



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

**Evaluación de morteros con residuos industriales como
sustituciones parciales del cemento con análisis de ciclo
de vida y su comportamiento mecánico**

Tesis

Para obtener el grado de
Maestra en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Presenta:

María Guadalupe Gómez Valdovinos

Asesor de tesis:

Dr. Wilfrido Martínez Molina

Co-asesor de tesis:

Dr. Elia Mercedes Alonso Guzmán

Morelia, Michoacán, septiembre de 2025



MCIA
Maestría en Ciencias
en Ingeniería Ambiental
UMSNH

RESUMEN

En el presente trabajo se lleva a cabo una evaluación de morteros que cuentan con la implementación de residuos industriales como sustituciones parciales del cemento, utilizando criterios de desempeño mecánico y ambiental, para ser comparados con el desempeño de un mortero convencional. El análisis mecánico será revisado con las propiedades físicas de resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico; así como con las propiedades mecánicas de resistencia a compresión, resistencia a flexión y resistencia a tensión directa. El desempeño ambiental será evaluado con la metodología de análisis de ciclo de vida, utilizando dos metodologías para la revisión de impactos ambientales: Eco indicador 99 y ReCiPe 2016. El análisis mecánico permitirá tener una justificación técnica de la aplicación de los nuevos materiales en la industria de la construcción; por su parte, el análisis ambiental ayudará a la comprobación de las bondades ambientales de los morteros con residuo en contraste con los morteros convencionales. El mortero óptimo será aquel que presente, en conjunto, un desempeño mecánico adecuado, y, un buen desempeño ambiental.

Palabras clave: residuos industriales, morteros, ACV, Eco indicador 99, ReCiPe (2016)

SUMMARY

This study evaluates mortars that use industrial waste as partial substitutes for cement, using mechanical and environmental performance criteria, to compare them with the performance of conventional mortar. The mechanical analysis will be reviewed with the physical properties of electrical resistivity and ultrasonic pulse velocity, as well as the mechanical properties of compressive strength, flexural strength, and direct tensile strength. Environmental performance will be evaluated using the life cycle analysis methodology, employing two methodologies for reviewing environmental impacts: Eco Indicator 99 and ReCiPe 2016. The mechanical analysis will provide technical justification for the application of new materials in the construction industry, while the environmental analysis will help to verify the environmental benefits of mortars with waste in contrast to conventional mortars. The optimal mortar will be the one that, overall, has adequate mechanical performance and good environmental performance.

Keywords: industrial waste, mortars, LCA, Eco indicator 99, ReCiPe (2016)

DEDICATORIA

A **Jair**: “los dos te queremos, mi corazón y yo somos un buen par de buenos amigos
tuyos, esa es la verdad”

A **mis padres**, cada logro que obtengo es un logro compartido.

AGRADECIMIENTOS

A dios, por acompañarme en el camino y bendecirme a lo largo de él. Por la fortaleza que me brinda en mis seres queridos para avanzar con fe y perseverancia.

A mis padres, por el gran sacrificio y esfuerzo que han hecho para darme todo. Gracias por el amor, cariño y bendiciones diarias, ¡los amo infinitamente! Gracias a mis hermanos Guillermo y Alonso, a mis hermanas de otra madre Rosita y Kenia, por ser un pilar más en mi vida.

A Jair, mi novio, que con el afecto que me brinda es más sencillo superar cada reto que se me presenta.

A mis compañeros de posgrado, en especial a Miche, Maybe y Lía, quienes se convirtieron en unas grandes amigas.

Mis asesores, el Dr. Wilfrido y la Dra. Elia, quienes muestran un gran compromiso con todos los integrantes del departamento. Gracias por la confianza y el apoyo incondicional que me han brindado siempre.

A los académicos que conforman la mesa sinodal, el Dr. Mauricio, el Dr. Hugo y el Dr. Luis Elías. Gracias por sus aportaciones, su conocimiento y su apoyo.

Al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, a todos sus integrantes y al Departamento de Materiales, de manera general. Gracias por brindarme el espacio y los recursos técnicos y humanos para llevar a cabo mi proyecto.

A la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, a la Facultad de Ingeniería Civil, así como a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en general, por la formación académica que me ha sido brindada en sus instituciones. Gracias a los académicos que las conforman y comparten sus conocimientos con los estudiantes.

A la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación, SECIHTI, por la financiación ofrecida para la realización de mi maestría.

ÍNDICE

RESUMEN.....	II
SUMARY	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
ÍNDICE	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	XI
1. INTRODUCCIÓN.....	13
2. MARCO TEÓRICO	15
2.1 Morteros	15
2.1.1 Incorporación de puzolanas en morteros.....	17
2.2 Análisis de Ciclo de Vida.....	20
2.2.1 Fases.....	28
2.2.2 Métodos.....	32
3 ANTECEDENTES	34
4 JUSTIFICACIÓN	37
5 HIPÓTESIS	38
6 OBJETIVOS	39
6.1 General	39
6.2 Específicos.....	39
7 METODOLOGÍA	40
7.1 Planificación del estudio experimental.....	40
7.2 Elección de materiales de estudio.....	41
7.2.1 Materiales y diseño de mezclas.....	42

7.3	Análisis mecánico.....	48
7.3.1	Registro de propiedades para el desempeño mecánico	48
7.3.2	Definición de criterios para revisión de desempeño mecánico	49
7.3.3	Propuesta de calificación para desempeño mecánico	51
7.4	Análisis ambiental	52
7.4.1	Fase 1. Definición de objetivo y alcances.....	52
7.4.2	Fase 2. Inventario de extracciones y emisiones	57
7.4.3	Fase 3. Evaluación de impacto ambiental	67
7.4.4	Fase 4. Interpretación de resultados ambientales.....	76
8	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	77
8.1	Análisis mecánico.....	77
8.1.1	Criterios para revisión de desempeño mecánico	77
8.1.2	Propuesta de calificación para desempeño mecánico	82
8.2	Análisis ambiental	83
8.2.1	Fase 3. Evaluación de impacto.....	83
8.2.2	Fase 4. Interpretación de resultados	105
8.3	Propuesta de calificación final.....	110
9	DISCUSIONES Y CONCLUSIONES	112
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas del ciclo de vida de un producto [37].....	24
Figura 2. Marco de referencia de un ACV de acuerdo con la norma ISO 14040 [27].	28
Figura 3. Ejemplo de un proceso del sistema con entradas y salidas definidas [34] ..	29
Figura 4. Elemento de la fase de Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida [27]	30
Figura 5. Diseño metodológico de la investigación	41
Figura 6. Cemento y arena utilizados en la elaboración de morteros. a) cemento, b) arena. [44]	43
Figura 7. Residuos utilizados como sustitución del cemento. a) CBC, b) CCV, c) CEL. [44]	45
Figura 8. Residuos utilizados como sustitución del cemento. a) CM, b) EAH, c) CHBOF. [44].....	47
Figura 9. Límite de los sistemas T1-H y T2-L.....	54
Figura 10. Límite de los sistemas CBC-20, CCV-20, CEL-5, EAH-20 y CHBOF-5.	54
Figura 11. Entradas y salidas para los sistemas de mortero T1-H y T2-L	55
Figura 12. Entradas y salidas para los sistemas de morteros de los sistemas CBC-20, CCV-20, CEL-5, CM-10, EAH-20 y CHBOF-5	55
Figura 13. Ruta de transporte desde Río El Cuervo, Huajúmbaro, Michoacán, hasta el lugar de producción del mortero	60
Figura 14. Ruta de transporte desde Río Lerma hasta el lugar de producción del mortero	60
Figura 15. Ruta de transporte desde el lugar de generación de los residuos CBC hasta el lugar de producción del mortero	61
Figura 16. Ruta de transporte desde el lugar de generación de los residuos CCV hasta el lugar de producción del mortero	62
Figura 17. Ruta de transporte desde el lugar de generación de los residuos CEL hasta el lugar de producción del mortero	63
Figura 18. Ruta de transporte desde el lugar de generación de los residuos CM, EAH y CHBOF hasta el lugar de producción del mortero.....	63
Figura 19. Procedimiento general del método Eco indicador 99	71

Figura 20. Modelo de daños en el método Eco indicador 99.....	72
Figura 21. Modelo ReCiPe con categorías de impacto y su relación con las áreas de protección ([83]).....	73
Figura 22. Resultados de las propiedades físico-mecánicas en todas las mezclas. a) Resistencia a compresión, b) Resistencia a flexión y c) Resistencia a tensión directa.	80
Figura 23. Resultados de las propiedades físico-mecánicas en todas las mezclas. a) Resistividad eléctrica y b) Velocidad de pulso ultrasónico.	81
Figura 24. Puntuación final para categorías de daño con aportación de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Huajúmbaro (Eco indicador 99)	85
Figura 25. Puntuación final para categorías de daño con aportación de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Lerma (Eco indicador 99)	86
Figura 26. Caracterización de impactos en la categoría “ecosistema” con aportación de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Huajúmbaro (Eco indicador 99)	88
Figura 27. Caracterización de impactos en la categoría “ecosistema” con aportación de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Lerma (Eco indicador 99)	89
Figura 28. Caracterización de impactos en la categoría “salud humana” con aportación de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Huajúmbaro (Eco indicador 99)	90
Figura 29. Caracterización de impactos en la categoría “salud humana” con aportación de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Lerma (Eco indicador 99)	91
Figura 30. Caracterización de impactos en la categoría “recursos” con aportación de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Huajúmbaro (Eco indicador 99)	92
Figura 31. Caracterización de impactos en la categoría “recursos” con aportación de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Lerma (Eco indicador 99)	93

Figura 32. Caracterización de impactos con aportación porcentual de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Huajúmbaro (Eco indicador 99)	95
Figura 33. Caracterización de impactos con aportación porcentual de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Lerma (Eco indicador 99).....	96
Figura 34. Comparación de los resultados obtenidos por el método Eco indicador 99 en cada mortero analizado para las tres categorías de daño.....	98
Figura 35. Caracterización de impactos con aportación de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Huajúmbaro (ReCiPe 2016).....	100
Figura 36. Caracterización de impactos con aportación de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Lerma (ReCiPe 2016)	101
Figura 37. Comparación de los resultados obtenidos por el método ReCiPe 2016 en cada mortero analizado para las tres categorías de impacto con mayor relevancia ..	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de mortero de albañilería [13][10]	16
Tabla 2. Requerimiento químicos para materiales puzolánicos de acuerdo a su clase [23].	19
Tabla 3. Requerimiento físicos para materiales puzolánicos de acuerdo a su clase [23]	20
Tabla 4. Composición química de CBC [14]	43
Tabla 5. Composición química de CCV [14]	44
Tabla 6. Composición química CEL [14]	45
Tabla 7. Composición química EAH [14]	46
Tabla 8. Composición química de CHBOF [14]	47
Tabla 9. Dosificaciones de materiales para elaboración de las mezclas [68].	47
Tabla 10. Tipos de mortero y resistencia mínima de diseño a la compresión [13][10]	50
Tabla 11. Tipos de mortero y resistencia mínima de flexión	50
Tabla 12. Tipos de mortero y resistencia mínima de tensión	50
Tabla 13. Criterios de evaluación de resistividad eléctrica real en especímenes de concreto [75]	51
Tabla 14. Criterios de evaluación de concreto a partir de VPU [76]	51
Tabla 15. Propuesta de calificación de desempeño mecánico	52
Tabla 16. Dosificación de materias primas para la elaboración de 1 m ³ de los morteros en estudio.	58
Tabla 17. Consumo de energía y emisiones en producción de cemento para el territorio de Latinoamérica. Fuente: FICEM[65].	59
Tabla 18. Cuantificación de transporte para todas las materias primas	64
Tabla 19. Inventario de materiales, energía y transporte para el sistema S T1-H.....	65
Tabla 20. Inventario de materiales, energía y transporte para el sistema S CBC	65
Tabla 21. Inventario de materiales, energía y transporte para el sistema S CCV	65
Tabla 22. Inventario de materiales, energía y transporte para el sistema S CEL.....	66
Tabla 23. Inventario de materiales, energía y transporte para el sistema S T2-L	66
Tabla 24. Inventario de materiales, energía y transporte para el sistema S CM	66

Tabla 25. Inventario de materiales, energía y transporte para el sistema S EAH	67
Tabla 26. Inventario de materiales, energía y transporte para el sistema S CHBOF ..	67
Tabla 27. Modelos utilizados en la evaluación ambiental de los diferentes sistemas establecidos con el software openLCA.	68
Tabla 28. Resultados de la calificación de desempeño mecánico.....	82
Tabla 29. Resultados de la calificación de desempeño mecánico clasificados de mayor a menor calificación	83
Tabla 30. Comparación de resultados en transporte para cada conjunto de morteros	106
Tabla 31. Comparación de resultados en contribución del cemento para cada conjunto de morteros.....	107
Tabla 32. Comparación de resultados del eco-indicar en las tres categorías de daño para cada conjunto de morteros	108
Tabla 33. Resultado final del desempeño ambiental.....	110
Tabla 34. Evaluación final de los morteros en análisis.....	110



1. INTRODUCCIÓN

El enfoque a la sostenibilidad en las últimas décadas, así como las preocupaciones por el consumo de energía, la escasez de materiales y el deterioro del ambiente en general, ha planteado la necesidad de trabajar en principios de economía circular y el desarrollo de enfoques de ciclo de vida [1]. En la industria de la construcción, en el ámbito de la sostenibilidad, se plantea que el principal problema detectado está relacionada con las consecuencias de la producción del concreto, principalmente, la emisión de Dióxido de Carbono (CO_2) a la atmósfera durante la elaboración del cemento [2]. Debido a sus bondades, a su versatilidad, disponibilidad y precio, el concreto se ha convertido, globalmente, en el material constructivo con mayor utilización, por diferencia [3], por tanto, dejar de utilizarlo es complicado, considerando su alta demanda por la industrialización y urbanización en el mundo. Por otro lado, los desechos industriales aumentan año con año creando problemas de sostenibilidad en el proceso final de vida, muchos desechos como las cenizas de fondo de carbón de centrales eléctricas, las cenizas de fundición de metal, la escoria de cobre de la industria metalúrgica, el polvo de roca triturada de canteras y los desechos de construcción se generan en cantidades masivas [4].

Enlazando los dos problemas anteriores, se inició a trabajar con nuevos materiales que ayuden a reducir el impacto ambiental que genera la industria del concreto, garantizando que, con su implementación, no se demerite el comportamiento mecánico requerido en la industria. El reemplazo parcial de cemento con materiales suplementarios para reducir las emisiones de CO_2 y el consumo de energía durante la producción del concreto es una técnica ya bien establecida en el ámbito de la construcción sostenible [5][2]. Existen muchos estudios que incorporan puzolanas obtenidas de desechos industriales como sustitución parcial del cemento; no obstante, la implementación de estos cementantes se ha limitado a algunas propiedades mecánicas y hay pocos trabajos bibliográficos completos que tomen en consideración tanto la evaluación mecánica como la evaluación ambiental.

Para discutir la problemática en torno al impacto ambiental de la innovación de materiales creados con tecnologías sostenibles, es necesario adoptar un enfoque



científico que siga los criterios del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) [6]. El ACV permite calcular los impactos ambientales potenciales de un producto o servicio, determinando al mismo tiempo la energía incorporada e todas sus etapas de su vida, desde la adquisición de materias primas hasta la eliminación de residuos [1]. La utilización del ACV para evaluar ambientalmente los materiales de construcción está ganando importancia porque los aglutinantes convencionales generan altos impactos ambientales, principalmente debido a la producción de cemento, por lo tanto, el reemplazo del cemento Portland con aditivos alternativos presenta el potencial de requerir menor energía para su producción y transporte [7], siendo así que, gracias a las técnicas del AVC esa energía se puede calcular para hacer una comparación ambiental cuantitativa entre los materiales tradicionales y los nuevos materiales. Así pues, la utilización del Análisis de Ciclo de Vida en los nuevos materiales sostenibles permite valorar el impacto en el ambiente según sus correspondientes emisiones de CO₂, su coste energético y la explotación de materias primas y/o combustible [8]. Por ende, el análisis mecánico que justifica técnicamente la aplicación de los materiales con implementación de residuos, al ser complementado con un análisis que garantice beneficios ambientales (ACV), permite a la comunidad tener más certeza a la hora de su aplicación, puesto que su uso implica un enfoque holístico, en donde coexisten óptimamente cuestiones técnicas, ambientales y económicas.

En este tenor, la presente investigación se enfoca en la implementación de un análisis de ciclo de vida en morteros con residuos industriales que presentan un desempeño mecánico adecuado, comprobando con ello que también presentan beneficios ambientales.



2. MARCO TEÓRICO

2.1 Morteros

Los materiales que funcionan como aglutinantes son tan antiguos que ya eran utilizados en la antigua Grecia, a donde llegó la técnica de elaboración de morteros con cal como base cementante en el año 500 A.C. aproximadamente [9]; la cultura helénica utilizaba como cementantes para unión de piedras y ladrillos, materiales a base de cal, o como materiales para capas de revestimiento en calizas porosas con las que eran construidos sus templos y palacios [10]. Los morteros se obtienen de la combinación de agua y arena con uno o más materiales cementantes (puede ser cemento Portland o cemento Portland premezclado y adicionado con cal o alguna puzolana), resultando en una mezcla plástica que es aglomerante. [11].

El mortero es casi tan noble en sus aplicaciones como lo es el concreto y los usos que podemos encontrar son múltiples; sin embargo, es posible definir dos grandes grupos a partir de las prestaciones que tiene dicho material. Primeramente, tenemos el **mortero de revestimiento** que se diseña para ser aplicado como protección y acabado de superficies [12], y por otro lado, el conocido como **mortero de albañilería** usado principalmente para la unión de bloques de mampostería [13].

En la normativa de México, está priorizado el mortero de albañilería, siendo así que cuenta con especificaciones técnicas para su aplicación en la normativa NMX-C-46-ONNCCE-2010/Ratificada 2021 y N-CMCT-2-01-004/02. La importancia del mortero de albañilería radica en que es fundamental para la unión de piezas de mampostería, siendo el mortero el material que proporciona unión y solidez al elemento estructural de mampostería permitiendo un asiento perfecto entre pieza para la transmisión de cargas y la adherencia necesaria para proporcionar una resistencia suficiente al deslizamiento entre las mismas [14]. Los morteros de albañilería son clasificados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (ONNCCE) en los tres tipos indicados en la tabla 1.



Tabla 1. Tipos de mortero de albañilería [14][11]

Tipo de mortero	Partes de cemento Portland	Partes de cemento de albañilería	Partes de cal	Partes de arena
Tipo I	1	0	0 a $\frac{1}{4}$	No menos de 2.25 ni más de 4 veces la suma de cementantes en volumen
	1	0 a $\frac{1}{2}$	0	
Tipo II	1	0	$\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$	
	1	$\frac{1}{2}$ a 1	0	
Tipo III	1	0	$\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{4}$	

A diferencia del concreto, la resistencia a la compresión no es la propiedad más importante de un mortero [15]; en este material, su aplicación determinará cuál propiedad es la más relevante a considerar. El mortero de revestimiento se diseña considerando características de trabajabilidad, adherencia, protección de la mampostería del meteorismo y resistencia al agua; en cambio, el mortero de albañilería debe cumplir con requisitos de resistencia, adherencia y durabilidad. A continuación, se describen las propiedades más características de los morteros de construcción. Dentro de sus propiedades en estado fresco se encuentran la trabajabilidad, consistencia, densidad, adherencia y capacidad de retención del agua; las características relevantes en estado endurecido son la resistencia mecánica, retracción, permeabilidad al vapor de agua y comportamiento térmico.

Trabajabilidad: se trata de la propiedad perteneciente a una mezcla, ya sea concreto o de mortero, la cual muestra qué tan manejable es, que tan sencillo se hace distribuirla en la superficie de trabajo y que tan fácil es compactado [16].

Consistencia: cuando se habla de consistencia en el mortero, se le llama así a la característica que ayuda a determinar si la mezcla es manejable o trabajable [17].

Densidad: la propiedad está directamente relacionada el contenido de aire del material y la densidad de los materiales mismos componentes del mortero [17].

Adherencia: la adherencia es una propiedad más utilizada en los morteros de albañilería y describe la resistencia de unión entre el mortero de albañilería y la pieza de albañilería [13].



Capacidad de retención de agua: es la capacidad con la que cuenta un mortero para poder retener el agua cuando ésta entra en contacto con el sol, la temperatura, el viento, etc., o cuando entra en contacto con alguna superficie como algún bloque de mampostería, siendo una propiedad muy relevante ya que, una pérdida rápida de la humedad podría ocasionar disminución de trabajabilidad [18].

Resistencia a compresión: al igual que la descripción para un concreto, se refiere a la resistencia que presenta el mortero una vez endurecido para soportar fuerzas compresivas [18].

Retracción: se refiere a la contracción que se genera en el momento que existe una disminución de su volumen cuando se está produciendo el fraguado e inicio del endurecimiento. [17]. La causa es debido a que, tras la hidratación del cemento, se puede llegar a generar pérdida del agua de mezclado sobrante [17].

Permeabilidad al vapor de agua: en esencia, esta propiedad habla de la capacidad de un material, como el mortero, para admitir el paso del vapor de agua a través de él, proceso que se necesita para evitar la acumulación de la humedad [19].

Comportamiento térmico: dicha propiedad se relaciona directamente con la conductividad térmica del mortero, la cual se define como la cantidad de calor que atraviesa por una superficie de unidad de material en un tiempo específico y depende, principalmente del contenido de agua, de la porosidad existente y de la densidad del material [17]. Siendo así que, por la energía de elaboración del material, a mayor energía, el comportamiento térmico será menos confortable.

2.1.1 Incorporación de puzolanas en morteros

En la actualidad, los materiales cementantes suplementarios se han convertido en parte integral del diseño de mezclas de concreto y mortero, estos materiales pueden ser materiales naturales, desechos industriales o subproductos, siempre buscando aquellos que requieren menos energía para su fabricación [20]. Estos materiales cementantes no son más que puzolanas incorporadas en mortero o concreto para mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad del material. Los materiales cementantes más



comúnmente utilizados son cenizas volantes, humo de sílice, escoria granulada de alto horno y metakaolín [21], sin embargo, varias de estos materiales son puzolanas comerciales con costos elevados, por lo que actualmente se investigan materiales con actividad puzolánica que podrían provenir de subproductos de diferentes industrias que tengan precios más bajos [22] y, adicionalmente, ayuden a abordar problemas de sostenibilidad en el aspecto de la valoración de residuos.

Puzolanas

Las puzolanas son materiales silíceos que presentan alto contenido de sílice reactiva y/o aluminio llamadas espinelas (silico-alumínico) utilizado desde la antigüedad por la cultura romana para producir un cemento antes de la invención del cemento Portland en el siglo XIX [23]. American Society for Testing and Materials define a una puzolana como un material silíceo o silico-aluminoso que no tiene valor cementicio por sí mismo, pero al ser molido finamente y en con humedad presente, se logra una reacción química con el hidróxido de calcio (comúnmente conocido como portlandita Ca(OH)) [24], formando compuestos de hidratos de silicato de calcio (CSH) e hidratos de silicato de calcio-aluminato (CSAH) que conservan propiedades cementantes adicionales [25].

Muchos de los beneficios de las puzolanas, incluidos la resistencia a ataques químicos y durabilidad en general es gracias a la reacción puzolánica [26]. La actividad puzolánica abarca todas las reacciones que ocurren entre los elementos nativos de la puzolana y la cal, y determina la velocidad de la reacción puzolánica para producir y mejorar la fuerza de unión con CH (enlace carbono hidrógeno) en presencia de humedad [27]. Es decir, la actividad puzolánica se refiere a la facilidad de reacción entre los iones Ca^{+2} del CH y cualquier material silíceo o aluminoso para formar compuestos estables con propiedades cementantes [25].

Clasificación de puzolanas

En la literatura se han definido muchas clasificaciones para los materiales puzolánicos. Se menciona, sin embargo, solo la clasificación propuesta por la norma ASTM C618-22 [24], en donde se establecen tres tipos de puzolanas:



- Clase **N**: puzolanas naturales, brutas o calcinadas, que respondan a los requisitos propuestos para esta clase por la norma ASTM C618-22, tales como algunas tierras de dolomitas, cretas y esquistos opalinos, tobas y cenizas volcánicas o pumicitas, calcinadas o sin calcinar, y diversos materiales que requieran calcinación para obtener propiedades satisfactorias, tales como algunas arcillas y esquistos [24].
- Clase **F**: cenizas volantes que cumplen los requisitos aplicables a esta clase según se indica en la norma ASTM C618-22 [24]. Las cenizas volantes pertenecientes a esta clase tienen propiedades puzolánicas [24].
- Clase **C**: se caracteriza por presentar propiedades cementantes, adicionadas a las propiedades puzolánicas [24]. Esta clase de cenizas, al igual que la clase F, se producen normalmente gracias a la combustión de lignito o carbón bituminoso, y también pueden producirse utilizando antracita o carbón bituminoso [24].

Las tres clases de puzolanas descrita anteriormente tiene definidos requerimientos físicos y químicos, los cuales se deben revisar si se quiere clasificar algún material como una puzolana de clase N, F o C. En la tabla 2 están descritos los requerimientos químicos. Para la clase F, en caso de obtener pérdida por ignición de hasta 12% se permite su uso si se disponen de registros de rendimiento aceptables [24].

Tabla 2. Requerimientos químicos para materiales puzolánicos de acuerdo a su clase [24].

Requerimiento	Clase		
	N	F	C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (% min)	70.0	50.0	50.0
CaO (%)	Solo reportar	10.0 max	>18.0
SO ₃ (% max)	4.0	5.0	5.0
Contenido de humedad (% max)	3.0	3.0	3.0
Pérdida por ignición (% max)	10.0	6.0	6.0

Los requerimientos físicos se presentan en la tabla 3. La reactividad con el cemento Portland se establece con la medición del índice de actividad resistente, y está sujeto a variaciones dependiendo de la fuente del cemento utilizado, así como del origen la puzolana o ceniza volante. Cabe mencionar que, esta propiedad no puede dictaminar la resistencia a la compresión del material que contenga la puzolana o ceniza volante,



puesto que la masa de puzolana natural o ceniza volante especificada para la obtención del índice resistente con cemento Portland no es la misma que se toma en consideración en el proporcionamiento del material usado en obra [28]. La cantidad óptima de puzolana natural o ceniza volantes para cualquier aplicación está determinada por las propiedades que se soliciten para el material, así como otros componentes de éste, las cuales se establecen con ensayos [24].

Tabla 3. Requerimientos físicos para materiales puzolánicos de acuerdo a su clase [24]

Requerimiento	Clase		
	N	F	C
Finura. Retenido en la malla no. 325 al tamizar en húmedo (% max)	34	34	34
Índice de resistencia. Con cemento Portland a 7 días (% min de control)	75 ^A	75 ^A	75 ^A
Índice de resistencia. Con cemento Portland a 28 días (% min de control)	75 ^A	75 ^A	75 ^A
Agua (% max de control)	115	105	105
Densidad (% de variación máx de la media)	5	5	5
Retenido en malla no. 325 (max variación, puntos porcentuales de la media)	5	5	5

^A El cumplimiento del índice de resistencia a los 27 y 28 días indicará el cumplimiento de la especificación.

Requerimiento de uniformidad: La densidad y la finura de las muestras individuales no deberán diferir de la media establecida por las diez pruebas precedentes, o por todas las pruebas precedentes si el número inferior a diez,

2.2 Análisis de Ciclo de Vida

Actualmente, tanto las empresas como las naciones están interesadas en conocer y determinar los impactos en las actividades desarrolladas por la humanidad [29]. En este escenario, el Análisis de Ciclo de Vida se presenta como un instrumento efectuado en varios sectores productivos de la economía que estudia cada etapa del ciclo de vida de un producto o servicio teniendo como finalidad estimar los potenciales impactos en relación con lo ambiental, cuantificando el flujo de entradas y salidas de materia, así como la necesidad energética del sistema productivo [29]. Los primeros indicios de ACV fueron iniciados a finales de la década de los sesenta por el Departamento de Energía de los Estados Unidos en el estudio de aspectos de ciclo de vida de materiales y productos, centrándose en cuestiones como las necesidades energéticas y la eficiencia



energética [30]. Se dice que el primer ACV fue realizado en el año 1969 para la empresa Coca Cola por el Midwest Research Institute (MRI) con la premisa fundamental de disminuir el consumo de recursos y con ello las emisiones al medioambiente [31]. Para la región de Europa, en el mismo período se inició con la creación de una especie de inventario que más tarde sería conocido como “Ecobalance”; y en 1972, Lan Boustead, investigador del Reino Unido, realizó la cuantificación de energía total requerida para la producción de diversos tipos de envases con diferente origen como vidrio, plástico, acero y aluminio [32]. Para el mismo año, se estaba llevando a cabo lo que sería considerada de manera global, uno de los primeros intentos mundiales donde se ponía en discusión un tema muy relevante, la interrelación entre el crecimiento económico, el desarrollo de los países y la protección ambiental, la Conferencia de las Naciones Unidas de 1972 sobre Medioambiente Humano en Estocolmo [33]. Este precedente, la presión de las organizaciones ecologistas y la necesidad de alguna herramienta regularizada para realizar ACV llevaron al establecimiento de normas de ACV por parte de la Organización Internacional de Normalización (ISO) [30]. El escenario en Latinoamérica es diferente, puesto que en esta región la metodología de Análisis de Ciclo de Vida tardó varias décadas en llegar y su desarrollo ha sido lento. La primera aplicación de ACV en la región se llevó a cabo en Brasil por el año 1994 con el Grupo de Apoyo a la Normalización que intervino en el proceso del documento ISO/TC-207; además; en el 2005, con la finalidad de promocionar e impulsar la aplicación del ACV en la zona, se realizó la primera Conferencia Internacional de ACV en Latinoamérica, en Costa Rica, evento donde se creó la Red Iberoamericana de Ciclo de Vida (RICV) [33].

En la norma ISO 14010 se describe al ACV como una herramienta que permite calcular los impactos potenciales asociados a un servicio o producto, y por ende, determinar sus bondades ambientales; para ello, primeramente se inventarían tanto entradas como salidas asociadas al sistema, después se evalúan los impactos ambientales potenciales ligados a dichas entradas y salidas, y, finalmente, se lleva a cabo la interpretación de los resultados obtenidos en las fases anteriores, tomando como lineamientos los objetivos del estudio [34]. Aunque la metodología de Análisis de Ciclo de vida es la



metodología más reconocida y estandarizada para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, material, proceso o actividad, de acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), hoy en día existen muchas metodologías para llevar a cabo la evaluación del impacto ambiental de procesos y productos [35]. El ACV se encarga, primordialmente, del estudio de ecosistemas, impactos en la salud humana y explotación de recursos, en relación con el medio ambiente [36]; no tiene en cuenta los efectos económicos o sociales, aunque tenga gran importancia [8], siendo necesario complementar con otros métodos para hacer una evaluación completa y cumplir con todos los pilares de la sostenibilidad.

Las herramientas de evaluación cuantitativa medioambiental más utilizadas son las mencionadas a continuación [37],

- Un **análisis de ciclo de vida** que cuantifica un gran número de usos de recursos, flujos de sustancias y acumulaciones medioambientales para estimar múltiples impactos medioambientales asociados a una función determinada [37].
- Un **análisis de flujo de sustancias** (SFA) que cuantifica los flujos y acumulaciones medioambientales de una sola sustancia, como el mercurio, o de un grupo de sustancias, como los compuestos inorgánicos de nitratos [37].
- Una **evaluación de riesgos** (RA) que la probabilidad existente o el riesgo posible de que se produzcan impactos graves de una instalación (como una central nuclear) o los riesgos de utilizar una sustancia química [37].
- Un **análisis de flujo de materiales** (MFA) que hace un seguimiento de flujo de materiales en la economía de una región determinada. Suele tratarse de primas como papel, vidrio, concreto o plásticos [37].
- La **huella de carbono** (CF) la cual determina las emisiones directas e indirectas de gases de efecto invernadero debidas a un producto, una actividad humana o una empresa [37].
- La **huella hídrica** (WF) determina los impactos asociados al agua como área de preocupación, incluido el uso del agua y las exposiciones medioambientales relacionadas con la calidad del agua [37].



Dentro del análisis ambiental de un nuevo material sostenible en la edificación, la técnica más popular es el ACV, porque, gracias a sus bondades de aplicación, esta herramienta permite llevar a cabo la comparación de varios sistemas o productos que compartan la unidad funcional, es decir, una funcionalidad igual [31], permitiendo conocer las bondades ambientales de los nuevos materiales sostenibles contra los convencionales.

El ACV está diseñado para estudiar todos los impactos ambientales incorporados a cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto o servicio, tomando en consideración, inicialmente la extracción de materias primas, posteriormente la producción y fabricación de energía y/o materiales, hasta el uso y tratamiento al finalizar su vida útil, considerando su disposición final [38]. Son cinco las etapas que se consideran dentro del ciclo de vida mencionado (figura 1) [39].

- *Obtención de materias primas:* en este apartado se encuentran cada una de las actividades que se necesitan realizar para obtener la materia prima, incluida la energía necesaria del medio ambiente, e inclusive todo el transporte antes de la producción [39].
- *Proceso y fabricación:* se incluyen las actividades imprescindibles para la transformación de las materias primas en el producto o servicio, al igual que toda la energía consumida [39].
- *Transporte y distribución:* abarca todo el transporte que se necesite para trasladar el producto o servicio desde la fábrica al usuario [39] [40].
- *Uso, reutilización y mantenimiento:* es la etapa de uso del producto final en toda su vida útil [39].
- *Gestión de los residuos:* la última etapa inicia al finalizar vida útil del producto, comprendiendo los procesos necesarios para que, el residuo final, sea devuelto al entorno [39] [40].



