_x, SO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, VOC, CO, Pb, Consumo de agua, Captación de agua y consumo de energía, respectivamente por cada mezcla de concreto por metro cubico.

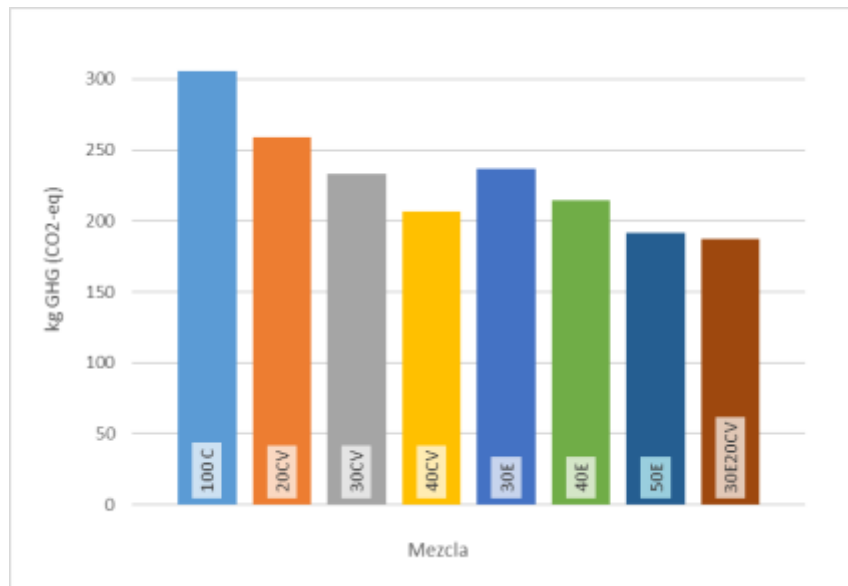


Figura 13. Impacto ambiental en CO_{2-eq} de las diferentes mezclas de concreto analizadas.

En particular, para la categoría de impacto de calentamiento global, la muestra con menor impacto es el concreto con 30% de escoria y 20% de cenizas volantes (30E20CV), con una emisión de 187 kg GEI (CO_{2-eq}), que es un 38,9% menor al CO_{2-eq} producido por el concreto de referencia (100% C), seguido de la utilización de 50% escoria con una reducción del 37.3% (Figura 13). Lo anterior es superior a los resultados reportados por Maury-Ramírez et al. (2023), quienes indicaron una reducción del 27% de emisiones de GEI con la muestra con 50% de escoria en remplazo del cemento.

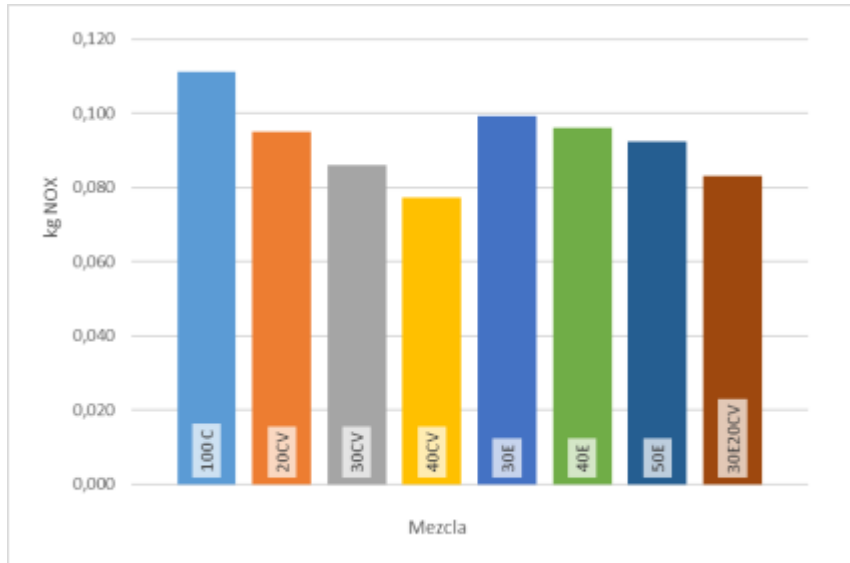


Figura 14. Impacto ambiental en NO_x de las diferentes mezclas de concreto analizadas.

La muestra con menor emisión de NO_x es el concreto con 40% de cenizas volantes (40CV), con una emisión de 0,077 kg, lo que representa una reducción del 30,5% respecto al concreto de referencia (Figura 14).

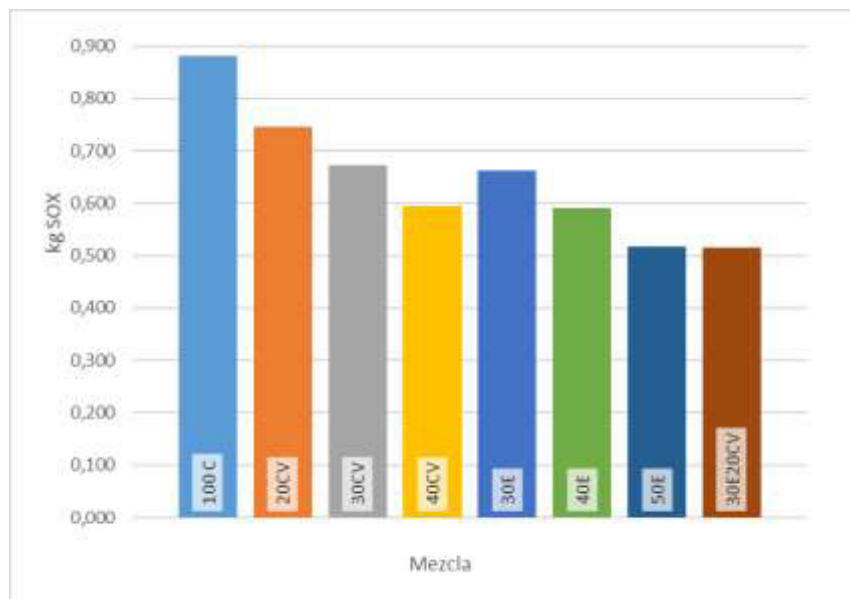


Figura 15. Impacto ambiental en SO_x de las diferentes mezclas de concreto analizadas.

La muestra con menor emisión de SO_x es el concreto con 30% de escoria y 20% de cenizas volantes (30E20CV), con una emisión de 0,516 kg, lo que representa una reducción del 41,5% respecto al concreto de referencia (Figura 15).

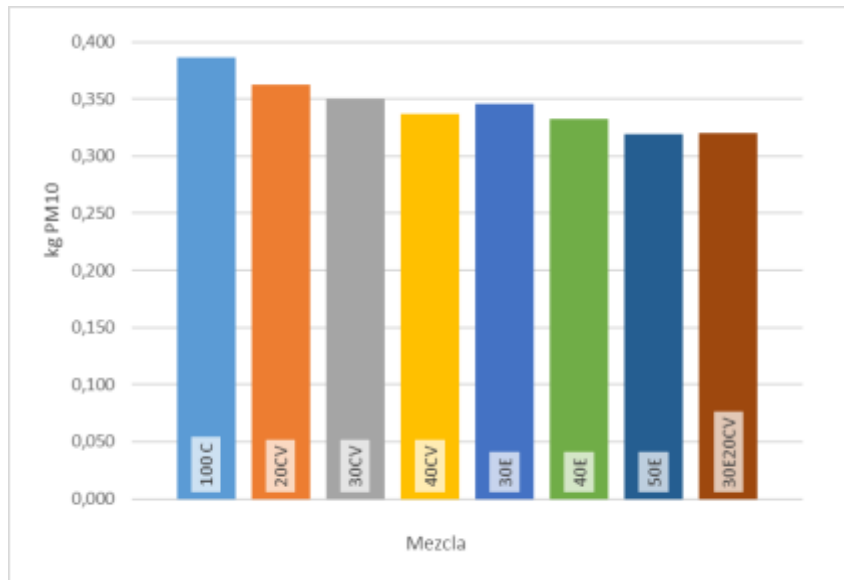


Figura 16. Impacto ambiental en PM_{10} de las diferentes mezclas de concreto analizadas.

La muestra con menor emisión de PM_{10} es el concreto con 50% de escoria (50E), con una emisión de 0,319 kg, lo que representa una reducción del 17,4% respecto al concreto de referencia (Figura 16).

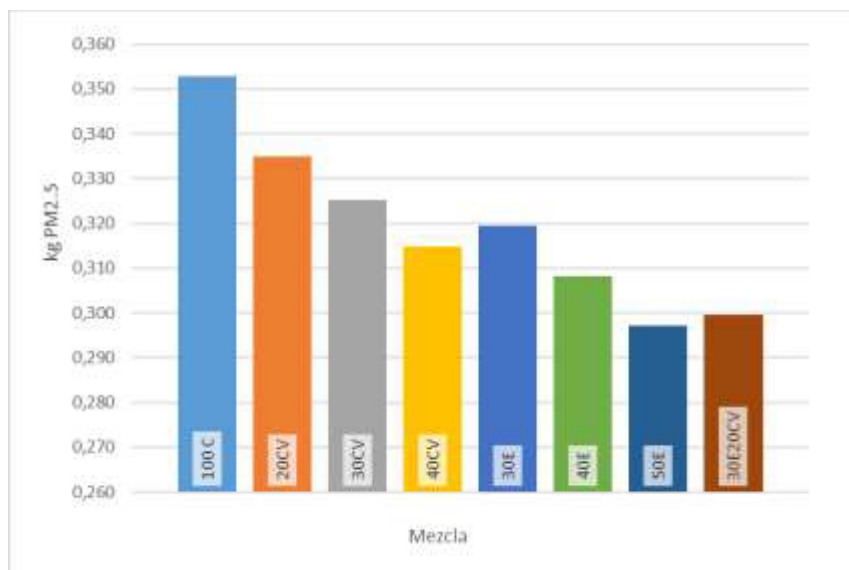


Figura 17. Impacto ambiental en $PM_{2,5}$ de las diferentes mezclas de concreto analizadas.

La muestra con menor emisión de $PM_{2,5}$ es el concreto con 50% de escoria (50E), con una emisión de 0,297 kg, lo que representa una reducción del 15,8% respecto al concreto de referencia (Figura 17).

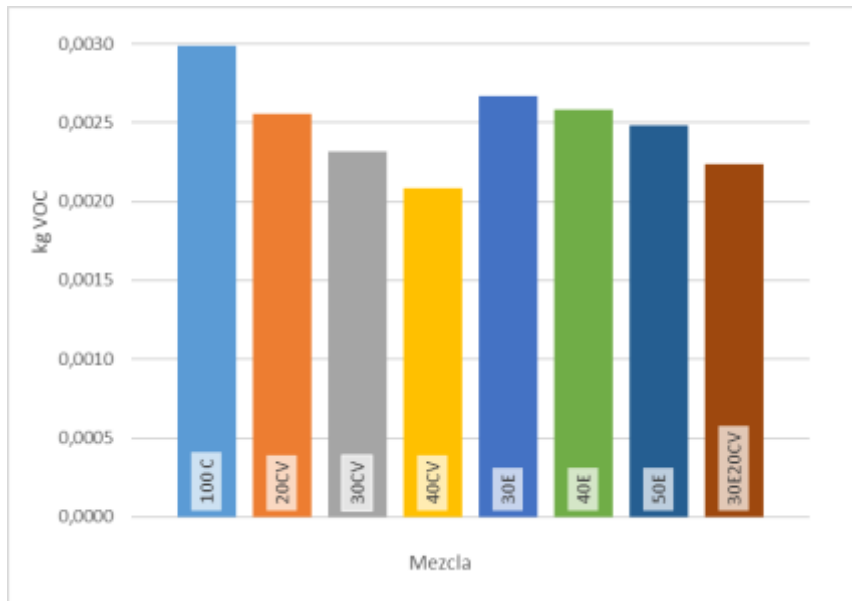


Figura 18. Impacto ambiental en VOC de las diferentes mezclas de concreto analizadas.

La muestra con menor emisión de VOC es el concreto con 40% de cenizas volantes (40CV), con una emisión de 0,00208 kg, lo que representa una reducción del 30,3% respecto al concreto de referencia (Figura 18).

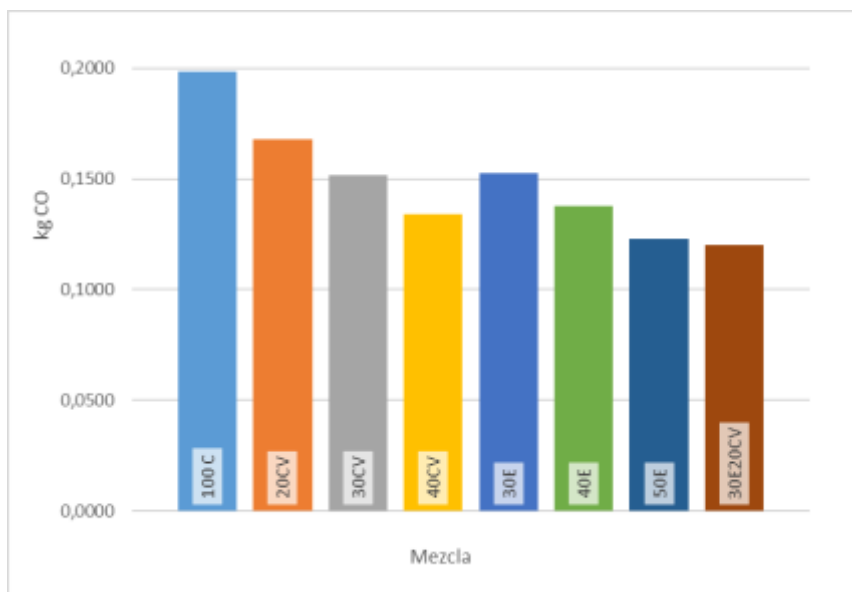


Figura 19. Impacto ambiental en CO de las diferentes mezclas de concreto analizadas.

La muestra con menor emisión de CO es el concreto con 30% de escoria y 20% de cenizas volantes (30E20CV), con una emisión de 0,120 kg, lo que representa una reducción del 39,4% respecto al concreto de referencia (Figura 19).

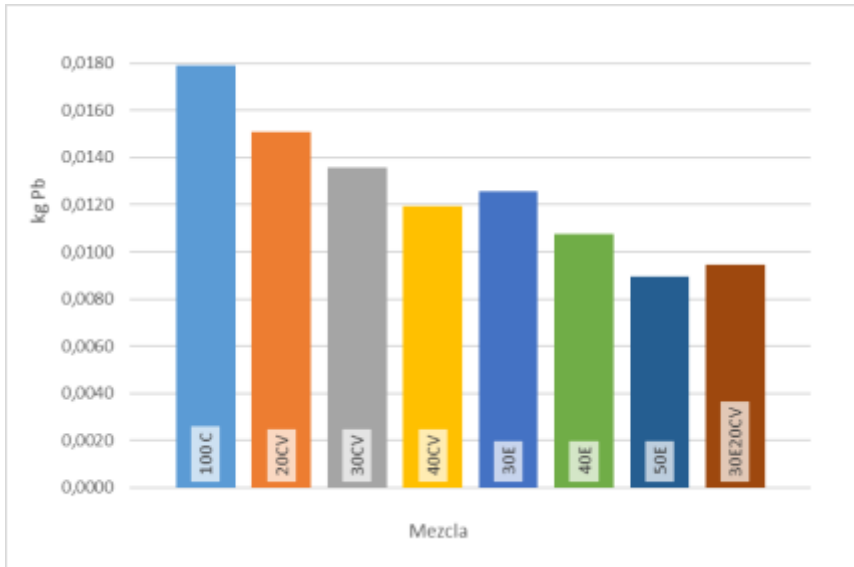


Figura 20. Impacto ambiental en Pb de las diferentes mezclas de concreto analizadas.

La muestra con menor emisión de Pb es el concreto con 50% de escoria (50E), con una emisión de 0,009 kg, lo que representa una reducción del 50% respecto al concreto de referencia (Figura 20).

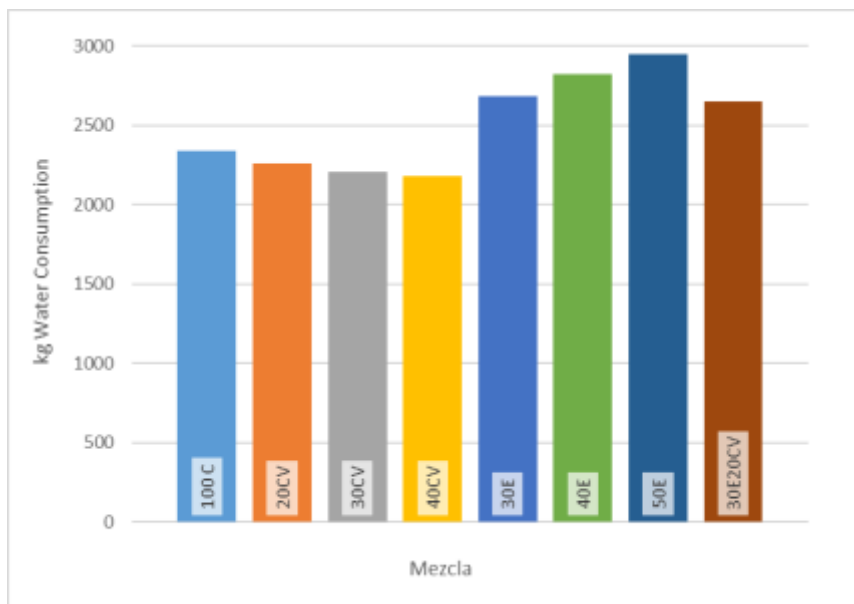


Figura 21. Impacto ambiental: agua consumida de las diferentes mezclas de concreto analizadas.

La muestra con menor consumo de agua es el concreto con 40% de cenizas volantes (40CV), con un consumo de 2181,5 kg, lo que representa una reducción del 6,7% respecto al concreto de referencia (Figura 21). No obstante, se identifica que la utilización de escorias de alto horno generó

un aumento en el consumo de agua, siendo la mezcla con remplazo del 50% de escorias (50E) la que genero mayor consumo con 2951,1 kg, lo que representa un aumento del 26,3% frente al consumo de agua del concreto de referencia sin remplazo.

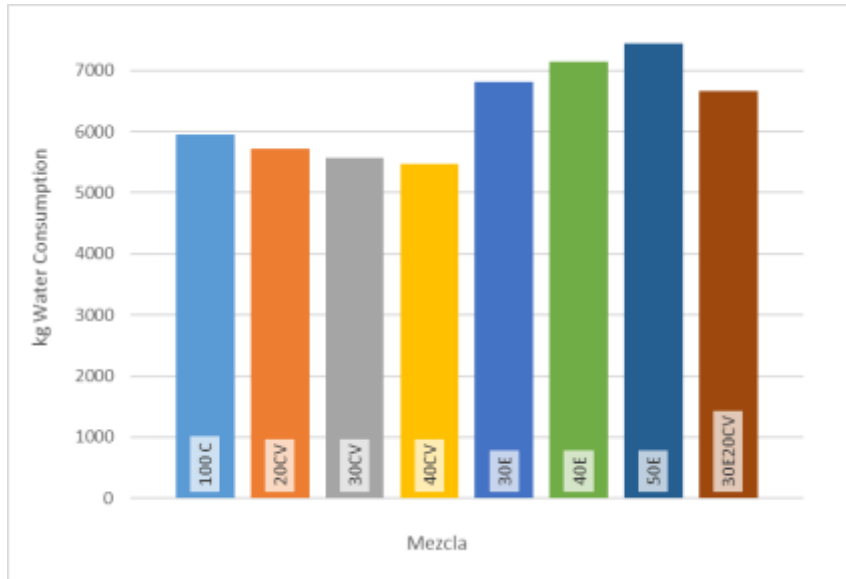


Figura 22. Impacto ambiental: agua captada para las diferentes mezclas de concreto analizadas.

La muestra que requirió menor captación de agua es el concreto con 40% de cenizas volantes (40CV), con una captación de 5479,3 kg, lo que representa una reducción del 8,0% respecto al concreto de referencia (Figura 22). No obstante, se identifica que la utilización de escorias de alto horno generó un aumento en la captación de agua, siendo la mezcla con remplazo del 50% de escorias (50E) la que genero mayor captación con 7450,3 kg, representando un aumento del 25,1% frente a la captación de agua del concreto de referencia.

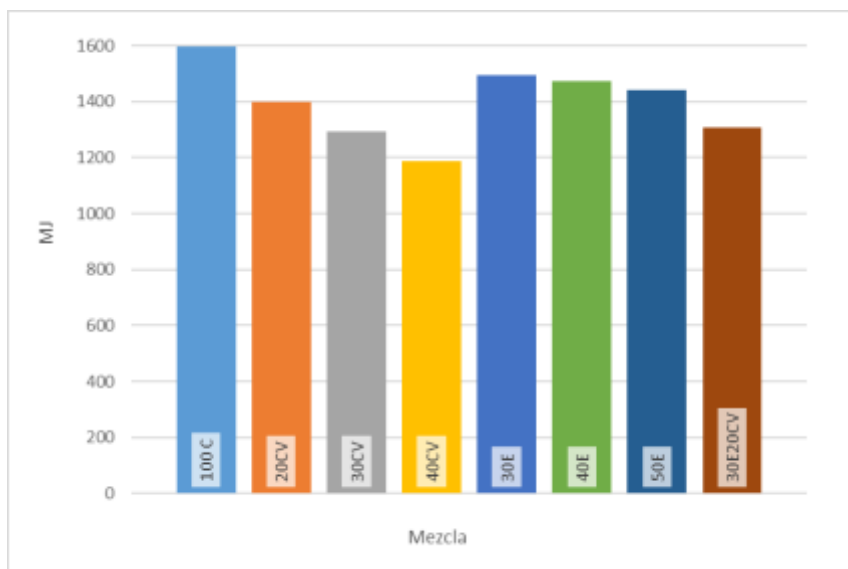


Figura 23. Impacto ambiental en energía demandada (MJ) de las diferentes mezclas de concreto analizadas.

La muestra con menor energía demandada es el concreto con 40% de cenizas volantes (40CV), con una demanda de 1187,8 MJ, lo que representa una reducción del 25,5% respecto al concreto de referencia (Figura 23).

En cuanto al análisis ambiental, se permite determinar que existe una relación inversamente proporcional entre la adición de cenizas volantes y/o escorias y la emisión de GEI, NO_x, SO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, VOC, CO y Pb, mientras que se presentó una relación directamente proporcional entre la adición de escorias de alto horno y el consumo de agua, al igual que la demanda. Lo anterior, debido a la gran cantidad de agua necesaria para el proceso de enfriamiento y granulación de la escoria.

4.2. Impacto a la salud humana

Posteriormente, aplicando la metodología de ReCipe 2016, se encontró que se pueden relacionar las emisiones de GEI, PM_{2.5}, NO_x y Pb, además del consumo del agua. Desde la Figura 24 a la 29 se pueden apreciar los impactos a la salud humana en DALY.

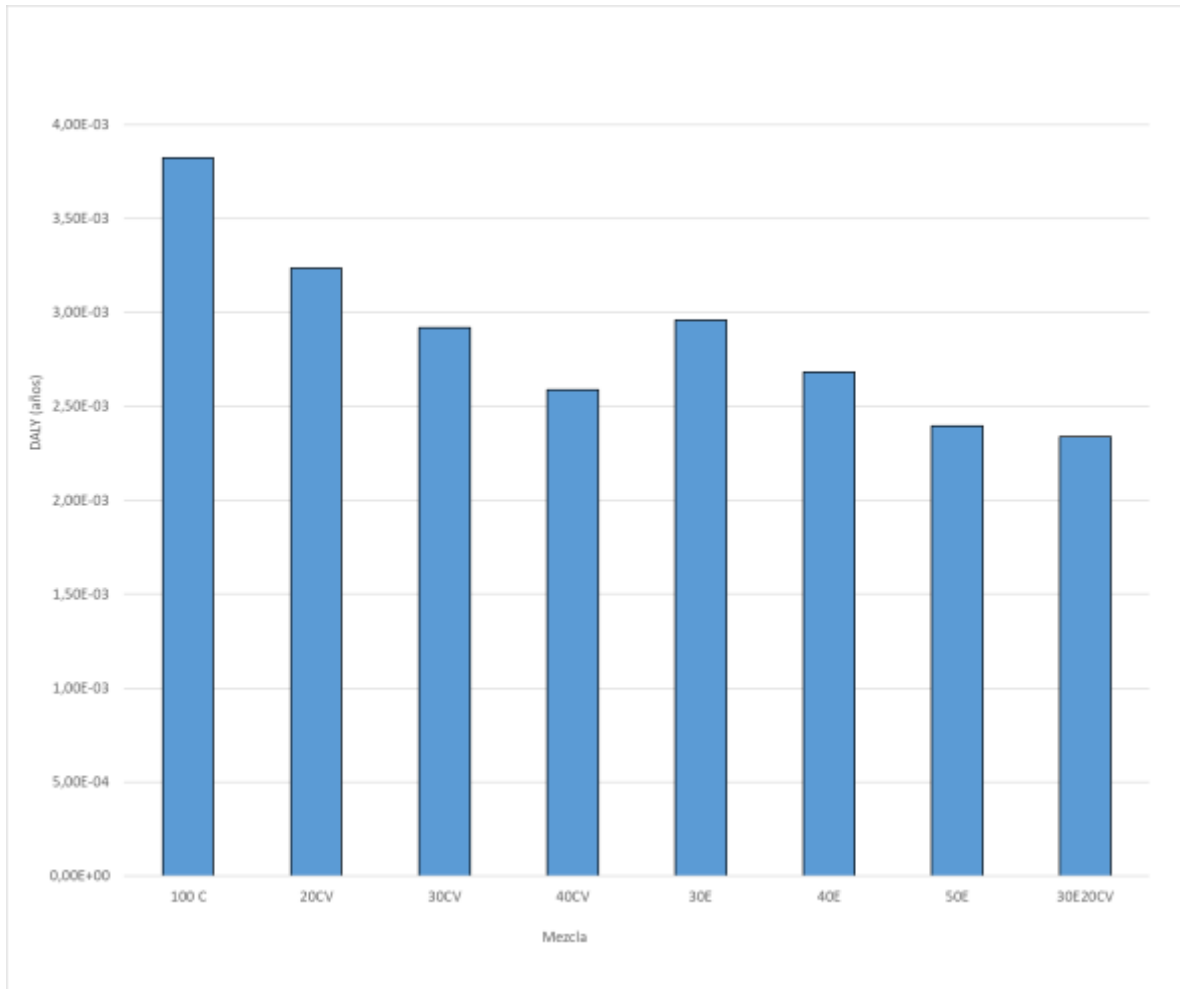


Figura 24. Impacto a la salud humana por la emisión de GEI (CO_{2-eq}) para cada mezcla de concreto propuesta.

La muestra con menor impacto a la salud humana por la emisión de GEI (CO_{2-eq}) es el concreto con 30% de escorias y 20% de cenizas volantes (30E20CV), con una afectación de 2,34E-03 DALY, lo que representa una reducción del 38,9% respecto al concreto de referencia (Figura 24).

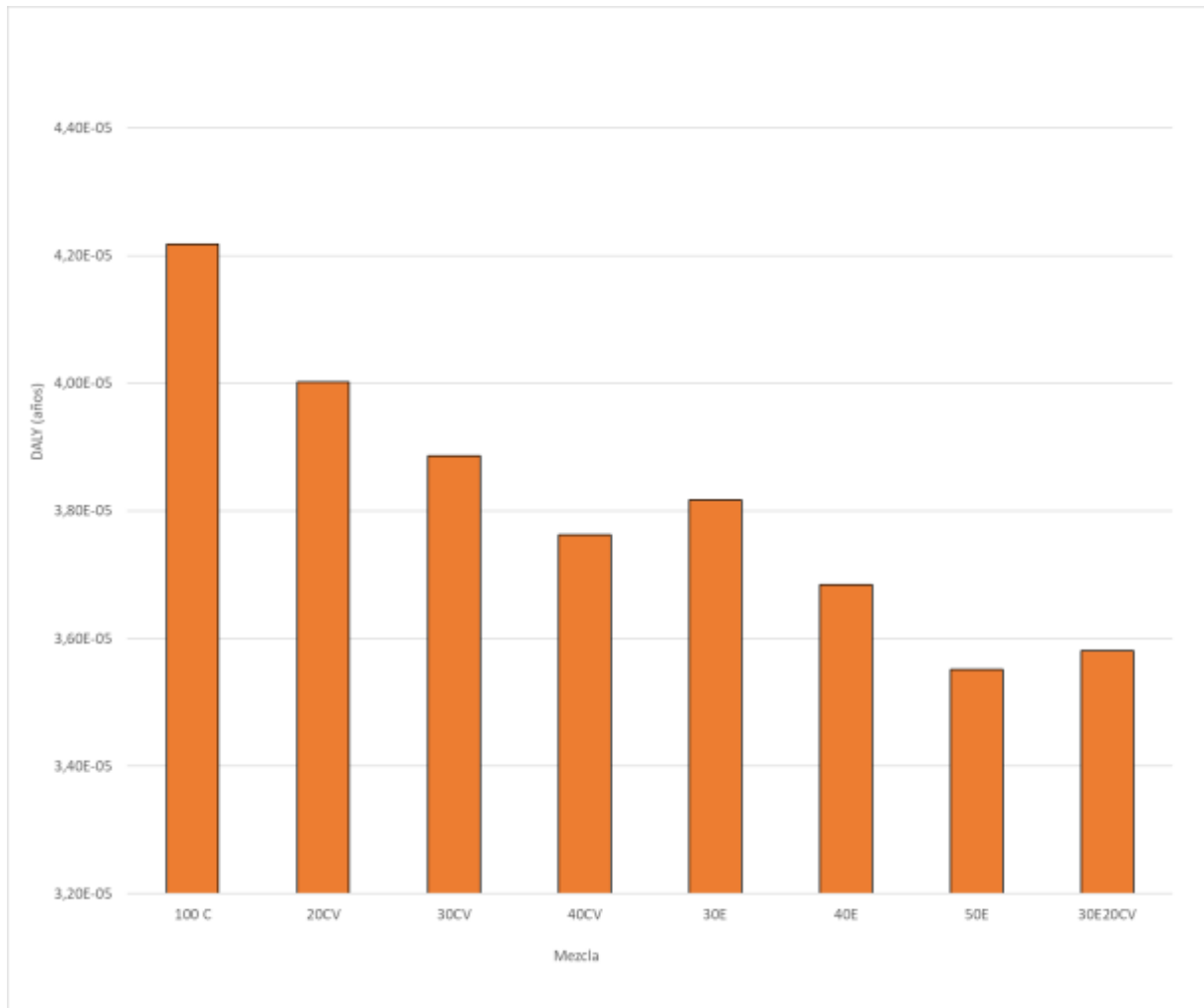


Figura 25. Impacto a la salud humana por la emisión de $PM_{2.5}$ de las diferentes mezclas de concreto analizadas.

La muestra con menor impacto a la salud humana por la emisión de $PM_{2.5}$ es el concreto con 50% de escorias (50E), con una afectación de 3,55E-05 DALY, lo que representa una reducción del 15,8% respecto al concreto de referencia (Figura 25).

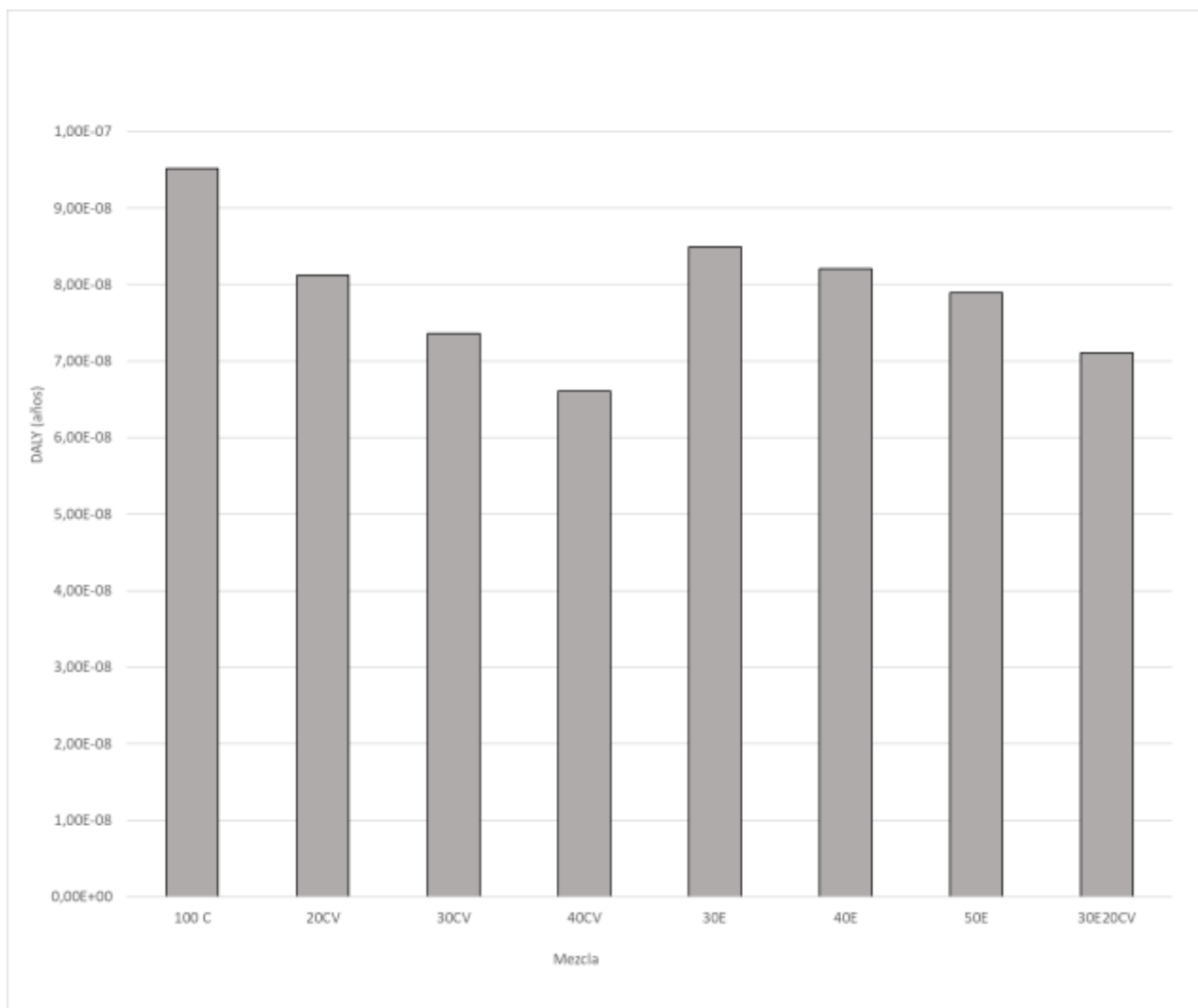


Figura 26. Impacto a la salud humana por la emisión de NO_x de las diferentes mezclas de concreto analizadas.

La muestra con menor impacto a la salud humana por la emisión de NO_x es el concreto con 40% de cenizas volantes (40CV), con una afectación de 6,61E-08 DALY, lo que representa una reducción del 30,5% respecto al concreto de referencia (Figura 26).

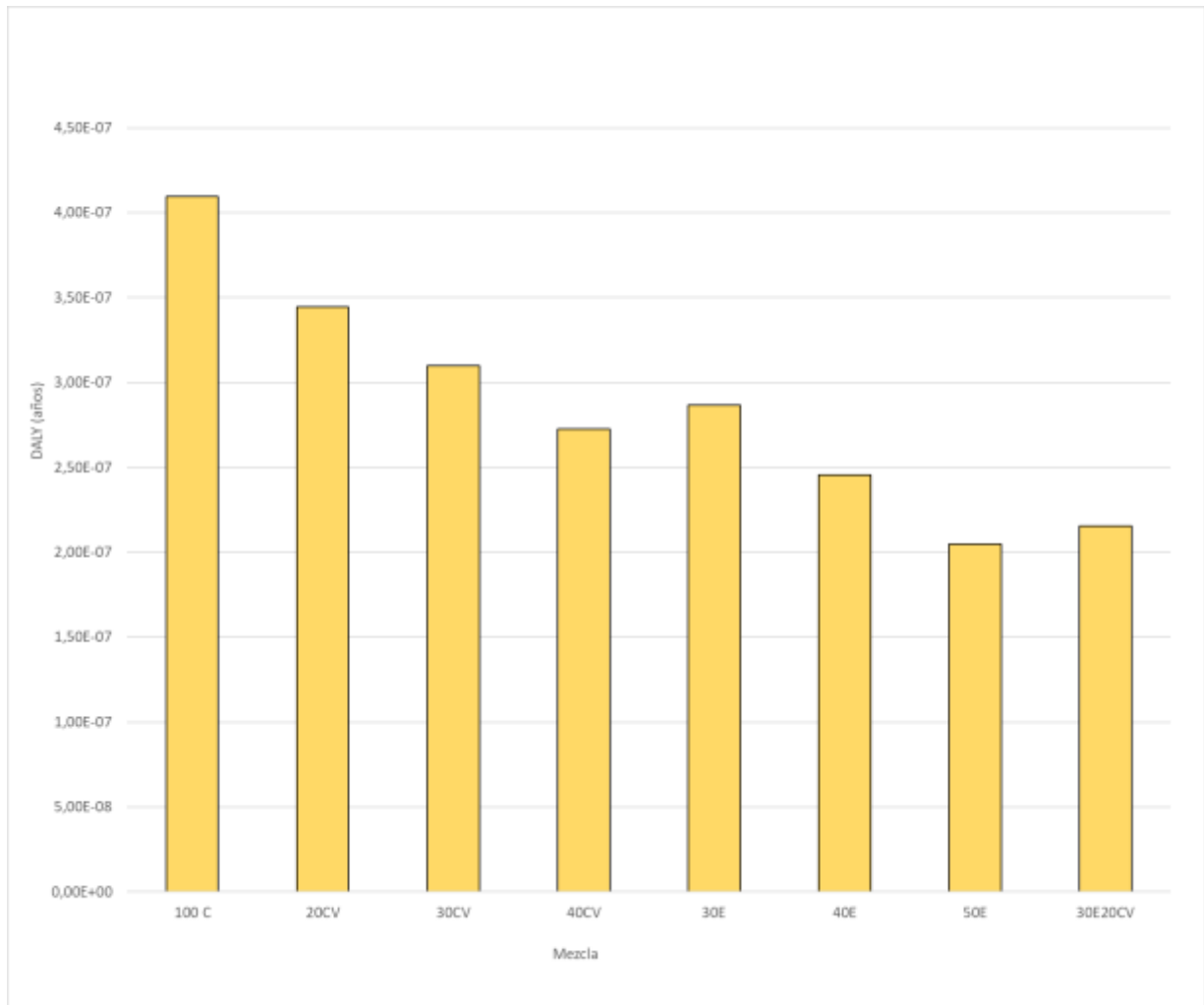


Figura 27. Impacto a la salud humana por la emisión de Pb de las diferentes mezclas de concreto analizadas.

La muestra con menor impacto a la salud humana por la emisión de Pb es el concreto con 50% de escorias (50E), con una afectación de 2,05E-07 DALY, lo que representa una reducción del 50% respecto al concreto de referencia (Figura 27).