Figura 1. Etapas del ciclo de vida de un producto [41]

Considerando las etapas de vida de un producto, los diferentes análisis que se hagan a un producto pueden tener diferentes alcances en su desarrollo [38]:

- *De cuna-tumba (cradle to grave)*: analiza todas las etapas del producto, desde la obtención de la materia prima hasta el tratamiento del producto cuando se convierte en residuo [38].
- *De la cuna-puerta (cladle to gate)*: para este análisis se considera nuevamente, desde el acondicionamiento de materias primas, hasta su transformación en el producto final [38].

Aunque estos dos enfoques son los más utilizados en la industria de la construcción, E. Haya Leiva (2016) menciona tres más [42]:

- *De la puerta-puerta (gate to gate)*: este enfoque está diseñado para analizar el proceso productivo de una determinada organización, puesto que toma en cuenta solo las actividades llevadas a cabo durante el proceso de producción [42].
- *De la puerta-tumba (gate to grave)*: al igual que el anterior, permite a la empresa la revisión de un proceso productivo, pero considerando también las actividades para la gestión de residuos que se forman durante el proceso productivo [42].
- *De la cuna-cuna (cradle to cradle)*: es el enfoque más completo; toma en consideración todas las etapas de ciclo de vida del producto en análisis, e



incluso, hace la revisión de la reincorporación de dicho producto en algún proceso productivo [42].

Como ya se detalló, la principal necesidad de establecer estudios de ACV surgió con la urgencia de cuantificar las emisiones medioambientales relacionadas con un servicio o producto con el objetivo de identificar posibilidades de mejora con lo que respecta a un menor impacto medioambiental y un menor consumo de recursos durante todo el ciclo de vida de dicho producto [30], sin embargo, el nivel de detalle de un ACV no es igual en todos los estudios, puesto que está relacionado directamente de la finalidad a cubrir, dando lugar a 3 tipos de ACV [42].

ACV conceptual: es el ACV más sencillo, puesto que es un estudio básicamente cualitativo (maneja datos cualitativos y muy generales) cuya finalidad es la identificación de los impactos potenciales que son de mayor significancia [42].

ACV simplificado: consiste en un análisis más completo que el anterior. La técnica de ACV es desarrollada con la utilización de datos selectivo, considerando el ciclo de vida superficialmente y usando datos genéricos sobre este; posteriormente, se simplifica usando las etapas más importantes y cerrando con un estudio de fiabilidad en el resultado [42].

ACV completo: como es de esperarse, es el nivel más complejo. La aplicación de la herramienta es detallada en toda sus etapas, desarrollando un análisis tanto cualitativos como cuantitativo [42].

El ACV permite ser utilizado para el desarrollo de un producto, para la mejora de un producto o con intenciones de marketing [30]. En el primer caso, *desarrollo de un producto*, existen muchas opciones para la selección de materiales y recursos, abriendo la posibilidad a realizar un diseño basado en sostenibilidad, por lo que, cuanto antes se utilice el ACV de forma eficiente en la fase del diseño, menor será el impacto sobre el medio ambiente; no obstante, la recopilación de datos se vuelve más compleja y requiere mucho tiempo. Cuando la herramienta es utilizada para *mejorar un producto ya fabricado* la recopilación de datos es más sencilla, siendo importante centrarse únicamente en los recursos y materiales que afectan significativamente el producto,



partiendo de comparaciones de productos entre sí desde criterios medioambientales y para incorporar aquellas opciones que causan un menor impacto en cada fase del ciclo de vida. El ACV *con fines de marketing* tiene como fin comunicar al cliente que un producto coincide ciertos criterios ambientales en cuanto a un determinado nivel de requisitos de calidad, y, por lo tanto, pueda resultar más atractivo para su compra.

Como ya se mencionó, las normas de referencia para trabajar con ACV están establecidas la familia de normas ISO 14000. Se tiene el grupo de normas ISO 14040, en las que se especifica el procedimiento a seguir para la ejecución de un Análisis de Ciclo de Vida en productos o servicios, teniendo como objetivo la evaluación del impacto ambiental provocan, mediante el análisis de ciertos parámetros de calidad en las diferentes etapas seleccionadas [32] [8]. Adicionalmente, aquellas que presentan una mayor relación con el Análisis de Ciclo de Vida son las siguientes:

- ISO 14001:2015. Sistemas de gestión ambiental. Requisitos de orientación para su uso [43].
- ISO 14004:2016. Sistemas de gestión ambiental. Directrices generales sobre la implementación [44].
- ISO 14006:2011. Sistemas de gestión ambiental. Directrices para la gestión del ecodiseño [45].
- ISO 14020:2022. Etiquetas ecológicas y declaraciones ambientales. Principios y requerimientos generales [46]
- ISO 14021:2016. Etiquetas ecológicas y declaraciones ambientales. Autodeclaraciones medioambientales. Etiquetado ecológico Tipo II [47]
- ISO 14024:2018. Etiquetas ecológicas y declaraciones ambientales. Etiquetado ecológico Tipo I. Principios y procedimientos [48].
- ISO 14025:2006. Etiquetas ecológicas y declaraciones ambientales. Etiquetado ecológico Tipo III. Principios y procedimientos [49].
- ISO 14031:2000. Gestión ambiental. Evaluación del comportamiento medioambiental. Directrices generales [50].



- ISO 14040:2006. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia [51].
- ISO 14044:2006. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Requisitos y directrices [52].
- ISO 14045:2012. Gestión ambiental. Evaluación de la ecoeficiencia del sistema del producto. Principios, requisitos y directrices [53].
- ISO 14046:2014. Gestión ambiental. Huella de Agua. Principios, requisitos y directrices [54].
- ISO 14063:2020. Gestión ambiental. Comunicación ambiental. Directrices y ejemplos [55].
- ISO 14064-1:2018. Gases de efecto invernadero. Parte 1: Especificaciones con orientación a nivel de organización para la cuantificación y la declaración de las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero [56].
- ISO 14064-2:2019. Gases de efecto invernadero. Parte 1: Especificaciones con orientación a nivel de proyecto para la cuantificación, el seguimiento y la declaración de las reducciones o mejoras en la eliminación de gases de efecto invernadero [57].
- ISO 14064-3:2019. Gases de efecto invernadero. Parte 3: Especificaciones con orientación para la verificación y validación de las declaraciones de gases de efecto invernadero [58].
- ISO 14065:2020. Principios generales y requisitos para los organismos que validan y verifican la información medioambiental [59].

Objetivos del ACV

Los objetivos del análisis de ciclo de vida llegan a ser diferentes, según para qué fines se realice [8]:

- Identificación de ciertas partes en el sistema (producto o servicio), ya sean materias primas o proceso con mayor contribución al impacto ambiental [8].
- Verificación de la mejor opción entre varias, para un solo proceso, con la fiabilidad de obtener el mínimo posible de impactos ambientales [8].



- Ser guía en la planificación estratégica a largo plazo, vinculando las tendencias actuales de diseños de nuevos productos y uso de materias primas [8].
- Evaluación de posible disminución en el uso de los recursos naturales que se presentan como materias primas de un determinado producto [8].
- Ayuda en la implementación de procesos o materias primas más amigables con el ecosistema durante la elaboración de nuevos productos en concordancia con productos equivalentes [8].

2.2.1 Fases

Según la norma ISO 14040 [51] e ISO 14044 [52], la utilización de un ACV se debe llevar a cabo considerando cuatro etapas: *definición del objetivo y alcances*, en donde se establece el principal objetivo y su uso, el alcance según el sistema con sus límites, la calidad de datos usados para el inventario y la unidad funcional a utilizar la presentar resultados obtenidos [60]; *análisis de inventario*, se trata de la recopilación detallada de las entradas (energía y materia prima) y salidas (productos, coproductos, residuos y emisiones al agua, aire y suelo) para todos los proceso dentro de las etapas que componen al sistema [8]; *evaluación de impacto*; es la fase dedicada a convertir el inventario de entradas y salidas en indicadores de impactos ambientales potenciales; y *etapa de interpretación de resultados*, la última etapa trata de la interpretación de los datos obtenidos, tanto en el inventario del ciclo de vida como en su evaluación [61].

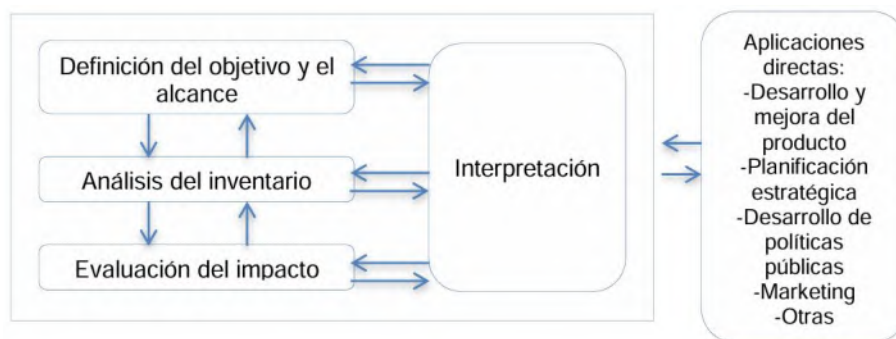


Figura 2. Marco de referencia de un ACV de acuerdo con la norma ISO 14040 [29].

Un ACV realizado adecuadamente es aquel en el que las 4 etapas mencionadas fueron consideradas y en el que se le dio el mismo peso a cada una de estas, además de que es



necesaria una retroalimentación e interpretación en cada una de estas etapas, como se observa en el diagrama de la figura 2.

A continuación, se describe de manera más detallada las consideraciones y especificaciones que se deben de tener en cada una de ellas.

Fase 1. Definición de objetivos y alcances

Dentro del **objetivo** de un análisis de ciclo de vida queda comprendida la aplicación, las principales razones de aplicación, el público objetivo y la consideración de si será utilizada para comparar diferentes productos [8]; para el **alcance**, en cambio, es prescindible especificar una unidad funcional, los límites que define al sistema y el tipo de calidad en los datos a utilizar [8]. La *unidad funcional* es aquella unidad a la que tienen que ir referido cada dato que componga al sistema; los *límites del sistema* establecen los procesos unitarios a ser incluidos, a partir de aquellas etapas del ciclo de vida (figura 1) considerados para el análisis; y, el *tipo de calidad de datos* permiten especificar desde cuándo existen, su cobertura geográfica y su tecnología [32].

Fase 2. Análisis de inventario.

La segunda fase es el análisis de inventario del ciclo de vida (ICV) donde se hace la compilación de datos de entradas y salidas pertinentes para llevar a cabo los objetivos [8].

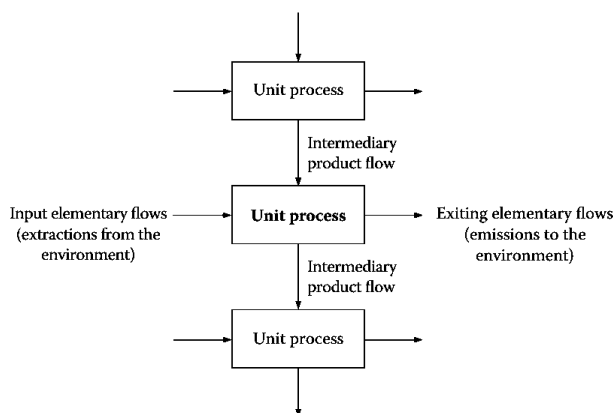


Figura 3. Ejemplo de un proceso del sistema con entradas y salidas definidas [37]

Se realiza una descripción detallada del flujo de las entradas y salidas de cada proceso en el sistema: estas entradas pueden incluir el uso energético y de recursos, por su parte,



las salidas corresponden a las emisiones dirigidas a la atmósfera, agua y suelo asociadas al sistema en particular [29]. Es la fase con mayor trabajo durante la implementación del ACV, debido a que son definidas y calculados todos los balances de materia y energía asociadas al sistema en análisis, para obtener el inventario de las cargas ambientales a partir de una unidad funcional [62].

Fase 3. Evaluación de impactos

Se trata de la fase técnica necesaria para la caracterización y el evaluación de las cargas ambientales definidas en el inventario; de manera general, esta etapa implica la relación de cada dato el inventario con el impacto ambiental al que da lugar intentando cuantificar su significado, pero sobre todo su magnitud en el entorno [62].

El marco general de la Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida (EICV) está compuesto por diferentes elementos que convierten los resultados obtenidos en la evaluación en indicadores [29]. La norma ISO 14040 indica tres elementos obligatorios: elección de las categorías de impacto, adjudicación de resultados del ICV (clasificación) y cálculo del indicador para cada categoría (caracterización). Estos tres elementos se muestran en el diagrama de la figura 3, juntos con otros elementos definidos como opcionales.

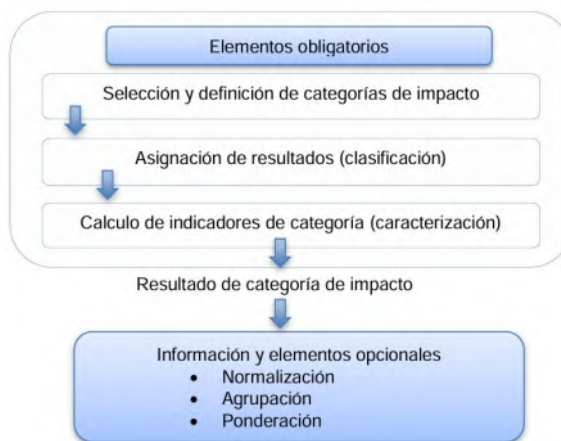


Figura 4. Elemento de la fase de Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida [29]

Durante la **selección de categorías de impacto** se pueden distinguir tres grupos, a partir de la importancia ambiental en relación con el ACV y la existencia de métodos para su caracterización [42][8]:

- Grupo A: categorías de impacto básicas:



- Agotamiento de recursos abióticos
- Impactos del suelo. Competencia por el suelo
- Cambio climático
- Agotamiento del ozono estratosférico
- Toxicidad en humanos
- Ecotoxicidad
 - Ecotoxicidad acuática en aguas dulces
 - Ecotoxicidad en agua marina
 - Ecotoxicidad terrestre
- Formación de fotooxidantes
- Acidificación
- Eutrofización

- Grupo B. Categorías de impacto específicas

- Impactos del uso de suelo
 - Pérdida de la función de soporte de vida
 - Pérdida de biodiversidad
- Ecotoxicidad
 - Ecotoxicidad en sedimentos de aguas dulces
 - Ecotoxicidad en sedimentos marinos
- Impacto de la radiación ionizante
- Olor
- Ruido
- Calor residual (aumento de la temperatura del agua)
- Accidentes

- Grupo C. Otras categorías de impacto

- Agotamiento de recursos bióticos
- Desecación
- Malos olores en el agua

El segundo elemento obligatorio es la **clasificación**, proceso en donde lo obtenido a partir del inventario se asignan a las diferentes categoría de clasificación, de acuerdo con efecto ambiental esperado [62]. Existirán datos del ICV que se deban asignar únicamente a una categoría, ya que solo generan cargas ambientales en dicha categoría, mientras que otros contribuyen a varias de ellas [42].

Como tercer proceso obligatorio, se tiene la **caracterización**, en donde los impactos obtenidos a partir del inventario son convertidos en valores para aquellas categorías seleccionadas [63]; la aportación de cada entrada y salida en el sistema a la carga



medioambiental se asignan y se transforman en indicadores que representan los correspondientes impactos potenciales sobre el entorno ambiental [30]. La estimación del impacto potencial de cada emisión o recurso se lleva a cabo con la ayuda de ciertos factores científicos [64].

Por último, se tienen tres procesos opcionales, la normalización, agrupación y ponderación. La **normalización** pretende expresar cada impacto ambiental utilizando la comparación para que puedan el estudio sea sencillo [63], la **agrupación** se trata de asignar las categorías en uno o más conjuntos según lo definido en el objetivo y alcance [42], y, la **ponderación** permite decidir cuáles impactos son más importantes, asignando pesos de importancia a cada impacto [64].

Fase 4. Interpretación de resultados

La última fase se encarga de decantar lo obtenido en el ICV y en la EICV en un solo informe para poder conocer la incidencia que tienen los flujos de producto del ICV en cada impacto ambiental estudiado en la EICV, siendo necesario contrastar con otras bases de datos y otras investigaciones para entablar caminos de discusión del estudio [63]. La culminación de la fase, así como del ACV se da con la preparación de recomendaciones, discusiones, y conclusiones para tomas de decisiones, en función del alcance y objetivos establecidos al inicio [8][65].

2.2.2 Métodos

Los métodos que se tratan en este subtema son herramientas desarrolladas para relacionar lo registrado en el ICV con cada impacto ambiental, donde los datos en el ICV se clasifican dentro de categorías de impacto, las cuales contienen un indicador de categoría [30]. Los métodos que se han creado a lo largo del tiempo para llevar a cabo un ACV diferencian entre sí, principalmente, en las categorías de impacto que cubre cada uno, los indicadores utilizados y su enfoque geográfico [65].

Los métodos mencionados tienen dos enfoques de desarrollo, el método *midpoint* (punto medio) y el denominado “*endpoint*” (punto final). El primero es un punto entre la elaboración del ICV y las consecuencias finales del ACV teniendo las categorías principales de impactos ambientales formuladas como problemas, y, por su parte, el



punto final lleva el problema a sus daños y consecuencias específicas [63]. En segundo, de punto medio se analizan cambios tempranos en la cadena causa-efecto que suelen ser químicos o físicos que representan atribuciones a diferentes problemas medioambientales, mientras que el enfoque de punto final son los que se basan en cambios posteriores en la cadena causa-efecto, principalmente biológicos que representan daños sobre los ecosistemas, la salud humana y los recursos [30].

Los métodos *mintpoint* consideran categorías de impacto como el cambio climático, toxicidad humana, agotamiento del ozono estratosférico, inorgánicos respiratorios, formación de ozono fotoquímico (nivel tierra), radiación ionizante, acidificación (tierra y agua), ecotoxicidad (agua dulce, marina, terrestre), eutrofización (tierra y agua), uso de la tierra y agotamiento de recursos (minerales, fósiles y recursos energéticos renovables) [66]. Como ejemplos, existen los métodos CML, EDIP 2003 y TRACI [30].

Los puntos analizados en los métodos *endpoint* son daño a la salud humana, daño a ecosistema y agotamiento de los recursos naturales, como es claro, estos están relacionados con las tres áreas de protección “salud humana”, “medio ambiente natural” y “recursos naturales”, respectivamente [66]. Los ejemplos más conocidos de este enfoque son el método Eco-indicador 99, EPS 200, Eco Scarcity y JEPIX [30].

De manera general, se puede reconocer el desarrollo de dos escuelas de metodologías: los métodos orientados a la resolución de problemas, los cuales limitan la modelización cuantitativa a las primeras etapas y agrupan los resultados del inventario en las denominadas categorías intermedias; y, los métodos orientados al daño, que modelan la cadena hasta el punto final, o lo que es lo mismo, hasta el daño relacionado con los distintos ámbitos de protección ambiental [30].



3 ANTECEDENTES

La implementación de residuos en el área de la edificación una práctica que ha sobresalido dentro de los grupos científicos que analizan la incorporación de nuevos materiales sustentables; desde la implementación de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) [67], hasta la implementación de residuos textiles en el concreto (cita tesis de Beto o Fabricio), demuestran que son bastas los estudios que se llevan a cabo día con día en la exploración de materiales con tecnologías sustentables. Cuando hablamos de tecnologías más limpias o sustentables nos referimos a utilizar procesos que involucren menor cantidad de materias primas o subproductos agroindustriales para mejorar la calidad de producción mediante tecnologías ecoeficientes [68]. Dentro de estos estudios, existe una línea de enfoque muy fuerte que reduce el uso de cemento Portland como cementante en concretos y se dedicada al análisis de materiales cementantes suplementarios con alta actividad puzolánica, como cenizas volantes, escoria granulada molida, humo de sílice, etc., la que se ha intensificado en el ámbito científico gracias a las mejoras encontradas en las propiedades mecánicas de los concretos adicionados con dichos materiales [69]. C. Bernabé Reyes *et. al.* (2012) obtuvieron resultados favorables al hacer una sustitución de ceniza de elaboración de ladrillo en un mortero cemento-arena, puesto que el mortero adicionado con el residuo presentó mejores características de resistencia ante sollicitaciones mecánicas que un mortero control sin adición [70]. La investigación realizada por J. L. Rodríguez Bucio *et.al.* (2012) destacó que se puede eliminar un cierto porcentaje de cemento portland para sustituir hasta un 20% ceniza de bagazo de caña y carbón vegetal en un mortero cemento arena, ya que los morteros con dichas adiciones muestran resultados favorables ante esfuerzos de compresión y flexión en edades tardías [71]. L. Cruz Jiménez *et.al.* (2012), por su parte, analizaron la adición en morteros cemento-arena de ceniza de carbón y escoria de alto horno generadas en una siderurgia; su estudio fue prometedor, puesto que los morteros con residuos revelaron una resistencia igual, y en algunos casos mayor al mortero con 100% de cemento Portland [72]. J. A. Núñez Hurtado *et. al.* (2012) trabajó con ceniza de Blast Oxygen Furnance, su análisis indica que dicha ceniza en un mortero cemento-arena es viable para una sustitución del



cementante por el residuo hasta un 5%, generándose un mortero con propiedades similares al mortero testigo [73].

Sin embargo, durante la valoración de la posible aplicación de los residuos en nuevos materiales sustentables se vuelve complicado determinar la factibilidad del uso de dichos residuos al momento de evaluar también las contribuciones ambientales y revisar el balance entre éstas y las mejoras mecánicas, principalmente por la complicación de cuantificar dichos aspectos. Como se mencionó, diversos autores han estado trabajando en la reducción de las emisiones procedentes de la elaboración de cemento desde un enfoque tecnológico, mientras que otros autores han estado discutiendo las consecuencias ambientales del empleo de diferentes soluciones desde un enfoque de Análisis de Ciclo de Vida [74]. Nour El Houda Khitas *et. al.* (2025), durante de investigación de morteros preparados sustituyendo el cemento por residuos de ladrillos, puzolana natural y arena de sílice, encontraron que la sustitución del 20% de cemento por alguno de estos aditivos resulta en una disminución de energía utilizada en la molienda que oscila entre el 18% y 19% en contraste con el cemento Portland, y con dichos resultado dedujeron una disminución de emisiones de CO₂ en un 19% con el uso de sustituciones ecológicas [75]. Durante su indagación sobre la viabilidad de combinar escoria residual producida por la industria del acero como reemplazo en morteros base cemento, Richa Palod *et. al.* (2019) llevaron a cabo un ACV el cual reveló una disminución visible en los impactos ambientales en todas las categorías que evalúa el método CML del Centro de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden, Holanda [76]. Francisco Agrela *et. al.* (2024) prepararon morteros con incorporación de agregados reciclados y cenizas de fondo de biomasa procedentes de orujo de aceituna en sustitución del cemento y los agregados, luego, con la aplicación de una evaluación de impacto, obtuvieron una disminución de las emisiones de CO₂ en un 25% en relación a las emisiones producidas por la elaboración de un mortero tradicional [77].

Durante la indagación para identificar los aspectos que reducen o aumentan de manera significativa el impacto ambiental del mortero como producto, A. Peterk Gursel *et. al.* (2014) realizaron una revisión centrada en la fase del inventario del ciclo de vida del



concreto, en el artículo reportó que el 90% de la energía se gasta en la etapa de producción de cemento, por su parte, la obtención de materias primas (preparación, molienda y transporte) se encuentra en un rango de 2-5%, aproximadamente, porcentajes que a niveles globales pueden representar grandes cantidades [78]. Durante una indagación realizada por Rishabh Bajpai *et. al.* (2020) para analizar la posibilidad de utilización de cenizas volantes y humo de sílice como sustitutos del cemento, se concluyó que el cemento es responsable del 76.42% de los impactos ambientales de una mezcla de concreto convencional [79]. Con respecto al impacto generado por el uso de agregados pétreos en la producción de concreto/mortero, Y. Zhang *et. al.* (2019) reportaron que la carga ambiental del transporte de los agregados es lo más significativo, representando entre el 4 y el 14% del impacto total del material [80], datos que concuerdan con los resultados obtenidos por P. Jagadesh *et. al.* (2024) en su análisis a morteros base cemento con sustituciones parciales de polvo de concreto reciclado [81]. Adicionalmente, Rishabh Bajpai *et. al.* (2020) también revisaron la contribución total del transporte en general dentro de la fabricación del concreto en la categoría de impacto Potencial de Calentamiento Global, concluyendo que el transporte genera un aumento del impacto en dicha categoría en un porcentaje desde el 8.80% hasta el 47.61% [79].



4 JUSTIFICACIÓN

La emisión de CO₂ a la atmósfera durante la fabricación de cemento deja una huella enorme de carbono. El centro de estudios británicos Chatham House estimó que es causante del 8%, aproximadamente, de las emisiones totales de CO₂ a nivel global, y establece que se establecería como el tercer emisor, si se considerara un país, superado solo por China y Estados Unidos [82]. La International Energy Agency (IEA) reporta una producción mundial anual de 4000 millones de toneladas de cemento [83], tan solo en México, durante el año 2021 la producción del sector alcanzó las 51.5 millones de toneladas, un 7.8% arriba de las cifras para 2020 [84], y, conforme a la Federación Interamericana del Cemento (FICEM) quien representa las organizaciones productoras, asociaciones e institutos en América Latina y del Caribe, se emiten cerca de 600 kg de CO₂ en cada tonelada de material fabricado en la zona [85].

El concreto puede ser un material duradero con un rendimiento satisfactorio durante una fase de vida útil aceptablemente larga [86], es por esto que se denomina el material de construcción por excelente. La población urbana alcanzó los 800 millones en el mes de noviembre de 2022 y se estima que se llegarán a los 9700 millones para el año 2050 [87], analizando esto y considerando que el crecimiento de la población exige una constante urbanización y modernización, la utilización del concreto para estos procesos no se detendrá, por ende, la fabricación de cemento tampoco va a disminuir en un futuro. Es importante que la comunidad científica contribuya en la popularización del uso y producción de materiales más amigables con el entorno ambiental para crear ciudades sostenibles. Por ello, la incorporación de otro tipo de cementantes con menor impacto en su producción ha sido analizado en diferentes investigaciones, sin embargo, en el país aún se ha popularizado su uso en construcciones masivos debido a la falta de antecedentes suficientes que lleven a cabo un análisis tanto mecánico como ambiental.

Con el propósito de contribuir en la valoración de morteros con residuos industriales como sustituciones parciales del cemento a la sociedad mexicana, en el presente trabajo se desarrolla un análisis del comportamiento mecánico en diferentes morteros con adiciones de residuos industriales investigados en el laboratorio de materiales Luis Silva Ruelas, y posteriormente, un análisis de ciclo de vida en cada uno de ellos.



5 HIPÓTESIS

Los morteros creados con residuos industriales como sustituciones parciales de cemento con el mismo desempeño mecánico que un mortero convencional, tendrán mejor impacto ambiental que estos últimos, gracias a la disminución de la cantidad de cemento usada para su elaboración, así como al aumento de vida de los residuos incorporados en él; siendo una alternativa viable para su uso en las ciudades sostenibles que se desean para el futuro.



6 OBJETIVOS

6.1 General

Evaluación, tomando en cuenta criterios ambientales y de comportamiento mecánico, de varios morteros con residuos industriales como sustituciones parciales del cemento, con el fin de contribuir en la popularización de materiales alternativos y ecológicos para la creación de ciudades sostenibles en México.

6.2 Específicos

- Realizar un análisis de las propiedades mecánicas en morteros con residuos industriales como sustitutos parciales de cemento.
- Evaluar de manera ambiental los morteros en estudio con la metodología ACV para determinar el impacto del material a lo largo de las etapas de su vida.
- Identificar el mortero óptimo, tomando en consideración el impacto ambiental y comportamiento mecánico de cada uno de los morteros en estudio.



7 METODOLOGÍA

7.1 Planificación del estudio experimental

Para la planificación del presente estudio se establecieron tres fases o etapas dentro del diseño metodológico de la investigación.

- **Fase 1. Elección de materiales de estudio:** Una fase inicial diseñada con la intención de hacer una delimitación certera de los morteros suplementarios sujetos a estudio, llevando a cabo una búsqueda de las investigaciones sobre incorporación de residuos industriales en morteros realizados en el Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”. Después, una vez identificados los residuos con mejores resultados, así como los porcentajes de sustitución óptimos, llevar a cabo la elección de los morteros suplementarios para su posterior evaluación.
- **Fase 2. Análisis mecánico:** de acuerdo con los resultados y pruebas reportadas en las diferentes investigaciones de los materiales seleccionados, realizar la elección de las propiedades mecánicas que ayuden a caracterizar adecuadamente los diferentes morteros. Basándose en las especificaciones de la normativa mexicana, definir los criterios que regirán la propuesta de calificación para el desempeño mecánico y presentar dicha calificación para cada material en estudio.
- **Fase 3. Análisis ambiental:** con ayuda de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, y mediante el método eco-indicador, así como el método ReCiPe, presentar una calificación de desempeño ambiental para cada uno de los morteros en análisis.

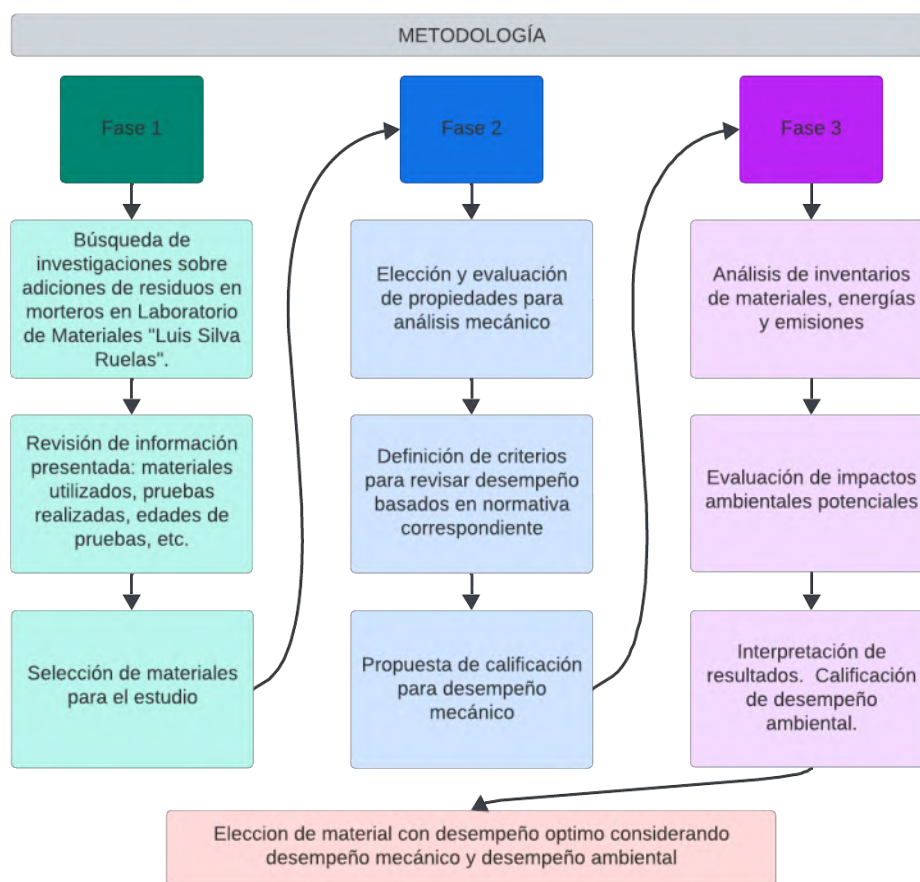


Figura 5. Diseño metodológico de la investigación

7.2 Elección de materiales de estudio

Los materiales que se analizarán en el presente trabajo se basan en materiales previamente estudiados, mecánicamente hablando, en el laboratorio de materiales. A continuación, se enlista cada uno de ellos, así como el porcentaje óptimo de sustitución para cada residuo de acuerdo a lo reportado en las diferentes investigaciones.

1. Ceniza de Bagazo de Caña (CBC), en un porcentaje de sustitución del 20% [71].
2. Ceniza de Carbón Vegetal (CCV), en un porcentaje de sustitución del 20% [71].
3. Ceniza de Elaboración de Ladrillo (CEL), en un porcentaje de sustitución del 5% [70].
4. Ceniza de Carbón Mineral (CM), en un porcentaje de sustitución del 10% [72].



5. Escoria de Alto Horno (EAH), en un porcentaje de sustitución del 10% [72].
6. Ceniza del Horno Blast Oxygen Furnace (CHBOF) en un porcentaje de sustitución del 5% [73].

Adicionalmente, se analizarán también dos morteros testigos sin ningún tipo de sustitución, con 100% de Cemento Portland como cementante. Un primer testigo denominado T1-H, para ser comparado con los primeros tres residuos industriales CBC, CCV y CEL, ya que los 4 morteros mencionados fueron elaborados con arena del Río Huajúmbaro. Y un segundo testigo, el T2-L, colado con arena del Río Lerma, al igual que los morteros con sustitución de CM, EAH y CHBOF, con la finalidad de poder llevar a cabo una comparación adecuada.

7.2.1 Materiales y diseño de mezclas

Los materiales que se utilizaron en la elaboración de las diferentes mezclas fueron cemento, agua, arena (río Huajúmbaro o río Lerma, según el caso) y el residuo. En las siguientes páginas se describen los diferentes materiales ya mencionados.

Cemento

El material utilizado fue Cemento Portland Compuesto de clase 30R, resistencia mínima a 3 días de 20MPa, de resistencia rápida y resistencia a sulfatos de la marca Tolteca [88][64][15]. La clasificación descrita CPC 30 R RS es de acuerdo a la normativa mexicana, la NMX-C-414-ONNCCE-2004 [89], al igual que la norma ASTM C 150/150M [90].