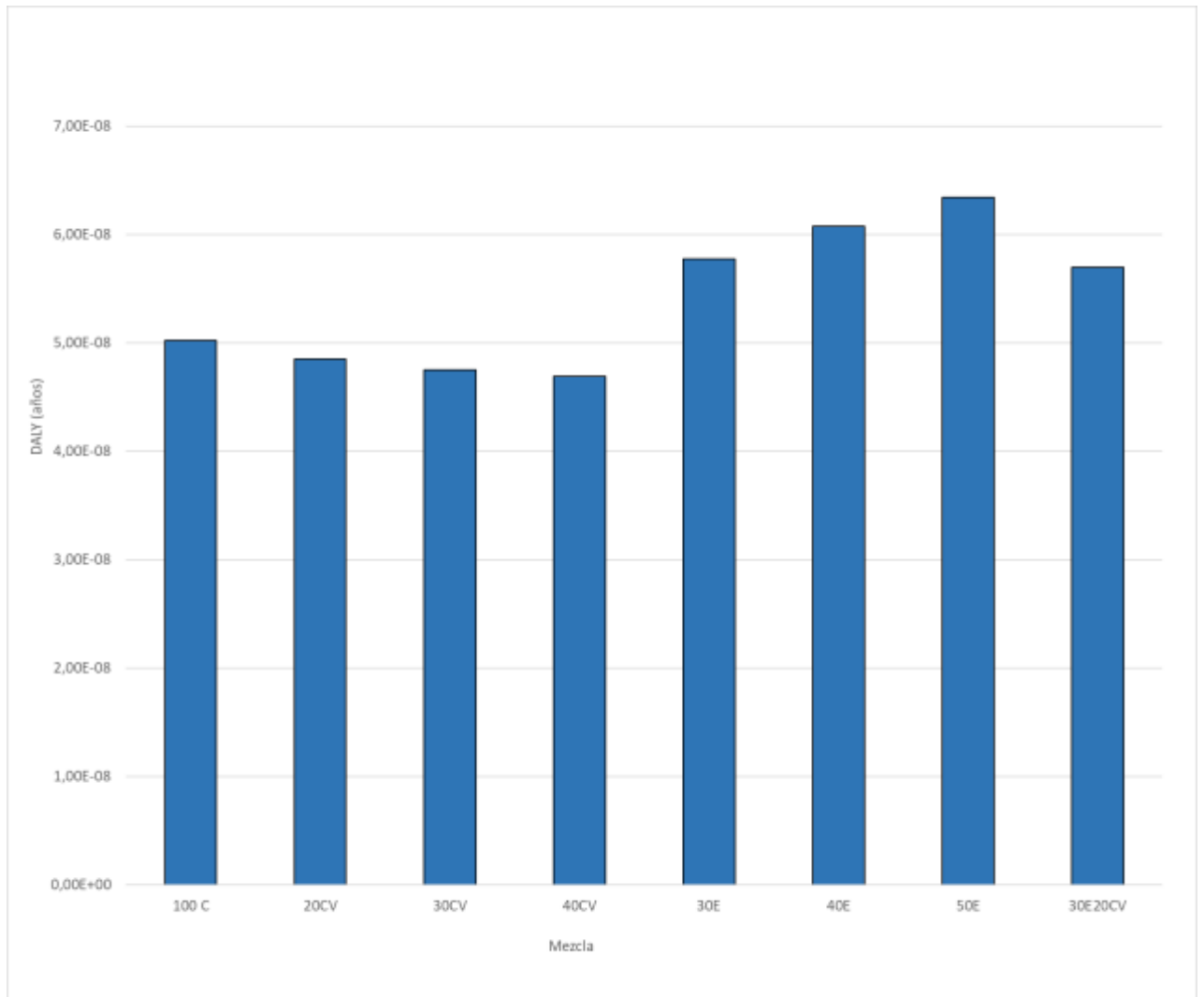


Figura 28. Impacto a la salud humana por el consumo de agua de las diferentes mezclas de concreto analizadas.

La muestra con menor impacto a la salud humana por el consumo de agua es el concreto con 40% de cenizas volantes (40CV), con una afectación de 4,69E-08 DALY, lo que representa una reducción del 6,7% respecto al concreto de referencia; no obstante la utilización de escorias incrementó sustancialmente el consumo de agua respecto al concreto de referencia, lo que ocasionó que las muestras con este material presentaran una mayor afectación a la salud humana, siendo la muestra con 50% de escorias (50E) la que mayor afectación presentó con un valor de 6,34E-08, es decir, un incremento de 26,3% frente al concreto de referencia (Figura 28).

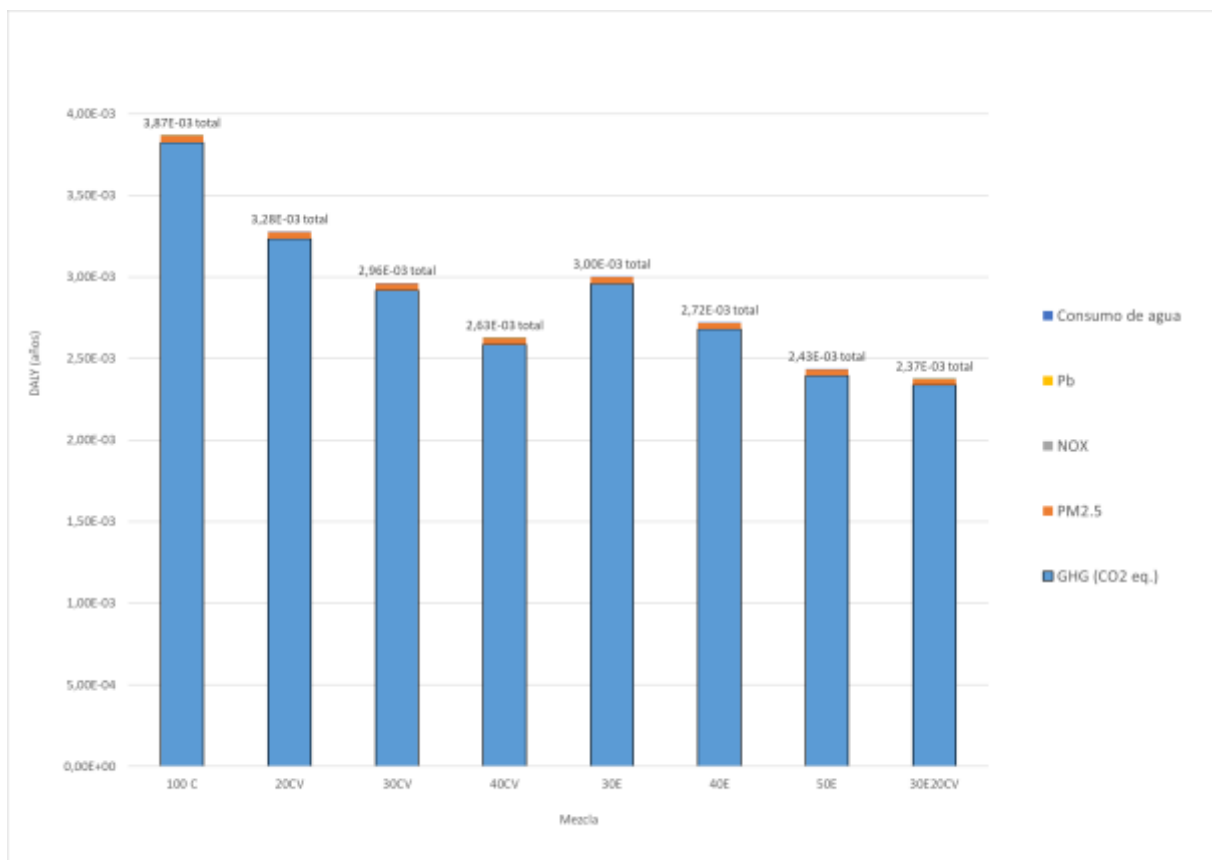


Figura 29. Impacto total a la salud humana en DALY de las diferentes mezclas de concreto analizadas.

En el análisis del impacto a la salud humana, se puede determinar que la generación de gases efecto invernadero en CO₂-eq de la producción de las mezclas de estudio es la mayor responsable cuantitativamente de la afectación a la salud humana, seguido de la emisión de partículas finas PM_{2.5} (Figura 29), lo anterior es congruente con Orozco et al. (2023) donde el concreto utilizado para puentes en Filipinas presentó un daño a la salud humana ocasionado principalmente por el calentamiento global (66%) y la producción de partículas finas (32%).

Como es de esperarse por anteriores resultados en impactos ambientales que repercuten en los impactos a la salud humana, la mezcla que presentó mayor impacto a salud humana fue la de 100% de cemento (100C), con un impacto por metro cubico de concreto de 3,87E-03 DALY. Por otro lado, si consideramos la producción de concreto del Valle del Cauca, que para el periodo de enero a julio del 2023 fue de 266 miles de metros cúbicos (Cámara de Comercio de Cali, 2023), y bajo el supuesto de una producción mensual uniforme de 44,3 mil metros cúbicos de concreto, la afectación a la salud humana por metro cubico de concreto correspondería a 171,57 DALY, es

decir 171,57 años de vida ajustados por discapacidad, que resumen la carga de enfermedad entre la población del Valle del Cauca.

De igual forma se determinó, que la mezcla de concreto con menor impacto total a salud humana fue 30E20CV (i.e. 30% de escoria y 20% de cenizas volantes de remplazo), con un impacto de $2,37E-03$ DALY y una reducción del 38.8% respecto a la mezcla de referencia (100 C). Lo anterior, bajo el supuesto de una producción mensual uniforme de 44,3 mil m^3 de concreto en el Valle del Cauca, representaría una afectación a la salud humana de 105,7 DALY, esto es 66,5 años menos que el concreto de referencia.

4.3. Impacto económico

Para la estructura de costos principalmente se determinó el costo del transporte de los materiales suplementarios considerando las distancias desde las fuentes utilizando la herramienta SICE-TAC como se indica a continuación.

Para el transporte de las cenizas volantes considerando el transporte a granel en tractocamión de tres ejes con semirremolque desde el municipio de Tocancipá (Cundinamarca) hasta Yumbo (Valle) el precio por tonelada por cada kilómetro movilizado es de \$ 274,70 pesos colombianos (Figura 30). El análisis detallado de la tarifa de este recorrido se encuentra en los Anexos J y K.

Costos Eficientes

Cuál es la configuración de su vehículo? Tractocamión tres ejes - Tractomula con semiremolque de tres e
 Qué tipo de carga va a transportar? Granel Sólido
 Qué tipo de unidad de transporte va a emplear? ESTACAS
 Donde se origina el viaje? TOCANCIPÁ 25817000
 Cual es el destino? YUMBO 76892000
 Cual vía va a utilizar para el viaje? TOCANCIPA CUNDINAMARCA _ YUMBO VALLE DEL CAUCA
 Horas acordadas para la actividad del cargue? 12 Horas acordadas para la actividad del descargue? 12
 Horas de espera en el cargue? 12 Horas de espera en el descargue? 12
 Cuál es el periodo? 202407
 Cuánto es 24 + 52 65 **CALCULAR**

Última actualización: 2024/06/29

El cálculo de los costos eficientes en el SICE TAC, no incluye un porcentaje de intermediación para las empresas de transporte, al igual que no incluye utilidades, valor del cargue y valor del descargue de la carga.

Los precios unitarios indicados en la herramienta son referencia de mercado y se encuentran avalados por el observatorio de transporte de carga por carretera OTCC.

[Dar clic aquí para verificar fechas de ingreso y actualización de rutas en SICE-TAC](#)

Costos Operativos - Resumen

Tonelada x KM Movilización	\$173,25	Costo Tonelada Movilización	\$112,936.78	Costo Movilización Carga	\$3,839,852.17
Costo Hora Adicional	\$46,845	Horas de Espera	48.0	Costo Tiempos de Espera	\$2,248,541.76
Tonelada x KM del Viaje	\$274,70	Costo Tonelada del Viaje	\$179,070.41	Costo Total del Viaje	\$6,088,394
Costo x KM Movilización	\$5,890,43	Costo x KM del Viaje	\$9,339.75		

Figura 30. Análisis del costo de transporte de Cenizas Volantes mediante la herramienta SICE-TAC.

Para el transporte de las escorias considerando el transporte a granel en tractocamión de tres ejes con semirremolque desde el municipio de Sogamoso (Boyacá) hasta Yumbo (Valle) el precio por tonelada por cada kilómetro movilizado es de \$ 285,98 pesos colombianos (Figura 31). El análisis detallado de la tarifa de este recorrido se encuentra en los Anexos L y M.

Transporte RNDC SICETAC ESTADÍSTICAS ALIANZAS CORREDORES PUBLICACIONES Q

Costos Eficientes

Cuál es la configuración de su vehículo?

Qué tipo de carga va a transportar?

Qué tipo de unidad de transporte va a emplear?

Donde se origina el viaje?

Cuál es el destino?

Cual vía va a utilizar para el viaje?

Horas acordadas para la actividad del cargue? Horas acordadas para la actividad del descargue?

Horas de espera en el cargue? Horas de espera en el descargue?

Cuál es el periodo?

Cuánto es 31 + 31? **CALCULAR**

Ultima actualización: 2024/06/29

El cálculo de los costos eficientes en el SICE TAC, no incluye un porcentaje de intermediación para las empresas de transporte, al igual que no incluye utilidades, valor del cargue y valor del descargue de la carga.

Los precios unitarios indicados en la herramienta son referencia de mercado y se encuentran avalados por el observatorio de transporte de carga por carretera DTCC.

[Dar clic aquí para verificar fechas de ingreso y actualización de rutas en SICE-TAC](#)

Costos Operativos - Resumen

Tonelada x KM Movilización	<input type="text" value="\$188.34"/>	Costo Tonelada Movilización	<input type="text" value="\$127,574.67"/>	Costo Movilización Carga	<input type="text" value="\$4,337,536.37"/>
Costo Hora Adicional	<input type="text" value="\$46,845"/>	Horas de Espera	<input type="text" value="48.0"/>	Costo Tiempos de Espera	<input type="text" value="\$2,248,545.12"/>
Tonelada x KM del Viaje	<input type="text" value="\$285.98"/>	Costo Tonelada del Viaje	<input type="text" value="\$193,708.28"/>	Costo Total del Viaje	<input type="text" value="\$6,584,082"/>
Costo x KM Movilización	<input type="text" value="\$6,403.69"/>	Costo x KM del Viaje	<input type="text" value="\$9,723.31"/>		

Figura 31. Análisis del costo de transporte de Escorias mediante la herramienta SICE-TAC.

Luego, para el análisis del costo de todas la mezclas de diseño, como se indica en el alcance del trabajo, se considera el costo de producción del concreto como el costo del equipo, materiales y transporte.

Tabla 9. Análisis de precios unitarios para concreto de referencia (100 C).

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
Item: Concreto 4000 PSI o 28 Mpa (incluye transporte a obra)				Unidad	m ³
Equipo					
Descripción	Unidad	Cantidad	Rendimiento	Vr. Unitario	Vr. Total
Planta dosificadora (mezcladora) de concreto	h	1	0,0125	\$ 160.118,19	\$ 2.001,48
Subtotal Equipo					\$ 2.001,48
Materiales					
Descripción	Unidad	Cantidad		Vr. Unitario	Vr. Total
Cemento	kg	365,2		\$ 789,51	\$ 288.330,77
Escoria	kg	0,0		\$ 0,00	\$ 0,00
Cenizas Volantes	kg	0,0		\$ 0,00	\$ 0,00
Agregado grueso	kg	994,8		\$ 48,48	\$ 48.225,83
Agregado fino	kg	743,8		\$ 31,00	\$ 23.059,37
Aditivo Acelerante	kg	0,37		\$ 16.214,17	\$ 5.999,24
Aditivo incorporador de aire	kg	0,04		\$ 3.095,28	\$ 123,81
Aditivo reductor de agua y acelerante	kg	0,11		\$ 9.856,82	\$ 1.084,25
Agua	kg	154,8		\$ 69,91	\$ 10.822,07
Subtotal Materiales					\$ 377.645,35
Transporte					
Descripción	Unidad	Cantidad	Distancia	Vr. Unitario	Vr. Total
Transporte de cemento	kg-km	365,2	7,5	\$ 0,75	\$ 2.067,73
Transporte de agregado grueso	m3-km	0,8	6,0	\$ 926,68	\$ 4.272,81
Transporte de agregado fino	m3-km	0,5	6,0	\$ 1.063,27	\$ 3.136,68
Transporte de cenizas volanes	kg-km	0,0	491,5	\$ 0,27	\$ 0,00
Transporte de escoria	kg-km	0,0	676,1	\$ 0,29	\$ 0,00
Transporte de concreto	m3-km	1,0	23,0	\$ 1.450,79	\$ 33.368,26
Subtotal Transporte					\$ 42.845,48
COSTO TOTAL DIRECTO					\$ 422.492,31
COSTOS INDIRECTOS					
Administración				22%	\$ 92.948,31
Imprevistos				2%	\$ 8.449,85
Utilidad				5%	\$ 21.124,62
Total AIU				29%	\$ 122.522,77
IVA sobre utilidad				19%	\$ 4.013,68
COSTO TOTAL INDIRECTO					\$ 126.536,45
COSTO TOTAL					\$ 549.028,75

Para el costo del concreto de referencia de 4000 psi sin remplazo de escoria o cenizas volantes, se determina el costo del equipo como de \$2001 pesos, el costo de materiales dada la dosificación inicial de \$377.645,33 y el costo de transporte de \$42.845,48 pesos, lo anterior, representa un costo

total directo de \$422.492,31. Posteriormente, considerando un AIU de 29% y el IVA correspondiente de 19% sobre la Utilidad, se calcula el costo total o costo de ciclo de vida en \$549.028,75 pesos colombianos correspondiente al límite del análisis (i.e. desde la adquisición de los materiales a la entrega del concreto) (Tabla 9).

Una vez se realiza el análisis de precios por cada una de las 8 dosificaciones (Anexo N al Anexo T), se adiciona el costo del carbono emitido por cada uno, dadas las recomendaciones del manual BEES, calculando el CCV definitivo considerando esta variable medioambiental (Tabla 10). Finalmente, se puede determinar que la mezcla con 50% de escoria (50E) presentó el menor costo de ciclo de vida con un valor de \$ 431.018,56 pesos por metro cubico de concreto, es decir, \$132.693,52 pesos menos que la mezcla de referencia.

Tabla 10. Costo de las diferentes mezclas de concreto analizadas.

Mezcla	APU	kg GEI (CO2-eq)	Costo del carbono (COP)	Costo de ciclo de vida (COP)
100 C	\$ 549.028,75	305,90	\$ 14.683,33	\$ 563.712,08
20CV	\$ 506.729,54	258,78	\$ 12.421,25	\$ 519.150,79
30CV	\$ 482.282,17	233,50	\$ 11.207,90	\$ 493.490,07
40CV	\$ 463.370,57	206,99	\$ 9.935,56	\$ 473.306,13
30E	\$ 467.316,99	236,81	\$ 11.366,72	\$ 478.683,70
40E	\$ 446.567,36	214,50	\$ 10.295,88	\$ 456.863,25
50E	\$ 421.814,38	191,75	\$ 9.204,18	\$ 431.018,56
30E20CV	\$ 428.301,69	187,01	\$ 8.976,70	\$ 437.278,39

Por otro lado, se realiza un análisis de la variación del costo en los materiales y transporte frente a la muestra de referencia de 100 C, donde se puede apreciar que el costo de los materiales en cada una de las mezclas disminuye al aumentar el porcentaje de remplazo, no obstante, la variación en el transporte demuestra que a mayor porcentaje de remplazo mayores son los costos de transporte, presentando la muestra de 30E20CV un incremento en el precio de transporte del 74% (Tabla 11).

Tabla 11. Variación % de Materiales y Transporte respecto a concreto referencia (100 C)

Mezcla	Materiales (COP)	Transporte (COP)	Variación Materiales (%)	Variación Transporte (%)
100 C	\$ 377.645,35	\$ 42.845,48	0	0
20CV	\$ 335.013,14	\$ 52.927,32	11,3	23,5
30CV	\$ 310.757,99	\$ 58.369,56	17,7	36,2
40CV	\$ 290.466,39	\$ 64.108,17	23,1	49,6
30E	\$ 294.195,23	\$ 63.416,21	22,1	48,0
40E	\$ 271.377,18	\$ 70.266,87	28,1	64,0
50E	\$ 245.478,45	\$ 77.117,52	35,0	80,0
30E20CV	\$ 253.057,79	\$ 74.530,34	33,0	74,0

Finalmente, se realiza un análisis de sensibilidad para determinar el costo admisible de las cenizas volantes y/o escorias por kilogramo del material correspondiente, teniendo como precio máximo el costo del concreto de referencia de 100 cemento de \$549.028,75 (Tabla 12).

Tabla 12. Costo admisible de cenizas volantes y escorias de alto horno por cada mezcla analizada.

Mezcla	\$ / kg
20CV	\$ 422,18
30CV	\$ 432,72
40CV	\$ 405,39
30E	\$ 573,72
40E	\$ 539,68
50E	\$ 536,12
30E20CV	\$ 483,36

De la anterior tabla se puede terminar que para realizar un concreto con remplazo del cemento por cenizas volantes o escorias de alto horno en las condiciones del estudio, a mayor porcentaje de remplazo, menor es el precio que se puede pagar por estos productos. Lo anterior es debido a los altos costos de transporte que conllevan a que el concreto con cenizas volantes y/o escorias tengan un costo superior al concreto sin remplazo si se superan los costos por kilogramo de material de la tabla.

4.4. Selección de la mejor alternativa

A continuación, se presenta una matriz con la calificación de cada mezcla de concreto investigada en cada una de las categorías de impacto ambiental, impacto económico y a la salud humana, donde 1 representa que obtuvo el orden de magnitud menor y el 8 el de orden de magnitud

mayor. Por ejemplo, para calentamiento global GEI en CO₂-eq el número 1 fue asignado al concreto con 30% de escoria y 20% de cenizas volantes y el número 8 al concreto con 100% C (referencia).

De forma similar, la mezcla 30E20CV generó el menor impacto en emisiones de SOX y CO. Por otro lado, la mezcla 40CV (40% de cenizas volantes) obtuvo el menor impacto en NOX, VOC, Consumo de agua, Demanda de agua y Energía demandada; y finalmente la mezcla 50E (50% escorias volantes) obtuvo el menor impacto en emisiones de PM₁₀, PM_{2.5}, Pb y desempeño económico (Tabla 13).

Tabla 13. Matriz de ponderación de las diferentes mezclas de concreto analizadas.

Impactos	100% C	20% CV	30% CV	40% CV	30% E	40% E	50% E	20% CV, 30% E
CO ₂ -eq	8	7	5	3	6	4	2	1
NO _x	8	5	3	1	7	6	4	2
SO _x	8	7	6	4	5	3	2	1
PM ₁₀	8	7	6	4	5	3	1	2
PM _{2.5}	8	7	6	4	5	3	1	2
VOC	8	5	3	1	7	6	4	2
CO	8	7	5	3	6	4	2	1
Pb	8	7	6	4	5	3	1	2
Consumo de agua	4	3	2	1	6	7	8	5
Captación de agua	4	3	2	1	6	7	8	5
Demanda energía	8	4	2	1	7	6	5	3
Salud humana	8	7	5	3	6	4	2	1
Desempeño economico	8	7	6	4	5	3	1	2
TOTAL	96	76	57	34	76	59	41	29
ORDEN	VIII	VI	IV	II	VII	V	III	I

El concreto de referencia con 100% cemento obtuvo el peor desempeño (con un puntaje asignado de 8) en las emisiones CO₂-eq, NO_x, SO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, VOC, CO, Pb, Demanda de Energía e Impacto a la salud humana; mientras que el concreto con 50% de escorias (50% E) obtuvo el peor desempeño en el consumo y captación de agua (Tabla 13).

En ese orden de ideas, la selección del concreto con 20% de cenizas volantes y 30% de escorias (30E20CV) se hace viable al representar una reducción significativa de las emisiones de GEI, NO_x, SO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, VOC y CO, al igual de obtener el menor impacto a la salud humana, la selección de este material permitiría en dado caso cumplir con la aplicación de la Estrategia Municipal de Desarrollo Bajo en Carbono para Cali y los objetivos de desarrollo sostenible.

5. CONCLUSIONES

En el marco del análisis de ciclo de vida, el presente proyecto utiliza dos herramientas: Openconcrete y ReCiPe para determinar de manera cuantitativa los impactos ambientales, económicos y a la salud humana de diferentes mezclas de concreto con remplazo parcial del cemento estructural con cenizas volantes y escorias de alto horno. Mediante el uso de una matriz de ponderación se logra determinar la mejor alternativa de mezcla de acuerdo con los tres tipos de impacto, definiendo que la mejor alternativa de selección es la mezcla de 30% de escorias y 20% de cenizas volantes, al representar una reducción significativa de las emisiones de GEI, NO_x, SO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, VOC y CO, al igual de obtener el menor impacto a la salud humana.

Cabe destacar que la mezcla mejor puntuada (30E20CV) presentó una reducción significativa del potencial de calentamiento global, al obtener un 38,9% menos de emisión de CO₂-_{eq} respecto al concreto de referencia (100% C), esta reducción es incluso, superior a resultados presentados en otros estudios referenciados. De igual forma, la selección de la mezcla 30E20CV permite una reducción del 38,8% de la afectación a la salud humana, que equivale en términos de la producción mensual de concreto del Valle del Cauca a una reducción de 66,5 años de vida ajustados por discapacidad (DALY). Por todo lo anterior, la selección de este material contribuiría a la aplicación de la Estrategia Municipal de Desarrollo Bajo en Carbono para Cali y los objetivos de desarrollo sostenible.

Se avaluó el análisis del ciclo vida de las diferentes mezclas de concreto bajo la metodología CCV para determinar el impacto económico en la utilización de los cenizas volantes y escorias, donde se obtuvo que el menor costo de ciclo de vida lo obtuvo la mezcla con 50% de escorias (50E), con un valor de \$ 431.018,56 pesos colombianos por metro cubico, lo cual representa una reducción de 23,5% respecto al concreto de referencia. Aun cuando, los resultados de este trabajo sugieren una diferencia en los precios de las mezclas de los diferentes remplazos de cenizas volantes y escorias de alto horno, es importante reconocer ciertas limitaciones, en primer lugar, no se considera el precio de adquisición y procesamiento de los cementantes suplementarios, además, los gastos operacionales y administrativos dependen de cada empresa productora de concreto y las condiciones del mercado. Por lo anterior, los resultados no pueden ser generalizados y son necesarios estudios más amplios de la estructura económica y financiera

de la fabricación de concretos premezclados, que permitan comprender aún mejor la factibilidad de la utilización de los cementantes suplementarios en remplazo parcial del cemento.

Es importante destacar que las investigaciones respecto a los impactos de la utilización de cementantes suplementarios como las cenizas volantes y escorias en la producción de cemento y concreto son insuficientes, a su vez, son limitados los datos a nivel local para realizar comparaciones más precisas entre las diferentes mezclas de concreto. Por lo que se recomienda para trabajos futuros, realizar el análisis de ciclo de vida del concreto con remplazo parcial del cemento con la utilización de fuentes locales de cenizas como las producidas a partir de la quema de la cascara del arroz o de la quema del bagazo de la caña, de manera que, mayor investigación en esta área del conocimiento, permita comprender y monitorear con mayor certeza los impactos ambientales, económicos y a la salud humana de las diferentes alternativas de mezcla de concreto, asimismo, permitirá a los tomadores de decisiones dentro de los proyectos de construcción seleccionar las mejores alternativas para la reducción de las emisiones de CO₂-eq y otros elementos contaminantes, considerando además, un criterio económico y los posibles efectos a la salud humana.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abellan-Garcia, J., Martinez, D. M., Khan, M. I., Abbas, Y. M., & Pellicer-Martínez, F. (2023). Environmentally friendly use of rice husk ash and recycled glass waste to produce ultra-high-performance concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 1869–1881. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.041>
- Abushanab, A., & Alnahhal, W. (2023). Life cycle cost analysis of sustainable reinforced concrete buildings with treated wastewater, recycled concrete aggregates, and fly ash. *Results in Engineering*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101565>
- Aperador, W., Bautista, J., & Delgado, A. E. (2015). Evaluación de las propiedades mecánicas de materiales compuestos elaborados a partir de cenizas volantes y polímeros reciclados.
- Arrigoni, A., Panesar, D. K., Duhamel, M., Opher, T., Saxe, S., Posen, I. D., & MacLean, H. L. (2020). Life cycle greenhouse gas emissions of concrete containing supplementary cementitious materials: cut-off vs. substitution. *Journal of Cleaner Production*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121465>
- ASTM. (2023). Standard Specification for Coal Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete 1. <https://doi.org/10.1520/C0618-23E01>
- Cabrera-Madrid, J. A., Escalante-García, J. I., & Castro-Borges, P. (2016). Compressive strength of concretes with blast furnace slag. Re-visited state-of-the-art. *ALCONPAT Journal*, 6(1), 64–83. <https://doi.org/10.21041/ra>
- Cámara de Comercio de Cali. (2023). Informe Ritmo constructor Número 28. . Martes 14 de Noviembre de 2023. <https://www.ccc.org.co/category/informes-economicos/ritmo-constructor/>
- Chen, X., & Wang, H. (2022). Life-cycle assessment and multi-criteria performance evaluation of pervious concrete pavement with fly ash. *Resources, Conservation and Recycling*, 177. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105969>
- Chen, X., Wang, H., Najm, H., Venkateela, G., & Hencken, J. (2019). Evaluating engineering properties and environmental impact of pervious concrete with fly ash and slag. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117714. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.117714>

- Das, P., Cheela, V. R. S., Mistri, A., Chakraborty, S., Dubey, B., & Barai, S. V. (2022). Performance assessment and life cycle analysis of concrete containing ferrochrome slag and fly ash as replacement materials – A circular approach. *Construction and Building Materials*, 347. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128609>
- DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA - DANE. (2024). Boletín Técnico Febrero 2024. Estadísticas de Cemento Gris (ECG). <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/estadisticas-de-cemento-gris>
- Departamento Nacional de Planeación de Colombia (DNP). (2018). Documento Conpes 3918: Estrategia para la implementación de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) en Colombia. <https://colaboracion.dnp.gov.co>
- Dong, Y. H., & Ng, S. T. (2015). A social life cycle assessment model for building construction in Hong Kong. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(8), 1166–1180. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0908-5>
- Du, J., Liu, Z., Christodoulatos, C., Conway, M., Bao, Y., & Meng, W. (2022). Utilization of off-specification fly ash in preparing ultra-high-performance concrete (UHPC): Mixture design, characterization, and life-cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 180. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106136>
- EPA. (2024). U.S. Environmental Protection Agency (EPA). <https://www.epa.gov/>
- Estanqueiro, B., Dinis Silvestre, J., de Brito, J., & Duarte Pinheiro, M. (2018). Environmental life cycle assessment of coarse natural and recycled aggregates for concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 22(4), 429–449. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1197161>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2019). Calentamiento global de 1,5°C. www.ipcc.ch
- Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., & Olsen, S. I. (2018). *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3>

- Hossain, M. U., Poon, C. S., Lo, I. M. C., & Cheng, J. C. P. (2016). Evaluation of environmental friendliness of concrete paving eco-blocks using LCA approach. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(1), 70–84. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0988-2>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A., & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas Técnicas. (2022). NTC-ISO 15686-5: Edificaciones y activos construidos. Planificación de la vida útil. Parte 5: Cálculo del costo del ciclo de vida.
- Ige, O. E., Olanrewaju, O. A., Duffy, K. J., & Collins, O. C. (2022). Environmental Impact Analysis of Portland Cement (CEM1) Using the Midpoint Method. *Energies*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/en15072708>
- Kim, A., Cunningham, P. R., Kamau-Devers, K., & Miller, S. A. (2022). OpenConcrete: a tool for estimating the environmental impacts from concrete production. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability*, 2(4), 041001. <https://doi.org/10.1088/2634-4505/ac8a6d>
- Kneifel, J., Lavappa, P., Polidoro, B., & Greig, A. L. (2019). Building for Environmental and Economic Sustainability (BEES) Online 2.1 technical manual. <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.2032r1>
- Laura Flechas Mejía, Jessica Arias Gaviria, Maria Andrea Rueda, Giovanni Pabón Restrepo, & Álvaro Daniel Pinzón. (2022). Eliminación Gradual del carbón en la generación eléctrica en Colombia. <https://transforma.global/>
- Laura Golsteijn. (2016, March 15). Interpretation of metrics: DALYs and damage to human health. PRé Sustainability.
- Leonardo Augusto Fonseca Barrera. (2016). Empleo de ceniza volante colombiana como material cementicio suplementario y sus efectos sobre la fijación de cloruros en concretos.
- Liu, Z., Chin, C. S., Xia, J., Lu, J., & Wang, X. (2023). Exploring the sustainability of concrete with fly ash, recycled coarse aggregate and biomineralisation method by life cycle

- assessment. *Journal of Cleaner Production*, 406. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137077>
- Mah, C. M., Fujiwara, T., & Ho, C. S. (2017). Concrete waste management decision analysis based on life cycle assessment. *Chemical Engineering Transactions*, 56, 25–30. <https://doi.org/10.3303/CET1756005>
- Malagón, E., Ramos, C., & Villaquirán-Caicedo, M. A. (2023). La Escoria Siderúrgica De Alto Horno Como Alternativa Ecológica En La Producción De Materiales De Construcción: Revisión Blast Furnace Slag As An Environmentally Friendly Alternative In The Production Of Construction And Building Materials: A Review.
- Manchego, D. V. , R. F. R. , & L. J. C. (2015). *Concretos con cenizas volantes provenientes de termoeléctricas – 1ra edición (Edición en Español)*. ECOE EDICIONES.
- Maury-Ramírez, A., Illera-Perozo, D., & Mesa, J. A. (2022). Circular Economy in the Construction Sector: A Case Study of Santiago de Cali (Colombia). *Sustainability (Switzerland)*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/su14031923>
- Maury-Ramírez, A., Rojas Manzano, M. A., & De Belie, N. (2023). LCA based recommendations for the selection of eco-concretes using blast furnace slag and fly ash. *MATEC Web of Conferences*, 378, 06001. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202337806001>
- Mesa, J. A., Fúquene, C. E., & Maury-Ramírez, A. (2021). Life cycle assessment on construction and demolition waste: A systematic literature review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 14). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/su13147676>
- Miller, S. A., & Moore, F. C. (2020). Climate and health damages from global concrete production. *Nature Climate Change*, 439–443. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0733-0>
- Ministerio de Transporte. (2024a). SICE-TAC. <https://plc.mintransporte.gov.co/Runtime/empresa/ctl/SiceTAC/mid/417>
- Ministerio de Transporte. (2024b). Sistema de Información de Costos Eficientes para el Transporte Automotor de Carga SICE-TAC. <https://mintransporte.gov.co/publicaciones/4462/sice-tac/>

- Mocharla, I. R., Selvam, R., Govindaraj, V., & Muthu, M. (2022). Performance and life-cycle assessment of high-volume fly ash concrete mixes containing steel slag sand. *Construction and Building Materials*, 341. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127814>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015a). Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. <https://unfccc.int/>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015b). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. <http://undocs.org/A/70/L.1>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2024). Sobre la constitución de la OMS. <https://www.who.int/es/about/governance/constitution>
- Orozco, C. R., Babel, S., Tangtermsirikul, S., & Sugiyama, T. (2023). Understanding the environmental, economic, and social impact of fly ash utilization on early-age high-strength mass concrete using life cycle analysis. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.141>
- Osuna Motta I, Villa Franco JF, Maury-Ramírez A, Valencia Ojeda LA, Giraldo Yepes CM, Colonia Restrepo AF, Galarza S, Carmona Ceballos JI, Rincón Laverde EJ, Gutiérrez Robledo A, Barreras Cortés RA, Archer JP, Cardona S, Gaitán J. (2023). Manual de Construcción Sostenible de Santiago de Cali. Alcaldía de Santiago de Cali.
- Pacheco-Torgal, F. (2013). Introduction to the environmental impact of construction and building materials. *Eco-Efficient Construction and Building Materials: Life Cycle Assessment (LCA), Eco-Labeling and Case Studies*, 1–10. <https://doi.org/10.1533/9780857097729.1>
- Panesar, D. K., Kanraj, D., & Abualrous, Y. (2019). Effect of transportation of fly ash: Life cycle assessment and life cycle cost analysis of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 99, 214–224. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.019>
- Prieto, L. C., Montañó, A. A., Parra, A., & Puerto-Suárez, J. D. (2018). Mechanical and Environmental Assessment of the Use of Fly Ash with Alkaline Activation as an Alternative to Total Replacement of Cement in the Manufacture of Prefabricated Tablets.

- Sathiparan, N., Jaasim, J. H. M., & Banujan, B. (2022). Sustainable production of cement masonry blocks with the combined use of fly ash and quarry waste. *Materialia*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2022.101621>
- Shobeiri, V., Bennett, B., Xie, T., & Visintin, P. (2023). Mix design optimization of concrete containing fly ash and slag for global warming potential and cost reduction. *Case Studies in Construction Materials*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01832>
- Thacker, S. B., Stroup, D. F., Carande-Kulis, V., Marks, J. S., Roy, K., & Gerberding, J. L. (2006). Measuring the Public's Health. *Public Health Reports*, 121(1), 14–22. <https://doi.org/10.1177/003335490612100107>
- The Global Consensus on Sustainability in the Built Environment (GLOBE). (2022). DECARBONISING GLOBAL CONSTRUCTION. <http://globe-consensus.com/>
- Tushar, Q., Bhuiyan, M. A., Zhang, G., Maqsood, T., & Tasmin, T. (2022). Application of a harmonized life cycle assessment method for supplementary cementitious materials in structural concrete. *Construction and Building Materials*, 316. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125850>
- Van Den Heede, P., & De Belie, N. (2012). Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and “green” concretes: Literature review and theoretical calculations. *Cement and Concrete Composites*, 34(4), 431–442. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004>
- Wada, Y., De Graaf, I. E. M., & Van Beek, L. P. H. (2016). High-resolution modeling of human and climate impacts on global water resources. <https://doi.org/10.1002/2015MS000618>

7. ANEXOS

Anexo A. Inventario de la bases de datos de Openconcrete. Fuente: Kim et al. (2022).

Constituent	Process	Energy Demand (MJ/kg)	Energy Type (or m ³ CO ₂ Emissions (kg/kg)**	WCM Emissions (kg/kg)	
	quarry operations, raw meal preparation, finish grinding - wet kiln	0.406	Electricity		
	quarry operations, raw meal preparation, finish grinding - long dry kiln	0.541	Electricity		
	quarry operations, raw meal preparation, finish grinding - preheater kiln	0.54	Electricity		
	quarry operations, raw meal preparation, finish grinding - precalciner/preheater kiln	0.517	Electricity		
	quarry operations, raw meal preparation, finish grinding - total based on kiln efficiencies per state	0.523	Electricity		
	Portland Cement	kilning - wet kiln	5.926	Thermal	
	kilning - long dry kiln	3.843	Thermal		
	kilning - preheater kiln	3.73	Thermal		
	kilning - precalciner/preheater kiln	3.386	Thermal		
	kilning - total based on kiln efficiencies per state	3.760	Thermal		
	calcination emissions			0.485	
Opium	quarry operations, preparation	0.0386	Electricity		
Limestone Filler	quarry operations, preparation	0.0386	Electricity		
Interground limestone	quarry operations, preparation, grinding electricity	0.1874	Electricity		
Natural Pozzolans	quarry operations, preparation	0.0386	Electricity		
Fly Ash	N/A	0	N/A		
Silica Fume	N/A	0	N/A		
Shale Ash	N/A	0	N/A		
Granulated Blast Furnace Slag	quenching and granulation, dewatering and drying, iron removal, crushing, and grinding	2.5104	Electricity		
Calcined clay***	grinding, packing, operation, other processes	0.24	Electricity		
	kilning	2.7833	Thermal		
Fine Aggregates	quarry operations, preparation	0.02319	Electricity		
Coarse Aggregates	quarry operations, preparation	0.05544	Electricity		
Pectidians and Superplasticizers	Raw material supply, transport prior to production gate, and manufacturing	32.91	Electricity		
Air Entrainers	Raw material supply, transport prior to production gate, and manufacturing	15.014	Electricity		
Hardening Accelerators	Raw material supply, transport prior to production gate, and manufacturing	42.71	Electricity		
Set Accelerators	Raw material supply, transport prior to production gate, and manufacturing	30.72	Electricity		
Water Retaining Admixtures	Raw material supply, transport prior to production gate, and manufacturing	06.03	Electricity		
Retarders	Raw material supply, transport prior to production gate, and manufacturing	30.37	Electricity		
Additional Processes	Process	Energy Demand (MJ/m ³ or l	Energy Type (or m ³ CO ₂ Emissions (kg/units in l	WCM Emissions (kg/units in l	
	Batching (per cubic meter). For water (per kg, batching water)	2.488	Electricity		
	Aggregate transfer (per kg aggregate)				
	Sand transfer (per kg sand)				
Batching	Cement unloading (per kg cement)				
	SCM unloading (per kg SCM)				
	Hopper loading (per kg material)				
	Mixer loading (per kg material)				
	Transportation, truck	0.8	Transportation Fuel	0.001689	1.19E-06
Transportation	Transportation, rail	0.212	Transportation Fuel	2.47E-06	2.83E-07
	Transportation, ship	0.152	Transportation Fuel	1.77E-06	4.10E-07
Concrete Transportation	Transportation, concrete mixer truck	0.8	Transportation Fuel	0.00168914	1.1995E-06

* where values were reported and could be differentiated from energy-derived emissions (which are determined through energy demands and emissions factors on energy tails); location is transportation fuels - all emissions listed here are from fuel combustion

** by transportation systems, these values reflect energy-derived GHG emissions using 100a GWP from the IPCC (Gonier 2007)

*** where data availability were limited, PM2.5 were approximated as equivalent to PM10 (note - this can lead to an over estimation of PM2.5)

**** water demands based on preheater/precalciner kiln

Anexo B. Inventario de la bases de datos de Openconcrete (continuación). Fuente: Kim et al. (2022).