Arena

Se estuvo trabajando con dos diferentes agregados, ambos extraídas de río y con alto contenido de cuarzo. Se obtuvieron del río Huajúmbaro ubicado en el estado de Michoacán, y del río Lerma en Guanajuato.



a)



b)

Figura 6. Cemento y arena utilizados en la elaboración de morteros. a) cemento, b) arena. [64]

CBC

La CBC corresponde a un desecho generado en la calcinación del bagazo de caña en el ingenio “Lázaro Cárdenas” de Taretan, Michoacán. Durante la producción del azúcar, se produce el bagazo de caña, un residuo fibroso procedente del material leñoso de caña y humedad que no ha sido eliminada, el cual es utilizado como un combustible para crear energía que alimente el proceso; en este proceso de calcinación es donde se genera la CBC [71]. A partir de un análisis de su composición química y determinación de la cantidad de óxidos, se demostró una actividad puzolánica del 66.4% permitiendo clasificar esta ceniza como puzolana tipo C [15], a partir de la clasificación presentada en la tabla 2. La composición química determinada con fluorescencia de rayos X se presenta en la tabla siguiente.

Tabla 4. Composición química de CBC [15]

Componente	%	Componente	%
SiO ₂	56.620	SO ₃	0.244
Al ₂ O ₃	4.293	ZrO ₂	0.000
TiO ₂	0.422	Cl	0.000
Fe ₂ O ₃	5.488	Cr ₂ O ₃	0.000
MgO	1.573	SrO	0.057
MnO	0.227	ZnO	0.000
CaO	2.013	PXC/PPI	26.650
Na ₂ O	0.240	BaO	0.000
K ₂ O	2.178	P ₂ O ₅	0.000



CCV

La ceniza de carbón vegetal fue generada durante la producción de carbón, al ser calcinado este material orgánico, se genera ceniza del material que se consume. La ceniza proveniente de la elaboración de carbón vegetal a partir de la madera de encino mencionada en este trabajo fue obtenida en la localidad Cuto de la Esperanza, municipio de Morelia, Michoacán [88]. En la tabla 5 se coloca la composición química esta ceniza, de acuerdo con la norma ASTM C618-22, esta ceniza no se puede clasificar en ninguno de los tres tipos de puzolanas, debido a su porcentaje de actividad puzolánica, alcanzando un 38.8% de compuestos destacados para la actividad puzolánica y por pérdidas grandes por calcinación [15].

Tabla 5. Composición química de CCV [15]

Componente	%	Componente	%
SiO ₂	27.000	SO ₃	0.685
Al ₂ O ₃	12.710	ZrO ₂	0.000
TiO ₂	1.000	Cl	0.000
Fe ₂ O ₃	9.131	Cr ₂ O ₃	0.000
MgO	2.132	SrO	0.216
MnO	0.196	ZnO	0.000
CaO	25.220	PXC/PPI	19.190
Na ₂ O	0.580	BaO	0.000
K ₂ O	1.945	P ₂ O ₅	0.000

CEL

En la producción de ladrillos, durante la etapa de cocción de los ladrillos, la energía necesaria se genera con la calcinación de leña. La ceniza de elaboración de ladrillo utilizada en este trabajo proviene de dicho proceso llevado a cabo en Tenencia Morelos, municipio de Morelia, Michoacán. La ceniza es un desecho del proceso de elaboración de ladrillos, y en ocasiones es utilizada dentro de la propia industria para el desmolde de los tabiques [70]. Con la ceniza obtenida de la elaboración de ladrillos sucede lo mismo que con la ceniza de carbón vegetal, al tener un 41.4% de compuestos encargados de desarrollar la actividad puzolánica, no se puede clasificar en algún tipo [15]. Su composición química está en la tabla 6.



Tabla 6. Composición química CEL [15]

Componente	%	Componente	%
SiO ₂	28.180	SO ₃	2.150
Al ₂ O ₃	7.188	ZrO ₂	0.000
TiO ₂	0.610	Cl	0.000
Fe ₂ O ₃	5.967	Cr ₂ O ₃	0.000
MgO	1.550	SrO	0.062
MnO	0.441	ZnO	0.084
CaO	29.730	PXC/PPI	12.540
Na ₂ O	0.136	BaO	0.000
K ₂ O	1.160	P ₂ O ₅	0.000



a)



b)



c)

Figura 7. Residuos utilizados como sustitución del cemento. a) CBC, b) CCV, c) CEL. [64]

CM

Una de las industrias que genera ceniza de carbón mineral es la metalurgia. La ceniza de carbón mineral utilizada proviene de la siderurgia de Lázaro Cárdenas, Michoacán, el cual es un desecho del coque utilizado en la fabricación del acero y no es utilizado en ningún otro proceso, resultando un desecho para la empresa Arcelor Mittal [72]. No se cuenta con la composición química del carbón mineral, puesto que no fue posible hacer el análisis de fluorescencia de rayos X, debido a que las pérdidas por calcinación del material fueron superiores al 85% [15].

EAH

La escoria de alto horno es un producto que flota en el baño de fundición del metal formado por la neutralización de óxidos ácidos y básicos, siendo separados del metal cuando éste se enfría [72]. Este material es un aditivo ya estudiado como adición de



materiales constructivos, estando presente en algunos cementos presentados en la norma NMX-C-414-ONNCCE-2017 [89]. La escoria de alto horno en estudio se produjo en la siderurgia Arcelor Mittal en Lázaro Cárdenas, Michoacán [72]. En la composición química obtenida para la escoria derivada del análisis de fluorescencia de rayos x (tabla 7) se encontró un porcentaje de reacción puzolánica de 47.5%, muy cerca del 50% que indica la norma ASTM C168-22 para que un material sea considerado una puzolana de tipo F.

Tabla 7. Composición química EAH [15]

Componente	%	Componente	%
SiO ₂	36.383	SO ₃	1.930
Al ₂ O ₃	10.631	ZrO ₂	0.000
TiO ₂	0.556	Cl	0.000
Fe ₂ O ₃	0.335	Cr ₂ O ₃	0.000
MgO	10.107	SrO	0.000
MnO	0.417	ZnO	0.000
CaO	37.551	PXC/PPI	-0.720
Na ₂ O	0.298	BaO	0.000
K ₂ O	0.424	P ₂ O ₅	0.053

CHBOF

Además de la escoria de alto horno y la ceniza de carbón mineral, la siderurgia produce un tipo de ceniza durante el proceso de fabricación del acero en donde participa el horno básico de oxígeno, por ellos el residuo obtenido se denomina ceniza del blast oxygen furnance. Suministrada, al igual que CM y EAH por Acerlor Mittal, ubicada en Cd. Lázaro Cárdenas, Michoacán [73]. En la ceniza CHBOF se obtuvo solo un 45.7% de compuestos con actividad puzolánica, la composición química se presenta en la tabla 8.





a) b) c)

Figura 8. Residuos utilizados como sustitución del cemento. a) CM, b) EAH, c) CHBOF. [64]

Tabla 8. Composición química de CHBOF [15].

Componente	%	Componente	%
SiO ₂	14.584	CaO	37.456
Al ₂ O ₃	4.287	Na ₂ O	0.032
TiO ₂	0.827	K ₂ O	0.024
Fe ₂ O ₃	26.773	PXC/PPI	4.790
MgO	5.995	SO ₃	0.800
MnO	2.423	P ₂ O ₅	0.814

Los criterios de diseño para las diferentes mezclas siguieron lo establecido en la normativa internacional ASTM C 109/C 109M-02 “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars”[91] y la normativa mexicana NMX-C-061-ONNCCE-2001 “Determinación de la resistencia a la compresión de los cementantes hidráulicos” [92]. De acuerdo a las especificaciones, las mezclas se realizaron utilizando 2.75 partes de arena por una de cemento, partiendo de una relación agua/cemento de 0.485 y siendo modificada hasta obtener una fluidez de 110±5%; finalmente, la relación agua/cemento adecuada se fijó en 1.01, con un rendimiento de cemento de 0.47 gr/m³ [88][64][15].

Las dosificaciones totales utilizadas en la fabricación de cada mezcla se presentan en la tabla 9, en ellas se considera que la sustitución de los residuos se hace en porcentaje del peso del cemento.

Tabla 9. Dosificaciones de materiales para elaboración de las mezclas [88].

Mezcla	Arena (g)	Agua (g)	Cemento (g)	CBC (g)	CCV (g)	CEL (g)	CM (g)	EAH (g)	CHBOF (g)
T1-H	4072	1495	1481						
CBC-20	4072	1495	1185	296					
CCV-20	4072	1495	1185		296				
CEL-5	4072	1495	1407			74			
T2-L	4072	1495	1481						
CM-10	4072	1495	1333				148		
EAH-20	4072	1495	1185					296	
CHBOF-5	4072	1495	1407						74



7.3 Análisis mecánico

El análisis mecánico que se llevará a cabo pretende realizar una comparativa de las propiedades físico-mecánicas entre los diferentes morteros elaborados, con la finalidad de identificar cuál de los residuos utilizados como sustitutos del cemento Portland obtuvo un desempeño óptimo, mecánicamente hablando; al tiempo que se identifica si la sustitución del residuo es realmente viable, de acuerdo al desempeño identificado en los morteros control (con 100% de cemento Portland como cementante).

Recordemos que tenemos 8 mezclas de morteros diferentes (Tabla 9):

- **T1-H:** testigo 1, con arena del río Huajúmbaro.
- **CBC-20:** mezcla con 20% de sustitución de Ceniza de Bagazo de Caña.
- **CCV-20:** mezcla con 20% de sustitución de Ceniza de Carbón Vegetal.
- **CEL-5:** mezcla con 5% de sustitución de Ceniza de Elaboración de Ladrillo.
- **T2-L:** testigo 2, con arena del río Lerma.
- **CM-10:** mezcla con 10% de sustitución de Carbón Mineral.
- **EAH-20:** mezcla con 20% de sustitución de Escoria de Alto Horno.
- **CHBOF-5:** mezcla con 5% de sustitución de Ceniza de Horno Basic Oxygen Furnance.

7.3.1 Registro de propiedades para el desempeño mecánico

En el desempeño mecánico de los morteros serán consideradas cinco propiedades físico-mecánicas. Primeramente, 3 propiedades ligadas directamente con la resistencia mecánica de los materiales elaborados, que son resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y resistencia a la tensión; y, por último, dos propiedades relacionadas con la durabilidad del material, la resistividad eléctrica y la velocidad de pulso ultrasónico.

Se considerarán los resultados de pruebas elaboradas en laboratorio para obtener las propiedades mencionadas en el párrafo anterior considerando un rango de edades amplio, desde los 14, 28, 45, 90, y hasta los 180 días de prueba, agregando además las edades de 360 y 1000 días para las dos propiedades de durabilidad.



Se elaboraron especímenes cúbicos de 5cm de lado, con los cuales fue llevada a cabo la prueba de resistencia a compresión simple dictaminada en la norma ASTM C109/C109M [91] y con ella se obtuvo la resistencia a compresión (f'_c) de cada diseño de mortero. Con la prueba de resistencia a flexión se determinó el módulo de ruptura (MR) para cada mezcla en cada una de las edades establecidas; se siguió el procedimiento establecido en la norma ASTM C293/C293M [93] y se prepararon vigas de 4cm x 4cm x 16 cm como dimensiones. También, especímenes en forma de briqueta fueron colados para ser ensayados en la máquina Michaelis y así encontrar el valor de resistencia a la tensión directa (TD) en cada mezcla de mortero elaborada. Para la prueba de resistividad eléctrica se utilizó la normativa ASTM G57 [93] que dicta el procedimiento a seguir para obtener la resistividad eléctrica (RE) en suelos y materiales porosos; este ensayo fue llevado a cabo en especímenes cilíndricos de 5cm de diámetros x 10cm de altura. Finalmente, para encontrar la propiedad de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) se siguieron las especificaciones establecidas en la norma ASTM C597 [94]; al igual que la prueba de resistividad eléctrica, el procedimiento se realizó a las muestras cilíndricas de 5cm de diámetros x 10cm de altura.

7.3.2 Definición de criterios para revisión de desempeño mecánico

En el ámbito de la ingeniería civil, un aspecto muy importante para el diseño de infraestructura son los requisitos de resistencia que tienen que cumplir los materiales para poder ser utilizados, puesto que, si se cumple con las especificaciones de resistencia que se establecen en la normativa, el material tendrá un desempeño adecuado una vez puesto en obra. Por ello, los criterios que se proponen en la presente investigación para la revisión del desempeño mecánico en los diferentes morteros que están en análisis se basan en los requisitos de resistencia y durabilidad que especifica la normativa mexicana, puesto que son los parámetros que nos certifican un comportamiento óptimo y adecuado del material.

En México, la aplicación de un mortero se da con una clasificación para uso estructural o no estructural; consideraremos para el análisis las especificaciones para mortero estructural, siendo la aplicación en la que se presentan los requisitos más estrictos de resistencia. Primeramente, los requisitos de resistencia mecánica que debe de cumplir



un mortero están establecidos en la norma NMX-C-646-ONNCCE-2010/Ratificada 2021 [14] y en la norma N-CMT-2-01-004/02; en las normas citadas se establece únicamente los requisitos de resistencia a compresión mínima que debe de cumplir un mortero para uso estructural a la edad de 28 días (Tabla 10). Se establecen valores desde 4 MPa, para el mortero con menores requisitos de resistencia, hasta 12.5 MPa de resistencia a compresión para el mortero que requiere valores del altos del f'_c .

Tabla 10. Tipos de mortero y resistencia mínima de diseño a la compresión [14][11]

Tipo de mortero	f'_c Mpa
Tipo I	12.5
Tipo II	7.5
Tipo III	4.0

Hablando de resistencia mecánica concretamente, no existen más especificaciones dentro de la normativa mexicana, por tanto, para continuar con la definición de criterios de resistencia para las 2 propiedades restantes (resistencia a la tensión y resistencia a la flexión) se hace uso de lo establecido en la literatura, en donde existen trabajos que desarrollan correlaciones entre la resistencia a compresión de un concreto y su flexión o tensión. Se utiliza la correlación propuesta por Steven H. Kosmatka *et. al.*[10], quien explica que la resistencia a la flexión de concretos es, aproximadamente, de 0.7 a 0.8 veces la raíz cuadrada de su resistencia a compresión, mientras que, por su parte, la resistencia a tensión es, normalmente, del 0.4 a 0.7 veces su raíz cuadrada. Con las correlaciones descritas, se encuentran las resistencias mínimas a la flexión y tensión presentadas en las tablas 11 y 12.

Tabla 11. Tipos de mortero y resistencia mínima de flexión

Tipo de mortero	f'_c Mpa
Tipo I	2.5
Tipo II	1.9
Tipo III	1.4

Tabla 12. Tipos de mortero y resistencia mínima de tensión

Tipo de mortero	f'_c Mpa
Tipo I	1.4
Tipo II	1.1
Tipo III	0.8



De los dos criterios de durabilidad en análisis, la RE y la VPU, no existe normativa específica para morteros, por lo que, en su defecto, se utilizan las especificaciones dictadas por la norma NMX-C-514-ONNCE-2019 [95] que establece criterios de evaluación de resistividad eléctrica real para revisión de riesgo de corrosión en especímenes de concreto, así como los criterios de evaluación de la calidad del concreto a partir de la velocidad de propagación de ondas establecida por la Red DURAR [96]. Las especificaciones mencionadas son las establecidas en la tabla 13 y 14.

Tabla 13. Criterios de evaluación de resistividad eléctrica real en especímenes de concreto [95]

Resistividad eléctrica K Ω -cm	Riesgo de corrosión
100-200	Muy bajo
50-100	Bajo
10-50	Moderado
<10	Muy alto

Tabla 14. Criterios de evaluación de concreto a partir de VPU [96]

Velocidad de propagación m/s	Calidad del material
>400	Durable
3001-4000	Alta
2001-3000	Normal
<2000	Muy alto

7.3.3 Propuesta de calificación para desempeño mecánico

La propuesta de calificación mecánica que se pretende aplicar a todas las mezclas de mortero en evaluación está diseñada a partir de los parámetros en la normativa mexicana presentados en el subtema anterior. Se propone una calificación base 10, donde el 10 es la puntuación más elevada, asignada a aquel mortero que alcanzó el requisito de resistencia o durabilidad más alto, y bajando la calificación en rangos de 2.5 puntos a partir de la especificación superior hacia la especificación menor. A cada mezcla se le dará una calificación para cada una de las propiedades que se consideran dentro del rendimiento mecánico, de acuerdo a la tabla 15, siendo necesario sumar estas cuatro calificaciones para asignarle una puntuación final de desempeño mecánico a cada mortero en análisis.



Tabla 15. Propuesta de calificación de desempeño mecánico

Calificación	Parámetro				
	RE (K Ω -cm)	VPU (m/s)	f _c (MPa)	MR (Mpa)	TD (Mpa)
10	100-200	>400	12.5	2.5	1.4
7.5	50-100	3001-4000	7.5	1.9	1.1
5	10-50	2001-3000	4.0	1.4	0.8
2.5	<10	<2000			

7.4 Análisis ambiental

La implementación del análisis de ciclo de vida sigue el marco establecido por las normas ISO 14040 [51] e ISO 14044 [52].

7.4.1 Fase 1. Definición de objetivo y alcances

El objetivo del Análisis de Ciclo de Vida presentado en este trabajo es llevar a cabo la comparación del impacto ambiental generado por un mortero convencional contra morteros sustentables (con sustituciones parciales de residuos industriales) a partir de la evaluación y cuantificación de los impactos potenciales generados durante su ciclo de vida hasta la producción, con la finalidad de contribuir a la popularización del uso de morteros sostenibles en la comunidad científica y técnica de la construcción mexicana.

Para el ACV, se considerarán 8 sistemas diferentes, uno para cada mezcla:

- **Sistema T1-H.** Sistema de mortero convencional elaborado a base de cemento, arena del Río Huajúmbaro y agua.
- **Sistema CBC.** Sistema de mortero suplementario elaborado a base de cemento, ceniza de bagazo de caña, arena del Río Huajúmbaro y agua.
- **Sistema CCV-20.** Sistema de mortero suplementario elaborado a base de cemento, ceniza de carbón vegetal, arena del Río Huajúmbaro y agua.
- **Sistema CEL-5.** Sistema de mortero suplementario elaborado a base de cemento, ceniza de elaboración de ladrillo, arena del Río Huajúmbaro y agua.
- **Sistema T2-L.** Sistema de mortero convencional elaborado a base de cemento, arena del Río Lerma y agua.



- **Sistema CM-10.** Sistema de mortero suplementario elaborado a base de cemento, ceniza de carbón mineral, arena del Río Lerma y agua.
- **Sistema EAH-20.** Sistema de mortero suplementario elaborado a base de cemento, escoria de alto horno, arena del Río Lerma y agua.
- **Sistema CHBOF-5.** Sistema de mortero suplementarios elaborado a base de cemento, ceniza del horno básico de oxígeno, arena del Río Lerma y agua.

Función y unidad funcional.

Considerando que dentro del servicio que ofrece el mortero en la industria de la construcción son múltiples las aplicaciones que podemos encontrar para dicho material, la unidad funcional seleccionada para la realización del ACV es de 1 m³ de mortero elaborado en laboratorio.

Límites del sistema

La evaluación del ciclo de vida de los 8 sistemas se evaluará de la cuna a la puerta cuantificando los impactos ambientales asignados al material desde la extracción de las materias primas (cuna) hasta la producción de 1 m³ de mortero (puerta). Para hacer la comparación del impacto ambiental entre los diferentes morteros en análisis, la evaluación “de la cuna a la puerta” en donde se considera, i) obtención de materias primas, ii) transporte al sitio de producción, y iii) elaboración del mortero en laboratorio; y se excluye la fase de uso y disposición final es adecuado, ya que todos los morteros fueron diseñados para cumplir funciones de uso similares, siendo así que las fases de uso y disposición final no influirán en los resultados de comparación finales [97][38]. En las figuras 9 y 10 se presentan los límites para todos los sistemas en estudio.

Flujos de referencia

Para las etapas consideradas dentro del límite de los sistemas, se establecieron las entradas y salidas mostradas en las figuras 11 y 12. Para las entradas al sistema se consideró, el material extraído y energía necesaria en su obtención, la energía utilizada en el transporte de las mismas, así como la energía utilizada en la producción de los diferentes morteros.

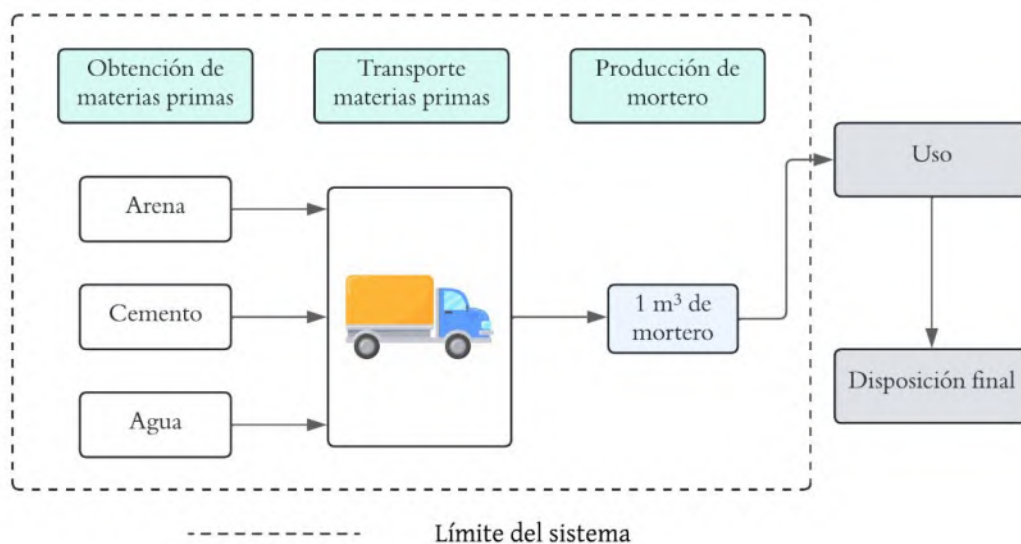


Figura 9. Límite de los sistemas T1-H y T2-L

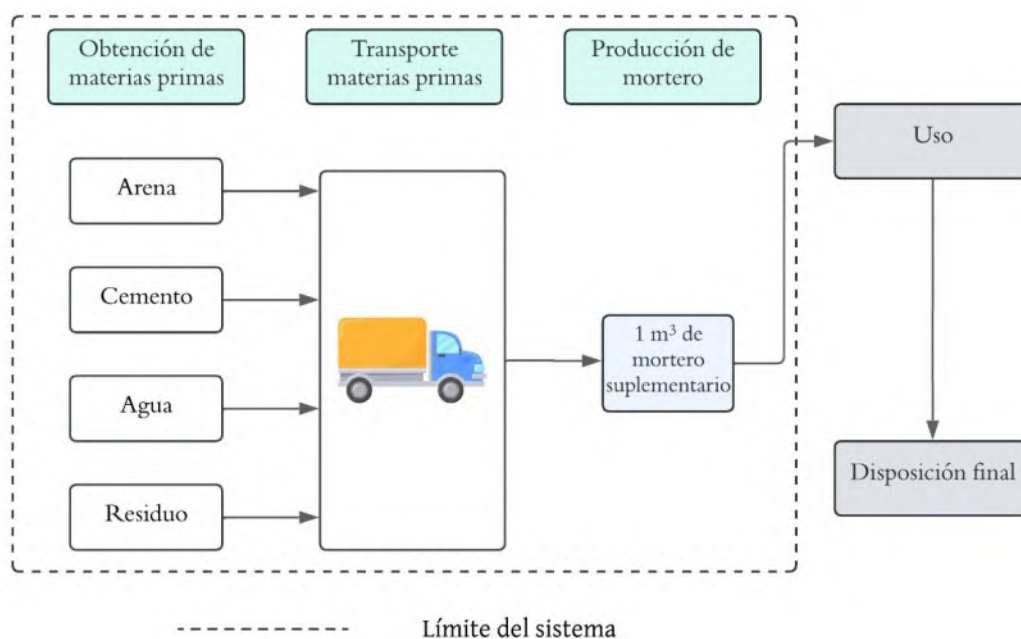


Figura 10. Límite de los sistemas CBC-20, CCV-20, CEL-5, EAH-20 y CHBOF-5

De acuerdo con la figura 11, en la elaboración de los morteros suplementario se considera un proceso más, el tratamiento necesario antes de la utilización de los residuos. Las salidas son todas aquellas emisiones al ambiente generadas en los procesos ya mencionados.

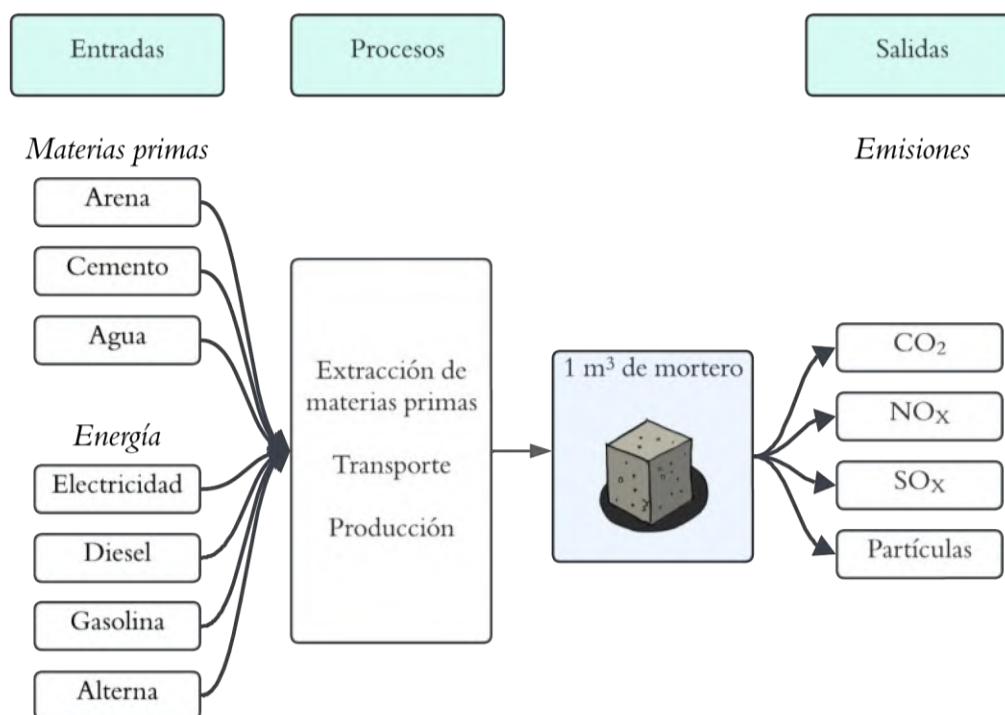


Figura 11. Entradas y salidas para los sistemas de mortero T1-H y T2-L

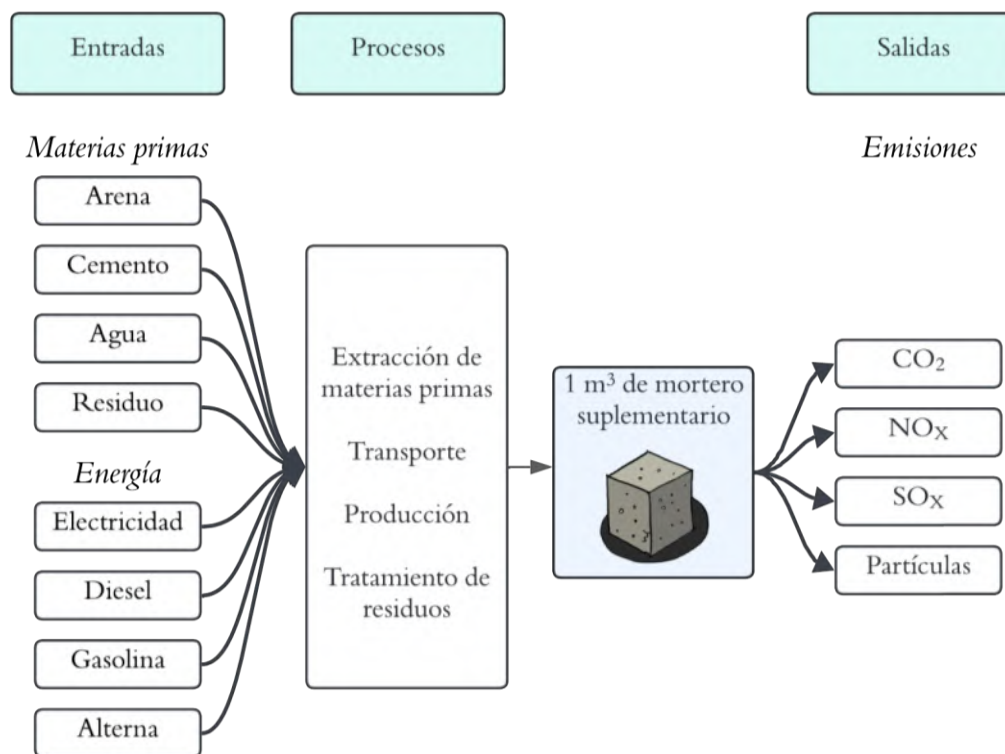


Figura 12. Entradas y salidas para los sistemas de morteros de los sistemas CBC-20, CCV-20, CEL-5, CM-10, EAH-20 y CHBOF-5



A continuación, se describen los procesos asociados a los flujos de referencia establecidos dentro del sistema, para llegar a la unidad funcional.

Extracción de arena: no se hizo ninguna explotación a un banco de material, ni procesos de trituración para la obtención de la arena ya que fue recogida de manera manual, con una pala, en los ríos Huajúmbaro y Lerma. Finalmente, ambas arenas fueron cribadas manualmente por la malla no. 16 y 30 [64][88].

Producción de cemento Portland: para el proceso de producción del cemento portland, se tomó en consideración el proceso sistematizado que siguen las cementeras, en donde se encuentran una gran cantidad de operaciones, organizado en 4 etapas, de acuerdo a Kosmatka *et. al.* (2004): a) selección, trituración y dosificación adecuada de las materias primas; b) proceso de molienda de la materia prima; c) procesos de calcinación para transformar químicamente la harina cruda en el clinker del cemento; y, d) etapa final en donde el clinker se enfría y pulveriza, agregando los aditivos finales [10].

Tratamiento a la ceniza de bagazo de caña: la ceniza residuo de la quema del bagazo dentro de la industria del azúcar, necesitó únicamente cribado manual por la malla no. 200 para eliminar carbón y partículas gruesas [15][88]. Por lo tanto, en el tratamiento realizado a este residuo no hubo gasto de energía, debido a que solo hubo una actividad manual.

Tratamiento a la ceniza de carbón vegetal: para obtener la ceniza residuo de la elaboración de carbón vegetal y utilizarla en la producción de mortero fueron necesarios dos procesos de tratamiento: i) envasado, después de la producción de carbón vegetal, excavar manualmente las chimeneas, con ayuda de una pala para envasar el material, y, ii) tamizado, con ayuda de la malla no. 200 el material fue tamizado para eliminar partículas gruesas y la mayor cantidad de carbón posible [15][88]. Ambos procesos fueron realizados manualmente, por lo tanto, no hubo consumo de energía.

Tratamiento a la ceniza de elaboración de ladrillo: la ceniza de elaboración del ladrillo, al igual que la ceniza de bagazo de caña y la ceniza de carbón vegetal, necesitó



ser tamizada por la malla no. 200 para eliminar partículas grandes antes de su utilización, siendo este proceso el único aplicado a esta puzolana, en consecuencia, no hubo gasto de energía en su tratamiento [15][88].

Tratamiento a carbón mineral: el carbón mineral fue proporcionado en forma granular, por lo tanto, para su utilización se llevaron a cabo dos pasos: i) molienda, con ayuda de un molino de cilindros para llegar a una forma fina, y, ii) tamizado, para utilizar material con tamaños menores a la malla no. 200 [15][88].

Tratamiento a la escoria de alto horno: el tratamiento aplicado a la escoria de alto horno fue el mismo que se aplicó al carbón mineral, i) molienda, para obtener una partícula fina, y, ii) tamizado, por la malla no. 200 [15][88].

Tratamiento a la Ceniza del horno blast oxygen Furnace: este tipo de ceniza generada durante el proceso de producción del acero, también fue adquirida en forma granular al igual que el carbón mineral y la escoria de alto horno, sin embargo, para ser usada simplemente fue tamizado todo el material por la malla no. 200 y el material retenido fue desechado [15][88]. El consumo de energía en el proceso de tratamiento fue nulo para esta ceniza.

Producción de 1 m³ de mortero: la producción de los diferentes morteros se llevó a cabo en una cubeta con capacidad de 19 litros. Para el mezclado de la materia prima se utilizó un taladro adicionado con aspas mezcladoras de la marca Bosch y con potencia de 750 w y 3500 RPM [15][88].

Transporte: El transporte del agregado desde el río Huajúmbaro se hizo en una camioneta Nissan de 1.5 toneladas; por su parte, la arena del río Lerma fue transportada en un volteo de 7 m³. Todas las cenizas fueron transportadas desde el lugar de generación del desecho hasta el Laboratorio de Materiales “Luis Silva Ruelas” en una camioneta Nissan de 1.5 toneladas.