Constituent	Process	SOX Emissions (kg/kg)	PM10 Emissions (kg/kg)	PM2.5 Emissions (kg/kg)***	VOC Emissions (kg/kg)
	quarry operations, raw meal preparation, finish grinding - wet kiln		0,000200765	0,000200765	
	quarry operations, raw meal preparation, finish grinding - long dry kiln		0,000200765	0,000200765	
	quarry operations, raw meal preparation, finish grinding - preheater kiln		0,000200765	0,000200765	
	quarry operations, raw meal preparation, finish grinding - precalciner/preheater kiln		0,000200765	0,000200765	
	quarry operations, raw meal preparation, finish grinding - total based on kiln efficiencies per state		0,000200765	0,000200765	
	Portland Cement	kilning - wet kiln	0,00180595		
	kilning - long dry kiln	0,00180595			
	kilning - preheater kiln	0,00180595			
	kilning - precalciner/preheater kiln	0,00180595			
	kilning - total based on kiln efficiencies per state				
	calcination emissions				
Gypsum	quarry operations, preparation		0,00011492	0,00011492	
Limestone Filler	quarry operations, preparation		0,00011492	0,00011492	
Interground limestone	quarry operations, preparation, grinding electricity		0,00011492	0,00011492	
Natural Pozzolans	quarry operations, preparation		0,00011492	0,00011492	
Fly Ash	N/A				
Silica Fume	N/A				
Shale Ash	N/A				
Granulated Blast Furnace Slag	quenching and granulation, dewatering and drying, iron removal, crushing, and grinding				
Calcined clay****	grinding, packing, operation, other processes		0,00011492	0,00011492	
	kilning		0,00011492	0,00011492	
Fine Aggregates	quarry operations, preparation		0,00011492	0,00011492	
Coarse Aggregates	quarry operations, preparation		0,00011492	0,00011492	
Plasticizers and Superplasticizers	Raw material supply, transport prior to production gate, and manufacturing				
Air Entrainers	Raw material supply, transport prior to production gate, and manufacturing				
Hardening Accelerators	Raw material supply, transport prior to production gate, and manufacturing				
Set Accelerators	Raw material supply, transport prior to production gate, and manufacturing				
Water Resisting Admixtures	Raw material supply, transport prior to production gate, and manufacturing				
Retarders	Raw material supply, transport prior to production gate, and manufacturing				
Additional Processes	Process	SOX Emissions (kg/units in le	PM10 Emissions (kg/units in lef	PM2.5 Emissions (kg/units in left co	VOC Emissions (kg/units in left
	Batching (per cubic meter), For water (per kg batching water)		0,02965	0,02965	
	Aggregate transfer (per kg aggregate)		0,0000017	0,0000017	
	Sand transfer (per kg sand)		0,00000051	0,00000051	
Batching	Cement unloading (per kg cement)		0,00000017	0,00000017	
	SCM unloading (per kg SCM)		0,0000065	0,0000065	
	Hopper loading (per kg material)		0,0000013	0,0000013	
	Mixer loading (per kg material)		0,0000028	0,0000028	
	Transportation, truck	8,15E-08	2,26E-08	2,60E-08	9,60E-08
Transportation	Transportation, rail	2,15E-08	6,52E-09	4,47E-11	4,02E-08
	Transportation, ship	2,02E-08	1,83E-09	3,47E-03	1,24E-08
Concrete Transportation	Transportation, concrete mixer truck	8,14792E-08	2,25514E-08	2,59875E-08	9,59577E-08

(which are determined through energy demands and emissions factors on energy tabs);
exception is transportation fuels - all emissions listed here are from fuel combustion
** for transportation systems, these values reflect energy-derived GHG emissions using 100a GWPs from the IPCC (Gomez 2007)
*** where data availability were limited, PM2.5 were approximated as equivalent to PM10 (note - this can lead to an over estimation of PM2.5)
**** water demands based on preheater/precalciner kiln

Anexo C. Inventario de la bases de datos de Openconcrete (continuación 2). Fuente: Kim et al. (2022).

Constituent	Process	CO Emissions (kg/kg)	Pb Emissions (kg/kg)	Water Consumption (kg/kg)	Water Withdrawal (kg/kg)	Data Source
Portland Cement	quarry operations, raw meal preparation, finish grinding - wet kiln					Marceau, 2006, USEPA, 2001, Miller 2020
	quarry operations, raw meal preparation, finish grinding - long dry kiln					Marceau, 2006, USEPA, 2001, Miller 2020
	quarry operations, raw meal preparation, finish grinding - preheater kiln					Marceau, 2006, USEPA, 2001, Miller 2020
	quarry operations, raw meal preparation, finish grinding - precalciner/preheater kiln					Marceau, 2006, USEPA, 2001, Miller 2020
	quarry operations, raw meal preparation, finish grinding - total based on kiln efficiencies per state					Marceau, 2006, USEPA, 2001, Miller 2020
Portland Cement	kilning - wetkiln	0.00054245	0.00005415	2,172,747,224	3,471,158,994	manufacturing emissions sans energy-derived emissions from (GNR, 2014, USEPA, 1994)
	kilning - long dry kiln	0.00054245	0.00005415	2,246,747,224	3,545,158,994	manufacturing emissions sans energy-derived emissions from (GNR, 2014, USEPA, 1994)
	kilning - preheater kiln	0.00054245	0.00005415	2,254,747,224	3,553,158,994	manufacturing emissions sans energy-derived emissions from (GNR, 2014, USEPA, 1994)
	kilning - precalciner/preheater kiln	0.00054245	0.00005415	1,719,747,224	3,018,158,994	manufacturing emissions sans energy-derived emissions from (GNR, 2014, USEPA, 1994)
	kilning - total based on kiln efficiencies per state					
	calcination emissions					stoichiometry, assuming 65% lime content in cln
Gypsum	quarry operations, preparation			1,113,747,224	2,412,158,994	assumed same as limestone, USEPA, 2001, wa
Limestone Filler	quarry operations, preparation			1,113,747,224	2,412,158,994	NREL, 2020, conversions from GREET 2010; LF grinding electricity approximated at the lower end of clinker electricity demand (30% of the
Interground Limestone	quarry operations, preparation, grinding electricity			1,113,747,224	2,412,158,994	
Natural Pozzolans	quarry operations, preparation			1,126,162,469	2,412,712,642	assumed same as limestone, USEPA, 2001, wa
Fly Ash	NA			1,149,573,304	1,170,534,96	EPA, 2003; water from Miller, 2016a
Silica Fume	NA			1,149,573,304	1,170,534,96	assumed same as flyash, EPA, 2003; water from
Shale Ash	NA			1,149,573,304	1,170,534,96	assumed same as flyash, EPA, 2003; water from
Granulated Blast Furnace Slag	quenching and granulation, dewatering and drying, iron removal, crushing, and grinding			0.005447	0.011473	SCA, 2015
Calcined clay***	grinding, packing, operation, other processes			1,719,747,224	3,018,158,994	Miller, 2016b; air emissions based on raw water
	kilning			1,719,747,224	3,018,158,994	Miller, 2016b; air emissions based on raw water
Fine Aggregates	quarry operations, preparation			0.433739527	1,731,260,635	Marceau, 2007, water from Miller, 2016a
Coarse Aggregates	quarry operations, preparation			0.433739527	1,731,260,635	Marceau, 2007, water from Miller, 2016a
Plasticizers and Superplasticizers	Raw material supply, transport prior to production gate, and manufacturing					EFCA, 2015a
Air Entrainers	Raw material supply, transport prior to production gate, and manufacturing					EFCA, 2015b
Hardening Accelerators	Raw material supply, transport prior to production gate, and manufacturing					EFCA, 2015c
Set Accelerators	Raw material supply, transport prior to production gate, and manufacturing					EFCA, 2015d
Water Retarding Admixtures	Raw material supply, transport prior to production gate, and manufacturing					EFCA, 2015e
Retarders	Raw material supply, transport prior to production gate, and manufacturing					EFCA, 2015f
Additional Processes	Process	CO Emissions (kg/units in le	Pb Emissions (kg/units in le1	Water Consumption (kg/units in le1	Water Withdrawal (kg/units in le	Data Source
Batching	Batching (per cubic meter), For water (per kg batching water)				1	1 Kermet, 2011; USEPA, 2006
	Aggregate transfer (per kg aggregate)					USEPA, 2006, uncontrolled emissions
	Sand transfer (per kg sand)					USEPA, 2006, uncontrolled emissions
	Cement unloading (per kg cement)					USEPA, 2006, accounts for emissions controls if
	SCM unloading (per kg SCM)					USEPA, 2006, controlled emissions
	Hopper loading (per kg material)					USEPA, 2006, uncontrolled emissions
Transportation	Mixer loading (per kg material)					USEPA, 2006, accounts for emissions controls through use of fraction from AP 42
	Transportation, truck	1.30E-06	9.16E-13	0.254165139	0.254165139	median from distributions fit to data from NREL, 2012, E.L.C.D., 2017 (single point use if only one from distributions fit to data from NREL, 2012, E.L.C.D., 2017 (single point use if only one datum, from distributions fit to data from NREL, 2012, E.L.C.D., 2017 (single point use if only one datum, median from distributions fit to data from NREL, 2012, E.L.C.D., 2017 (single point use if only one
	Transportation, rail	1.29E-07	2.31E-13	0.255199617	0.255199617	
Concrete Transportation	Transportation, ship	7.47E-08	1.06E-13	0.255967904	0.255967904	
	Transportation, concrete mixer truck	1.30293E-06	9.15607E-13	0.254165139	0.254165139	

(which are determined through energy demand and emissions factors on energy tabs), exception is transportation fuels - all emissions listed here are from fuel combustion
 ** for transportation systems, these values reflect energy-derived GHG emissions using 100a GWPs from the IPCC (Gomez 2007)
 *** where data availability were limited, PM2.5 were approximated as equivalent to PM10 (note - this can lead to an over estimation of PM2.5)
 **** water demands based on preheater/precalciner kiln

Anexo D. Factores de emisión por cada MJ producido de diferentes fuentes de energía térmica. Adaptado de Kim et al. (2022).

per MJ

	kg CO ₂	kg CH ₄	kg N ₂ O	kg NO _x	kg SO _x	kg PM ₁₀	kg PM _{2.5}	kg VOC	kg CO	kg Pb	kg Water Consumption	kg Water Withdrawal
Coal	9,83E-02	8,14E-06	1,19E-06	8,58E-05	0,000244	4,07E-05	1,23E-05	7,57E-07	3,68E-06	1,81E-08	1,67E-02	1,68E-02
Oil	7,20E-02	2,56E-06	4,69E-07	3,77E-05	9,82E-06	7,81E-07	4,12E-07	1,61E-07	2,87E-06	8,64E-10	3,12E-01	4,59E-01
Biomass	7,96E-02	6,04E-06	8,04E-07	0,000152	1,08E-05	5,91E-05	4,65E-05	7,28E-06	0,000259	2,06E-08	8,13E-01	9,98E-01
Fossil waste	1,00E-01	1,59E-05	3,13E-06	8,89E-06	1,71E-05	1,12E-05	1,13E-05	5,74E-07	1,61E-06	6,20E-08	2,86E-01	3,69E-01
PetCoke	9,73E-02	2,99E-06	5,98E-07	4,73E-05	0,000132	2,68E-06	2,68E-06	2,38E-07	2,02E-06	0,00E+00	2,86E-01	3,69E-01
Natural gas	5,61E-02	9,96E-07	9,98E-08	2,94E-05	2,53E-07	2,40E-06	2,40E-06	2,33E-06	3,64E-05	2,11E-10	1,16E-03	2,04E-03
Solid waste	1,12E-01	2,16E-05	3,28E-06	3,54E-05	1,07E-05	0,000286	0,000286	1,30E-05	2,35E-05	8,40E-07	2,86E-01	3,69E-01
Liquid waste	7,35E-02	3,01E-05	4,00E-06	8,89E-06	1,71E-05	1,12E-05	1,13E-05	5,74E-07	1,61E-06	6,17E-08	2,86E-01	3,69E-01

Median results for air emissions from estimates and modeling assumptions discussed in Miller, 2020; Median results for water demands from estimates and modeling assumptions discussed in Miller, 2018a

Fuel mix used	Fuel Mix (from "Inputs & Outputs")	US Average (based on National statistics reported by the USGS)	(based on data from CARB)
Coal	80,0%	0,5747	52,8%
Oil	0,0%	0,0060	0,0%
Biomass	0,0%	0,0000	5,9%
Fossil Waste	10,0%	0,0000	0,0%
PetCoke	0,0%	0,1541	21,0%
Natural Gas	0,0%	0,1109	9,3%
Solid Waste*	10,0%	0,1006	11,0%
Liquid Waste	0,0%	0,0536	0,0%

* includes tire waste

Thermal energy mix from van Oss, 2015

Impacts per MJ	kg CO ₂	kg CH ₄	kg N ₂ O	kg GHG	kg NO _x	kg SO _x	kg PM ₁₀	kg PM _{2.5}	kg VOC	kg CO	kg Pb	kg Water Consumption	kg Water Withdrawal
Fuel Mix (from "I	9,99E-02	1,03E-05	1,59E-06	1,01E-01	7,31E-05	1,98E-04	6,23E-05	3,96E-05	1,96E-06	5,46E-06	1,05E-07	7,05E-02	8,73E-02

** calculated using 100a GWPs from the IPCC (Gomez 2007)

Anexo E. Factores de emisión por MJ de electricidad y proporciones de las diferentes fuentes de electricidad. Adaptado de Kim et al. (2022).

per MJ	kg CO ₂	kg CH ₄	kg N ₂ O	kg NO _x	kg SO _x	kg PM ₁₀	kg PM _{2.5}	kg VOC	kg CO	kg Pb	kg Water Consum	kg Water Withdrawal
Coal	260E-01	2.64E-06	3.85E-06	0.0002958	0.000819	2.98E-05	1.25E-05	3.07E-06	2.84E-05	6.44E-11	1.07E-01	1.07E-01
Oil	212E-01	7.32E-06	1.39E-06	0.0003615	0.000707	2.98E-05	1.83E-05	1.63E-07	5.87E-07	2.50E-01	5.83E-01	1.07E-01
Natural Gas	1.62E-01	2.86E-06	6.44E-07	7.89E-05	8.41E-06	7.54E-06	6.72E-06	4.64E-06	0.000117	1.99E-12	2.99E-01	6.28E-00
Biomass	0	1.28E-04	1.70E-05	0.0010353	0.0037306	0.0005942	3.00E-05	3.12E-05	0.001275	4.26E-12	3.00E-01	1.54E-01
Nuclear*	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	8.08E-01	2.31E-01
Hydroelectric*	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.94E-00	3.94E-00
Geothermal*	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.97E-01	4.00E-01
Solar*	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	4.82E-01	4.66E-01
Wind*	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	3.28E-02	3.28E-02

Median results for air emissions from estimates and modeling assumptions discussed in Miller, 2020; Median results for water demands from estimates and modeling assumptions discussed in Miller, 2018a

* air emissions assumed to be negligible for electricity resources including hydro, wind, solar, geothermal and nuclear

US Mix	Cement - Elk Limestone, i	Limestone F	Natural Pozz Shale Ash -	Calcined Clc Silica Fume	Fly Ash - Elk Blast Furnac	Fine Aggregates	Coarse Aggregates	- El Superplastic Hardening A	Air Entrainer	Water Retenis Set	Acceler Retardens -	Electricity Mix
Coal	27.5%	12.2%	12.2%	12.2%	12.2%	12.2%	12.2%	12.2%	12.2%	12.2%	12.2%	12.2%
Oil	0.6%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%	0.9%
Natural Gas	35.1%	25.1%	25.1%	25.1%	25.1%	25.1%	25.1%	25.1%	25.1%	25.1%	25.1%	25.1%
Biomass	1.6%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%
Nuclear	19.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Hydroelectric	6.9%	58.9%	58.9%	58.9%	58.9%	58.9%	58.9%	58.9%	58.9%	58.9%	58.9%	58.9%
Geothermal	0.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Solar	1.5%	1.6%	1.6%	1.6%	1.6%	1.6%	1.6%	1.6%	1.6%	1.6%	1.6%	1.6%
Wind	6.5%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%

based on Cf based on USDOE, 2015

Impacts per MJ	kg CO ₂	kg CH ₄	kg N ₂ O	kg GHG	kg NO _x	kg SO _x	kg PM ₁₀	kg PM _{2.5}	kg VOC	kg CO	kg Pb	kg Water Consum	kg Water Withdrawal
US Mix	1.30E-01	3.89E-06	1.57E-06	1.30E-01	1.28E-04	2.94E-04	2.19E-05	6.11E-06	2.99E-06	6.81E-05	8.44E-11	7.07E-01	1.02E+01
Cement - Electricity Mix from "Inputs & C	7.42E-02	2.46E-06	8.24E-07	7.45E-02	7.00E-05	1.48E-04	1.36E-05	3.50E-06	1.87E-06	4.50E-05	8.44E-12	2.47E-00	5.47E+00
Limestone, Infiground - Electricity Mix	7.42E-02	2.46E-06	8.24E-07	7.45E-02	7.00E-05	1.48E-04	1.36E-05	3.50E-06	1.87E-06	4.50E-05	8.44E-12	2.47E-00	5.47E+00
Limestone Filler - Electricity Mix	7.42E-02	2.46E-06	8.24E-07	7.45E-02	7.00E-05	1.48E-04	1.36E-05	3.50E-06	1.87E-06	4.50E-05	8.44E-12	2.47E-00	5.47E+00
Natural Pozzolain - Electricity Mix	7.42E-02	2.46E-06	8.24E-07	7.45E-02	7.00E-05	1.48E-04	1.36E-05	3.50E-06	1.87E-06	4.50E-05	8.44E-12	2.47E-00	5.47E+00
Shale Ash - Electricity Mix	7.42E-02	2.46E-06	8.24E-07	7.45E-02	7.00E-05	1.48E-04	1.36E-05	3.50E-06	1.87E-06	4.50E-05	8.44E-12	2.47E-00	5.47E+00
Calcined Clay - Electricity Mix	7.42E-02	2.46E-06	8.24E-07	7.45E-02	7.00E-05	1.48E-04	1.36E-05	3.50E-06	1.87E-06	4.50E-05	8.44E-12	2.47E-00	5.47E+00
Fly Ash - Electricity Mix	7.42E-02	2.46E-06	8.24E-07	7.45E-02	7.00E-05	1.48E-04	1.36E-05	3.50E-06	1.87E-06	4.50E-05	8.44E-12	2.47E-00	5.47E+00
Blast Furnace Slag - Electricity Mix	7.42E-02	2.46E-06	8.24E-07	7.45E-02	7.00E-05	1.48E-04	1.36E-05	3.50E-06	1.87E-06	4.50E-05	8.44E-12	2.47E-00	5.47E+00
Fine Aggregates - Electricity Mix	7.42E-02	2.46E-06	8.24E-07	7.45E-02	7.00E-05	1.48E-04	1.36E-05	3.50E-06	1.87E-06	4.50E-05	8.44E-12	2.47E-00	5.47E+00
Coarse Aggregates - Electricity Mix	7.42E-02	2.46E-06	8.24E-07	7.45E-02	7.00E-05	1.48E-04	1.36E-05	3.50E-06	1.87E-06	4.50E-05	8.44E-12	2.47E-00	5.47E+00
Superplasticizer - Electricity Mix	7.42E-02	2.46E-06	8.24E-07	7.45E-02	7.00E-05	1.48E-04	1.36E-05	3.50E-06	1.87E-06	4.50E-05	8.44E-12	2.47E-00	5.47E+00
Hardening Accelerators - Electricity Mix	7.42E-02	2.46E-06	8.24E-07	7.45E-02	7.00E-05	1.48E-04	1.36E-05	3.50E-06	1.87E-06	4.50E-05	8.44E-12	2.47E-00	5.47E+00
Air Entrainers - Electricity Mix	7.42E-02	2.46E-06	8.24E-07	7.45E-02	7.00E-05	1.48E-04	1.36E-05	3.50E-06	1.87E-06	4.50E-05	8.44E-12	2.47E-00	5.47E+00
Water Retaining Admixtures - Electricity A	7.42E-02	2.46E-06	8.24E-07	7.45E-02	7.00E-05	1.48E-04	1.36E-05	3.50E-06	1.87E-06	4.50E-05	8.44E-12	2.47E-00	5.47E+00
Set Accelerators - Electricity Mix	7.42E-02	2.46E-06	8.24E-07	7.45E-02	7.00E-05	1.48E-04	1.36E-05	3.50E-06	1.87E-06	4.50E-05	8.44E-12	2.47E-00	5.47E+00
Retarders - Electricity Mix	7.42E-02	2.46E-06	8.24E-07	7.45E-02	7.00E-05	1.48E-04	1.36E-05	3.50E-06	1.87E-06	4.50E-05	8.44E-12	2.47E-00	5.47E+00

** calculated using 100a GWPs from the IPCC (Gomez 2007)

Anexo G. Resultados de impacto por unidad de los procesos y materiales. Adaptado de: Kim et al. (2022).

constituent/process	Unit	Impact category										
		kg GHG	kg NO _x	kg SO _x	kg PM ₁₀	kg PM _{2.5}	kg VOC	kg CO	kg Pb	kg Water Consumption	kg Water Withdrawal	MJ Energy Demand
Portland Cement, preheater/precalciner kiln	per kg	9,02E-01	3,12E-04	2,63E-03	4,51E-04	3,60E-04	8,36E-06	5,87E-04	5,45E-05	3,34E+00	6,34E+00	4,28E+00
Clinker, preheater/precalciner kiln	per kg	9,02E-01	3,11E-04	2,63E-03	4,51E-04	3,54E-04	8,36E-06	5,86E-04	5,45E-05	3,28E+00	6,21E+00	4,28E+00
Gypsum	per kg	2,88E-03	2,70E-06	5,70E-06	1,15E-04	1,15E-04	7,22E-08	1,74E-06	3,26E-13	1,21E+00	2,62E+00	3,86E-02
Limestone, interground	per kg	1,17E-02	1,10E-05	2,32E-05	1,26E-04	1,25E-04	2,94E-07	7,08E-06	1,33E-12	1,50E+00	3,27E+00	1,57E-01
Limestone filler	per kg	2,88E-03	2,70E-06	5,70E-06	1,25E-04	1,24E-04	7,22E-08	1,74E-06	3,26E-13	1,21E+00	2,62E+00	3,86E-02
Natural Pozzolans	per kg	2,88E-03	2,70E-06	5,70E-06	1,25E-04	1,24E-04	7,22E-08	1,74E-06	3,26E-13	1,22E+00	2,62E+00	3,86E-02
Shale Ash	per kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,30E-06	9,30E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,15E+00	1,17E+00	0,00E+00
Calcined Clay	per kg	2,98E-01	2,20E-04	5,87E-04	3,01E-04	2,35E-04	5,91E-06	2,60E-05	2,91E-07	2,51E+00	4,57E+00	3,02E+00
Silica Fume	per kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,30E-06	9,30E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,15E+00	1,17E+00	0,00E+00
Fly Ash	per kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,30E-06	9,30E-06	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,15E+00	1,17E+00	0,00E+00
Blast furnace slag	per kg	1,87E-01	1,76E-04	3,71E-04	4,47E-05	1,94E-05	4,69E-06	1,13E-04	2,12E-11	6,21E+00	1,37E+01	2,51E+00
Fine Aggregate	per kg	1,73E-03	1,62E-06	3,42E-06	1,17E-04	1,17E-04	4,34E-08	1,04E-06	1,96E-13	4,91E-01	1,86E+00	2,32E-02
Coarse Aggregate	per kg	2,64E-03	2,48E-06	5,23E-06	1,18E-04	1,18E-04	6,63E-08	1,59E-06	2,99E-13	5,21E-01	1,93E+00	3,54E-02
Plasticizing Admixture	per kg	2,45E+00	2,30E-03	4,86E-03	4,47E-04	1,15E-04	6,15E-05	1,48E-03	2,78E-10	8,14E+01	1,80E+02	3,29E+01
Batching water	per kg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,00E+00	1,00E+00	0,00E+00
Hardening Accelerators	per kg	3,18E+00	2,99E-03	6,31E-03	5,80E-04	1,50E-04	7,99E-05	1,92E-03	3,61E-10	1,06E+02	2,34E+02	4,27E+01
Air Entrainers	per kg	1,12E+00	1,05E-03	2,22E-03	2,04E-04	5,26E-05	2,81E-05	6,75E-04	1,27E-10	3,71E+01	8,22E+01	1,50E+01
Set Accelerators	per kg	2,29E+00	2,15E-03	4,54E-03	4,18E-04	1,08E-04	5,74E-05	1,38E-03	2,59E-10	7,60E+01	1,68E+02	3,07E+01
Water Resisting Admixtures	per kg	5,07E+00	4,76E-03	1,00E-02	9,25E-04	2,38E-04	1,27E-04	3,06E-03	5,74E-10	1,68E+02	3,72E+02	6,80E+01
Retarders	per kg	2,26E+00	2,13E-03	4,48E-03	4,13E-04	1,06E-04	5,68E-05	1,37E-03	2,56E-10	7,51E+01	1,66E+02	3,04E+01
Batching*	per m ³	7,07E-01	6,64E-04	1,40E-03	2,98E-02	2,97E-02	1,77E-05	4,27E-04	8,01E-11	2,45E+01	5,29E+01	9,49E+00
Transport, rail	per tkm	2,47E-05	2,63E-07	2,15E-08	6,52E-09	4,47E-11	4,02E-08	1,29E-07	2,31E-13	2,55E-01	2,55E-01	2,12E-01
Transport, truck	per tkm	1,69E-04	1,19E-06	8,15E-08	2,26E-08	2,60E-08	9,60E-08	1,30E-06	9,16E-13	2,54E-01	2,54E-01	8,00E-01
Transport, ship	per tkm	1,77E-05	4,10E-07	2,02E-08	1,83E-09	3,47E-03	1,24E-08	7,47E-08	1,08E-13	2,56E-01	2,56E-01	1,52E-01
Transport, concrete mixer truck	per tkm	1,69E-04	1,19E-06	8,15E-08	2,26E-08	2,60E-08	9,60E-08	1,30E-06	9,16E-13	2,54E-01	2,54E-01	8,00E-01

*some batching particulates are assigned to the constituents as they are driven by the mass of those constituents used

Anexo H. Resultados de impacto por transporte de los materiales. Adaptado de: Kim et al. (2022).

constituent	Impacts per ton													
	distance, truck (km)	distance, rail (km)	distance, ship (km)	kg GHG	kg NO _x	kg SO _x	kg PM ₁₀	kg PM _{2.5}	kg VOC	kg CO	kg Pb	kg Water Consumption	kg Water Withdrawal	MJ Energy Demand
Portland Cement	7,5	0	0	1,27E+03	8,91E-06	6,11E-07	1,69E-07	1,95E-07	7,20E-07	9,77E-06	6,87E-12	1,91E+00	1,91E+00	6,00E+00
Limestone, interground	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Limestone Filler	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Natural Pozzolans	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Shale Ash	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Calcined Clay	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Silica Fume	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Fly Ash	491,5	0	0	8,30E-02	5,84E-04	4,00E-05	1,11E-05	1,28E-05	4,72E-05	6,40E-04	4,50E-10	1,25E+02	1,25E+02	3,93E+02
Blast Furnace Slag	676,1	0	0	1,14E-01	8,04E-04	5,51E-05	1,52E-05	1,76E-05	6,49E-05	8,81E-04	6,19E-10	1,72E+02	1,72E+02	5,41E+02
Fine Aggregates	6	0	0	1,01E-03	7,13E-06	4,89E-07	1,35E-07	1,56E-07	5,76E-07	7,82E-06	5,49E-12	1,53E+00	1,53E+00	4,80E+00
Coarse Aggregates	6	0	0	1,01E-03	7,13E-06	4,89E-07	1,35E-07	1,56E-07	5,76E-07	7,82E-06	5,49E-12	1,53E+00	1,53E+00	4,80E+00
Superplasticizer	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Water	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Air Entrainers	500	0	0	8,45E-02	5,94E-04	4,07E-05	1,13E-05	1,30E-05	4,80E-05	6,51E-04	4,58E-10	1,27E+02	1,27E+02	4,00E+02
Hardening Accelerator:	500	0	0	8,45E-02	5,94E-04	4,07E-05	1,13E-05	1,30E-05	4,80E-05	6,51E-04	4,58E-10	1,27E+02	1,27E+02	4,00E+02
Set Accelerators	500	0	0	8,45E-02	5,94E-04	4,07E-05	1,13E-05	1,30E-05	4,80E-05	6,51E-04	4,58E-10	1,27E+02	1,27E+02	4,00E+02
Water Resisting Admix	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Retarders	0	0	0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Concrete	23	0	0	3,89E+03	2,73E-05	1,87E-06	5,19E-07	5,98E-07	2,21E-06	3,00E-05	2,11E-11	5,85E+00	5,85E+00	1,84E+01

Anexo I. Cálculos impacto a la salud humana. Elaboración propia.

ReCIPe Human health (Salud Humana)		Para dosificación		1				
Categoría de impacto	Unidad Openconcrete	Valor Openconcrete	Factor de caracterización	Unidad Punto Medio (ReCIPe)	Valor CFm Punto medio	Unidad de Fm (factor de punto medio a final)	Valor Fm	Cfe (Punto Final en DALY)
Cambio Climático	kg GHG (CO2 eq.)	305,9		1,0 kg CO2 eq.	305,9027	DALY/kg CO2 eq.	1,25E-05	3,82E-03
Formación de materia particulada fina	kg PM2.5	0,353		0,19 kg PM2.5 eq.	0,0671	DALY/kg PM2.5 eq.	6,29E-04	4,22E-05
Formación fotoquímica de ozono (smog)	kg NOX	0,111		0,94 kg NOx eq.	0,1046	DALY/kg NOx eq.	9,10E-07	9,51E-08
Toxicidad en humanos (cancer)	kg Pb	0,0179		6,88 kg 1,4-DCB	0,1233	DALY/kg 1,4-DCB	3,32E-06	4,09E-07
Uso del agua	kg Consumo de agua	2337,2		0,001 m3 Consumo de agua	2,3372	Daly/m3 Consumo de agua	2,15E-08	5,02E-08
3,87E-03								
ReCIPe Human health (Salud Humana)		Para dosificación		2				
Categoría de impacto	Unidad Openconcrete	Valor Openconcrete	Factor de caracterización	Unidad Punto Medio (ReCIPe)	Valor CFm Punto medio	Unidad de Fm (factor de punto medio a final)	Valor Fm	Cfe (Punto Final en DALY)
Cambio Climático	kg GHG (CO2 eq.)	258,8		1,0 kg CO2 eq.	258,7760	DALY/kg CO2 eq.	1,25E-05	3,23E-03
Formación de materia particulada fina	kg PM2.5	0,335		0,19 kg PM2.5 eq.	0,0636	DALY/kg PM2.5 eq.	6,29E-04	4,00E-05
Formación fotoquímica de ozono (smog)	kg NOX	0,095		0,94 kg NOx eq.	0,0892	DALY/kg NOx eq.	9,10E-07	8,12E-08
Toxicidad en humanos (cancer)	kg Pb	0,0151		6,88 kg 1,4-DCB	0,1037	DALY/kg 1,4-DCB	3,32E-06	3,44E-07
Uso del agua	kg Consumo de agua	2257,1		0,001 m3 Consumo de agua	2,2571	Daly/m3 Consumo de agua	2,15E-08	4,85E-08
3,28E-03								
ReCIPe Human health (Salud Humana)		Para dosificación		3				
Categoría de impacto	Unidad Openconcrete	Valor Openconcrete	Factor de caracterización	Unidad Punto Medio (ReCIPe)	Valor CFm Punto medio	Unidad de Fm (factor de punto medio a final)	Valor Fm	Cfe (Punto Final en DALY)
Cambio Climático	kg GHG (CO2 eq.)	233,5		1,0 kg CO2 eq.	233,4980	DALY/kg CO2 eq.	1,25E-05	2,92E-03
Formación de materia particulada fina	kg PM2.5	0,325		0,19 kg PM2.5 eq.	0,0618	DALY/kg PM2.5 eq.	6,29E-04	3,89E-05
Formación fotoquímica de ozono (smog)	kg NOX	0,086		0,94 kg NOx eq.	0,0809	DALY/kg NOx eq.	9,10E-07	7,36E-08
Toxicidad en humanos (cancer)	kg Pb	0,0136		6,88 kg 1,4-DCB	0,0933	DALY/kg 1,4-DCB	3,32E-06	3,10E-07
Uso del agua	kg Consumo de agua	2208,3		0,001 m3 Consumo de agua	2,2083	Daly/m3 Consumo de agua	2,15E-08	4,75E-08
2,96E-03								
ReCIPe Human health (Salud Humana)		Para dosificación		4				
Categoría de impacto	Unidad Openconcrete	Valor Openconcrete	Factor de caracterización	Unidad Punto Medio (ReCIPe)	Valor CFm Punto medio	Unidad de Fm (factor de punto medio a final)	Valor Fm	Cfe (Punto Final en DALY)
Cambio Climático	kg GHG (CO2 eq.)	207,0		1,0 kg CO2 eq.	206,9908	DALY/kg CO2 eq.	1,25E-05	2,59E-03
Formación de materia particulada fina	kg PM2.5	0,315		0,19 kg PM2.5 eq.	0,0598	DALY/kg PM2.5 eq.	6,29E-04	3,76E-05
Formación fotoquímica de ozono (smog)	kg NOX	0,077		0,94 kg NOx eq.	0,0726	DALY/kg NOx eq.	9,10E-07	6,61E-08
Toxicidad en humanos (cancer)	kg Pb	0,0119		6,88 kg 1,4-DCB	0,0821	DALY/kg 1,4-DCB	3,32E-06	2,73E-07
Uso del agua	kg Consumo de agua	2181,5		0,001 m3 Consumo de agua	2,1815	Daly/m3 Consumo de agua	2,15E-08	4,69E-08
2,63E-03								
ReCIPe Human health (Salud Humana)		Para dosificación		5				
Categoría de impacto	Unidad Openconcrete	Valor Openconcrete	Factor de caracterización	Unidad Punto Medio (ReCIPe)	Valor CFm Punto medio	Unidad de Fm (factor de punto medio a final)	Valor Fm	Cfe (Punto Final en DALY)
Cambio Climático	kg GHG (CO2 eq.)	236,8		1,0 kg CO2 eq.	236,8066	DALY/kg CO2 eq.	1,25E-05	2,96E-03
Formación de materia particulada fina	kg PM2.5	0,319		0,19 kg PM2.5 eq.	0,0607	DALY/kg PM2.5 eq.	6,29E-04	3,82E-05
Formación fotoquímica de ozono (smog)	kg NOX	0,099		0,94 kg NOx eq.	0,0933	DALY/kg NOx eq.	9,10E-07	8,49E-08
Toxicidad en humanos (cancer)	kg Pb	0,0125		6,88 kg 1,4-DCB	0,0863	DALY/kg 1,4-DCB	3,32E-06	2,86E-07
Uso del agua	kg Consumo de agua	2686,3		0,001 m3 Consumo de agua	2,6863	Daly/m3 Consumo de agua	2,15E-08	5,78E-08
3,00E-03								
ReCIPe Human health (Salud Humana)		Para dosificación		6				
Categoría de impacto	Unidad Openconcrete	Valor Openconcrete	Factor de caracterización	Unidad Punto Medio (ReCIPe)	Valor CFm Punto medio	Unidad de Fm (factor de punto medio a final)	Valor Fm	Cfe (Punto Final en DALY)
Cambio Climático	kg GHG (CO2 eq.)	214,5		1,0 kg CO2 eq.	214,4976	DALY/kg CO2 eq.	1,25E-05	2,68E-03
Formación de materia particulada fina	kg PM2.5	0,308		0,19 kg PM2.5 eq.	0,0586	DALY/kg PM2.5 eq.	6,29E-04	3,68E-05
Formación fotoquímica de ozono (smog)	kg NOX	0,096		0,94 kg NOx eq.	0,0902	DALY/kg NOx eq.	9,10E-07	8,21E-08
Toxicidad en humanos (cancer)	kg Pb	0,0108		6,88 kg 1,4-DCB	0,0740	DALY/kg 1,4-DCB	3,32E-06	2,46E-07
Uso del agua	kg Consumo de agua	2825,9		0,001 m3 Consumo de agua	2,8259	Daly/m3 Consumo de agua	2,15E-08	6,08E-08
2,72E-03								
ReCIPe Human health (Salud Humana)		Para dosificación		7				
Categoría de impacto	Unidad Openconcrete	Valor Openconcrete	Factor de caracterización	Unidad Punto Medio (ReCIPe)	Valor CFm Punto medio	Unidad de Fm (factor de punto medio a final)	Valor Fm	Cfe (Punto Final en DALY)
Cambio Climático	kg GHG (CO2 eq.)	191,8		1,0 kg CO2 eq.	191,7537	DALY/kg CO2 eq.	1,25E-05	2,40E-03
Formación de materia particulada fina	kg PM2.5	0,297		0,19 kg PM2.5 eq.	0,0565	DALY/kg PM2.5 eq.	6,29E-04	3,55E-05
Formación fotoquímica de ozono (smog)	kg NOX	0,092		0,94 kg NOx eq.	0,0867	DALY/kg NOx eq.	9,10E-07	7,89E-08
Toxicidad en humanos (cancer)	kg Pb	0,0090		6,88 kg 1,4-DCB	0,0616	DALY/kg 1,4-DCB	3,32E-06	2,05E-07
Uso del agua	kg Consumo de agua	2951,1		0,001 m3 Consumo de agua	2,9511	Daly/m3 Consumo de agua	2,15E-08	6,34E-08
2,43E-03								
ReCIPe Human health (Salud Humana)		Para dosificación		8				
Categoría de impacto	Unidad Openconcrete	Valor Openconcrete	Factor de caracterización	Unidad Punto Medio (ReCIPe)	Valor CFm Punto medio	Unidad de Fm (factor de punto medio a final)	Valor Fm	Cfe (Punto Final en DALY)
Cambio Climático	kg GHG (CO2 eq.)	187,0		1,0 kg CO2 eq.	187,0146	DALY/kg CO2 eq.	1,25E-05	2,34E-03
Formación de materia particulada fina	kg PM2.5	0,300		0,19 kg PM2.5 eq.	0,0569	DALY/kg PM2.5 eq.	6,29E-04	3,58E-05
Formación fotoquímica de ozono (smog)	kg NOX	0,083		0,94 kg NOx eq.	0,0781	DALY/kg NOx eq.	9,10E-07	7,11E-08
Toxicidad en humanos (cancer)	kg Pb	0,0094		6,88 kg 1,4-DCB	0,0649	DALY/kg 1,4-DCB	3,32E-06	2,15E-07
Uso del agua	kg Consumo de agua	2650,4		0,001 m3 Consumo de agua	2,6504	Daly/m3 Consumo de agua	2,15E-08	5,70E-08
2,37E-03								