7.4.2 Fase 2. Inventario de extracciones y emisiones

En las entradas, primeramente, se presentan las materias primas necesarias para obtener 1 m³ de mortero. Considerando las cantidades de material que fueron necesarias para



elaborar las mezclas (Tabla 9) y que el rendimiento cementante, a partir de información de la pre experimentación, se fijó en 0.47 gr/cm^3 [88], las cantidades de materiales necesarias para la fabricación de 1 m^3 de cada mortero son las mostradas en la Tabla 16. Las dosificaciones de material para producir 1 m^3 de mortero son similares a lo que se ha reportado en la literatura previamente para morteros [38][76][35][77][75], además, la relación cemento/agregado también se encuentra dentro del rango establecido en la norma ASTM C 109/C 109M-02, en donde se establece que en un mortero estándar, la relación en masa se establece como una parte de cemento por cada 2.75 partes de arena [91].

Tabla 16. Dosificación de materias primas para la elaboración de 1 m^3 de los morteros en estudio.

Mezcla	Arena (kg)	Agua (kg)	Cemento (kg)	CBC (kg)	CVC (kg)	CEL (kg)	CM (kg)	EAH (kg)	CHBOF (kg)
T1-H	1292.26	474.44	470						
CBC-20	1292.26	474.44	376	94					
CCV-20	1292.26	474.44	376		94				
CEL-5	1292.26	474.44	446.5			23.5			
T2-L	1292.26	474.44	470						
CM-10	1292.26	474.44	423				47		
EAH-10	1292.26	474.44	376					94	
CHBOF	1292.26	474.44	446.5						23.5

El inventario para la energía requerida en la producción de cemento, así como las emisiones de CO_2 se obtuvieron del Informe Estadístico del año 2021 presentado por la dirección ejecutiva de la Federación Interamericana del Cemento (FICEM). De acuerdo con sus indicadores de desempeño, para el año 2019, la producción de cemento en Latinoamérica, presentó un consumo de energía térmica de 3560 MJ por tonelada de Clinker (3204 MJ por tonelada de cemento, considerando la composición más desfavorable del cemento, con 90% de clinker), un consumo de energía eléctrica de 106 kWh por tonelada de cemento, así como el uso del 18.27% de combustibles alternos y biomasa. Las emisiones brutas de Dióxido de Carbono generadas por una tonelada de cemento llegaron a los 574 kg de CO_2 [85]. La tabla 17 presenta el resumen de los datos.



Tabla 17. Consumo de energía y emisiones en producción de cemento para el territorio de Latinoamérica. Fuente: FICEM[85].

	1 tonelada cemento	1 kg cemento
Entradas		
Consumo de energía térmica (MJ)	3204.0000	3.2040
Consumo de energía eléctrica (kWh)	106.0000	0.1060
Combustibles asleros y biomasa (18.27%)	65508.9120	65.5089
Salidas		
Emisiones de CO ₂ (kg)	597	0.597

En la mayoría de los *residuos* no se necesitó de energía para su *tratamiento*. Únicamente en el carbón mineral y la escoria, los cuales fueron procesados mecánicamente para obtener partículas más pequeñas; la molienda se llevó a cabo en un molino de cilindros. Considerando una potencia de 35 kWh/ t para la molienda de carbón mineral y una potencia de 95 kWh/t para la escoria de alto horno [78], el consumo energético en el tratamiento de residuos fue de 0.001645 kWh para el carbón mineral y 0.00893 kWh en la molienda de escoria de alto horno.

En la *producción* de 1 m³ de mortero se empleó solo energía eléctrica para hacer trabajar el taladro con el que se mezcló cada una de las proporciones de morteros. El tiempo de mezclado fue de 1.5 min por cada mezcla; considerando la potencia de 750 w del taladro utilizado, la energía eléctrica empleada para la producción del material fue de 0.01875 kW/h.

Transporte de materia prima

El último subproceso por definir es el transporte de cada una de las materias primas.

La *arena del río Huajúmbaro* que se utilizó en la elaboración de los morteros T1-H, CBC, CCV y CEL, se obtuvo directamente del Río El Cuervo, Huajúmbaro [64], una localidad que se encuentra en el municipio de Zinapécuaro del Estado de Michoacán de Ocampo [15], desde donde se trasladó directamente al Laboratorio de materiales, en

Morelia, Michoacán. De acuerdo con la ruta establecida en la figura siguiente, se recorrieron 72.3 kilómetros en el traslado en una camioneta de 1.5 toneladas.

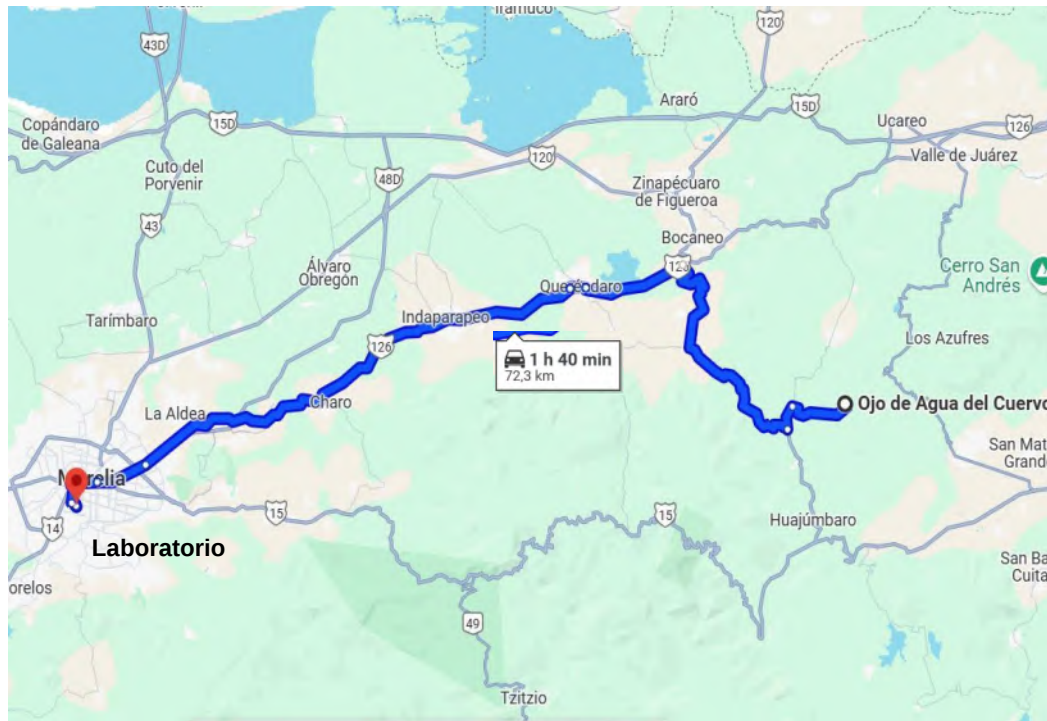


Figura 13. Ruta de transporte desde Río El Cuervo, Huajuábaro, Michoacán, hasta el lugar de producción del mortero

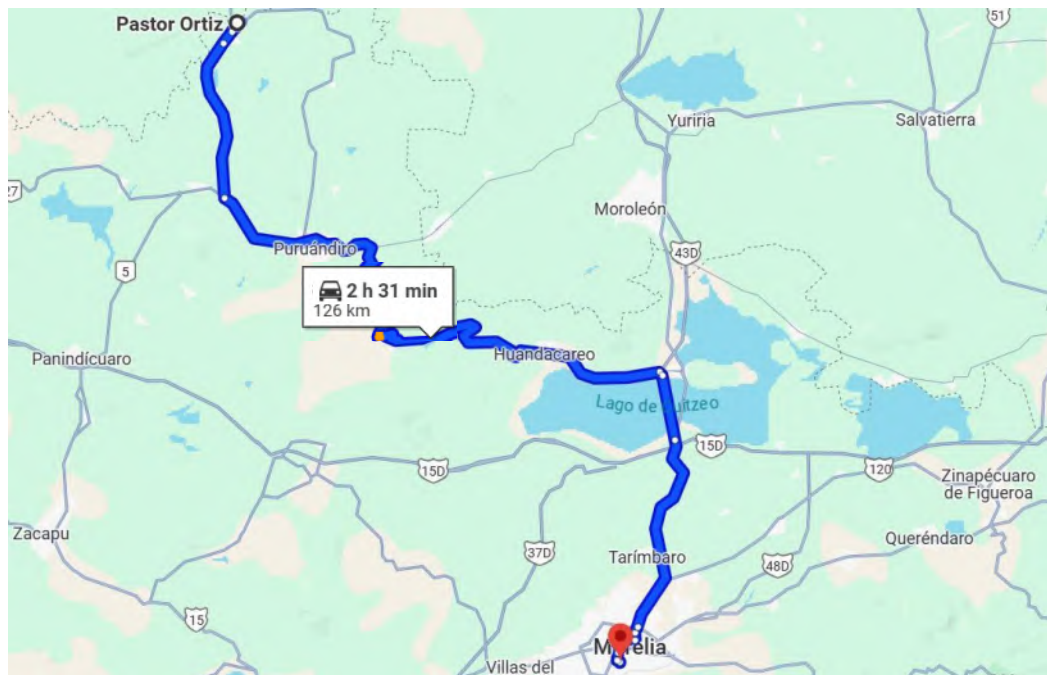


Figura 14. Ruta de transporte desde Río Lerma hasta el lugar de producción del mortero



Por su parte, la *arena del río Lerma*, proviene del río ya mencionado, entre el estado de Michoacán y Guerrero [72]. La arena fue recogida directamente del río, en la comunidad Pastor Ortiz, municipio J. Sixto Verduzco, estado de Michoacán. Fue trasladada al lugar de producción del mortero en un volteo de 7 m³ durante una distancia de 126 km, con la ruta establecida en la figura 14.



Figura 15. Ruta de transporte desde el lugar de generación de los residuos CBC hasta el lugar de producción del mortero

La ruta de traslado del *cemento Portland* considera su traslado, primeramente, de la planta de producción de cemento hasta el punto de venta, y, posteriormente, la distancia recorrida desde el punto de venta hasta el lugar de producción. El suministro de cemento en el Laboratorio de Materiales Ing. Luis Silva Ruelas generalmente sigue la misma ruta: se trata de un cemento producido en el centro de México, de ahí es trasladado al punto de venta dentro de la Ciudad de Morelia en un camión de 32 toneladas, en donde es recogido por el personal del laboratorio con una camioneta de 1.5 toneladas de capacidad y trasladado al punto de producción. Rosalía Ruiz Ruiz (2018) reportó una distancia total de traslado de 231 kilómetros desde la planta de producción de cemento hasta el punto de venta, desde donde se recorren 1.64

kilómetros hasta el Laboratorio de Materiales Ing Luis Silva Ruelas, finalizando así su recorrido [65].

La ceniza de bagazo de caña necesitó ser transportada 104 kilómetros desde el Ingenio “Lázaro Cárdenas” ubicado en el municipio de Taretan, Michoacán de Ocampo, en donde fue generada [88], hasta el lugar de producción del mortero (figura 15). El acarreo se hizo a partir de una camioneta de 1.5 toneladas.

El residuo, *ceniza de carbón vegetal*, presentó la ruta de transporte de la figura 6, siendo trasladado por solo 22.7 kilómetros desde la localidad Cuto de la Esperanza, ubicada en el Municipio de Morelia, Michoacán de Ocampo, hasta el Laboratorio donde se llevó a cabo la elaboración de los diferentes morteros. La siguiente figura muestra el recorrido realizado con un medio de transporte de 1.5 toneladas de capacidad.

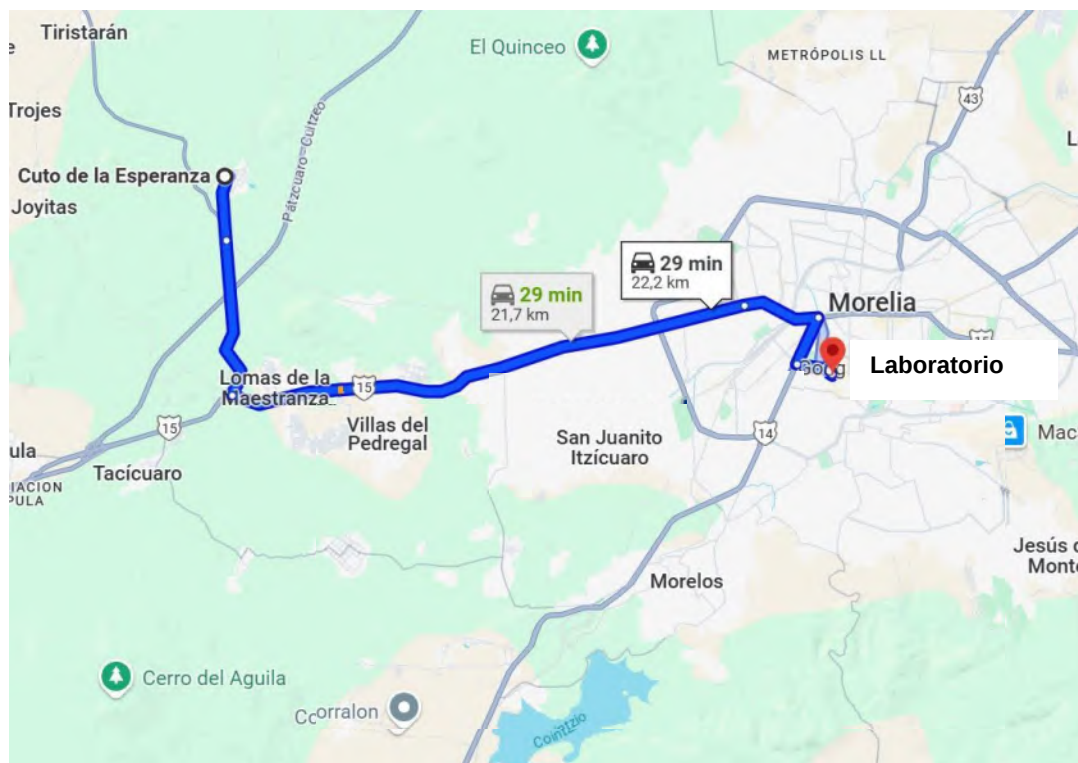


Figura 16. Ruta de transporte desde el lugar de generación de los residuos CCV hasta el lugar de producción del mortero

La ceniza de elaboración de ladrillo se generó en la Tenencia Morelos, una comunidad cerca de la ciudad de Morelia, Michoacán [88], en donde está ubicado el Laboratorio donde se elaboraron todos los morteros. La ruta de transporte se muestra en la figura

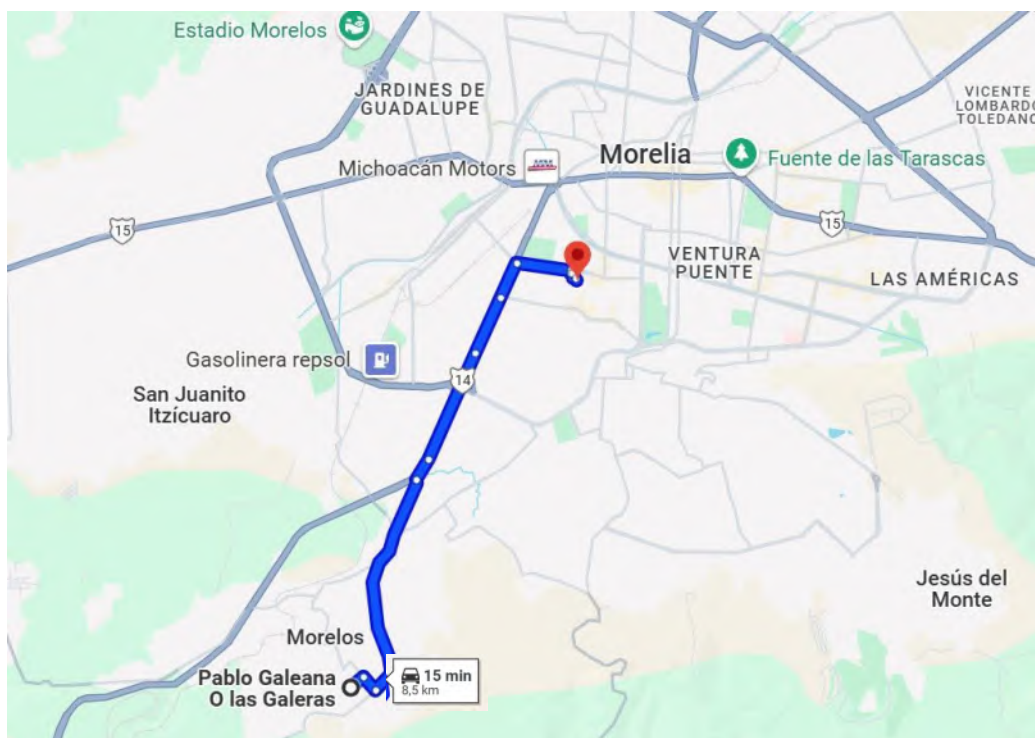


Figura 17. Ruta de transporte desde el lugar de generación de los residuos CEL hasta el lugar de producción del mortero

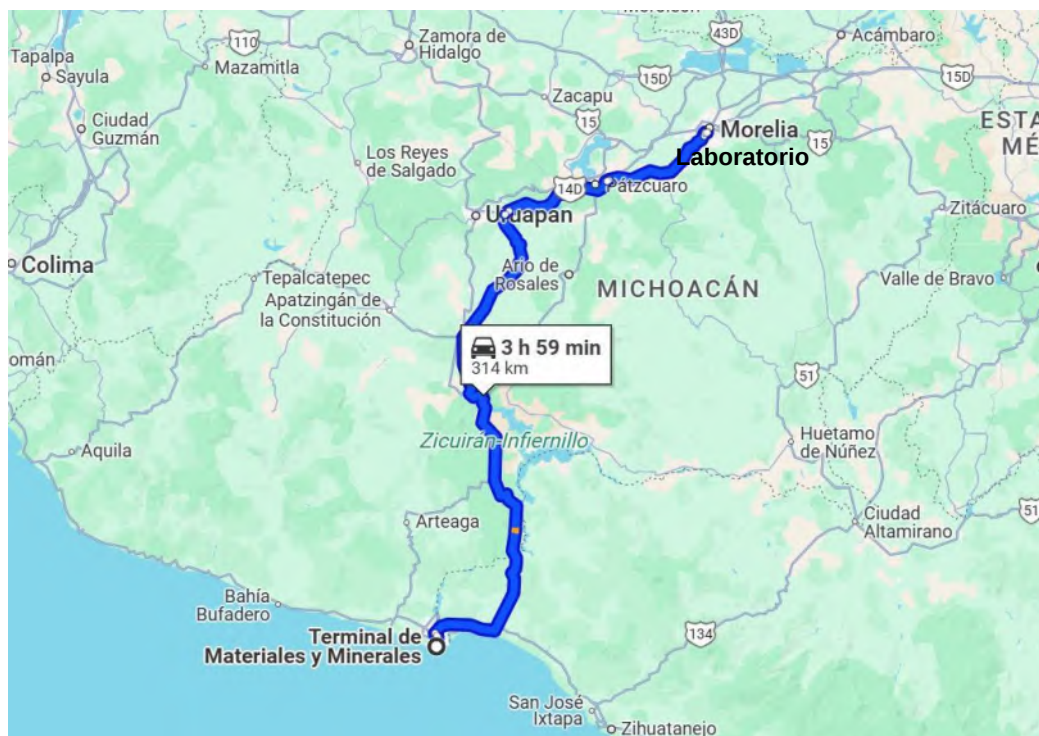


Figura 18. Ruta de transporte desde el lugar de generación de los residuos CM, EAH y CHBOF hasta el lugar de producción del mortero



17, en donde se observa un recorrido total de 8.5 kilómetros con una camioneta de 1.5 toneladas.

La ceniza de carbón mineral, la escoria de alto horno y la ceniza de horno blast oxygen furnace al ser provenientes del mismo sitio, la Siderurgia de Lázaro Cárdenas “Arcelor Mittal”[88], fueron transportados la misma distancia hasta el lugar de producción, el Laboratorio de Materiales Ing. “Luis Silva Ruelas”. El transporte del material se hizo en una camioneta de 1.5 toneladas, con un total de 314 kilómetros recorridos (Figura 18).

En la tabla 18 se resume las cantidades de transporte en toneladas-kilómetro (t-km) para cada una de las materias primas, así como el tipo de vehículo en el que fueron transportadas

Tabla 18. Cuantificación de transporte para todas las materias primas

	Arena H	Arena L	Agua	Cemento	Cemento	CBC	CVC	CEL	CM	EAH	CHBOF
Material											
Cantidad (t)	1.292	1.292	0.474	0.470	0.470	0.094	0.094	0.024	0.047	0.094	0.024
Distancia (km)	72.30	126.00	0.00	231.00	1.64	104.00	22.70	8.50	314.00	314.00	314.00
Transporte (t-km)	93.430	162.825	-	108.570	0.771	9.776	2.134	0.200	14.758	29.516	7.379
Tipo de vehículo											
Camioneta 1.5 t	•		-		•	•	•	•	•	•	•
Camión 32 t			-	•							
Volteo 7 m ³		•	-								

El resumen de las materias primas, la energía y el transporte necesarios para la elaboración de los 8 sistemas se presentan en las tablas siguientes.



Tabla 19. Inventario de materiales, energía y transporte para el sistema S T1-H

	Arena H	Agua	Cemento	Producción (1m ³)	TOTAL
Materias primas					
Cantidad (kg)	1292.2600	474.4400	470.0000	2236.7000	1 m ³ de mortero
Energía					
Energía Térmica (MJ)	-	-	1505.8800	-	1505.8800
Energía eléctrica (kWh)	-	-	49.8200	0.0188	49.8388
Combustibles alternos y biomasa (MJ)	-	-	307.8919	-	307.8919
Transporte (t-km)					
Camioneta 1.5 t	93.4304	-	7.7080	-	101.1384
Camión 32 t	-	-	1085.7000	-	1085.7000
Volteo 7 m3	-	-	-	-	0.0000

Tabla 20. Inventario de materiales, energía y transporte para el sistema S CBC

	Arena H	Agua	Cemento	CBC	Producción (1m ³)	TOTAL
Materias primas						
Cantidad (kg)	1292.2600	474.4400	376.0000	94.0000	944.4400	1 m ³ de mortero
Energía						
Energía Térmica (MJ)	-	-	1204.7040	-	-	1204.7040
Energía eléctrica (kWh)	-	-	39.8560	-	0.0188	39.8748
Combustibles alternos y biomasa (MJ)	-	-	246.3135	-	-	246.3135
Transporte (t-km)						
Camioneta 1.5 t	93.4304	-	6.1664	9.7760	-	15.9424
Camión 32 t	-	-	868.5600	-	-	868.5600
Volteo 7 m3	-	-	-	-	-	0.0000

Tabla 21. Inventario de materiales, energía y transporte para el sistema S CCV

	Arena H	Agua	Cemento	CCV	Producción (1m ³)	TOTAL
Materias primas						
Cantidad (kg)	1292.2600	474.4400	376.0000	94.0000	944.4400	1 m ³ de mortero
Energía						
Energía Térmica (MJ)	-	-	1204.7040	-	-	1204.7040
Energía eléctrica (kWh)	-	-	39.8560	-	0.0188	39.8748
Combustibles alternos y biomasa (MJ)	-	-	246.3135	-	-	246.3135
Transporte (t-km)						
Camioneta 1.5 t	93.4304	-	6.1664	2.1338	-	8.3002
Camión 32 t	-	-	868.5600	-	-	868.5600
Volteo 7 m3	-	-	-	-	-	0.0000



Tabla 22. Inventario de materiales, energía y transporte para el sistema S CEL

	Arena H	Agua	Cemento	CEL	Producción (1m³)	TOTAL
Materias primas						
Cantidad (kg)	1292.2600	474.4400	446.5000	23.5000	944.4400	1 m³ de mortero
Energía						
Energía Térmica (MJ)	-	-	1430.5860	-	-	1430.5860
Energía eléctrica (kWh)	-	-	47.3290	-	0.0188	47.3478
Combustibles alternos y biomasa (MJ)	-	-	292.4973	-	-	292.4973
Transporte (t-km)						
Camioneta 1.5 t	93.4304	-	7.3226	0.1998	-	7.5224
Camión 32 t	-	-	1031.4150	-	-	1031.4150
Volteo 7 m3	-	-	-	-	-	0.0000

Tabla 23. Inventario de materiales, energía y transporte para el sistema S T2-L

	Arena L	Agua	Cemento	Producción (1m³)	TOTAL
Materias primas					
Cantidad (kg)	1292.2600	474.4400	470.0000	2236.7000	1 m³ de mortero
Energía					
Energía Térmica (MJ)	-	-	1505.8800	-	1505.8800
Energía eléctrica (kWh)	-	-	49.8200	0.0188	49.8388
Combustibles alternos y biomasa (MJ)	-	-	307.8919	-	307.8919
Transporte (t-km)					
Camioneta 1.5 t	-	-	7.7080	-	7.7080
Camión 32 t	-	-	1085.7000	-	1085.7000
Volteo 7 m3	162.825	-	-	-	162.825

Tabla 24. Inventario de materiales, energía y transporte para el sistema S CM

	Arena L	Agua	Cemento	CM	Producción (1m³)	TOTAL
Materias primas						
Cantidad (kg)	1292.2600	474.4400	423.0000	47.0000	944.4400	1 m³ de mortero
Energía						
Energía Térmica (MJ)	-	-	1355.2920	-	-	1355.2920
Energía eléctrica (kWh)	-	-	44.8380	0.001645	0.0188	44.8568
Combustibles alternos y biomasa (MJ)	-	-	277.1027	-	-	277.1027
Transporte (t-km)						
Camioneta 1.5 t	-	-	6.9372	14.7580	-	21.6952
Camión 32 t	-	-	977.1300	-	-	977.1300
Volteo 7 m3	162.825	-	-	-	-	162.825



Tabla 25. Inventario de materiales, energía y transporte para el sistema S EAH

	Arena L	Agua	Cemento	EAH	Producción (1m ³)	TOTAL
Materias primas						
Cantidad (kg)	1292.2600	474.4400	376.0000	94.0000	944.4400	1 m ³ de mortero
Energía						
Energía Térmica (MJ)	-	-	1204.7040	-	-	1204.7040
Energía eléctrica (kWh)	-	-	39.8560	0.00893	0.0188	39.8748
Combustibles alternos y biomasa (MJ)	-	-	246.3135	-	-	246.3135
Transporte (t-km)						
Camioneta 1.5 t	-	-	6.1664	29.5160	-	35.6824
Camión 32 t	-	-	868.5600	-	-	868.5600
Volteo 7 m3	162.825	-	-	-	-	162.825

Tabla 26. Inventario de materiales, energía y transporte para el sistema S CHBOF

	Arena L	Agua	Cemento	CHBOF	Producción (1m ³)	TOTAL
Materias primas						
Cantidad (kg)	1292.2600	474.4400	446.5000	23.5000	944.4400	1 m ³ de mortero
Energía						
Energía Térmica (MJ)	-	-	1430.5860	-	-	1430.5860
Energía eléctrica (kWh)	-	-	47.3290	-	0.0188	47.3478
Combustibles alternos y biomasa (MJ)	-	-	292.4973	-	-	292.4973
Transporte (t-km)						
Camioneta 1.5 t	-	-	7.3226	7.3790	-	14.7016
Camión 32 t	-	-	1031.4150	-	-	1031.4150
Volteo 7 m3	162.825	-	-	-	-	162.825

7.4.3 Fase 3. Evaluación de impacto ambiental

La Modelación de los sistemas en análisis se realiza con ayuda del software libre openLCA, tomando en referencia la unidad funcional de 1 m³ de mortero producido, así como los límites, entradas y salidas definidas en la fase 1. Con los datos recopilados en la fase de inventario, se seleccionaron los procesos dentro de las bases de datos libres para el software openLCA con mayor relación técnica, geográfica y tecnológica al inventario de esta investigación. Es necesario la utilización de tres bases de datos para poder cubrir cada proceso establecido en los límites del sistema, así como sus entradas y salidas (figura 9-12): Eva OzLC12019, base de datos gratuita creada por The Evah Institute con suministro regional de Australia para productos de construcción, limpieza y cuidado personal [98]; NEEDS 18, base de datos creada por el proyecto New Energy



Externalities Developments for Sustainability (NEEDS) con información sobre servicios de transporte, suministro eléctrico y suministro de materiales, para ser utilizada en evaluaciones tecnológicas medioambientales a largo plazo [98]; y, la base de datos europea del Centro Común de Investigación ELCD 3.2 v.2, que incluye datos del inventario de ciclo de vida sobre materiales clave, vectores energéticos, transporte y gestión de residuos [98]. La descripción de los modelos que representan cada elemento de los sistemas en análisis (figura 9-12) se describen en la tabla 27.

Tabla 27. Modelos utilizados en la evaluación ambiental de los diferentes sistemas establecidos con el software openLCA.

Elemento	Modelo usado	Unidad	Descripción	Base de datos/Ubicación
Materiales				
Cemento	Portland cement (CEM I), CEMBUREAU production mix, at plant	kg	Incluye todos los procesos desde suministro (extracción, preparación, transporte) de materias primas, combustible y electricidad, hasta producción de cemento.	ELCD/RER
Agua	Pump & Use Town Water in Tasmania	kg	Incluye todos los procesos involucrados en el bombeo y uso de agua municipal, desde el 2015 y después.	OzLCIA2019/AU
Arena		kg	Flujo elemental, arena de cuarzo, recurso en el suelo	OzLCIA2019
Electricidad	Electricity, production mix	kWh	Incluye todos los procesos de producción de electricidad en un sistema de eléctrico para la región o país	NEEDS/ UCTE (EU-27)
Transporte				
Camioneta 1.5 t	Small lorry transport, 3.5 t max payload	t-km	Incluye toda la cadena de suministro de combustible (desde la exploración y extracción del petróleo crudo hasta la preparación y el transporte al consumidor), así como la producción y el proceso de fin de vida de los medios de transporte.	ELCD/RER
Camión 32 t	Articulate lorry transport, 27 t max payload	t-km		ELCD/RER
Volteo 7 m ³	Lorry transport, 17.3 t max payload	t-km		ELCD/RER
Disposición final residuo	Landfill of municipal solid waste	kg	Incluye la utilización de gases de vertedero y el tratamiento de lixiviados, sin recogida, transporte ni pre-tratamiento; considera combinación de tecnologías	ELCD/ES

La limitante más grande en la selección de los modelos es la ubicación geográfica de estos, puesto que las bases de datos libres solo contienen información de la región de Europa, sin embargo, se realizó la mejor selección dentro de la disponibilidad de datos. La ubicación “RER” en los modelos utilizados para producción de cemento como materia prima y el transporte se refiere a la región europea; el cemento, específicamente, se trata de la producción de la Asociación Europea del Cemento con



sede en Bruselas, CEMBUREAU. El modelo para suministro de agua potable procede de Tasmania, Australia (AU), ubicación elegida dentro de las opciones debido similitud en cantidad de población con la ciudad de Morelia. Para el proceso de disposición final se utiliza un modelo de España, elegido por ser la región con mayor semejanza en tecnología de disposición final de residuos con respecto a México. Por último, la arena no tiene definida una ubicación puesto que es un flujo elemental.

En esta etapa se consideran dos metodologías para el análisis: eco-indicador 99 y ReCiPe 2016.

Eco-indicador 99

La metodología eco-indicador es una técnica de ponderación de punto final del Análisis de Ciclo de vida, desarrollado principalmente para el diseño de productos, siendo una herramienta que ha demostrado ser eficaz para los diseñadores, gracias a sus unidades fáciles de entender y los denominados eco indicadores [99]. El método fue desarrollado utilizando eco-indicadores para poder ofrecer un instrumento que permitiera poder crear productos con mejores bondades ambientales que los existentes [100].

La definición de “medio ambiente” no está clara, las discusiones sobre análisis de medio ambiente son, con frecuencia, muy controvertidas [100]. En Eco-indicador se consideran, básicamente, tres categorías de daño: salud humana, calidad de ecosistema y recursos.

Salud humana

Contiene la idea de que tanto en la actualidad como en el futuro, todos los seres humanos deben estar libres de muertes prematuras, alguna discapacidad o enfermedades transmitidas en el medio ambiente [99]. La categoría está conformada, principalmente por los años de vida que son perdidos a causa de muerte prematura, incluyendo también la cantidad de enfermedades y su duración, todo relacionado con causas ambientales [100]. Las categorías de impacto que representan en punto medio de una evaluación de ACV contenidas en esta categoría de daño son:

- Carcinogénesis



- Cambio climático
- Radiación ionizante
- Agotamiento de la capa de ozono
- Efectos respiratorios por sustancias inorgánicas
- Efectos respiratorios por sustancias orgánicas

La unidad que se utiliza en esta categoría de daño es la escala DALY (Disability Adjusted Life Years/Años de Vida Ajustados por Discapacidad). Siendo una escala de ponderación de discapacidad que enumera diversas discapacidades en una escala de 0 a 1 (0 significa estar perfectamente sano y 1 significa la muerte) [99].

Calidad del ecosistema

Los ecosistemas son muy complejos y resulta muy difícil determinar todos los daños que sufren [99]. Los efectos incluidos en la presente categoría están relacionados con la variedad de especies, principalmente todo tipo de organismos sencillos y plantas vasculares [100]. Las categorías de impacto que le corresponden son:

- Cambio de suelo
- Conversión de suelo
- Acidificación / eutroficación
- Ecotoxicidad

La unidad para los daños a la calidad del medio ambiente es el $\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{yr}$, que representa la Fracción Potencialmente Desaparecida por metro cuadrado por año, es decir, el daño aumenta, ya sea con un aumento en el tamaño del área, un aumento en el tiempo de ocupación o un aumento en el tiempo de restauración de un área anteriormente convertida [99].

Recursos

La categoría contempla la necesidad adicional de energía que se necesitará en el futuro para la explotación de combustibles fósiles o minerales de baja calidad [100]. Para esta categoría de daño solo se modelan

- Recursos minerales



- Combustibles fósiles

La unidad de categoría de daño a los recursos es el excedente de energía en MJ por kg de material extraído, refiriéndose al aumento esperado de la energía de extracción por kg de material extraído cuando la humanidad ha extraído una cantidad N veces mayor que la cantidad acumulada de materiales extraídos desde el inicio de la extracción hasta 1990 [99].