Anexo J. Costos detallados del transporte de Cenizas Volantes mediante la herramienta SICE-TAC

Cuentas Operativas - Detalle					
Tipo de costo	Concepto	Valor Mês	Valor por viaje	Valor por tonelada	Participación
FGI	Capital	\$1,062,000.00	\$1,284,617.36	\$37,764.26	23.12%
FGI	Comunicaciones	\$255,000.00	\$30,522.58	\$1,050.85	0.62%
FGI	Costos Adicionales Gravel Subido	\$200,000.00	\$46,540.66	\$1,248.06	0.77%
FGI	Impuestos Federales	\$90,000.00	\$10,899.05	\$30.17	0.02%
FGI	Participación	\$500,000.00	\$108,632.39	\$3,022.96	1.79%
FGI	Reserva Técnica Médica	\$42,000.00	\$9,199.08	\$259.57	0.17%
FGI	Salario 1.0 (SAR) + Prestaciones (SAR) + Vacaciones (SAR) + Seguro	\$2,100,000.00	\$476,132.87	\$13,219.33	13.12%
FGI	Seguros Social	\$147,000.00	\$32,289.69	\$900.49	0.52%
FGI	Seguros Automóvil	\$1,100,000.00	\$239,637.26	\$6,742.19	3.83%
Subtotal	Costos Fijos	\$11,260,075.00	\$2,472,796.76	\$70,759.55	40.47%
VARIABL	Combustible	\$0.00	\$1,284,617.40	\$35,829.24	17.82%
VARIABL	Repaso	\$0.00	\$211,680.00	\$5,829.45	1.69%
VARIABL	Cuentas	\$0.00	\$228,755.95	\$6,448.70	2.99%
VARIABL	Lubricantes	\$0.00	\$65,730.71	\$1,821.49	1.41%
VARIABL	Pérdida	\$0.00	\$36,739.75	\$1,080.59	0.84%
VARIABL	Mantenimiento y Reparación	\$0.00	\$119,521.08	\$3,300.52	2.22%
VARIABL	Luz y Energía	\$0.00	\$29,190.77	\$805.91	0.69%
VARIABL	Impuestos (2.5%)	\$107,148.76	\$24,031.19	\$679.14	0.98%
Subtotal	Costos Variables	\$0.00	\$2,460,099.99	\$70,049.29	40.09%
OTROS	Comercialización + Sector Productivo (S. 2016) + C. 2017%	\$1,100,000.00	\$436,709.02	\$12,769.15	15.42%
OTROS	Factor administrativo	\$1,100,000.00	\$436,709.02	\$12,769.15	15.42%
OTROS	Reserva + CA (1% + 0.2%) + 1.2%	\$1,100,000.00	\$436,709.02	\$12,769.15	15.42%
Subtotal	Otros Costos	\$0.00	\$873,418.04	\$25,538.30	13.79%
TOTAL	Costos de Operación	\$0.00	\$3,346,294	\$175,070.41	100%

Resumen de la operación			
Miles máximos del mes	222		
Valor (en millones) por hora	\$4,010.00	Tarifa de la configuración	\$4

Por el tipo de servicio y combustible						
Más	Total Miles	Placa	Incluido	Moneda	Reserva de horas	Afrentado
Operación (vía)	611.00	484.74	66.24	75.75	11.00	0.31
Operación (Promedio (vía))		96.24	23.22	23.22	23.22	19.00
Placa de viaje	14.00	0.02	2.34	0.00	0.47	0.00
Consumo de combustible (litros/gal)	4.80	3.39	0.42	0.42	0.40	2.07
Reserva combustible	\$1,062,075.40	\$480,144.00	\$163,879.90	\$202,774.27	\$11,269.96	\$1,448.32
Miles Reserva (vía) + Expendio	\$2.00					
Reserva en el día	15.0000					
Reserva en el Mes (Incluido Vía) + Expendio	6.0000					

Resumen de viajes				
Nombre Peaje	Sector	Valor Peaje	Categoría	
TEPEPA	Región de Chiapas - Chiapas - La Florida - 27 Vías - Vías AMERICAS SENTIDOS	\$16,780.00	18	
CHICUMBI	LA FORTUNA - Región de Chiapas - Chiapas - La Florida - 81 Vías - Vías BOGOTÁ AMERICAS SENTIDOS	\$56,160.00	9	
BOGOTÁ AMERICAS	Vías - Honda - Guatemala - Vías AMERICAS	\$48,580.00	9	
HONDÁ	AMERICAS SENTIDOS TOLUÁ - HONDÁ TOLUÁ KM 20 + 100 AMERICAS SENTIDOS	\$49,760.00	16	
LA LINDA	AMERICAS SENTIDOS TOLUÁ - LA LINDA TOLUÁ KM 20 + 100 AMERICAS SENTIDOS	\$49,760.00	16	
COCEBRA	Coahuila - Coahuila - Coahuila - Coahuila - Coahuila	\$22,880.00	9	
TOLUÁ DE LA LINDA TOLUÁ	La Florida - Coahuila - Coahuila - Coahuila - Coahuila	\$49,760.00	9	
COCEBRA	LA AMERICA - PUEBLO VIEJO - 70 AMERICAS SENTIDOS	\$49,760.00	18	
LA AMERICA	Vías Américas + de Coahuila México con 96 SUR AMERICAS	\$44,000.00	9	
LA AMERICA	Vías Américas Coahuila KM 12 + 100 AMERICAS SENTIDOS	\$10,000.00	9	
LA AMERICA	Vías Coahuila con 10 + 100 AMERICAS SENTIDOS	\$10,000.00	9	
EL COCEBRA	Vías Coahuila con 42 + 100 AMERICAS SENTIDOS	\$10,000.00	9	
COCEBRA	Vías Américas - Coahuila con 11 SUR AMERICAS	\$10,000.00	9	

Resumen de horas					
Nombre Cliente	Valor Unidad	Cantidad	Frecuencia de cambios	Costo a \$M	Costo Viaje
Operación (vía)	\$2,141,137.00	0.0	60.000	\$31.50	\$6,084.71
Luz de Tracción	\$2,442,000.00	0.0	60.000	\$27.70	\$16,527.70
Operación (vía)	\$2,735,070.00	0.0	110.000	\$24.86	\$15,540.00

Resumen de vehículos					
Nombre	Valor Saldo	Cantidad	Frecuencia de cambios	Costo a \$M	Costo Viaje
Vehículos Carga	\$14,000.00	0.0	60.000	\$6.70	\$6,715.24
Vehículos Diferenciales	\$12,000.00	1.20	60.000	\$17.70	\$11,902.87
Vehículos Motor	\$10,000.00	1.00	11.000	\$19.50	\$6,000.00

Anexo K. Costos detallados del transporte de Cenizas Volantes mediante la herramienta SICE-TAC (continuación).

Facturación de Bienes					
Nombre	Valor Unidad	Cantidad	Frecuencia de Cobro	Costo e RM	Costo Viaje
Filtro Aire	\$332,158.00	2.0	60,000	\$11.74	\$7,238.00
Filtro Colector primario	\$62,801.00	2.0	12,000	\$11.98	\$4,116.00
Filtro Trampa de Cenizas volantes	\$167,173.00	1.0	80,000	\$2.09	\$1,962.27
Filtro de Agua Motor	\$117,259.00	2.0	12,000	\$25.27	\$16,431.48
Filtro Bypass	\$47,766.00	1.0	12,000	\$5.58	\$2,594.81
Facturación de Mantenimiento y Repuestos					
Nombre	Valor Unidad	Cantidad	Frecuencia de Cobro	Costo e RM	Costo Viaje
Motor de arranque	\$1,432,960.00	1.0	120,000	\$4.79	\$1,126.92
Bateria	\$366,823.48	1.0	120,000	\$3.06	\$1,982.72
Alternador	\$2,833,423.00	1.0	120,000	\$7.50	\$5,141.34
Sensores	\$5,962,192.00	1.0	274,000	\$27.62	\$17,864.27
Luzes	\$766,652.00	1.0	274,000	\$3.68	\$2,298.23
Accesorios	\$1,642,712.00	1.0	288,000	\$5.72	\$3,248.87
Reservorio Motor	\$38,202,426.00	1.0	360,000	\$199.91	\$71,752.35
Reservorio Corriente Turbin	\$5,089,536.00	1.0	268,000	\$26.82	\$97,247.68
Impulsoras	\$2,232,274.00	1.0	302,000	\$4.42	\$4,363.02
Servicio de Operación	\$5,339,901.00	1.0	368,000	\$19.13	\$6,988.02
Autogramas	\$395,798.00	1.0	144,000	\$2.75	\$1,288.85
Radador	\$4,537,877.00	1.0	386,000	\$49.32	\$5,877.54
Manguera Radador	\$102,884.00	1.0	144,000	\$3.71	\$462.84
Bombas de Agua	\$1,817,786.00	1.0	702,000	\$8.36	\$1,472.05
Van-Club	\$4,223,176.00	1.0	702,000	\$22.29	\$14,339.35
Olivo	\$104,568.00	1.0	702,000	\$1.94	\$1,267.94
Pluma	\$4,174,496.00	1.0	702,000	\$27.74	\$14,771.28
Refractarios Endogel	\$385,569.00	1.0	702,000	\$2.21	\$1,208.87
Servicio Principal 110v/240v	\$3,279,827.00	1.0	384,000	\$8.54	\$9,035.77
Servicio Auxiliar 110v/240v	\$426,744.00	1.0	288,000	\$4.47	\$961.49
Instalación Caja de Transformador	\$6,784,412.00	1.0	384,000	\$17.66	\$17,489.54
Refractarios y Refractarios En Estacion 1	\$1,189,538.00	2.0	70,000	\$33.99	\$12,847.82
Refractarios y Refractarios En Tramo 1	\$1,189,538.00	1.0	70,000	\$16.47	\$10,729.81
Subestación En Estacion 1	\$1,561,946.00	1.0	144,000	\$48.07	\$6,268.28
Subestación En Tramo 1	\$1,091,824.00	1.0	144,000	\$47.58	\$4,242.64
Subest. de Frenos En Estacion 1	\$3,327,931.00	1.0	188,000	\$39.81	\$25,087.74
Caja Dirección	\$5,788,911.00	1.0	360,000	\$17.96	\$10,391.96
Servicio Hidráulica Dirección	\$1,429,447.00	1.0	360,000	\$4.34	\$2,452.21
Brazos de Dirección	\$476,240.00	1.0	274,000	\$5.72	\$3,049.87
Compuetes	\$2,475,736.00	1.0	274,000	\$11.45	\$7,665.81
Válvulas y Control	\$964,994.00	1.0	144,000	\$6.70	\$4,365.77
Mangueras	\$326,154.00	1.0	32,000	\$4.87	\$6,988.72
Valves	\$1,287,744.00	1.0	144,000	\$8.96	\$1,467.25
Espejos	\$386,805.00	1.0	144,000	\$2.77	\$1,805.82
Estabilizadores Transversales	\$7,096,821.00	1.0	360,000	\$19.72	\$12,856.38
Carroa Colapsable	\$5,423,447.00	1.0	360,000	\$15.07	\$9,821.32
Lubricante sintético	\$1,248,277.00	1.0	360,000	\$3.48	\$1,278.82
Tallería Accesorios Tractor	\$702,858.00	1.0	360,000	\$2.08	\$1,278.82
Facturación de Servicios y Espinas					
Nombre	Valor Unidad	Cantidad	Frecuencia de Cobro	Costo e RM	Costo Viaje
Luzes	\$223,807.00	1.0	10,000	\$22.38	\$14,558.42
Tringales	\$223,807.00	1.0	10,000	\$22.38	\$14,558.42
Notas actualizaciones					
Fecha	Descripción de la actualización				
2024/07/01	Con la actualización del mes de julio de 2024, se adicionan 26 nuevas notas.				
2024/06/05	Se adicionan 12 notas alteras por reparación en Fagardo Bopala.				
2024/03/18	Se adicionan 120 notas alteras que midan por Bogotá y en la altera van la vía por Cota y Nariño a Obispo.				
2023/02/23	Se adiciona una altera entre La Calzada Pástor Hoyo y La Hacha Toluca Hoya, ida y regreso.				
2023/01/19	Se adicionan 10 notas alteras, desde Sopranos, Duzbarré y Torca hasta Aguadulce y Ingal.				

Anexo M. Costos detallados del transporte de Escorias mediante la herramienta SICE-TAC (continuación).

Materiales de Pisos					
Nombre	Valor Unidad	Cantidad	Porcentaje de cambio	Costo a RM	Costo Majo
Módulo	\$122,758.00	2.0	60.00%	\$71.71	\$1,522.71
Módulo Combustible (litros)	\$60,000.00	2.0	12.00%	\$12.00	\$9,600.00
Módulo Transporte de Combustible (litros)	\$167,770.00	1.0	80.00%	\$167.77	\$1,677.70
Módulo de Acido Motor	\$114,256.00	2.0	12.00%	\$114.26	\$1,027.56
Módulo Seguro	\$47,754.00	1.0	12.00%	\$47.75	\$2,086.75
Materiales de Mantenimiento y Reparación					
Nombre	Valor Unidad	Cantidad	Porcentaje de cambio	Costo a RM	Costo Majo
Módulo de arranque	\$1,333,996.00	1.0	100.00%	\$1,333.99	\$3,347.32
Módulo	\$266,823.00	1.0	120.00%	\$266.82	\$2,076.07
Alternador	\$2,222,423.00	1.0	220.00%	\$2,222.42	\$5,302.07
Servicio	\$2,962,050.00	1.0	274.00%	\$2,962.05	\$18,036.40
Luzes	\$794,632.00	1.0	274.00%	\$794.63	\$2,481.55
Accesorios	\$1,412,712.00	1.0	268.00%	\$1,412.71	\$3,791.54
Reparación Motor	\$36,265,400.00	1.0	300.00%	\$36,265.40	\$70,552.60
Reparación y Cambio Filtro	\$1,080,266.00	1.0	270.00%	\$1,080.27	\$12,763.29
Impulsor	\$2,352,233.00	1.0	300.00%	\$2,352.23	\$4,513.54
Bombas de Impulsión	\$1,328,891.00	1.0	300.00%	\$1,328.89	\$1,201.06
Refrigerante	\$304,786.00	1.0	144.00%	\$304.79	\$1,440.71
Radador	\$4,307,877.00	1.0	300.00%	\$4,307.88	\$6,736.62
Módulo y Motor	\$702,264.00	1.0	144.00%	\$702.26	\$481.09
Bombas de Agua	\$1,471,236.00	1.0	192.00%	\$1,471.24	\$3,485.46
Car Ducha	\$4,333,376.00	1.0	192.00%	\$4,333.38	\$14,888.21
Shower	\$274,343.00	1.0	192.00%	\$274.34	\$1,109.07
Pintura	\$4,774,446.00	1.0	192.00%	\$4,774.45	\$14,727.24
Asesoría e Instalación	\$280,586.00	1.0	192.00%	\$280.59	\$1,260.07
Bomba Principal Frío/Caliente	\$2,219,627.00	1.0	304.00%	\$2,219.63	\$5,853.15
Bomba Auxiliar Frío/Caliente	\$424,764.00	1.0	268.00%	\$424.76	\$994.96
Reparación Caja de velocidades	\$6,764,412.00	1.0	300.00%	\$6,764.41	\$14,896.40
Mantenimiento y Reparaciones (C/ Detallado) I	\$1,580,238.00	2.0	72.00%	\$790.12	\$22,239.40
Mantenimiento y Reparaciones (C/ Trabajo) I	\$1,340,338.00	1.0	72.00%	\$1,340.34	\$14,712.30
Suplemento (C/ Detallado) I	\$1,504,894.00	1.0	144.00%	\$1,504.89	\$5,465.07
Suplemento (C/ Trabajo) I	\$1,291,824.00	1.0	144.00%	\$1,291.82	\$1,735.74
Sistema de Frenos (C/ Detallado) I	\$2,527,821.00	1.0	108.00%	\$2,527.82	\$25,871.86
Caja Dirección	\$2,738,961.00	1.0	300.00%	\$2,738.96	\$10,796.00
Bomba Hidráulica Dirección	\$1,453,447.00	1.0	300.00%	\$1,453.45	\$2,735.28
Bombas de Dirección	\$275,243.00	1.0	274.00%	\$275.24	\$2,733.01
Componente	\$2,475,738.00	1.0	274.00%	\$2,475.74	\$7,707.31
Alfombras y Cojines	\$964,292.00	1.0	144.00%	\$964.29	\$4,336.34
Módulos	\$205,754.00	1.0	72.00%	\$205.75	\$2,086.36
Motor	\$1,207,714.00	1.0	144.00%	\$1,207.71	\$1,660.07
Espejo	\$948,945.00	1.0	144.00%	\$948.95	\$1,876.28
Conexiones Transmisiones	\$7,086,621.00	1.0	300.00%	\$7,086.62	\$13,236.76
Cables Control	\$2,423,447.00	1.0	300.00%	\$2,423.45	\$10,224.74
Lubricación primera	\$1,248,217.00	1.0	300.00%	\$1,248.22	\$2,994.79
Repuestos Accesorios internos	\$750,000.00	1.0	300.00%	\$750.00	\$1,411.15
Materiales de Luces y Signos					
Nombre	Valor Unidad	Cantidad	Porcentaje de cambio	Costo a RM	Costo Majo
Luces	\$225,207.00	1.0	76.00%	\$225.21	\$10,718.80
Signos	\$225,207.00	1.0	76.00%	\$225.21	\$10,718.80
Notas aclaratorias					
Fecha	Descripción de la actualización				
2024/01/01	Con la actualización de precios de julio de 2024, se adicionan 24 nuevos ítems.				
2024/02/01	Se adicionan 12 ítems alternos por institución en Puerto España.				
2024/03/18	Se adicionan 134 ítems alternos que incluyen Signos y en la misma sede la Alcantara Colores Partes e Interiores.				
2024/03/22	Se adiciona ítem alterno entre La Cañada Pinar del Río y La Hacha Trujillo Alto, BQ y negro.				
2024/01/15	Se adicionan 18 ítems alternos, desde Seguros, Daños y Tarifa hacia Aguas y Traslado.				
Total					

Anexo N. Análisis de precios unitarios para concreto 20% CV.

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Item: Concreto 4000 PSI o 28 Mpa con 20% Cenizas Volantes (incluye transporte a obra)		Unidad	m ³		
Equipo					
Descripción	Unidad	Cantidad	Rendimiento	Vr. Unitario	Vr. Total
Planta dosificadora (mezcladora) de concreto	h	1	0,0125	\$ 160.118,19	\$ 2.001,48
Subtotal Equipo					\$ 2.001,48
Materiales					
Descripción	Unidad	Cantidad		Vr. Unitario	Vr. Total
Cemento	kg	307,3		\$ 789,51	\$ 242.617,87
Escoria	kg	0,0		\$ 0,00	\$ 0,00
Cenizas Volantes	kg	77,1		\$ 0,00	\$ 0,00
Agregado grueso	kg	994,8		\$ 48,48	\$ 48.225,83
Agregado fino	kg	743,8		\$ 31,00	\$ 23.059,37
Aditivo Acelerante	kg	0,56		\$ 16.214,17	\$ 9.079,93
Aditivo incorporador de aire	kg	0,04		\$ 3.095,28	\$ 123,81
Aditivo reductor de agua y acelerante	kg	0,11		\$ 9.856,82	\$ 1.084,25
Agua	kg	154,8		\$ 69,91	\$ 10.822,07
Subtotal Materiales					\$ 335.013,14
Transporte					
Descripción	Unidad	Cantidad	Distancia	Vr. Unitario	Vr. Total
Transporte de cemento	kg-km	307,3	7,5	\$ 0,75	\$ 1.739,91
Transporte de agregado grueso	m3-km	0,8	6,0	\$ 926,68	\$ 4.272,81
Transporte de agregado fino	m3-km	0,5	6,0	\$ 1.063,27	\$ 3.136,68
Transporte de cenizas volanes	kg-km	77,1	491,5	\$ 0,27	\$ 10.409,66
Transporte de escoria	kg-km	0,0	676,1	\$ 0,29	\$ 0,00
Transporte de concreto	m3-km	1,0	23,0	\$ 1.450,79	\$ 33.368,26
Subtotal Transporte					\$ 52.927,32
COSTO TOTAL DIRECTO					\$ 389.941,93
COSTOS INDIRECTOS					
Administración		22%		\$ 85.787,23	
Imprevistos		2%		\$ 7.798,84	
Utilidad		5%		\$ 19.497,10	
Total AIU		29%		\$ 113.083,16	
IVA sobre utilidad		19%		\$ 3.704,45	
COSTO TOTAL INDIRECTO					\$ 116.787,61
COSTO TOTAL					\$ 506.729,54

Anexo O. Análisis de precios unitarios para concreto 30% CV.

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Item: Concreto 4000 PSI o 28 Mpa con 30% Cenizas Volantes (incluye transporte a obra)		Unidad	m ³		
Equipo					
Descripción	Unidad	Cantidad	Rendimiento	Vr. Unitario	Vr. Total
Planta dosificadora (mezcladora) de concreto	h	1	0,0125	\$ 160.118,19	\$ 2.001,48
Subtotal Equipo					\$ 2.001,48
Materiales					
Descripción	Unidad	Cantidad		Vr. Unitario	Vr. Total
Cemento	kg	276,5		\$ 789,51	\$ 218.300,82
Escoria	kg	0,0		\$ 0,00	\$ 0,00
Cenizas Volantes	kg	118,7		\$ 0,00	\$ 0,00
Agregado grueso	kg	994,8		\$ 48,48	\$ 48.225,83
Agregado fino	kg	743,8		\$ 31,00	\$ 23.059,37
Aditivo Acelerante	kg	0,56		\$ 16.214,17	\$ 9.079,93
Aditivo incorporador de aire	kg	0,06		\$ 3.095,28	\$ 185,72
Aditivo reductor de agua y acelerante	kg	0,11		\$ 9.856,82	\$ 1.084,25
Agua	kg	154,8		\$ 69,91	\$ 10.822,07
Subtotal Materiales					\$ 310.757,99
Transporte					
Descripción	Unidad	Cantidad	Distancia	Vr. Unitario	Vr. Total
Transporte de cemento	kg-km	276,5	7,5	\$ 0,75	\$ 1.565,52
Transporte de agregado grueso	m3-km	0,8	6,0	\$ 926,68	\$ 4.272,81
Transporte de agregado fino	m3-km	0,5	6,0	\$ 1.063,27	\$ 3.136,68
Transporte de cenizas volanes	kg-km	118,7	491,5	\$ 0,27	\$ 16.026,29
Transporte de escoria	kg-km	0,0	676,1	\$ 0,29	\$ 0,00
Transporte de concreto	m3-km	1,0	23,0	\$ 1.450,79	\$ 33.368,26
Subtotal Transporte					\$ 58.369,56
COSTO TOTAL DIRECTO					\$ 371.129,02
COSTOS INDIRECTOS					
Administración				22%	\$ 81.648,39
Imprevistos				2%	\$ 7.422,58
Utilidad				5%	\$ 18.556,45
Total AIU				29%	\$ 107.627,42
IVA sobre utilidad				19%	\$ 3.525,73
COSTO TOTAL INDIRECTO					\$ 111.153,14
COSTO TOTAL					\$ 482.282,17

Anexo P. Análisis de precios unitarios para concreto 40% CV.

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Item: Concreto 4000 PSI o 28 Mpa con 40% Cenizas Volantes (incluye transporte a obra)		Unidad	m ³		
Equipo					
Descripción	Unidad	Cantidad	Rendimiento	Vr. Unitario	Vr. Total
Planta dosificadora (mezcladora) de concreto	h	1	0,0125	\$ 160.118,19	\$ 2.001,48
Subtotal Equipo					\$ 2.001,48
Materiales					
Descripción	Unidad	Cantidad		Vr. Unitario	Vr. Total
Cemento	kg	243,2		\$ 789,51	\$ 192.009,98
Escoria	kg	0,0		\$ 0,00	\$ 0,00
Cenizas Volantes	kg	162,6		\$ 0,00	\$ 0,00
Agregado grueso	kg	994,8		\$ 48,48	\$ 48.225,83
Agregado fino	kg	743,8		\$ 31,00	\$ 23.059,37
Aditivo Acelerante	kg	0,93		\$ 16.214,17	\$ 15.079,18
Aditivo incorporador de aire	kg	0,06		\$ 3.095,28	\$ 185,72
Aditivo reductor de agua y acelerante	kg	0,11		\$ 9.856,82	\$ 1.084,25
Agua	kg	154,8		\$ 69,91	\$ 10.822,07
Subtotal Materiales					\$ 290.466,39
Transporte					
Descripción	Unidad	Cantidad	Distancia	Vr. Unitario	Vr. Total
Transporte de cemento	kg-km	243,2	7,5	\$ 0,75	\$ 1.376,98
Transporte de agregado grueso	m3-km	0,8	6,0	\$ 926,68	\$ 4.272,81
Transporte de agregado fino	m3-km	0,5	6,0	\$ 1.063,27	\$ 3.136,68
Transporte de cenizas volanes	kg-km	162,6	491,5	\$ 0,27	\$ 21.953,45
Transporte de escoria	kg-km	0,0	676,1	\$ 0,29	\$ 0,00
Transporte de concreto	m3-km	1,0	23,0	\$ 1.450,79	\$ 33.368,26
Subtotal Transporte					\$ 64.108,17
COSTO TOTAL DIRECTO					\$ 356.576,05
COSTOS INDIRECTOS					
Administración				22%	\$ 78.446,73
Imprevistos				2%	\$ 7.131,52
Utilidad				5%	\$ 17.828,80
Total AIU				29%	\$ 103.407,05
IVA sobre utilidad				19%	\$ 3.387,47
COSTO TOTAL INDIRECTO					\$ 106.794,53
COSTO TOTAL					\$ 463.370,57

Anexo Q. Análisis de precios unitarios para concreto 30% E.

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Item: Concreto 4000 PSI o 28 Mpa con 30% de Escoria (incluye transporte a obra)		Unidad	m ³		
Equipo					
Descripción	Unidad	Cantidad	Rendimiento	Vr. Unitario	Vr. Total
Planta dosificadora (mezcladora) de concreto	h	1	0,0125	\$ 160.118,19	\$ 2.001,48
Subtotal Equipo					\$ 2.001,48
Materiales					
Descripción	Unidad	Cantidad		Vr. Unitario	Vr. Total
Cemento	kg	255,6		\$ 789,51	\$ 201.799,96
Escoria	kg	109,6		\$ 0,00	\$ 0,00
Cenizas Volantes	kg	0,0		\$ 0,00	\$ 0,00
Agregado grueso	kg	994,8		\$ 48,48	\$ 48.225,83
Agregado fino	kg	743,8		\$ 31,00	\$ 23.059,37
Aditivo Acelerante	kg	0,56		\$ 16.214,17	\$ 9.079,93
Aditivo incorporador de aire	kg	0,04		\$ 3.095,28	\$ 123,81
Aditivo reductor de agua y acelerante	kg	0,11		\$ 9.856,82	\$ 1.084,25
Agua	kg	154,8		\$ 69,91	\$ 10.822,07
Subtotal Materiales					\$ 294.195,23
Transporte					
Descripción	Unidad	Cantidad	Distancia	Vr. Unitario	Vr. Total
Transporte de cemento	kg-km	255,6	7,5	\$ 0,75	\$ 1.447,19
Transporte de agregado grueso	m3-km	0,8	6,0	\$ 926,68	\$ 4.272,81
Transporte de agregado fino	m3-km	0,5	6,0	\$ 1.063,27	\$ 3.136,68
Transporte de cenizas volanes	kg-km	0,0	491,5	\$ 0,27	\$ 0,00
Transporte de escoria	kg-km	109,6	676,1	\$ 0,29	\$ 21.191,28
Transporte de concreto	m3-km	1,0	23,0	\$ 1.450,79	\$ 33.368,26
Subtotal Transporte					\$ 63.416,21
COSTO TOTAL DIRECTO					\$ 359.612,92
COSTOS INDIRECTOS					
Administración				22%	\$ 79.114,84
Imprevistos				2%	\$ 7.192,26
Utilidad				5%	\$ 17.980,65
Total AIU				29%	\$ 104.287,75
IVA sobre utilidad				19%	\$ 3.416,32
COSTO TOTAL INDIRECTO					\$ 107.704,07
COSTO TOTAL					\$ 467.316,99

Anexo R. Análisis de precios unitarios para concreto 40% E.

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Item: Concreto 4000 PSI o 28 Mpa con 40% de Escoria (incluye transporte a obra)		Unidad	m ³		
Equipo					
Descripción	Unidad	Cantidad	Rendimiento	Vr. Unitario	Vr. Total
Planta dosificadora (mezcladora) de concreto	h	1	0,0125	\$ 160.118,19	\$ 2.001,48
Subtotal Equipo					\$ 2.001,48
Materiales					
Descripción	Unidad	Cantidad		Vr. Unitario	Vr. Total
Cemento	kg	219,1		\$ 789,51	\$ 172.982,67
Escoria	kg	146,1		\$ 0,00	\$ 0,00
Cenizas Volantes	kg	0,0		\$ 0,00	\$ 0,00
Agregado grueso	kg	994,8		\$ 48,48	\$ 48.225,83
Agregado fino	kg	743,8		\$ 31,00	\$ 23.059,37
Aditivo Acelerante	kg	0,93		\$ 16.214,17	\$ 15.079,18
Aditivo incorporador de aire	kg	0,04		\$ 3.095,28	\$ 123,81
Aditivo reductor de agua y acelerante	kg	0,11		\$ 9.856,82	\$ 1.084,25
Agua	kg	154,8		\$ 69,91	\$ 10.822,07
Subtotal Materiales					\$ 271.377,18
Transporte					
Descripción	Unidad	Cantidad	Distancia	Vr. Unitario	Vr. Total
Transporte de cemento	kg-km	219,1	7,5	\$ 0,75	\$ 1.240,53
Transporte de agregado grueso	m3-km	0,8	6,0	\$ 926,68	\$ 4.272,81
Transporte de agregado fino	m3-km	0,5	6,0	\$ 1.063,27	\$ 3.136,68
Transporte de cenizas volanes	kg-km	0,0	491,5	\$ 0,27	\$ 0,00
Transporte de escoria	kg-km	146,1	676,1	\$ 0,29	\$ 28.248,59
Transporte de concreto	m3-km	1,0	23,0	\$ 1.450,79	\$ 33.368,26
Subtotal Transporte					\$ 70.266,87
COSTO TOTAL DIRECTO					\$ 343.645,53
COSTOS INDIRECTOS					
Administración				22%	\$ 75.602,02
Imprevistos				2%	\$ 6.872,91
Utilidad				5%	\$ 17.182,28
Total AIU				29%	\$ 99.657,20
IVA sobre utilidad				19%	\$ 3.264,63
COSTO TOTAL INDIRECTO					\$ 102.921,84
COSTO TOTAL					\$ 446.567,36

Anexo S. Análisis de precios unitarios para concreto 50% E.

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Item: Concreto 4000 PSI o 28 Mpa con 50% de Escoria (incluye transporte a obra)				Unidad	m ³
Equipo					
Descripción	Unidad	Cantidad	Rendimiento	Vr. Unitario	Vr. Total
Planta dosificadora (mezcladora) de concreto	h	1	0,0125	\$ 160.118,19	\$ 2.001,48
Subtotal Equipo					\$ 2.001,48
Materiales					
Descripción	Unidad	Cantidad		Vr. Unitario	Vr. Total
Cemento	kg	182,6		\$ 789,51	\$ 144.165,39
Escoria	kg	182,6		\$ 0,00	\$ 0,00
Cenizas Volantes	kg	0,0		\$ 0,00	\$ 0,00
Agregado grueso	kg	994,8		\$ 48,48	\$ 48.225,83
Agregado fino	kg	743,8		\$ 31,00	\$ 23.059,37
Aditivo Acelerante	kg	1,11		\$ 16.214,17	\$ 17.997,73
Aditivo incorporador de aire	kg	0,04		\$ 3.095,28	\$ 123,81
Aditivo reductor de agua y acelerante	kg	0,11		\$ 9.856,82	\$ 1.084,25
Agua	kg	154,8		\$ 69,91	\$ 10.822,07
Subtotal Materiales					\$ 245.478,45
Transporte					
Descripción	Unidad	Cantidad	Distancia	Vr. Unitario	Vr. Total
Transporte de cemento	kg-km	182,6	7,5	\$ 0,75	\$ 1.033,87
Transporte de agregado grueso	m3-km	0,8	6,0	\$ 926,68	\$ 4.272,81
Transporte de agregado fino	m3-km	0,5	6,0	\$ 1.063,27	\$ 3.136,68
Transporte de cenizas volanes	kg-km	0,0	491,5	\$ 0,27	\$ 0,00
Transporte de escoria	kg-km	182,6	676,1	\$ 0,29	\$ 35.305,91
Transporte de concreto	m3-km	1,0	23,0	\$ 1.450,79	\$ 33.368,26
Subtotal Transporte					\$ 77.117,52
COSTO TOTAL DIRECTO					\$ 324.597,45
COSTOS INDIRECTOS					
Administración				22%	\$ 71.411,44
Imprevistos				2%	\$ 6.491,95
Utilidad				5%	\$ 16.229,87
Total AIU				29%	\$ 94.133,26
IVA sobre utilidad				19%	\$ 3.083,68
COSTO TOTAL INDIRECTO					\$ 97.216,94
COSTO TOTAL					\$ 421.814,38

Anexo T. Análisis de precios unitarios para concreto 30% E - 20% CV.

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Item: Concreto 4000 PSI o 28 Mpa con 30% Escoria y 20% Cenizas Volantes (incluye trans						Unidad	m ³
Equipo							
Descripción	Unidad	Cantidad	Rendimiento	Vr. Unitario	Vr. Total		
Planta dosificadora (mezcladora) de concreto	h	1	0,0125	\$ 160.118,19	\$ 2.001,48		
						Subtotal Equipo	\$ 2.001,48
Materiales							
Descripción	Unidad	Cantidad		Vr. Unitario	Vr. Total		
Cemento	kg	192,2		\$ 789,51	\$ 151.744,73		
Escoria y cenizas volantes	kg	115,1		\$ 0,00	\$ 0,00		
Cenizas Volantes	kg	77,1		\$ 0,00	\$ 0,00		
Agregado grueso	kg	994,8		\$ 48,48	\$ 48.225,83		
Agregado fino	kg	743,8		\$ 31,00	\$ 23.059,37		
Aditivo Acelerante	kg	1,11		\$ 16.214,17	\$ 17.997,73		
Aditivo incorporador de aire	kg	0,04		\$ 3.095,28	\$ 123,81		
Aditivo reductor de agua y acelerante	kg	0,11		\$ 9.856,82	\$ 1.084,25		
Agua	kg	154,8		\$ 69,91	\$ 10.822,07		
						Subtotal Materiales	\$ 253.057,79
Transporte							
Descripción	Unidad	Cantidad	Distancia	Vr. Unitario	Vr. Total		
Transporte de cemento	kg-km	192,2	7,5	\$ 0,75	\$ 1.088,22		
Transporte de agregado grueso	m3-km	0,8	6,0	\$ 926,68	\$ 4.272,81		
Transporte de agregado fino	m3-km	0,5	6,0	\$ 1.063,27	\$ 3.136,68		
Transporte de cenizas volanes	kg-km	77,1	491,5	\$ 0,27	\$ 10.409,66		
Transporte de escoria	kg-km	115,1	676,1	\$ 0,29	\$ 22.254,71		
Transporte de concreto	m3-km	1,0	23,0	\$ 1.450,79	\$ 33.368,26		
						Subtotal Transporte	\$ 74.530,34
COSTO TOTAL DIRECTO						\$ 329.589,60	
COSTOS INDIRECTOS							
Administración				22%	\$ 72.509,71		
Imprevistos				2%	\$ 6.591,79		
Utilidad				5%	\$ 16.479,48		
Total AIU				29%	\$ 95.580,99		
IVA sobre utilidad				19%	\$ 3.131,10		
COSTO TOTAL INDIRECTO						\$ 98.712,09	
COSTO TOTAL						\$ 428.301,69	

8. GLOSARIO DE TÉRMINOS ESPECIALES

Cambio Climático: es un cambio en las condiciones del clima que provoca alteraciones en las condiciones de temperatura, precipitaciones, nubosidad etc.

Emisión: liberación de todo tipo de sustancias ya sean sólidas, líquidas o gaseosas en el medio ambiente: al suelo, agua o al aire.

Desarrollo sostenible: desarrollo que busca satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las futuras generaciones.

Residuos valorizados: residuos que se utilizan para sustituir materia prima de productos de otras industrias.

Materiales suplementarios: materiales que pueden ser residuos de otras industrias que se utilizan para sustituir materia prima de un producto convencional.

Cenizas volantes: es un material y residuo valorizado en forma de pequeñas esferas vítreas finas atrapadas durante la combustión del carbón para la generación de energía en las termoeléctricas.

Escorias: es un material vidrioso y residuo valorizado de la fundición en los hornos siderúrgicos para la producción de acero.

Cemento estructural tipo ART: Cemento que por su composición y según la norma NTC121 se clasifica como un cemento de alta resistencia temprana.

Cemento portland: material que tiene propiedades tanto adhesivas como cohesivas que le dan capacidad de aglutinar los agregados para conformar el concreto.

Clinkerización: proceso de cocción de la harina o pasta de Clinker (materia fundamental del cemento) mediante hornos rotatorios que alcanzan temperaturas de 1500 °C.

Eco-concretos/Concreto verde: concreto con remplazos de los componentes más importantes del concreto tradicional como los agregados por agregados reciclados, y cemento portland por cementantes suplementarios como las cenizas y escorias.

Economía circular: sistema de producción y consumo que promueve la eficiencia en el uso de los recursos, teniendo en cuenta el uso circular de los flujos de los materiales.

Circularidad: nivel de adaptación de un producto a una economía circular.

Construcción sostenible: edificación de infraestructuras residenciales o no residenciales en el marco de un desarrollo sostenible y una economía circular.

Ciclo de vida: etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema de productos, desde la adquisición de materias primas o la generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final.

Análisis de Ciclo de Vida (ACV): recopilación y evaluación de las entradas, salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema de productos a lo largo de su ciclo de vida.

Unidad funcional: rendimiento cuantificado de un sistema de productos para su uso como unidad de referencia. Ejemplo: 1 Litro de pintura (el litro debe corresponder a una pintura en específico con sus propiedades claramente establecidas).

Categoría de Punto Final: atributo o aspecto del entorno natural, salud humana o recursos, identificando un problema ambiental que da lugar a una preocupación.

Indicador de categoría de impacto: representación cuantificable de una categoría de impacto.

Método / enfoque de punto medio: es un método de caracterización que proporciona indicadores para la comparación de intervenciones ambientales a nivel de cadena de causa efecto entre emisiones/consumo de recursos y el nivel de punto final.

Factor de caracterización: factor derivado de una caracterización modelo que permite convertir un resultado del análisis del inventario del ciclo de vida asignado a la unidad común de la categoría de punto final asignado.

Método LCIA: colección de modelos de caracterización individuales de las diferentes categorías de impacto.