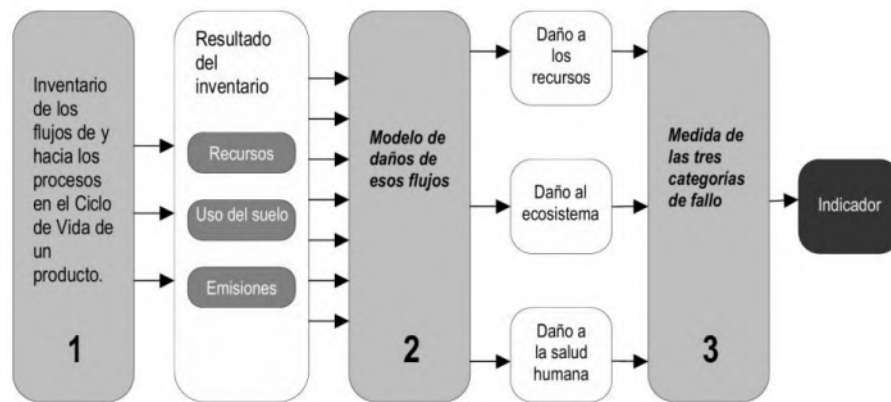


Figura 19. Procedimiento general del método Eco indicador 99 [100]

La metodología que se desarrolló para llevar a cabo el método Eco indicador 99 es muy sencilla consta de tres pasos desarrollados en la figura 19 [100].

- 1. Inventario.** Realmente se trata del paso en el procedimiento estándar de los ACV, en donde se realiza el inventario de las emisiones relevantes, la extracción de recursos y el uso del suelo de todos los procesos incluidos en el ciclo de vida de un producto [100].
- 2. Cálculo de daños.** Con los datos recabados en el inventario, se determinan los daños que pueden causar esos flujos a la salud humana, a la calidad del ecosistema y a los recursos [100]. En el análisis de las tres categorías de daño, así como su implementación fue necesaria la creación de modelos de daño complejos que permitan su uso [100]. La figura 20 presenta dicho modelo de forma esquemática.

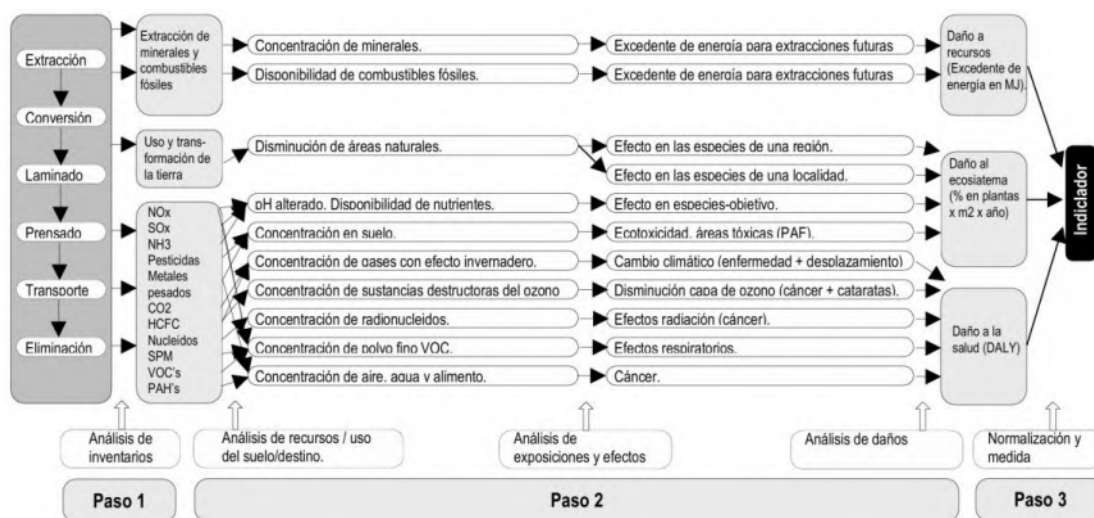


Figura 20. Modelo de daños en el método Eco indicador 99 [100]

3. Ponderación a categorías de daño. La fase más importante en la metodología que consiste en medir los diferentes daños que causan los impactos, llevando la evaluación de cada categoría de impacto a las únicas tres categorías de daño [100].

Debido a que el juicio sobre los problemas ambientales no es objetivo, la metodología se puede desarrollar con tres arquetipos de perspectivas ambientales tomadas del marco de Teoría Cultural de Thompson 1990 y Hofstetter 1998 [100]. El modelo **individualista** incluye únicamente relaciones causa-efecto comprobadas con perspectivas a corto plazo, preferentemente. La versión **jerárquica** utiliza datos respaldados por organismo científicos y políticos con suficiente reconocimiento. Y en el modelo **igualitario** aplica sistemáticamente el principio de precaución.

La versión predeterminada de la metodología es el modelo de daño jerárquico con una ponderización promedio, por lo tanto, es la utilizada en este trabajo.

Finalmente, los valores estándar de los eco indicadores resultan en valores adimensionales [100]. Como base, el método utiliza el “punto eco indicador” (Pt), empleando normalmente la unidad de milipuntos (mPt), es decir $700 \text{ mPt} = 0.7 \text{ Pt}$ [100]. La interpretación se debe de hacer considerando que el valor absoluto de los eco puntos no es relevante, ya que el objetivo principal es hacer la comparación de diferencias relevantes entre productos o componentes y la escala se ha elegido para que



1 Pt represente 1 centésima parte de la carga ambiental anual de un ciudadano europeo promedio [100].

ReCiPe

El método ReCiPe fue desarrollado en el año 2008 por un consorcio de instituciones por las cuales fue nombrado así, siendo los principales colaboradores en su desarrollo el Instituto Nacional de Salud Pública y Medio Ambiente (RIVM) de Países Bajos, la Universidad Radboud de Nijmegen, el Centro de Estudios Ambientales de la Universidad de Leiven (CEM) y PRé Consultants (ahora conocido como PRé Sustainability) [101]. ReCiPe presenta prometedoras capacidades integrales y amplia aplicabilidad, siendo un método muy completo gracias a sus más de 3000 sustancias para análisis [102]. El método ReCiPe para llevar a cabo la evaluación en un ACV es un método armonizado en términos de principios y opciones de modelización, que fue diseñado teniendo como principal objetivo ofrecer resultados tanto a nivel intermedio como a nivel final [101]. En la figura 21 se muestra el modelo correspondiente al método, con un resumen de la relación entre cada área de protección y las categorías de impacto que abarca.

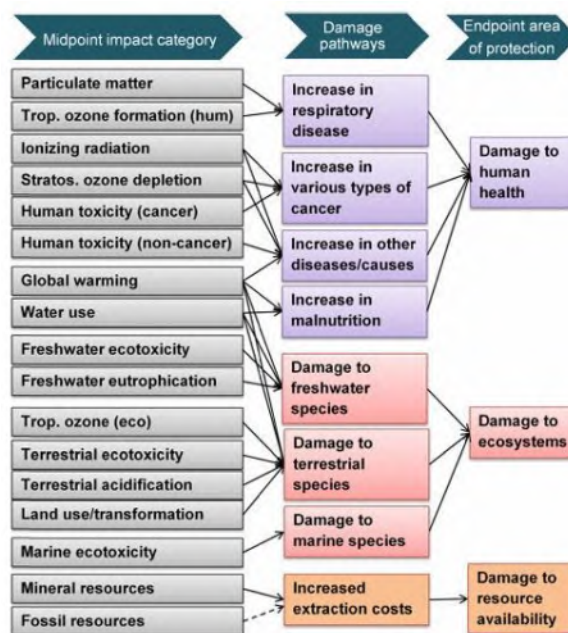


Figura 21. Modelo ReCiPe con categorías de impacto y su relación con las áreas de protección [103]



La **metodología de mindpoint** ofrece una amplia gama de categorías de punto medio para abordar diferentes preocupaciones ambientales [102], permitiendo hacer una ACV cuantitativo altamente detallado con 18 indicadores específico para medir los impactos ambientales en los ciclos de vida de cualquier producto [104]. Los creadores de este método utilizaron como referencia para la caracterización con enfoque de punto medio el Manual sobre ACV elaborado por Guinée *et. al.* en 2002 [101].

Por su parte, la **metodología endpoint** trata de ser un enfoque integral para describir los impactos desglosando indicadores ambientales en tres áreas de protección: los ecosistemas, la salud humana y la disponibilidad de recursos [104]. Los resultados del análisis cuantitativo obtenidos por el enfoque de punto medio proporcionan una visión general agregada y logística de la carga ambiental de cada etapa del ciclo de vida del producto enfocada en las tres categorías de daño mencionadas [102]. Para esta metodología el procedimiento propuesto en Eco Indicador 99 fue utilizado como referencia [101].

Las **tres áreas de protección** para la evaluación final se describen a continuación [101]:

- **Salud humana:** se aplica el concepto DALY para cuantificar el daño que contribuye a esta área de protección.
- **Ecosistema:** la unidad de esta área de protección es PDF x m² x yr.
- **Recursos:** a diferencia de las dos áreas de protección anteriores que comparten la misma unidad que el método Eco Indicador 99, ReCiPe utiliza el aumento del costo de extracción de algún recurso para la sociedad en el futuro (\$).

Las categorías de impacto de punto medio y sus indicadores se enlistan a continuación [103]. De las 18 categorías de impacto que se describen, no es posible ligarlas únicamente a cada una de las tres áreas de protección, debido a que más de una categoría está ligada diferentes áreas de protección.

- Ocupación de tierras agrícolas (m²*a)
- Cambio climático (kg CO₂ eq)



- Agotamiento fósil (kg petróleo eq)
- Ecotoxicidad de agua dulce (kg 1,4 DB eq, diclorobenceno)
- Eutroficación de agua dulce (kg P eq)
- Toxicidad humana (kg 1,4 DB eq, diclorobenceno)
- Radiación ionizante (kg Cobalto-60 eq)
- Ecotoxicidad marina ((kg 1,4 DB eq, diclorobenceno)
- Eutroficación marina (kg N eq)
- Agotamiento de metales (kg Fe eq)
- Transformación natural del terreno (m^2)
- Agotamiento del ozono (kg CFC-11 eq)
- Partículas en suspensión (kg PM10 eq)
- Oxidación fotoquímica (kg NMVOC eq)
- Acidificación terrestre (kg SO2 eq)
- Ecotoxicidad terrestre (kg ,4 DB eq, diclorobenceno)
- Ocupación de tierras urbanas ($m^2 \cdot a$)
- Agotamiento de agua (m^3)

Al igual que el método Eco Indicador 99, la metodología puede desarrollarse con incertidumbres en diferentes perspectivas: **individualista** (I), **jerárquica** (H) e **igualitaria** (E).

En el año 2016 el método ReCiPe fue actualizado para proporcionar factores de caracterización representativos en la escala mundial y no solo en la escala europea, y poder continuar con la idea principal de dicha metodología, ofrecer un procedimiento de vanguardia para contrastar los inventarios del ciclo de vida con un número limitado de puntuaciones de impacto en el ciclo de vida tomando en consideración el enfoque de punto medio o de punto final [103].

La metodología con enfoque de punto medio y la perspectiva jerárquica (H) es recomendada para ACV de propósito general, ya que refleja un compromiso para considerar preocupaciones ambientales tanto a corto como a largo plazo [105]. En el



desarrollo de este trabajo se utiliza el combo mencionado anteriormente, en su versión 2016.

El método ReCiPe cuenta con una amplia aplicación y aceptación dentro del grupo científico dedicado al Análisis de Ciclo de Vida [106][107]. Su flexibilidad de enfoque (mindpoint y endpoint) combinada con su capacidad para evaluar los impactos desde múltiples perspectivas (I, H y E) crean un marco sólido que permite el abordaje de ambigüedades subjetivas, garantizando al mismo tiempo evaluaciones exhaustivas y equilibradas del impacto ambiental de un producto [102].

7.4.4 Fase 4. Interpretación de resultados ambientales

La última fase del Análisis del Ciclo de Vida será acompañada de un análisis detallado que identifique las cuestiones más relevantes obtenidas durante la fase de evaluación para crear conclusiones y recomendaciones en concordancia con los objetivos y alcances definidos. Por lo tanto, se identificarán los procesos o elementos de los diferentes sistemas con mayor y menor aporte en el impacto ambiental, se reconocerán las categorías de impacto y áreas/categorías de daño más relevantes para la producción de mortero, y, por último, se verificará si la disminución del impacto que se espera obtener en los morteros con residuo es representativa para poder definirlos como productos más amigables con el medio ambiente.



8 RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados se analizan en dos fases. Primeramente, un análisis mecánico descrito en el capítulo 8.1, en donde se revisan las propiedades mecánicas resistencia a compresión, resistencia a flexión, resistencia a tensión directa; así como las propiedades físicas resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico. Finalmente, las mezclas son ponderadas de acuerdo a lo establecido en la tabla 15 con la intención de establecer cuál de los morteros presenta el mejor comportamiento mecánico, y realizar una clasificación en función de dicho desempeño.

La segunda fase, presentada en el capítulo 8.2, consiste en un análisis ambiental mediante ACV según la normativa ISO 14040. La revisión de impactos se revisa con dos metodologías (Ecoindicador 99 y ReCiPe 2016) en las que se contemplan tres áreas de daño, ecosistema, salud humana y recursos, cada uno con diferentes categorías de impacto. Al final de la sección se examina si las mezclas que cuentan con la adición de un residuo realmente presentan beneficios ambientales con respecto a las mezclas testigo.

8.1 Análisis mecánico

En los siguientes párrafos se expone los resultados encontrados después de llevar a cabo las pruebas físico mecánicas en todas las mezclas de los morteros elaboradas. De acuerdo a lo expuesto en el apartado de materiales y diseño de las mezclas, las primeras cuatro mezclas fueron elaboradas con la misma arena, arena del Río Huajúmbaro, por lo que se hace una primera comparación de las mezclas CBC-20, CCV-20 y CEL-5 con el primer testigo T1-H; por su parte, las mezclas CM-10, EAH-20 y CHBOF-5 se comparan con el testigo T2-L, puesto que en estas cuatro mezclas se utilizó arena del Río Lerma; al final, se lleva a cabo una comparación entre los ocho morteros realizados.

8.1.1 Criterios para revisión de desempeño mecánico

Los resultados de las pruebas que analizan la resistencia mecánica de las muestras se presentan en las gráficas de las figuras 22a), resistencia a compresión, 22b), resistencia



a flexión y 22c), resistencia a tensión directa. En una línea horizontal de color verde se colocó el límite que indica la resistencia máxima, la cual acredita una calificación de 10 en la propuesta de desempeño elaborada, en color naranja la resistencia media, y en color rojo la resistencia más baja.

Para la resistencia a compresión, los morteros CBC-20 y CEL-5 presentaron un f'_c mayor a la mezcla testigo en todas las edades de prueba y la mezcla CCV-20 también reportó un f'_c mayor a la mezcla T1-H en la segunda, tercera y última edad de prueba. La situación de los morteros CM-10, EAH-20 y CHBOF-5 es diferente, registrando valores de f'_c menores que el mortero testigo (T2-L) en las primeras 3 edades de prueba, sin embargo, la mezcla con escoria de alto horno supera la resistencia a compresión del mortero testigo en las dos últimas edades de prueba, y, por su parte, la mezcla denominada CHBOF, lo cual se atribuye a una reacción tardía de las puzolanas dentro de los morteros elaborados.

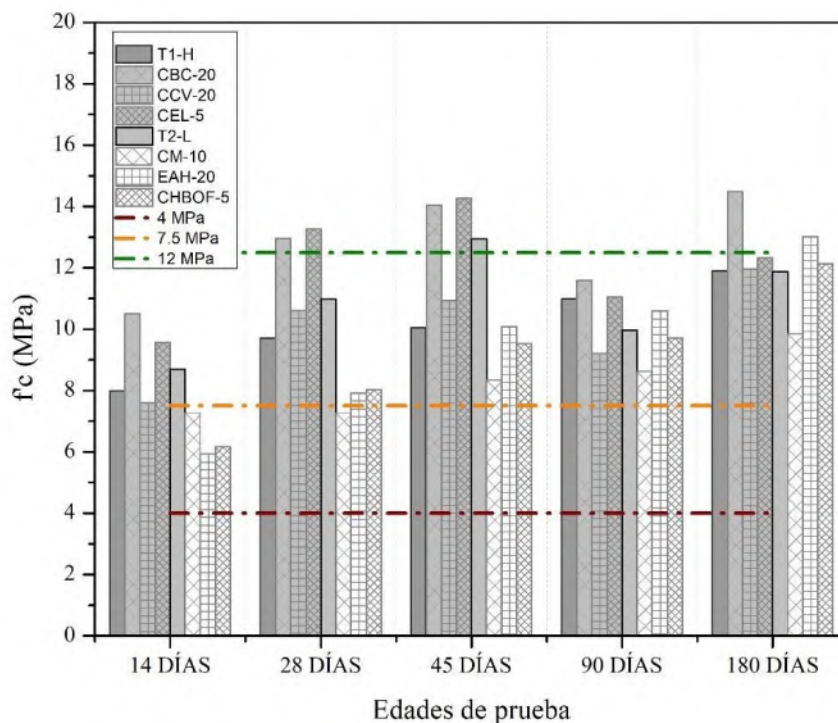
El módulo de ruptura obtenido a partir de la prueba de flexión llevada a cabo en vigas expone resultados similares a los obtenidos en la prueba de compresión. Aunque en la primera edad, los testigos tienen un valor de MR mayor que las muestras con adiciones, la situación es diferente para las edades posteriores. El mortero CBC-20 tiene un MR mayor que el testigo T1-H en todas las edades posteriores y lo mismo sucede a los 180 días de prueba en las mezclas CCV-20 y CEL-5. En las cuatro mezclas restantes, el testigo es el que exhibe un MR mayor, seguido del mortero EAH-20 y el CHBOF-5.

La tensión directa que se obtuvo de los especímenes correspondientes al testigo T1-H es menor que la obtenida de los especímenes realizado con las mezclas CBC-20 y CCV-20 en todas las edades de prueba, al igual que la mezcla CEL-5, exceptuando la edad de prueba de 90 días. El testigo T2-L, tiene un valor más alto de tensión directa que las mezclas CM-10, EAH-20 y CHBOF-5 a los 14 y 28 días, sin embargo, el mortero EAH-20 alcanza resistencias más altas de TD en las dos últimas edades de prueba.

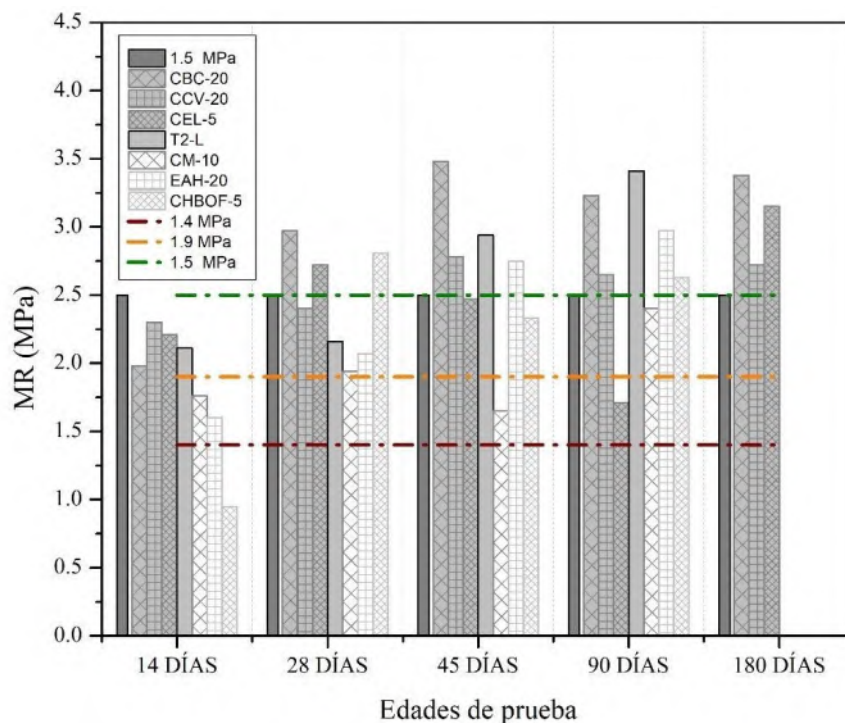
Finalmente, haciendo una comparación completa entre las 8 mezclas, se encuentra que el mortero con ceniza de bagazo de caña es la mezcla con mejor desempeño a lo largo

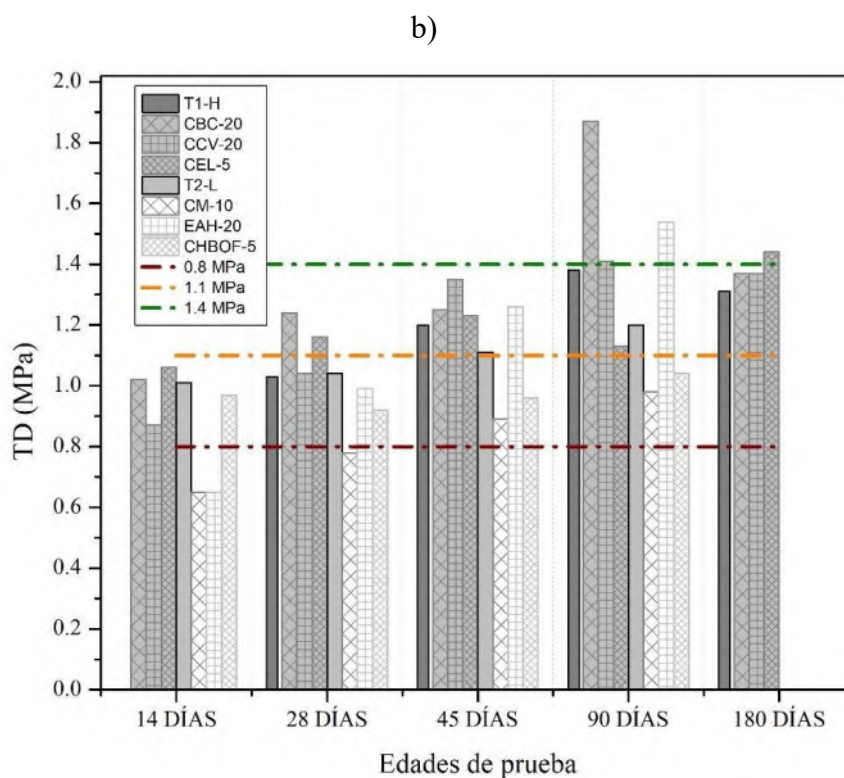


de las edades de prueba, cuando de resistencia mecánica se trata, seguido por el mortero con ceniza de elaboración de ladrillo.



a)

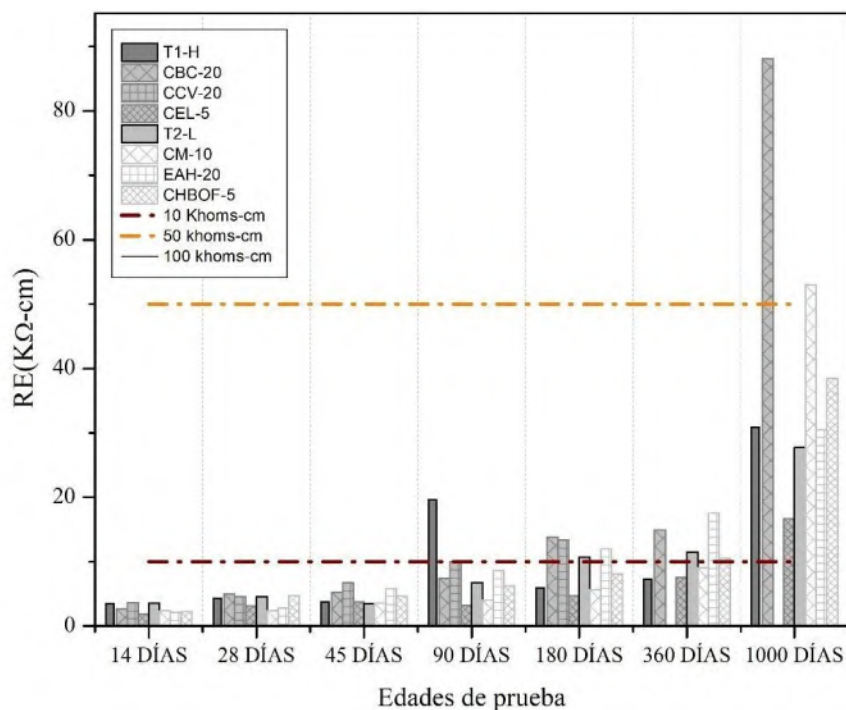




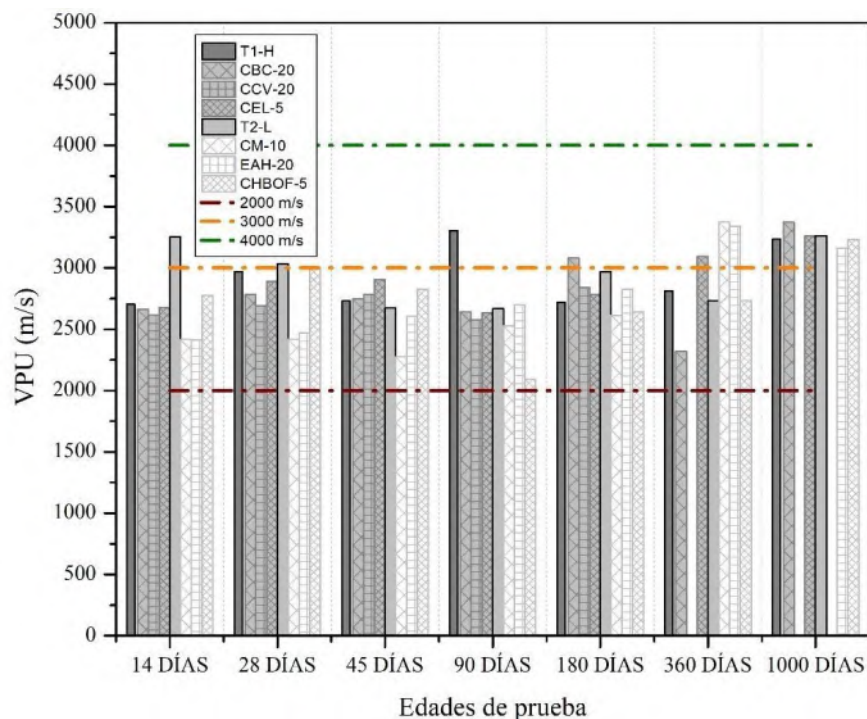
c)

Figura 22. Resultados de las propiedades físico-mecánicas en todas las mezclas. a) Resistencia a compresión, b) Resistencia a flexión y c) Resistencia a tensión directa.

Para exponer los resultados de las pruebas de durabilidad, se realizaron las gráficas de la imagen 20. Al igual que en las tres gráficas presentadas anteriormente, se colocó una línea horizontal de color verde indicando el límite de la resistencia máxima, la cual acredita una calificación de 10 en la propuesta de desempeño elaborada, en color naranja la resistencia media, y en color rojo la resistencia más baja. Como se puede observar en la figura 20a), en las primeras 6 edades de prueba, las mezclas presentaron valores de RE bajos, siendo hasta las últimas 3 edades de prueba (90, 160 y 360 días) que algunas mezclas superaron el límite inferior de 10 KΩ-cm que indica un riesgo de corrosión moderado. Ya para los 1000 días de prueba, las mezclas CBC-20, CM-10, CHBOF-5, EAH-20, T1-H y T2-L aumentan de manera considerable su resistividad eléctrica, siendo las dos primeras mezclas mencionadas las únicas que superan el segundo límite (50 KΩ-cm), ubicándose en el rango de corrosión bajo.



a)



b)

Figura 23. Resultados de las propiedades físico-mecánicas en todas las mezclas. a) Resistividad eléctrica y b) Velocidad de pulso ultrasónico.



En la prueba de velocidad de pulso ultrasónico (imagen 20b) se obtuvieron resultados relativamente uniformes a lo largo de las diferentes edades de prueba, ubicándose la mayoría de los datos entre el límite inferior y límite medio, es decir, en el rango de calidad de material normal. Para las últimas dos edades de prueba, fue alcanzado el rango de calidad alta del material (VPU arriba de 3000 m/s) en los morteros T1-H, CBC-20, CEL-5, T2-L, CM-10, EAH-20 y CHBOF-5.

8.1.2 Propuesta de calificación para desempeño mecánico

Una vez aplicada la propuesta de calificación para el desempeño de las mezclas presentada en la tabla 15, se obtuvieron las calificaciones de la tabla 27.

Tabla 28. Resultados de la calificación de desempeño mecánico

Mezcla	Parámetro					Total
	RE (KΩ-cm)	VPU (m/s)	f'c (MPa)	MR (Mpa)	TD (Mpa)	
T1-H	5.00	7.50	10.00	10.00	7.50	40.00
CBC-20	7.50	7.50	10.00	10.00	7.50	42.50
CCV-20	5.00	5.00	7.50	10.00	7.50	35.00
CEL-5	5.00	7.50	10.00	10.00	10.00	42.50
T2-L	5.00	7.50	10.00	10.00	7.50	40.00
CM-10	5.00	7.50	7.50	7.50	5.00	32.50
EAH-20	5.00	7.50	10.00	10.00	10.00	42.50
CHBOF-5	5.00	7.50	7.50	10.00	5.00	35.00

Para una mejor comprensión de los resultados, se presenta la tabla 28, en donde fueron ordenadas las mezclas, de acuerdo a su desempeño mecánico, de mayor a menor calificación. Fueron tres mezclas con residuos industriales adicionados las que exhiben el mejor desempeño mecánico, estas son el mortero con ceniza de bagazo de caña, el adicionado con ceniza de elaboración de ladrillo y el mortero con escoria de alto horno; posteriormente le siguen las dos mezclas testigo, que presentan la misma calificación, después se tienen los morteros CHBOF-5 y CCV-20, finalizando con el mortero adicionado con ceniza de carbón mineral, siendo este último la mezcla que expone el desempeño mecánico menor.



Tabla 29. Resultados de la calificación de desempeño mecánico clasificados de mayor a menor calificación

Mezcla	Parámetro					Total
	RE (KΩ-cm)	VPU (m/s)	f'c (MPa)	MR (Mpa)	TD (Mpa)	
CBC-20	7.50	7.50	10.00	10.00	7.50	42.50
CEL-5	5.00	7.50	10.00	10.00	10.00	42.50
EAH-20	5.00	7.50	10.00	10.00	10.00	42.50
T1-H	5.00	7.50	10.00	10.00	7.50	40.00
T2-L	5.00	7.50	10.00	10.00	7.50	40.00
CHBOF-5	5.00	7.50	7.50	10.00	5.00	35.00
CCV-20	5.00	5.00	7.50	10.00	7.50	35.00
CM-10	5.00	7.50	7.50	7.50	5.00	32.50

8.2 Análisis ambiental

El Análisis de Ciclo de Vida utilizado para llevar a cabo la evaluación ambiental se realizó en el software de uso libre openLCA. Se presentan los resultados obtenidos para la evaluación de impacto (fase 3) e interpretación de resultados (fase 4), por el método Eco indicador 99, así como por la metodología ReCiPe en su versión 2016. Aunque al final se hace una comparación de la calificación ambiental entre todos los sistemas de mortero analizados, es importante recordar que hay una subdivisión de dos grupos en los sistemas, al considerar la naturaleza del agregado en los dos testigos. La comparación ambiental de los sistemas CBC, CCV y CEL se hace con su mortero control o testigo 1(T1-H). Por su parte, los sistemas CM, EAH y CHBOF son comparados con el testigo que incorpora arena del Río Lerma (T2-L).

8.2.1 Fase 3. Evaluación de impacto

Un aspecto importante a considerar durante el análisis e interpretación de los resultados, es que, la incorporación de residuos industriales está evitando su disposición final en vertederos, así como todos los procesos y emisiones implícitos en ello, por ende, el subproceso de disposición final de estos residuos arroja resultados negativos en los impactos para cada sistema que los contiene, indicando que este impacto es evitado.



Eco indicador 99

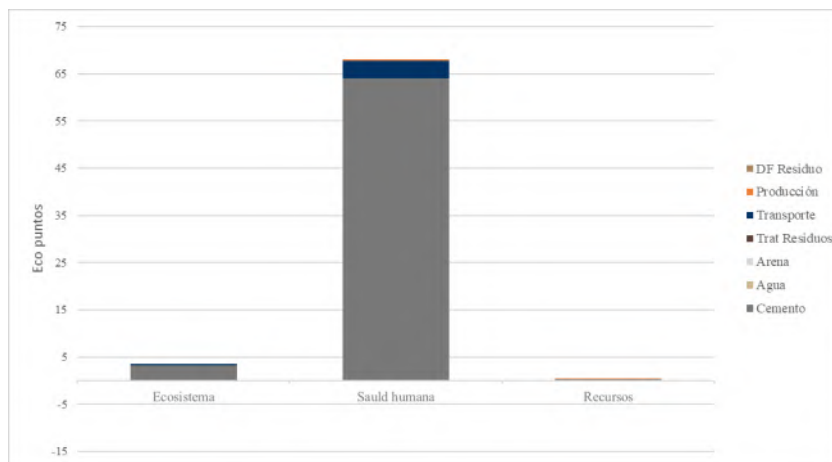
Los resultados se presentan en cuatro conjuntos de gráficas. Todas ellas son gráficas apiladas para poder comparar cada elemento en el total de cada sistema para las diferentes categorías de impacto y de daño.

El primer conjunto de gráficas (figura 24 y 25) contiene la **puntuación final** obtenida para los 8 sistemas evaluados. Gracias a estos gráficos se puede identificar en qué categoría de daño hay un mayor impacto para cada mortero realizado. En el eje de las “x” se observan las tres categorías de daño “ecosistema”, “salud humana” y “recursos” para las cuales se obtuvo una puntuación definida en el eje “y” como eco puntos. El comportamiento de todos los sistemas es el mismo: la categoría con menor impacto es la de *recursos* seguida de *ecosistema*, dejando como categoría con mayor impacto a la *salud humana*, cuya puntuación originada únicamente por el cemento es considerablemente mayor a las dos categorías de daño restantes.

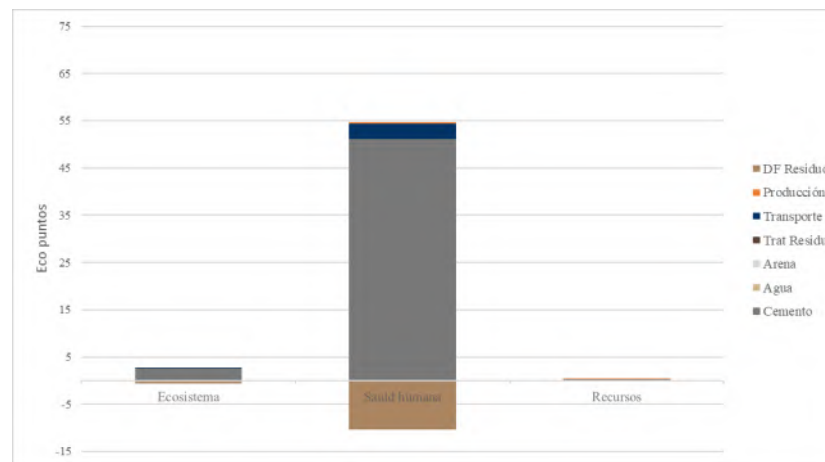
En la categoría de *salud humana* los resultados se encuentran en un rango de 44 a 68 puntos finales. Los sistemas de morteros elaborados con 100% de cemento Portland (S T1-H y S T2-L) registraron las puntuaciones más altas, arriba de 67 puntos; después se encuentran los morteros S CEL y S CHBOF con valores cercanos a 62; continua el sistema del mortero CM con 56 puntos y, finalmente, los sistemas con menor impacto en la categoría de daño “salud humana” son S EAH, S CBC y S CCV con un poco menos de 45 puntos.

Para el *ecosistema* se tienen valores entre 2.1 y 3.4 eco puntos. Los morteros control tienen una puntuación cercana a 3.4, los morteros con CEL y CHBOF resultaron en valores cercanos a 3.1, se tienen 2.78 puntos para el mortero con CM, y valores alrededor de 2.15 para los tres morteros restantes (con EAH, CBC y CCV).

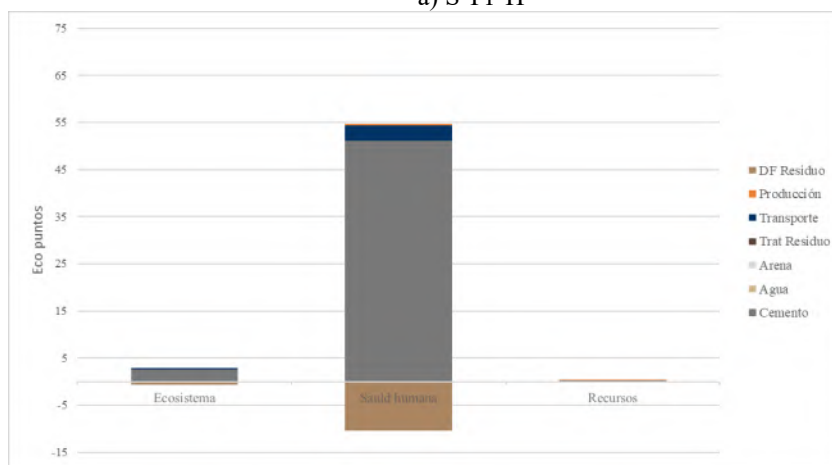
Las puntuaciones en la categoría de *recursos* se encuentran en el rango de 0.19 a 0.3. La distribución de puntuación final es igual que en las dos categorías de daño anteriores, las puntuaciones más altas son para los dos testigos, seguido por S CEL y CHBOF, luego se tiene S CM, para finalizar con S EAH, S CBC y S CCV.



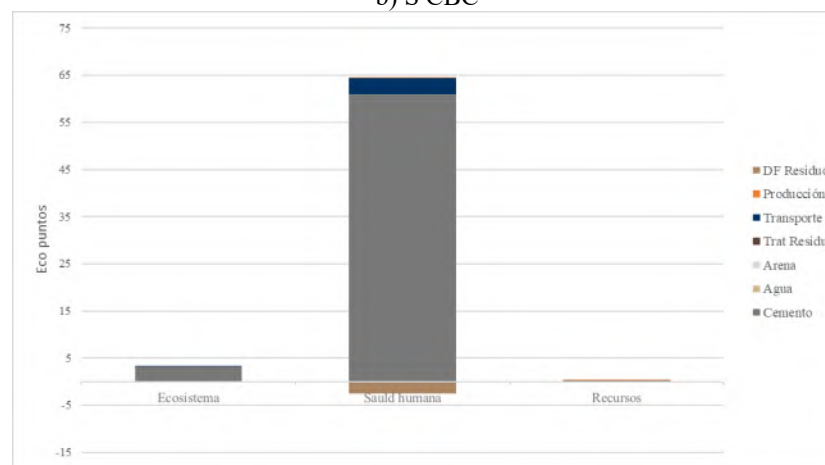
a) S T1-H



b) S CBC

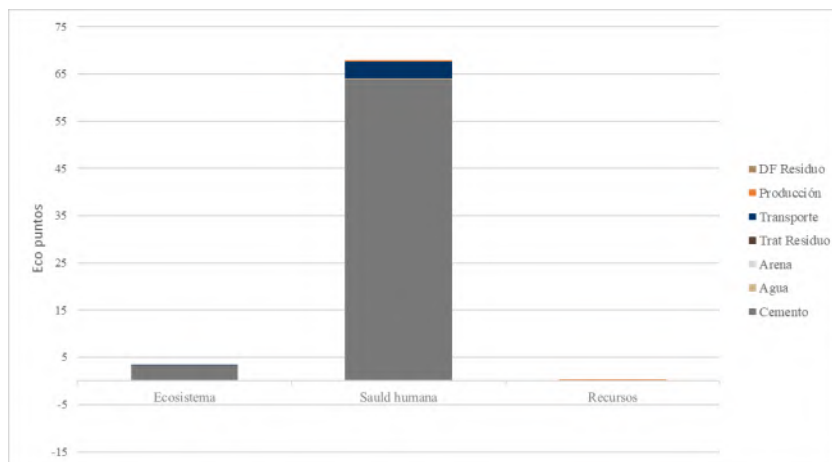


c) S CCV

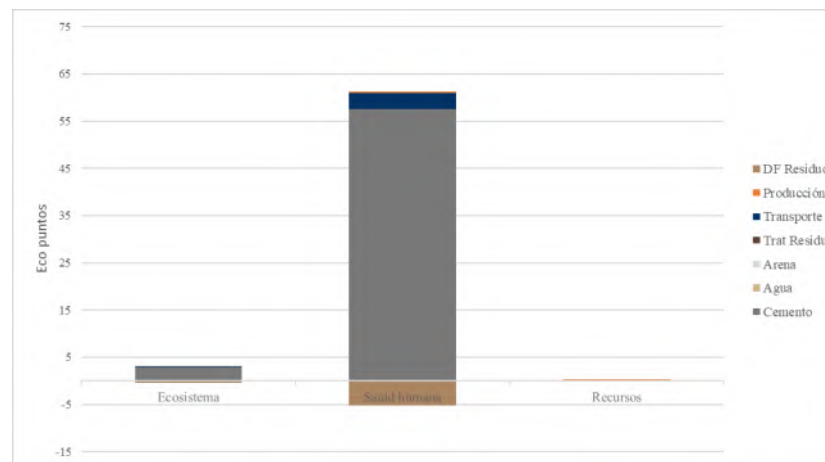


d) S CEL

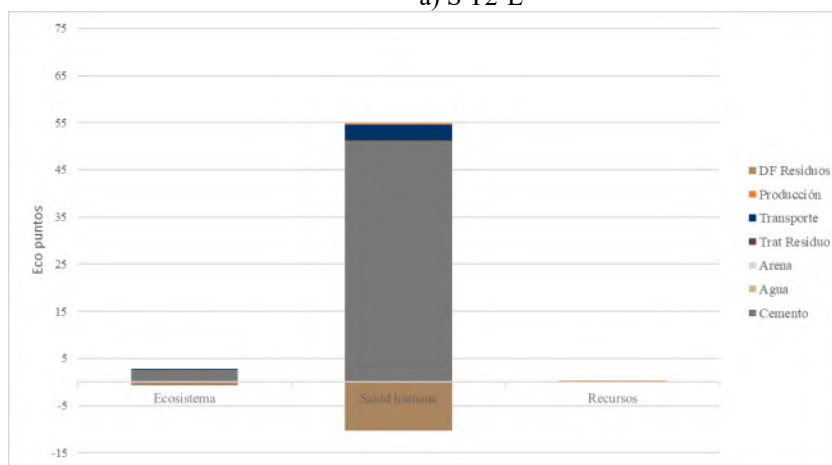
Figura 24. Puntuación final para categorías de daño con aportación de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Huajúmbaro (Eco indicador 99)



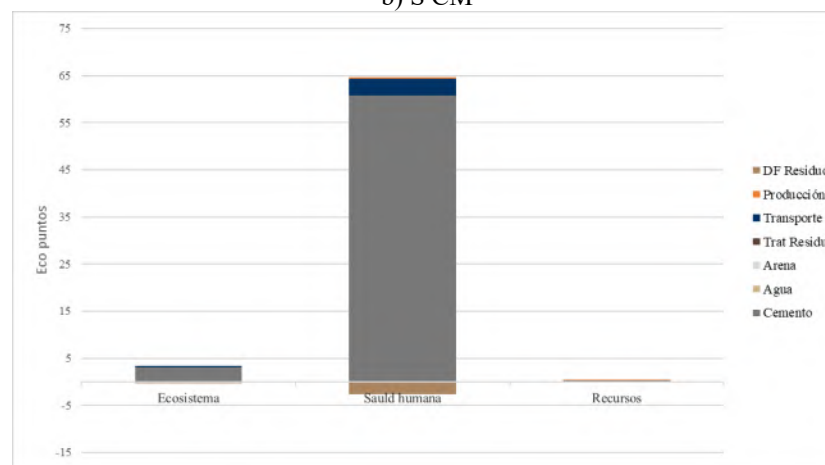
a) S T2-L



b) S CM



c) S EAH



d) S CHBOF

Figura 25. Puntuación final para categorías de daño con aportación de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Lerma (Eco indicador 99)

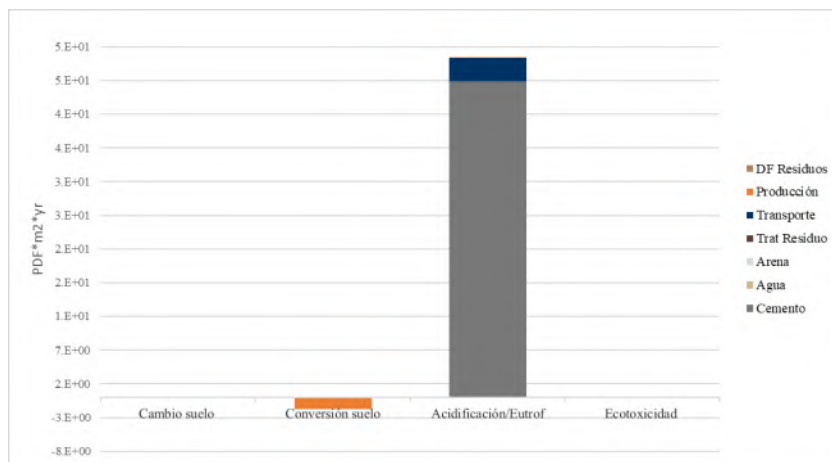


El impacto negativo obtenido por evitar el proceso de disposición final de los residuos alcanza un valor máximo de -10.34 eco puntos para la categoría de daño “salud humana” en los morteros donde se sustituyó una mayor cantidad de residuo (20% de CBC, 20% de CCV y 20% de EAH). Por su parte, los morteros con únicamente el 5% de sustitución de residuo (con CEL y CHBOF) presentaron una puntuación de -2.59 debido al subproceso de disposición final del residuo.

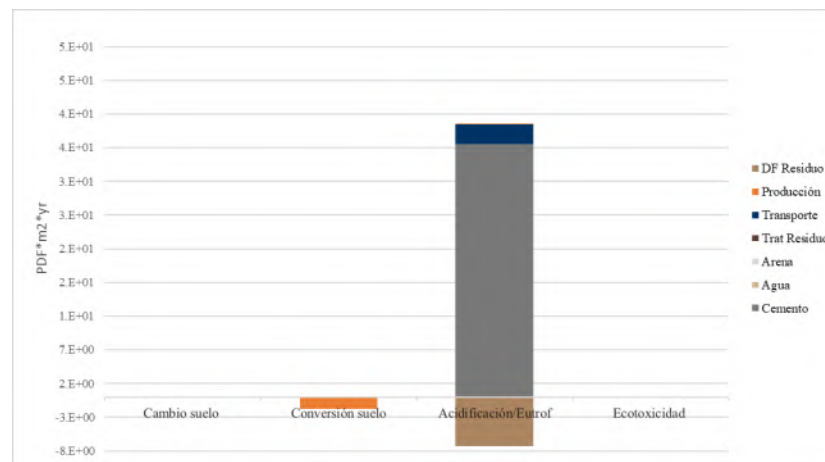
El segundo conjunto de gráficas presenta la **caracterización por categoría de daño**, con la finalidad de identificar, para cada una de ellas, la categoría de impacto con mayor influencia. Los datos presentados en las gráficas de las figuras 25 y 26 tienen unidades $\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{yr}$, las gráficas de las figuras 27 y 28 presentan los datos en DALYs, y las unidades son exceso de energía necesaria en MJ para los resultados presentados en las figuras 29 y 30. En todas las gráficas de este grupo, se tienen las categorías de impacto específicas de cada categoría de daño en el eje “x”.

Al analizar los resultados para el “ecosistema”, la categoría de impacto con mayor valor es *acidificación/eutroficación*, la cual presenta el dato máximo de $50 \text{ PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{yr}$ en los morteros testigo T1-M y T2-L y $47 \text{ PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{yr}$ como el valor mínimo en los morteros con EAH, CBC y CCV. Se puede observar también, que en la categoría *conversión de suelo*, se muestra un impacto negativo causado por los procesos que conllevan uso de energía eléctrica (producción y tratamiento de residuos). Las otras categorías de impacto alcanzan valores menores a $1 \times 10^{-5} \text{ PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{yr}$.

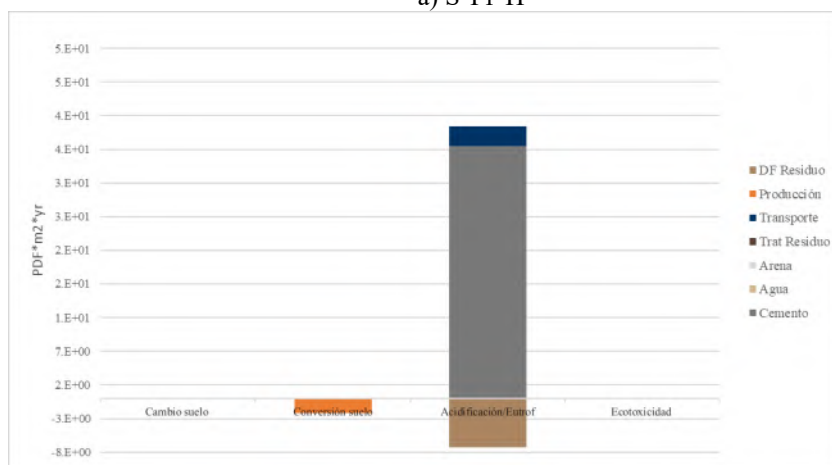
En la categoría de daño “salud humana”, se presenta dos categorías de impacto relevantes: el *cambio climático* y los *efectos respiratorios por sustancias inorgánicas*. Los morteros testigos reportaron valores superiores a los $4.4 \times 10^{-4} \text{ DALY's}$ para cambio climático y mayores a $1 \times 10^{-3} \text{ DALY's}$ en la categoría de *efectos respiratorios por sustancias inorgánicas*. Por su parte, los valores más bajos en estas dos categorías (presentados por los morteros con EAH, CBC y CCV) son de 4.2×10^{-4} y $9.9 \times 10^{-4} \text{ DALY's}$. Comparadas con los resultados obtenidos en las dos categorías mencionadas anteriormente, los resultados de las demás categorías de impacto son insignificantes, con valores en el rango de 1×10^{-7} .



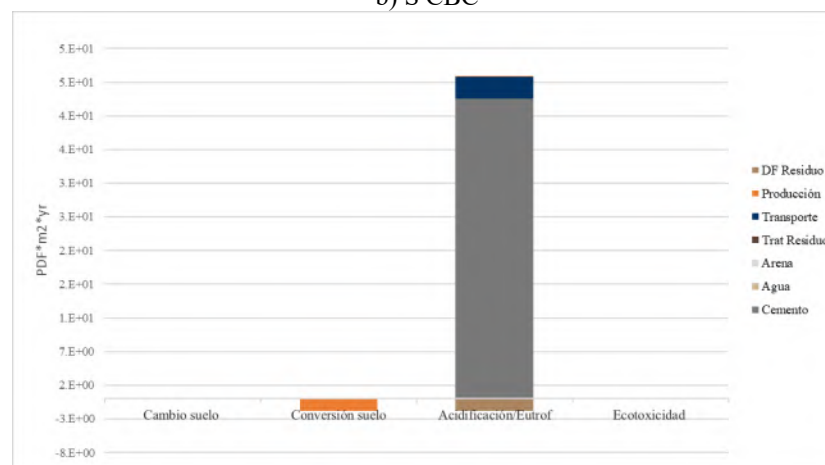
a) S T1-H



b) S CBC

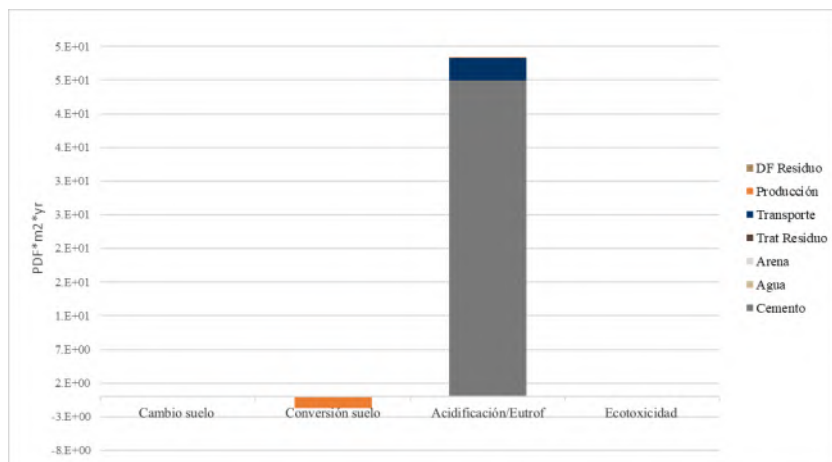


c) S CCV

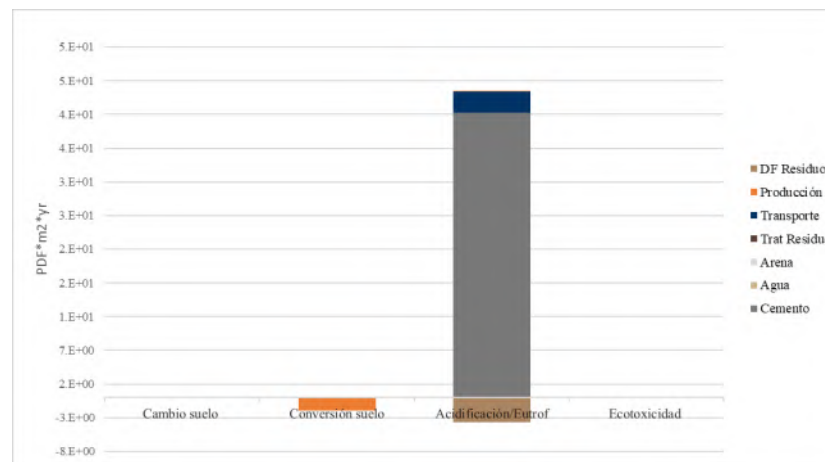


d) S CEL

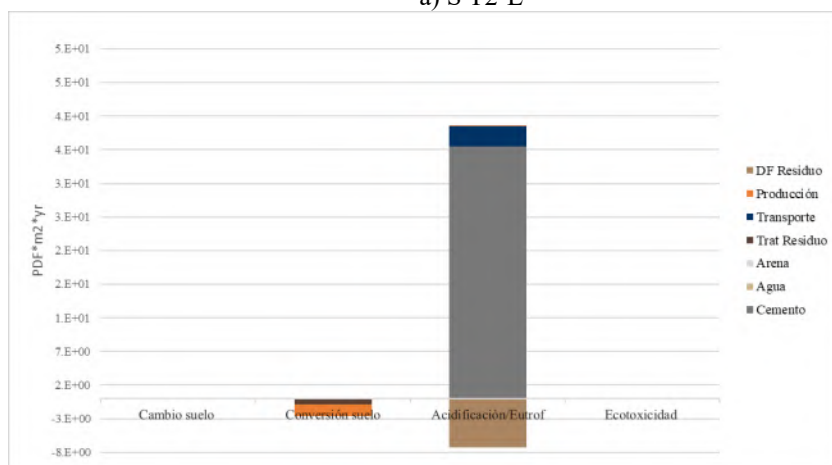
Figura 26. Caracterización de impactos en la categoría “ecosistema” con aportación de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Huajúbaro (Eco indicador 99)



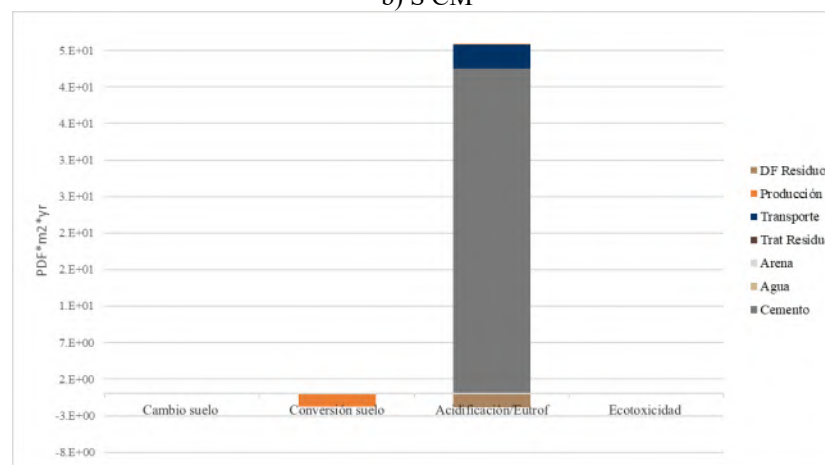
a) S T2-L



b) S CM

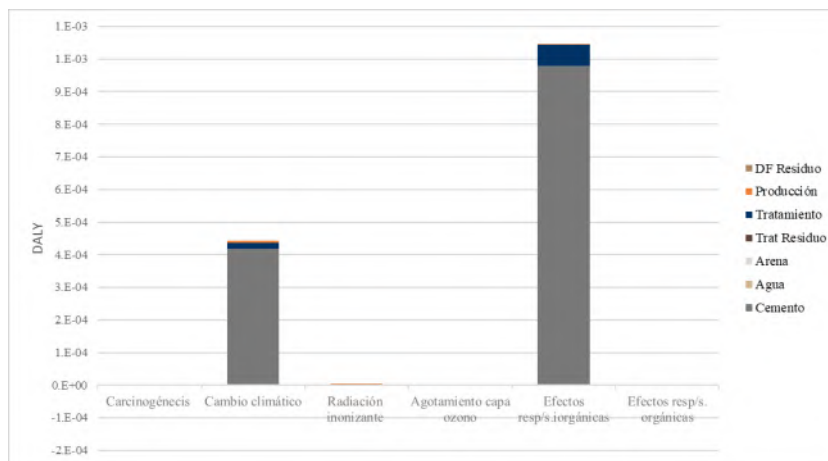


c) S EAH

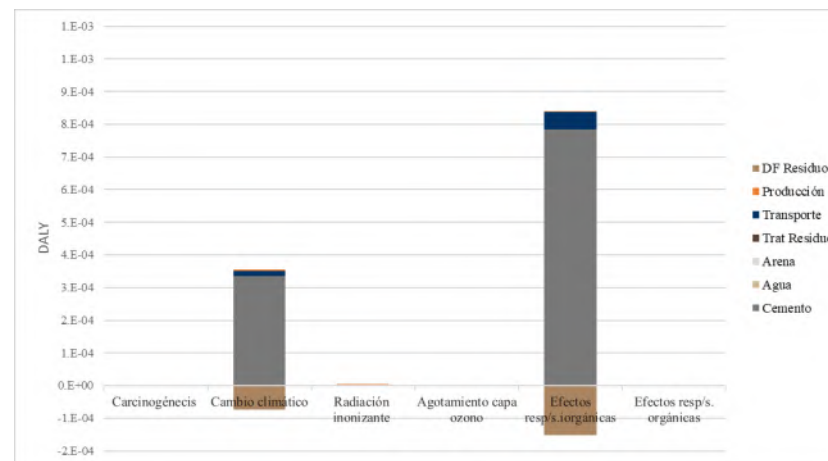


d) S CHBOF

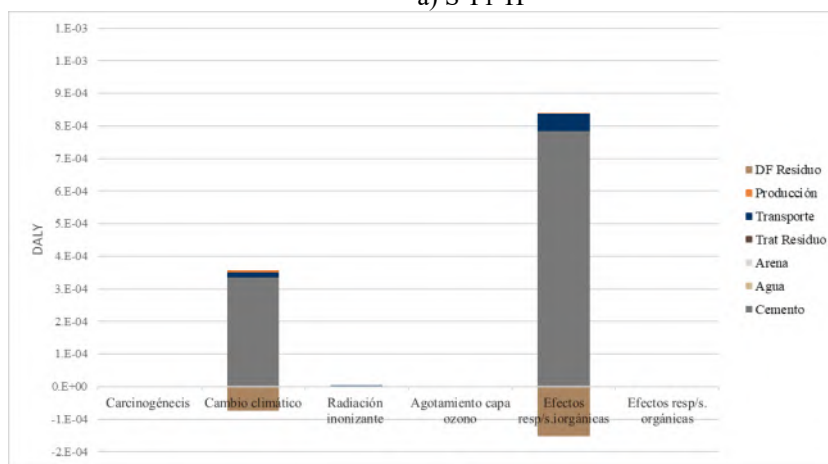
Figura 27. Caracterización de impactos en la categoría "ecosistema" con aportación de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Lerma (Eco indicador 99)



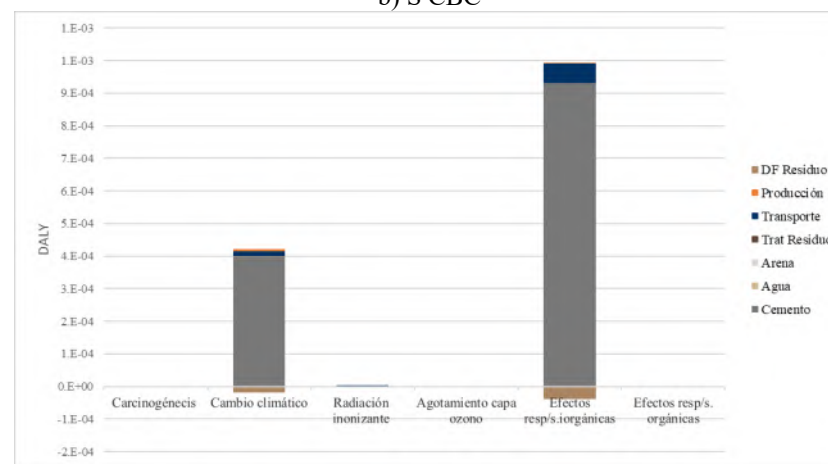
a) S T1-H



b) S CBC

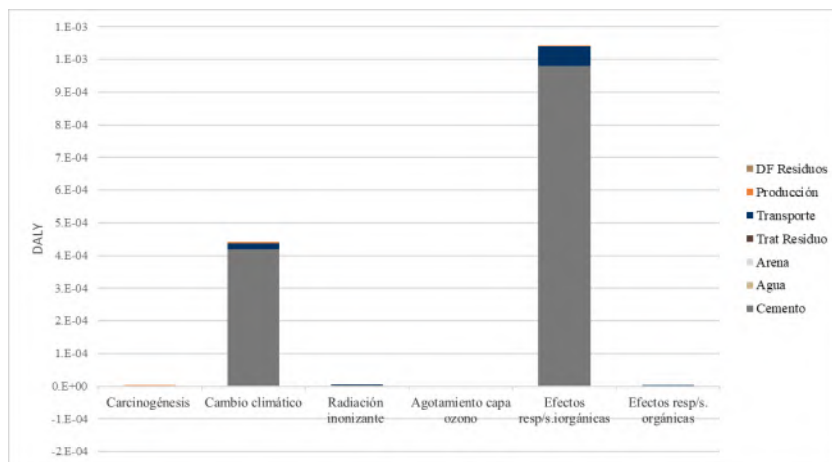


c) S CCV

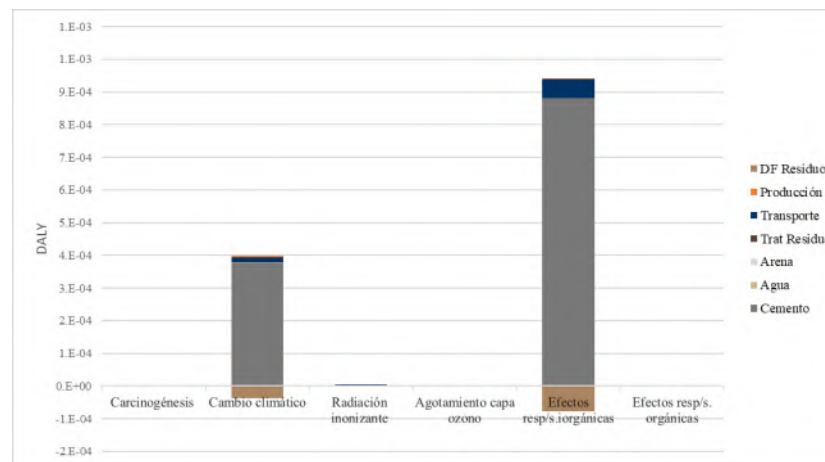


d) S CEL

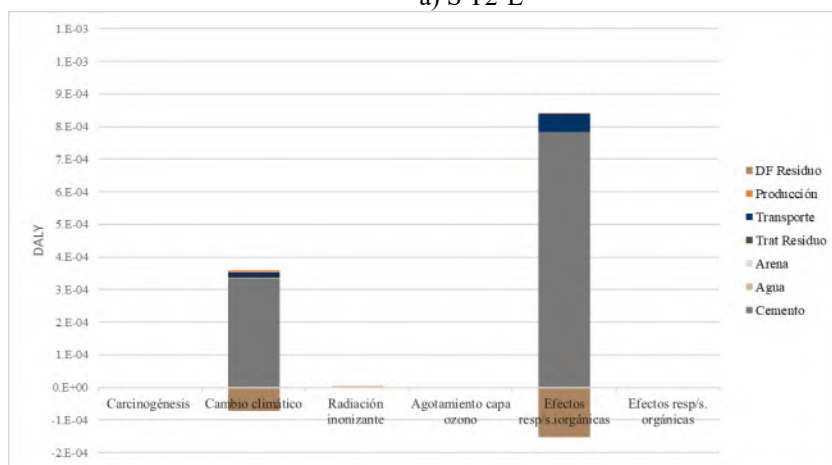
Figura 28. Caracterización de impactos en la categoría "salud humana" con aportación de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Huajúbaro (Eco indicador 99)



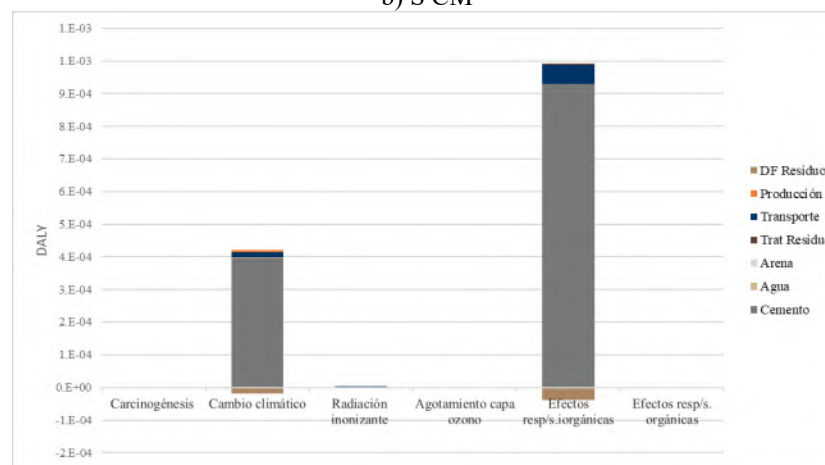
a) S T2-L



b) S CM

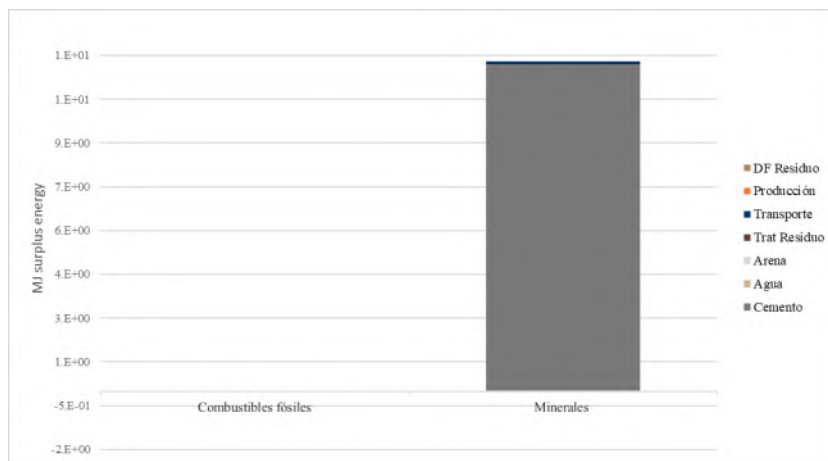


c) S EAH

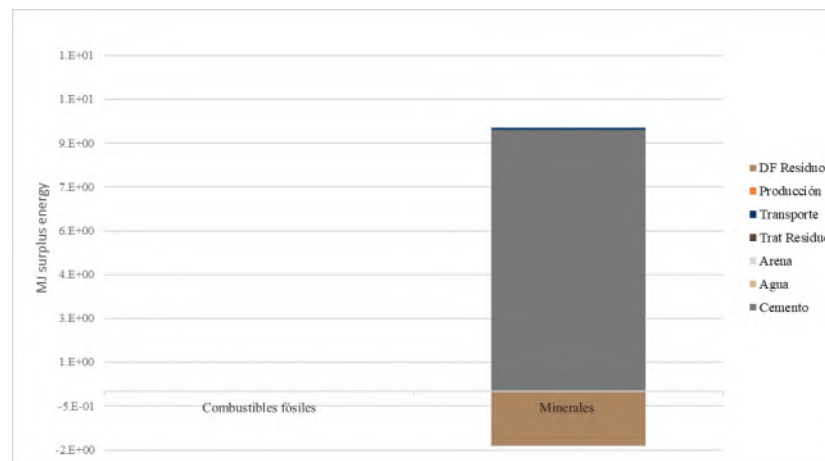


d) S CHBOF

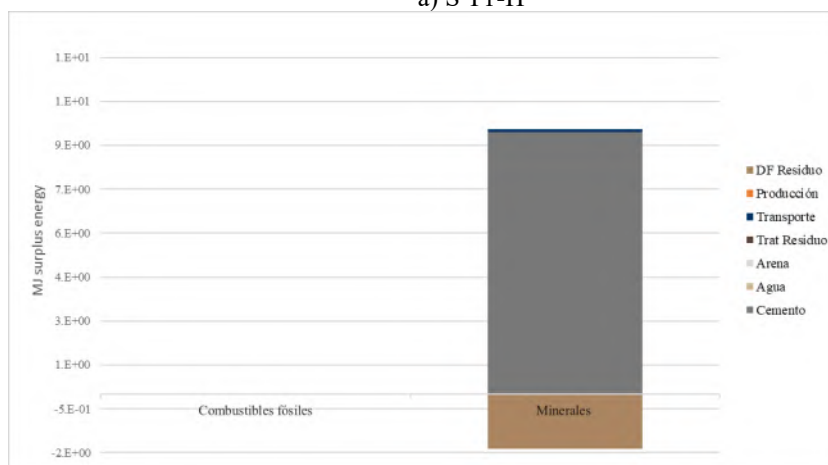
Figura 29. Caracterización de impactos en la categoría “salud humana” con aportación de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Lerma (Eco indicador 99)



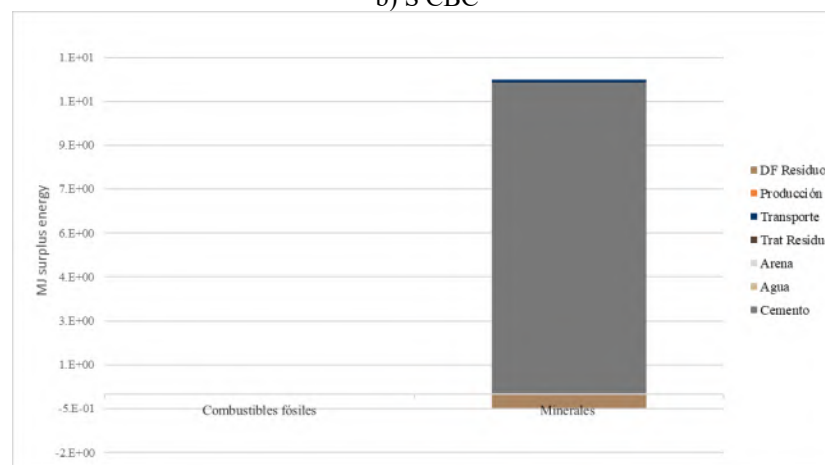
a) S T1-H



b) S CBC

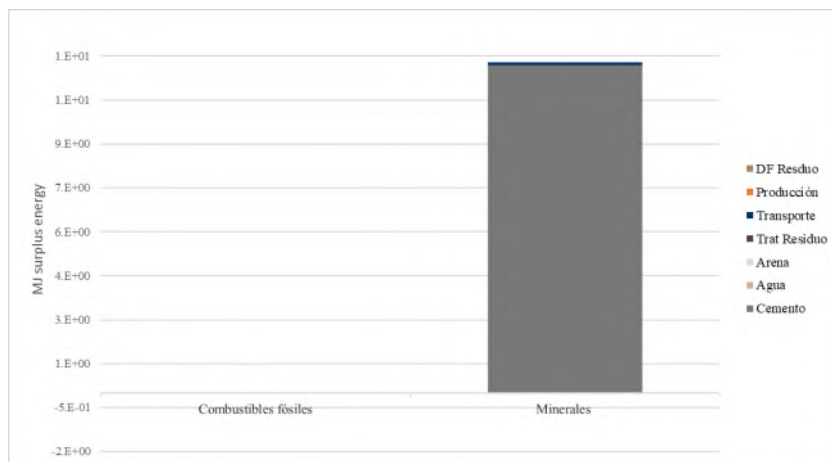


c) S CCV

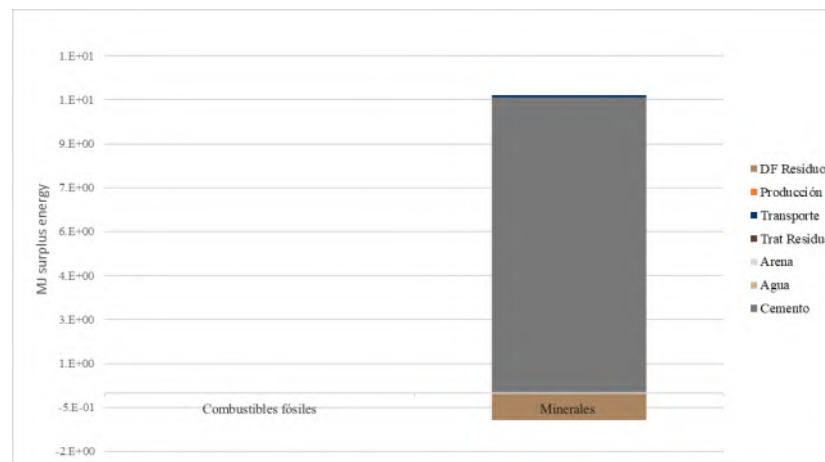


d) S CEL

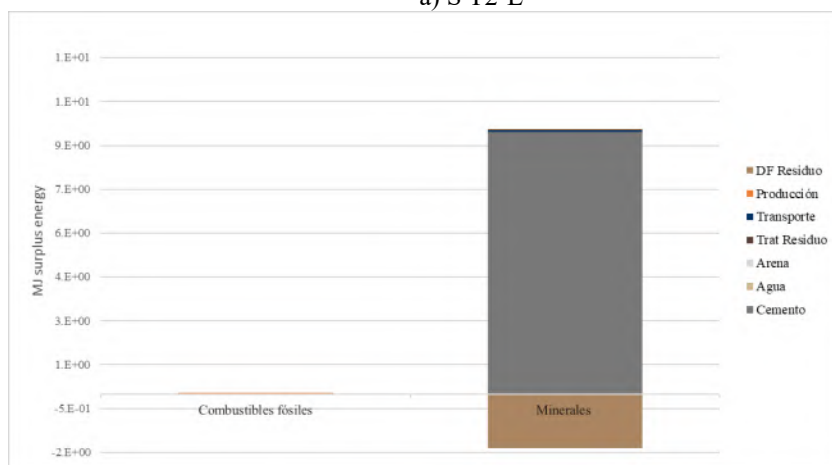
Figura 30. Caracterización de impactos en la categoría "recursos" con aportación de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Huajúmbaro (Eco indicador 99)



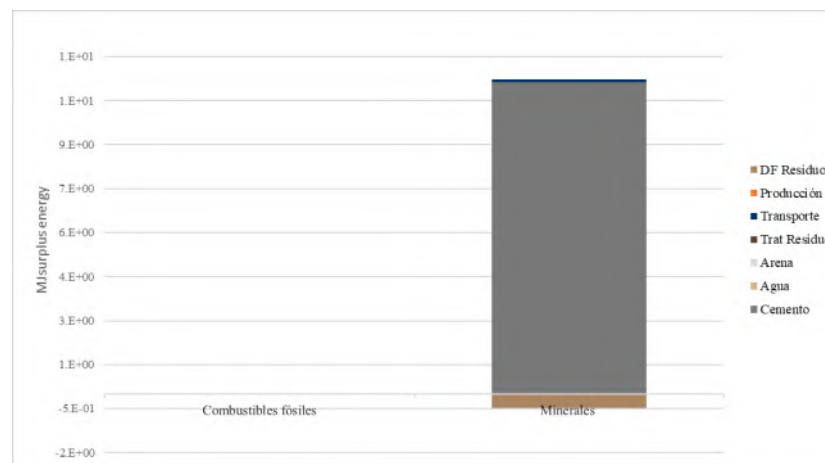
a) S T2-L



b) S CM



c) S EAH



d) S CHBOF

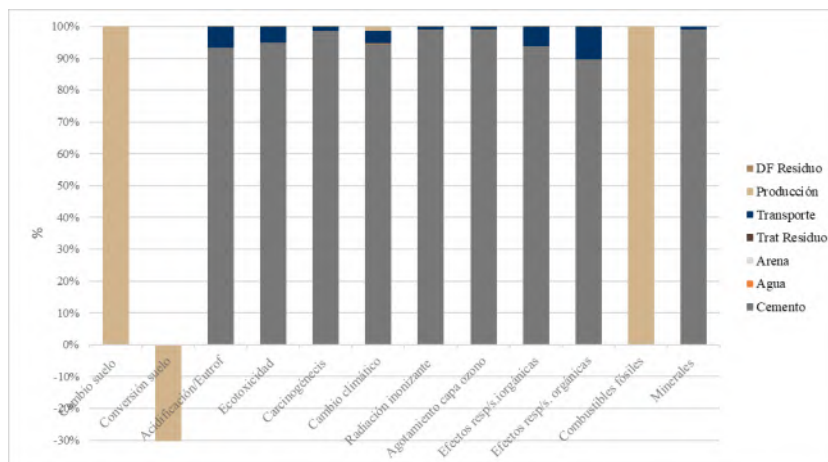
Figura 31. Caracterización de impactos en la categoría “recursos” con aportación de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Lerma (Eco indicador 99)



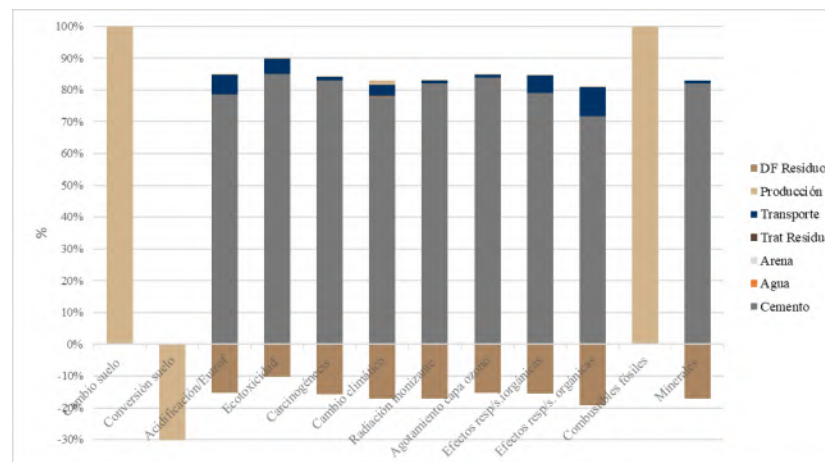
De acuerdo con los resultados obtenidos en “recursos”, de las dos categorías de impacto que se tienen, la categoría *minerales* tiene la mayor relevancia, con valores de exceso de energía necesaria en MJ dentro del rango de 10.9 a 11.3. Nuevamente, los morteros con los residuos EAH, CBC y CCV tienen el dato menor de 10.9 MJ, después se encuentra el mortero con CM con 11.1 MJ, luego, con 11.2 MJ los morteros con los residuos CHBOF y CEL, finalizando con los valores mayores en los testigos. Para la categoría de impacto “recursos fósiles” el impacto más alto se obtuvo para el mortero con la puzolana EAH con un valor de 1.16×10^{-2} , sin embargo, esto es apenas el 0.1% de los valores obtenidos para la otra categoría de impacto.

Para poder observar el elemento (o subproceso) dentro de los sistemas con mayor aportación a las diferentes categorías de impacto, se presenta el tercer conjunto de gráficas. Se trata de una **caracterización porcentual** por elemento con todas las categorías de impacto.

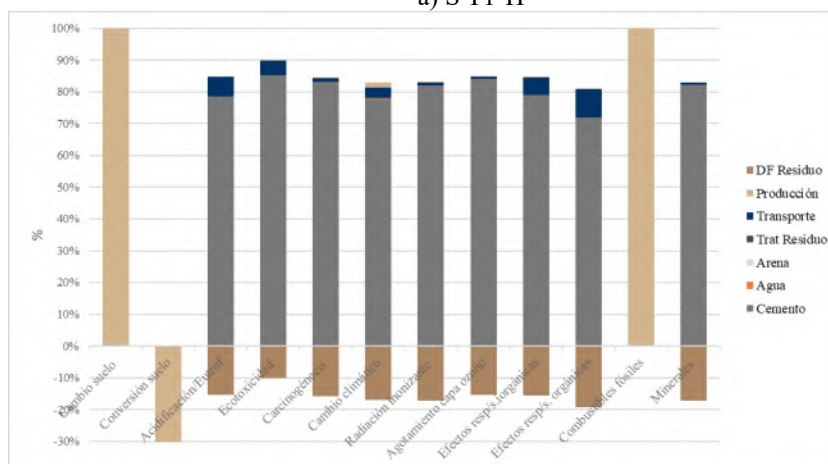
El detalle más importante apreciado en la presentación gráfica de la información es la contribución a cada categoría de impacto por parte del cemento como elemento en el sistema. Descartando las categorías de *cambio/conversión de suelo y combustibles fósiles*, el cemento es el mayor contribuyente al impacto resultante en todas las categorías de impacto, con porcentajes de contribución arriba del 70% en todos los casos. En las categorías *acidificación/eutroficación, cambio climático y efectos respiratorios por sustancias orgánicas/inorgánicas* el cemento representa entre el 71% y 95% del total de impacto en la categoría; siendo T1-H, CEL, T2-L, CM y CHBOF los sistemas donde se tiene el mayor porcentaje de contribución. Por su parte, para las categorías de *ecotoxicidad, carcinogénesis, radiación ionizante, agotamiento de la capa de ozono y minerales* esta contribución aumenta a un rango de 82-99%; los morteros en donde se presenta el menor porcentaje de contribución por parte del cemento son aquellos con los residuos CBC, CCV y EAH.



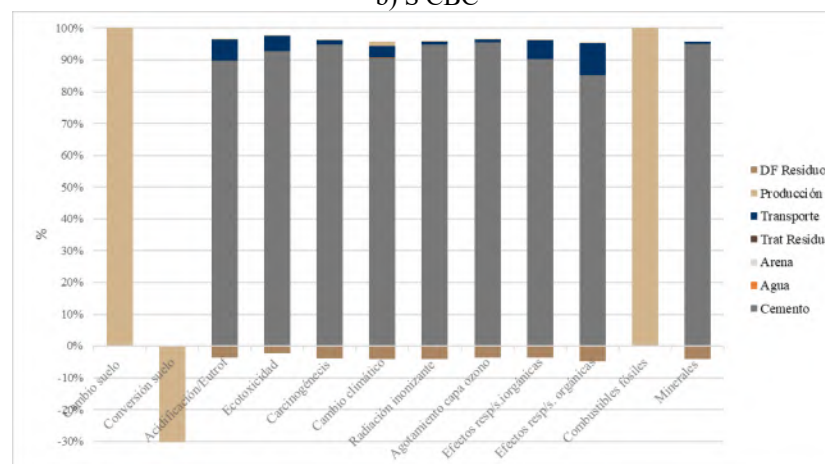
a) S T1-H



b) S CBC

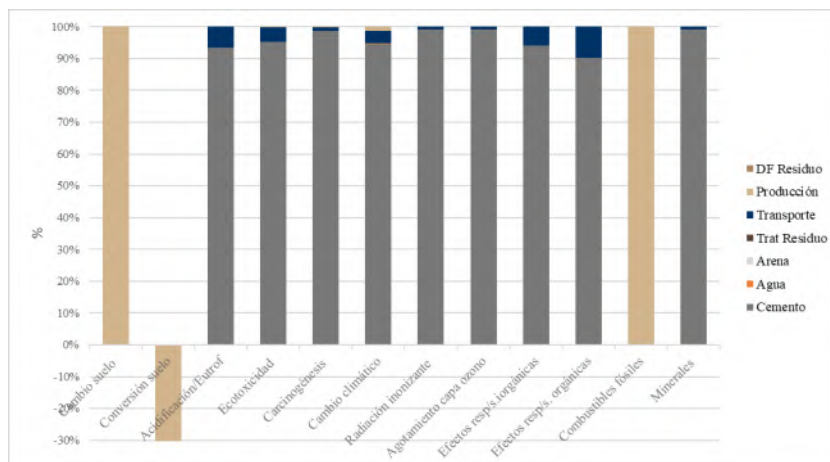


c) S CCV

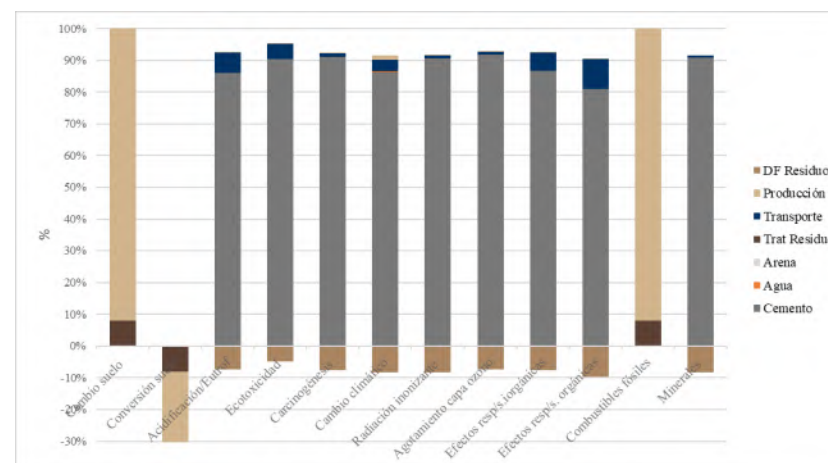


d) S CEL

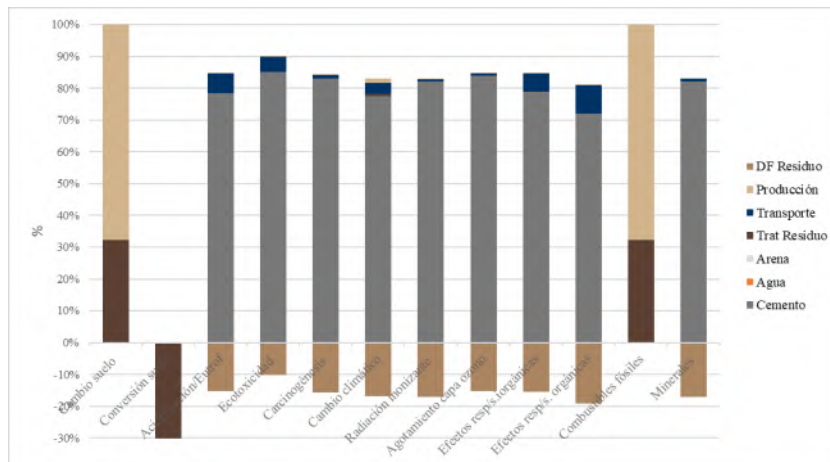
Figura 32. Caracterización de impactos con aportación porcentual de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Huajúbaro (Eco indicador 99)



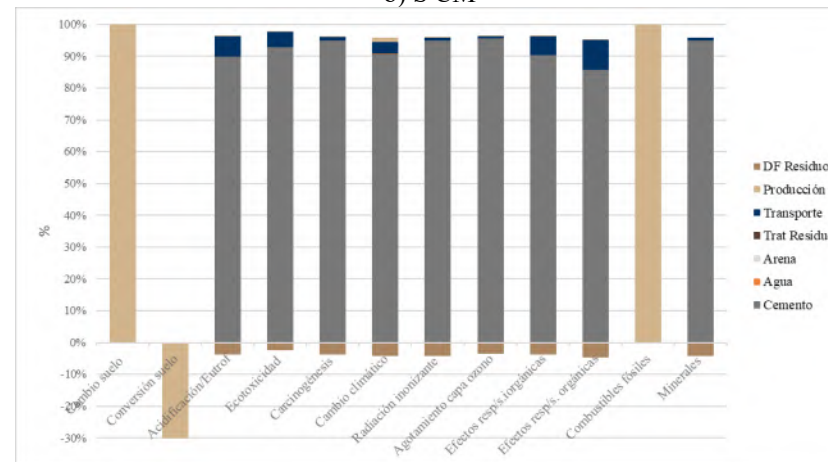
a) S T2-L



b) S CM



c) S EAH



d) S CHBOF

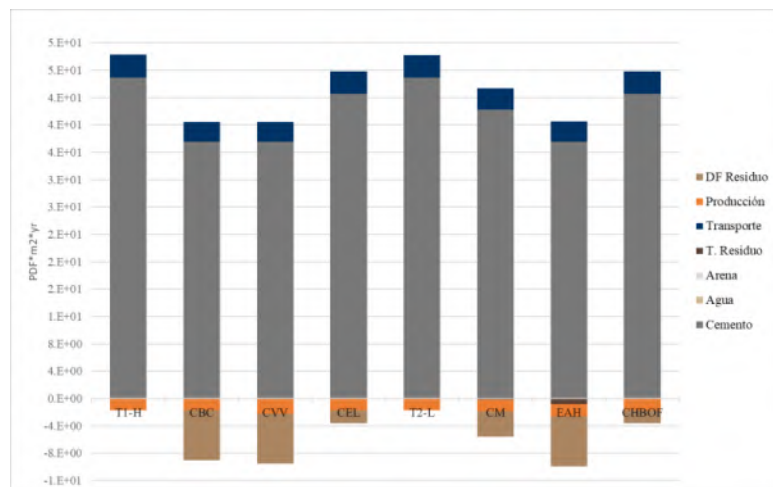
Figura 33. Caracterización de impactos con aportación porcentual de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Lerma (Eco indicador 99)



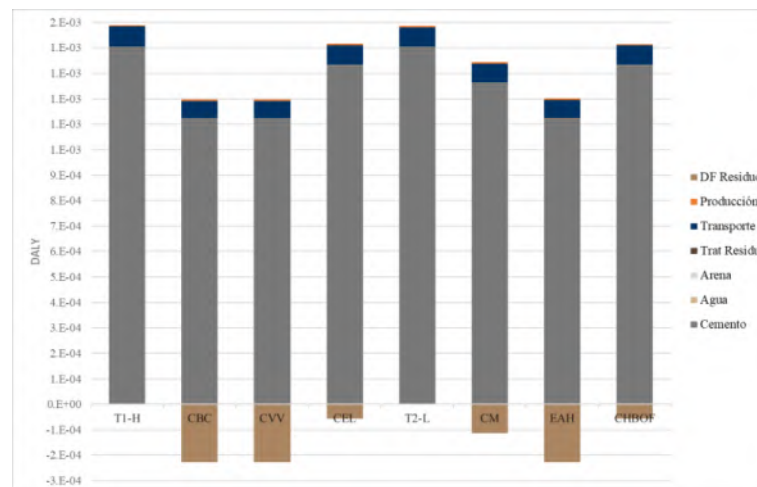
El segundo lugar de contribución a impacto total en cada categoría lo tiene el transporte, especialmente en la categoría *efectos respiratorios por sustancias inorgánicas*, en donde se alcanza hasta un 10% de contribución en los sistemas T1-H y CEL; y con los resultados más bajos cerca de 9% de aporte en CBC, CCV y EAH. Después, en un rango de valores de contribución relativamente igual se encuentran *acidificación/eutroficación*, *ecotoxicidad*, *cambio climático* y para *efectos respiratorios orgánicos* en donde el porcentaje de contribución oscila entre 3.4% y 6.8%. Presentando un aporte menor para *carcinogénesis*, *radiación ionizante*, *agotamiento de la capa de ozono* y *minerales*, el transporte en estas categorías representa entre 0.7% y 1.3% del total del impacto.

El uso del agua en la elaboración de los morteros generó impacto en la categoría de salud humana “cambio climático” donde representa entre 0.21% y 0.22% del impacto total. Por su parte, el proceso de producción contribuye entre el 1.4% al 1.7% del impacto ambiental dentro de dicha categoría de impacto.

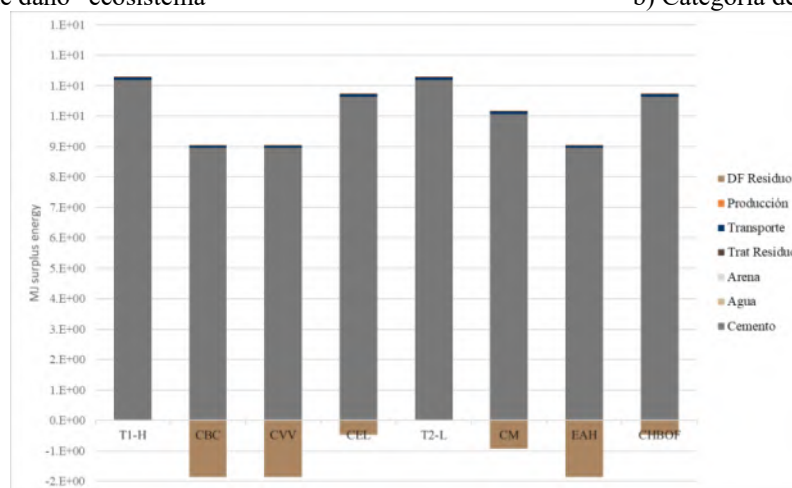
El subproceso “disposición final de residuos” solo tiene impacto en todos los morteros que tienen residuos, porque, como ya se mencionó, este proceso se está analizando para considerar el proceso de disposición final que es evitado al utilizar este residuo en la producción de un nuevo material, siendo negativa la puntuación de dicha categoría. Al igual que el subproceso “cemento”, el elemento “disposición final” tiene impacto en todas las categorías de impacto menos en cambio/conversión de suelo y combustibles fósiles. Para aquellos morteros con 20% de residuo industrial, el porcentaje de contribución varía entre 10% y 19% en las diferentes categorías; en el mortero que contiene 10% de CM el porcentaje va de 4.8% a 9.6%; y, la aportación que se genera para los residuos sustituidos en un 5% oscila entre 2.3%-4.8%.



a) Categoría de daño “ecosistema”



b) Categoría de daño “salud humana”



c) Categoría de daño “recursos”

Figura 34. Comparación de los resultados obtenidos por el método Eco indicador 99 en cada mortero analizado para las tres categorías de daño.



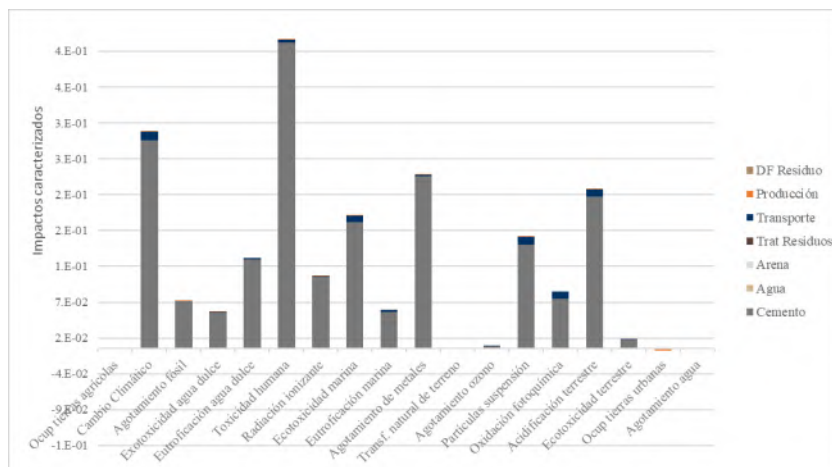
Para las categorías descartadas en el análisis anterior (*cambio/conversión de suelo y combustibles fósiles*), en donde los impactos son generados por el uso de energía eléctrica, los elementos que tienen contribución en dichas categorías son el proceso de producción de los morteros y el proceso de tratamiento de los residuos. Como solo dos residuos tuvieron un tratamiento, solo en los morteros con CM y CHBOF se tiene una contribución del 8.1% y 32.2%, respectivamente, por parte del proceso de tratamiento del residuo; en dichos morteros, el impacto restante en estas categorías se debe al proceso de producción. Para el resto de sistemas de mortero analizados, todo el impacto en las tres categorías de impacto es causado por el proceso de producción del mortero.

Por último, en la figura 33 se presenta la **comparación de los 8 sistemas de mortero** evaluados. Las tres gráficas apiladas presentan en el eje “y” la puntuación final en eco puntos de cada mortero y en el eje “x” la categoría de daño correspondiente. En las tres categorías de daño se puede observar la misma tendencia en los diferentes morteros evaluados: primeramente, los morteros testigos son los que encabezan cada categoría de daño con el mayor impacto generado, posteriormente se tiene los sistemas con los residuos CEL y CHBOF, luego la mezcla que tiene sustituido CM, y, por último, los morteros con menor impacto en cada una las categorías de daño son los correspondientes a los residuos EAH, CBC y CCV.

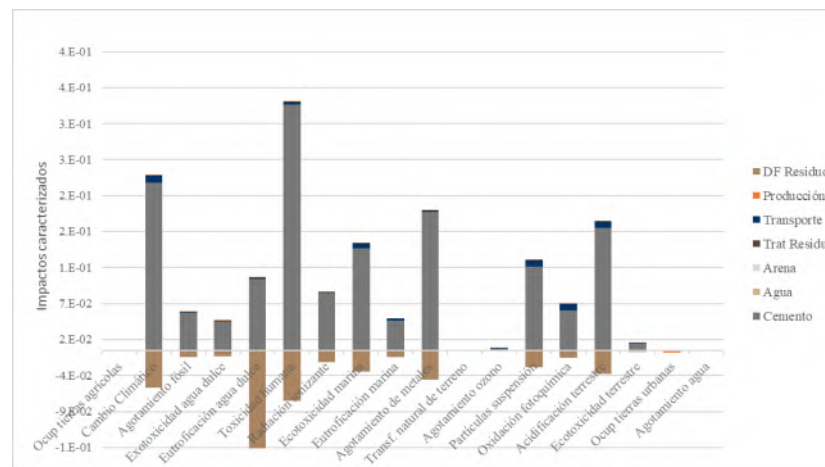
ReCiPe (2016)

Los resultados de punto medio obtenidos por el método ReCiPe se presentan, primeramente, en un conjunto de gráficas en donde se reúnen las 18 **categorías de impacto de punto medio caracterizadas** que toma en consideración el método, con la intención de identificar visualmente cuáles de ellas son en las que se presenta el mayor impacto. Posteriormente, se agregan gráficas específicas de las **categorías de impacto con mayor carga ambiental** para un análisis más exhaustivo.

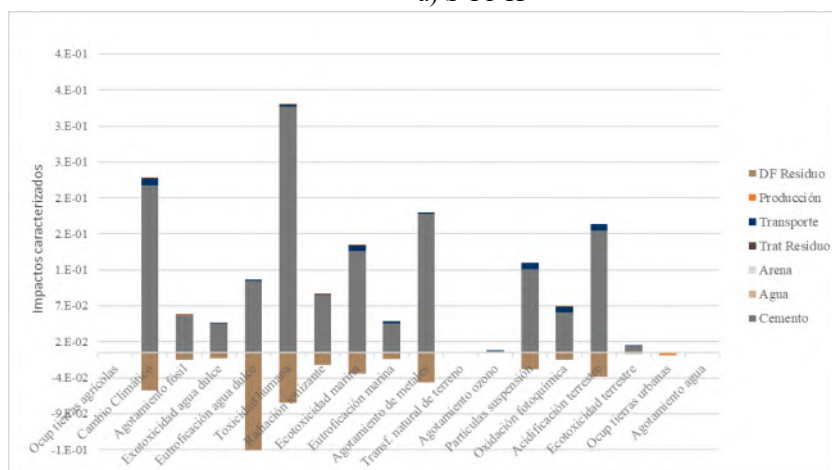
Las gráficas de las figuras 35 y 36 muestran los resultados de la **caracterización de todas las categorías de impacto**. Primeramente, la categoría con mayor carga ambiental es *toxicidad humana* alcanzando una puntuación máxima de 0.4313 y mínima de 0.2753 en la caracterización; dicha puntuación representa entre un 21% y



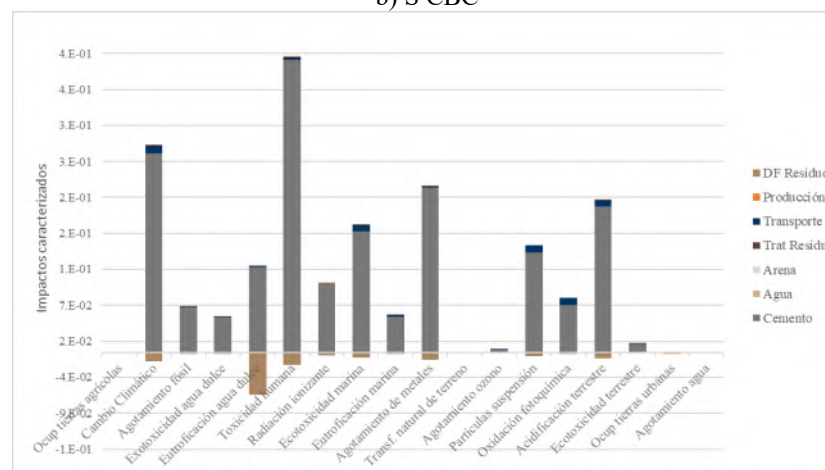
a) S T1-H



b) S CBC

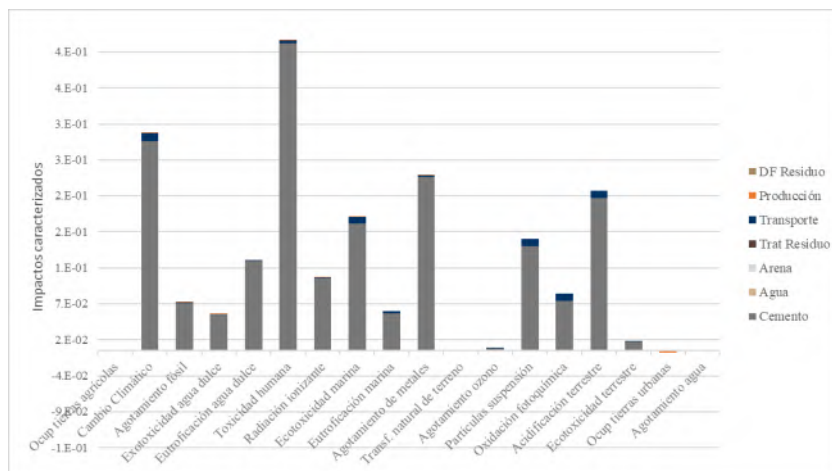


c) S CCV

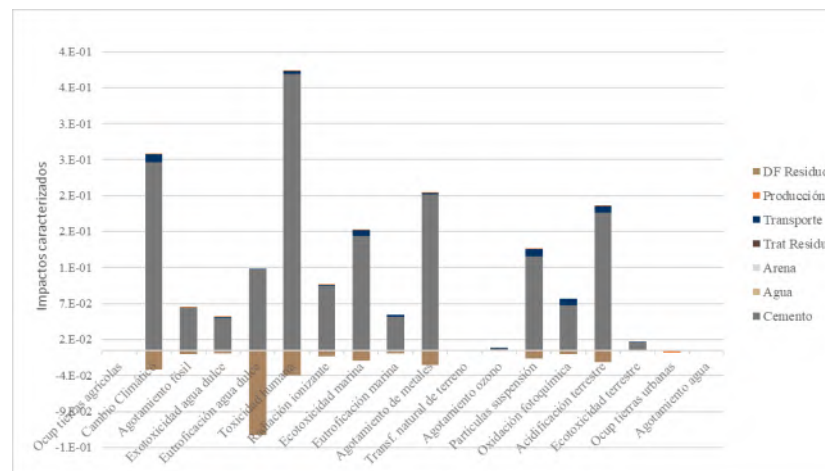


d) S CEL

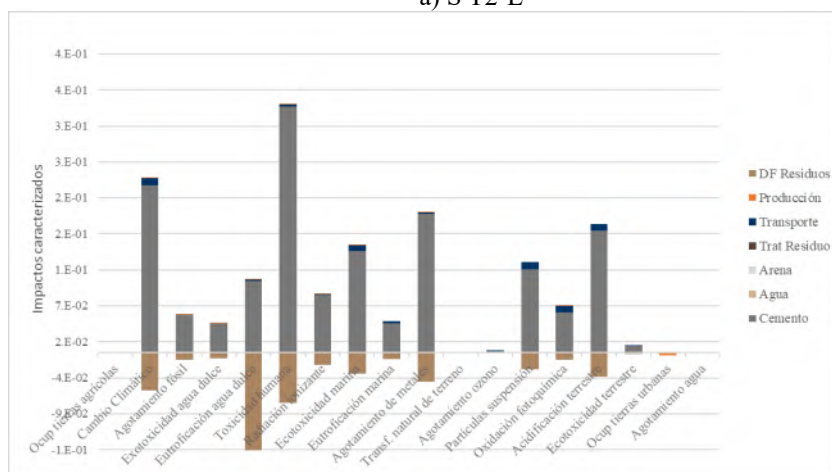
Figura 35. Caracterización de impactos con aportación de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Huajúmbaro (ReCiPe 2016)



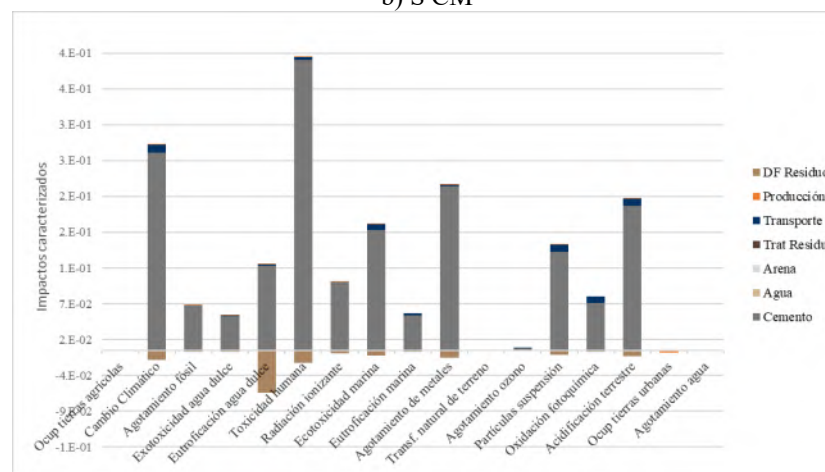
a) S T2-L



b) S CM



c) S EAH



d) S CEL

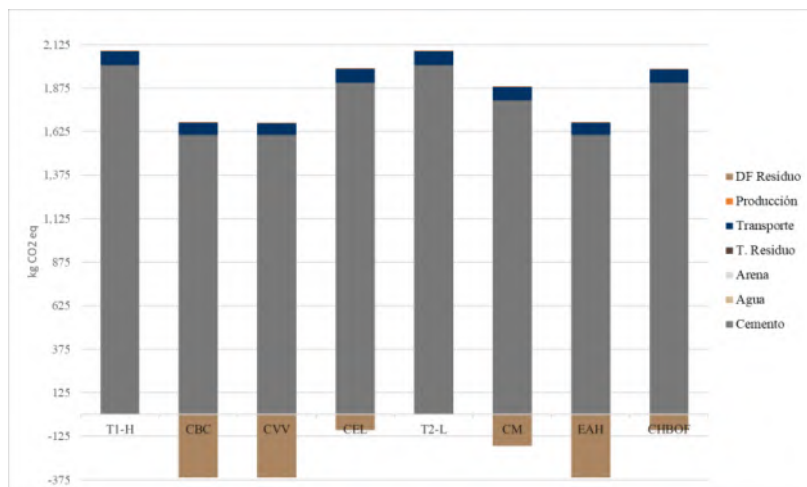
Figura 36. Caracterización de impactos con aportación de cada elemento en los sistemas elaborados con arena del Río Lerma (ReCiPe 2016)



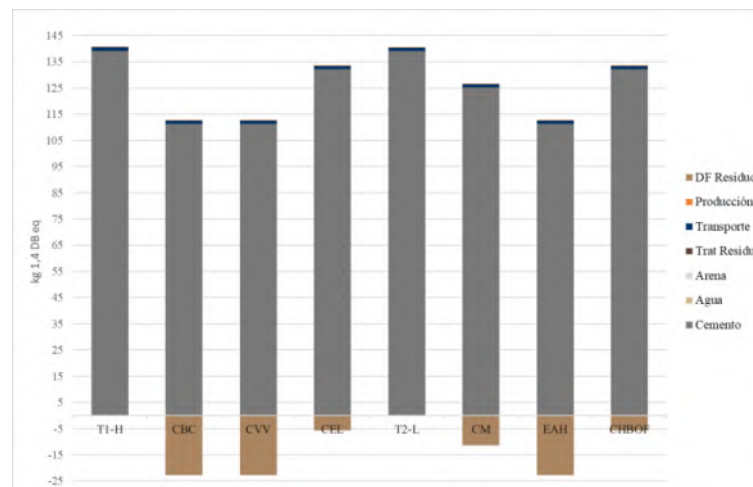
un 25%, aproximadamente, del total del impacto en cada sistema. En segundo lugar, se tiene la categoría de *cambio climático*, la cual contribuye entre un 15% y un 17% al impacto total, con puntuaciones en un rango de 0.1903-0.3027. Las siguientes categorías en la lista de mayor a menor aporte son *agotamiento de metales* y *acidificación terrestre*, las cuales representan entre un 12-14% y 11-13% de aporte a la puntuación final de cada mortero, respectivamente. Los resultados en puntuación de estas dos últimas categorías de impacto mencionadas se encuentran en un rango de 0.1538-0.2432 para el agotamiento de metales y entre 0.1458-0.2228 para la acidificación terrestre. A continuación, se encuentra la categoría *ecotoxicidad marina*, la cual tiene un aporte entre el 9% y el 11% del valor total. Las categorías restantes tienen un impacto menor al 10% en el resultado final, a excepción de la categoría *eutroficación en agua dulce*, la cual presenta un comportamiento diferente. En la categoría de impacto *eutroficación en agua dulce* se puede observar un comportamiento diferente al que vienen presentando el resto de categorías: para los morteros con residuos industriales, el porcentaje de impacto en dicha categoría disminuye considerablemente hasta el punto de alcanzar un impacto negativo en tres de dichos morteros. Por tanto, los porcentajes de aporte de dicha categoría van desde el 6.21% hasta el -12.30%.

Las **categorías de impacto con mayor carga ambiental** son *cambio climático*, *toxicidad humana*, *agotamiento de metales* y *acidificación terrestre*. La comparación de los resultados obtenidos para los ocho sistemas en análisis en cada una de estas categorías se encuentra en la figura 37. En las cuatro categorías de impacto se observa la misma tendencia por parte de los morteros en análisis, el mayor impacto es el correspondiente a los morteros testigos, después, en orden ascendente siguen los morteros CEL-5 y CHBOF-05, posteriormente, la mezcla CM-10, y finalmente, como los morteros con menor valor se encuentran CBC-20, CCV-20 y EAH-20.

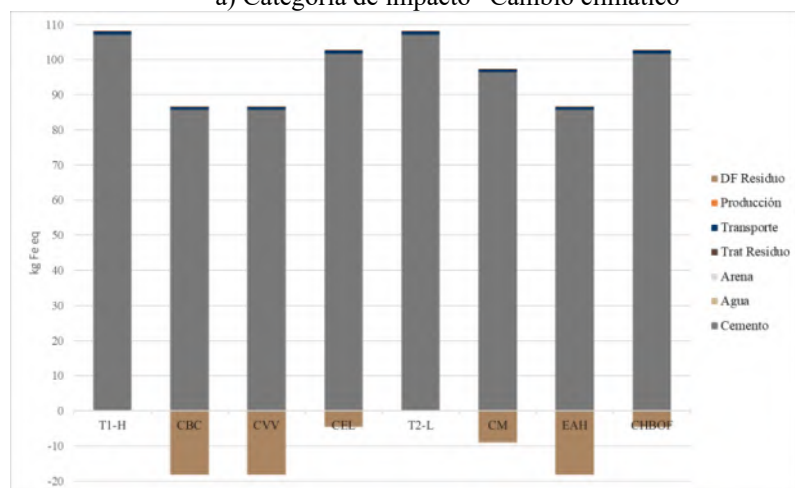
La figura 37a presenta los resultados obtenidos para la categoría de *cambio climático* que tiene unidades de kg de CO₂ equivalentes. La cantidad de CO₂ liberada a la atmósfera por la elaboración de los morteros T1-H y T2-L es de 2080 kg CO₂ eq, es decir, el mayor impacto lo presentan las mezclas con 100% de cemento en su diseño.



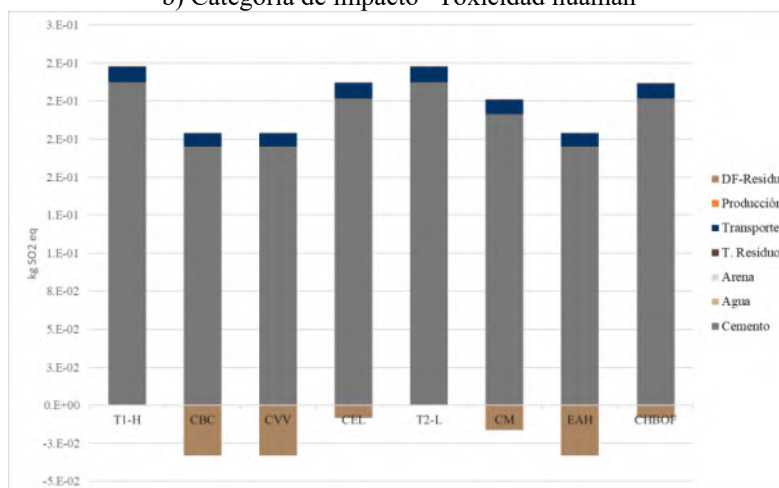
a) Categoría de impacto “Cambio climático”



b) Categoría de impacto “Toxicidad huaman”



c) Categoría de impacto “Agotamiento de metales”



d) Categoría de impacto “Acidificación terrestre”

Figura 37. Comparación de los resultados obtenidos por el método ReCiPe 2016 en cada mortero analizado para las tres categorías de impacto con mayor relevancia



En los morteros con residuos industriales incorporados como sustituciones de cemento, la disminución del impacto se encuentra en proporción con la disminución de cemento en su diseño. Los morteros con una sustitución del 5% (CEL y CHBOF) tuvieron una disminución de 193 kg de CO₂ equivalentes; por su parte, la mezcla en la que se sustituyó el 10% de cemento (CM-10) tuvo una disminución de 385 kg de CO₂ eq; y, aquellos con el 20% de reemplazo de cemento por residuo, CBC, CCV y EAH, presentaron una disminución de la emisión de CO₂ igual a 770 kg equivalentes. Además de los resultados mencionados anteriormente, en los morteros con residuos se tiene una cierta cantidad de kg de CO₂ evitados, por la disposición final evitada de los residuos; para las mezclas CBC-20, CCV-20 y EAH-20, este valor es de -361 kg de CO₂ eq, para CM-10 se obtuvo -180 kg de CO₂ eq y para CEL-5 y CHBOF-05 -90 kg de CO₂ eq.

La comparación de la categoría *toxicidad humana* se encuentran en la figura 37b. Las unidades para esta categoría son kg de diclorobenceno (1,4-DB) equivalentes. Los morteros testigos presentaron un impacto de 140.5 kg de 1,4-DB eq en la categoría. Por su parte, los morteros con residuos incorporados muestran los siguientes valores de impacto: CEL y CHBOF 127.8 kg de 1,4-DB eq, CM 115 kg de 1,4-DB eq, y el uso de los residuos CBC, CCV y EAH incorpora el menor impacto con 90 kg de 1,4-DB eq. Los valores de impactos negativos ocasionados por la disposición final evitada en los residuos van desde -5.70 kg de 1,4-DB eq hasta -22.78 kg de 1,4-DB eq.

En la gráfica de la figura 37c están representados los impactos obtenidos para la categoría *agotamiento de metales* con unidades iguales a kg de Fe equivalentes. El impacto menor fue presentado por las tres mezclas con menor cantidad de cemento (CBC-20, CCV-20 y EAH-20) indicado por 68-35 kg de Fe eq, luego, con un impacto de 88.12 kg de Fe eq se encuentra el mortero CM-10, posteriormente, los morteros CEL-5 y CHBOF-05 presentan el mismo valor de 98.13 kg de Fe eq, y finalmente, con el más alto impacto, se tienen las dos mezclas control, T1-H y T2-L, con 108.1 kg de Fe eq.



Por último, los valores de impacto para las 8 mezclas de mortero elaboradas en la categoría *acidificación terrestre* con unidades en kg de SO₂ equivalentes se ubican en la gráfica de la figura 37d. El comportamiento de las diferentes mezclas es igual al presentado en las tres categorías de impacto ya desarrolladas anteriormente. El mayor impacto lo presentan las mezclas con 100% de cemento en su diseño (8.5 kg de SO₂ eq). En los morteros con mejor desempeño mecánico, se disminuyó 2.94 kg de SO₂ equivalentes, esto es, en los morteros con CBC, CCV y EAH. Para el mortero CM-10, los kg de SO₂ disminuidos fueron 1.43, y para los morteros que incorporan CEL y CHBOF la disminución fue de 0.73 kg de SO₂ equivalente.

8.2.2 Fase 4. Interpretación de resultados

Eco indicador 99

Existen tres aspectos que destacan al momento de analizar los resultados obtenidos en la fase de evaluación por el método de eco indicador: el impacto real del transporte en el análisis ambiental, la contribución del cemento en el impacto total y la comparación de impacto entre los morteros con residuos industriales contra los morteros control. Por lo tanto, para la fase de interpretación de resultados, se analizan detalladamente dichos aspectos a partir de la puntuación final obtenido para cada categoría de daño. El análisis se hace considerando dos grupos en los sistemas debido a la naturaleza del agregado en los dos testigos.

Analizando de manera detallada **el transporte** como uno de los elementos clave en todos los sistemas evaluados (Tabla 30), el porcentaje de contribución que tiene en la puntuación final de las categorías de daño “ecosistema” y “salud humana” se encuentra entre un 4.8% y 6.4% para los diferentes morteros en análisis. Para la categoría restante, “consumo de recursos”, los porcentajes son más bajos, con resultados en el rango del 0.77% al 0.84% de contribución del transporte en la puntuación final.

Como en el análisis se incluye todo el transporte presente dentro de los sistemas, al final, todos los morteros elaborados con un residuo industrial reportaron una disminución del impacto generado por el transporte, con respecto a los morteros testigo. Lo anterior se debe a que, el elemento que necesita una mayor distancia de traslado es



el cemento, por lo tanto, al disminuir su cantidad en la mezcla, también se reduce la distancia de traslado. Para el primer grupo, en el mortero con CCV es en el que se presenta una menor contribución, seguido del CBC por un aumento muy pequeño; ambos morteros tuvieron una disminución de la carga ambiental debida al transporte de 15% aproximadamente, con respecto al mortero T1-H. El mortero con CEL, por otro lado, registró 3.61% de disminución. En el segundo grupo, EAH tuvo la mayor disminución con un 10% con respecto al testigo T2-L; a su vez, los sistemas CM y CHBOF, arrojaron una disminución de 5% y 2.5%, respectivamente.

Tabla 30. Comparación de resultados en transporte para cada conjunto de morteros

	Mortero con sustitución	% de contribución en pt. Final	Disminución respecto a T1-H (%)	Mortero con sustitución	% de contribución en pt. Final	Disminución respecto a T2-L (%)
Ecosistema	CBC	5.92	14.19	CM	6.20	5.21
	CCV	5.76	15.75	EAH	5.92	10.42
	CEL	6.40	3.67	CHBOF	6.31	2.61
Salud humana	CBC	4.89	14.11	CM	5.13	5.16
	CCV	4.80	15.69	EAH	4.94	10.32
	CEL	5.31	3.61	CHBOF	5.21	2.58
Consumo de recursos	CBC	0.78	14.30	CM	0.82	5.33
	CCV	0.77	15.83	EAH	0.79	10.66
	CEL	0.77	3.46	CHBOF	0.84	2.67

La carga ambiental del transporte representa un 5% aproximadamente, en las dos categorías de daño más importantes, un dato que ya ha sido presentado en algunas investigaciones [80]. Ciertamente un 5% puede llegar a parecer irrelevante contra otros elementos que destacan con porcentajes mayores, sin embargo, a niveles globales, ese 5% puede representar grandes cantidades de impacto al medio ambiente.

Por su parte, es muy evidente la gran contribución que tiene **el cemento** en el impacto final de cada categoría de daño (Tabla 32). El testigo T1-H, tiene una carga ambiental debido al cemento del 90.08%, 94.09% y 99.05% de la puntuación final de las categorías “ecosistema”, “salud humana” y “consumo de recursos”, respectivamente. Debido a que en las tres categorías la contribución del cemento supera el 90%, no queda duda del gran impacto que genera esta materia prima, y, resultados similares fueron obtenidos para el otro testigo, el T2-L, con 90.22%, 94.23% y 99.08% en las categorías de daño ya indicadas.



Tabla 31. Comparación de resultados en contribución del cemento para cada conjunto de morteros

	Mortero con sustitución	% de contribución en pt. Final	Disminución respecto a T1-H (%)	Mortero con sustitución	% de impacto en pt. Final	Disminución respecto a T2-L (%)
Ecosistema	CBC	75.77	20.00	CM	82.88	10.00
	CCV	75.17	20.00	EAH	74.44	20.00
	CEL	86.64	5.00	CHBOF	86.72	5.00
Salud humana	CBC	78.71	20.00	CM	86.58	10.00
	CCV	78.72	20.00	EAH	78.50	20.00
	CEL	90.37	5.00	CHBOF	90.46	5.00
Consumo de recursos	CBC	82.07	20.00	CM	90.71	10.00
	CCV	82.13	20.00	EAH	82.04	20.00
	CEL	94.92	5.00	CHBOF	94.93	5.00

Con la reducción del uso del cemento en los morteros en donde se incorporaron residuos, el porcentaje de contribución del cemento en la puntuación final de cada categoría de daño disminuyó. Los sistemas con los residuos CBC, CCV y EAH, disminuyeron su porcentaje de contribución a 75%, 79% y 82%, aproximadamente, en el orden que ya fueron enlistadas las categorías. En cuanto al mortero con CM presentó los valores de 82.88%, 86.72% y 90.71%. Y, a su vez, los morteros con CEL y CHBOF tuvieron una ligera disminución en el porcentaje de impacto que representa el cemento en la puntuación final, con resultados de 87%, 90% y 95%, aproximadamente.

Finalmente, para la comparación entre la puntuación final obtenida en cada uno de los sistemas con residuos industriales contra los morteros testigos con un 100% de cemento Portland se consideró el parámetro establecido por los creadores del método de evaluación utilizado. Si bien, la reducción del impacto ambiental a las tres categorías de daño con la introducción de un residuo industrial como una sustitución del cemento Portland existe en los resultados del análisis, es necesario analizar esta situación de manera muy delicada. La recomendación de los diseñadores del método es que, cuando se comparan ciclos de vida de varios productos, si se considera que los procesos dominantes son muy parecidos, la diferencia entre los resultados del eco indicador debería oscilar entre el 10% y 50% si se quiere llegar a la conclusión de que un producto es mejor que otro [100]. En la tabla 32 se presenta el análisis realizado.



Tabla 32. Comparación de resultados del eco-indicador en las tres categorías de daño para cada conjunto de morteros

	Disminución respecto a T1-H (%)		Disminución respecto a T2-L (%)	
Ecosistema	CBC	35.38	CM	17.89
	CCV	36.41	EAH	36.87
	CEL	8.89	CHBOF	8.79
Salud humana	CBC	34.80	CM	17.28
	CCV	34.81	EAH	34.44
	CEL	8.73	CHBOF	8.66
Consumo de recursos	CBC	36.42	CM	18.19
	CCV	36.48	EAH	36.36
	CEL	9.11	CHBOF	9.10

Tomando la consideración anterior como punto de partida en este análisis, los resultados obtenidos para las mezclas CEL-5 y CHBOF-5 indican que no se puede concluir que estos dos morteros son mejores, ambientalmente hablando, que los morteros T1-H y T1-L, respectivamente, puesto que el impacto ambiental de los primeros disminuyó solo un 8% con respecto a los productos control. Sin embargo, los cuatro morteros restantes presentaron resultados satisfactorios que permiten considerarlos como mejores productos, ambientalmente hablando, comparados con los morteros testigo. El mortero con el residuo CM muestra una disminución cercana al 18% en las tres categorías de daño; el mortero con CBC alcanzó una disminución de 35.5% en promedio; y, por su parte, los morteros con CCV y EAH, presentaron una disminución ligeramente mayor, de 35.9% promediando los resultados de las tres categorías de daño. Los resultados de estos últimos cuatro morteros son muy prometedores, especialmente de los morteros CM-10, CBC-20, CCV-20 y EAH-20.

Claramente, los morteros en donde se realizó una sustitución del cemento por el residuo industrial en un mayor porcentaje obtuvieron las menores puntuaciones finales. Por ello, los morteros CM-10, CBC-20, CCV-20 y EAH-20 son los que presentan mejores resultados, haciendo notable la importancia que tiene la reacción puzolánica que pudieran tener los residuos utilizados como sustitutos de cemento, dado que, entre mayor reacción puzolánica logre el residuo mayor será el porcentaje de sustitución de cemento que se pueda realizar



ReCiPe (2016)

Las cuatro categorías analizadas en el apartado de resultados, *cambio climático*, *toxicidad humana*, *agotamiento de metales* y *acidificación terrestre*, representan, en su conjunto, más de la mitad del impacto total que se genera por la producción de los diferentes sistemas. Sus porcentajes de aportación varían entre el 59% y el 69%, siendo, por tanto, las categorías de impacto más afectadas durante la producción de los morteros en análisis.

Al hacer un análisis de todas las categorías que implican toxicidad (*ecotoxicidad a agua dulce*, *toxicidad humana*, *ecotoxicidad marina*, *ecotoxicidad terrestre*) y que comparten las mismas unidades, dicloro benceno, se encuentra que, por sí solas, representan entre el 33% y 40% de todo el impacto ambiental generado por las diferentes mezclas de morteros. Lo anterior va en concordancia con los resultados arrojados por el método Eco Indicador 99, donde se encontró un gran aporte generado por la categoría de impacto “efectos respiratorios por sustancias inorgánicas”, la cual es parte de la categoría de daño “salud humana” que representa el 94% de todo el impacto generado durante la producción de los diferentes morteros en análisis. La categoría de impacto “efectos respiratorios por sustancias inorgánicas” incorpora el 70% de todo el impacto dentro de la categoría “salud humana”.

Un comportamiento curioso ocurre en la categoría de *eutrofización de agua dulce*. Gracias al proceso de disposición final evitado en los residuos incorporados en esta investigación, los valores de impacto en la categoría mencionada disminuyen considerablemente para los morteros donde fueron utilizados. En los morteros testigos (T1-H y T2-L) representa el 6.21% del impacto total en el sistema, para los morteros con CEL y CHBOF este porcentaje disminuye a 3.4%, y en los morteros restantes incluso se obtuvieron porcentajes negativos de -0.26% para la mezcla con CM y -12.31% para los sistemas con CBC, CCV y EAH, puesto que el impacto obtenido en dicha categoría para los últimos cuatro morteros mencionados resulta negativo.

Los resultados de desempeño ambiental son mostrados en la tabla 33.



Tabla 33. Resultado final del desempeño ambiental

Sistemas	Eco indicador 99			ReCiPe (2016)				Posición
	Ecosistema	Salud humana	Recursos	C.C.	T.H.	A.M.	A.T.	
S CVV	2.16	44.31	0.19	1312.74	89.67	68.34	5.56	1
S CBC	2.19	44.32	0.19	1314.00	89.69	68.35	5.57	1
S EAH	2.14	44.49	0.19	1314.80	89.71	68.36	5.58	1
S CM	2.78	56.14	0.24	1700.13	115.08	88.21	7.04	2
S CHBOF	3.09	61.99	0.27	1892.80	127.77	98.13	7.77	3
S CEL	3.09	62.04	0.27	1894.54	127.80	98.15	7.77	3
S T2-L	3.39	67.86	0.30	2085.47	140.45	108.06	8.49	4
S T1-H	3.40	67.97	0.30	2087.92	140.50	108.08	8.51	4

Con los resultados finales del impacto ambiental obtenido por los métodos Eco indicador 99 y ReCiPe (2016), los ocho morteros en análisis fueron enlistados de acuerdo al valor de impacto total obtenido en cada mortero; en primera posición de la lista se encuentran los morteros con menor impacto, y en último lugar están aquellos morteros con mayor valor de impacto. Debido a que los valores finales obtenidos para diferentes morteros son aproximadamente iguales, se utilizó la asignación de una posición para el acomodo de cada mortero en la tabla de resultados. Los morteros que se encuentran en una misma posición presentaron el mismo valor de impacto, siendo la posición 1 la que contiene a las mezclas con menor impacto ambiental y la posición 4 la que contiene a las mezclas que presentaron un mayor impacto.

8.3 Propuesta de calificación final

Para la selección del mortero con mejor desempeño, se considera tanto el desempeño mecánico (Tabla 29), como el desempeño ambiental (Tabla 33). Los diferentes morteros en análisis fueron ordenados en la tabla 34 de mejor desempeño a menor desempeño.

De acuerdo con el listado presentado en la tabla 34, los morteros que pueden ser definidos como materiales óptimos, tomando en consideración su desempeño ambiental y su comportamiento mecánico, son dos: el elaborado con residuos Ceniza de Bagazo de Caña (CBC-20) y el elaborado el residuo Escoria de Alto Horno (EAH-20).

Tabla 34. Evaluación final de los morteros en análisis



Sistemas	Desempeño mecánico	Desempeño ambiental
CBC-20	✓	✓
EAH-20	✓	✓
CCV-20	✗	✓
CEL-5	✓	✗
CM-10	✗	✓
T2-L	✓	✗
T1-H	✓	✗
CHBOF-05	✗	✗



9 DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

En la industria de la construcción, el principal parámetro de calidad utilizado para evaluar materiales es la resistencia mecánica y/o durabilidad. En seguimiento de la idea anterior, considerando el desempeño mecánico que tuvieron todas las mezclas en análisis (las mezclas de mortero con residuos industriales como sustitución del cemento y las mezclas testigo), los mejores comportamientos se presentaron en las mezclas CBC-20, EAH-20 y CEL-5. Dichas mezclas representan los morteros con mejor desempeño mecánico, incluso por encima de las mezclas testigo. La reacción puzolánica es la clave para conservar y acrecentar las propiedades mecánicas en los morteros que tienen implementados residuos industriales, puesto que, recordando la clasificación que se hizo de los residuos como puzolanas, únicamente los morteros con los residuos CBC y EAH contienen los requerimientos químicos para considerarse puzolanas. Ciertamente, el caso del mortero con CEL es diferente, cuyo porcentaje de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}_3$ alcanzó 41.4%, siendo imposible clasificarlo en algún tipo de puzolana; sin embargo, aunque no es un residuo que se considere una puzolana, el mortero elaborado con este residuo presenta un buen desempeño porque el porcentaje de sustitución del cemento se encuentra en un porcentaje bajo, el 5%, permitiendo mantener propiedades de resistencia mecánica adecuadas.

Es posible analizar detalladamente qué propiedad físico-mecánica tuvo mejor desempeño en las mezclas con residuos y en cual la sustitución del residuo por el cemento representó una disminución. Desde el punto de vista físico, para el caso de la *resistencia mecánica*, el comportamiento de todas las mezclas se mantuvo igual que las mezclas control, con excepción de la que contiene CBC, en la cual se tuvo un ligero incremento. Con la *velocidad de pulso ultrasónico* ocurre algo similar, en todas las mezclas con residuo se mantiene la propiedad, únicamente en el mortero CCV-20 se presentó una disminución del valor de esta propiedad. En el caso de las propiedades mecánicas, la *resistencia a compresión*, la propiedad de resistencia más conocida en el mortero, tuvo una disminución en los morteros CHBOF-5, CCV-20 y CM-10, mientras que los morteros restantes mantuvieron la misma resistencia que los morteros testigo (CBC-20, EAH-20 y CEL-5). Los valores de *módulo de ruptura* resultaron excelentes



en todas las mezclas elaboradas, tanto los testigos como las mezclas con residuos; solo en la mezcla con CM se tuvo una disminución de la resistencia a flexión. Por último, la *tensión directa (TD)* fue la propiedad que mayor variación mostró en los morteros evaluados; los morteros CBC-20 y CCV-20 mantuvieron el mismo rango de valores que los morteros testigos, los morteros CHBOF-5 y CM-10 presentaron una reducción en los valores de TD, y, por su parte, los morteros EAH-20 y CEL-5 superaron los valores que mostraron las mezclas control en esta propiedad. A partir del análisis físico-mecánico, se pueden vislumbrar los diferentes usos que cada uno de los materiales en análisis podría tener en la industria de la construcción según la propiedad que mejor desempeño mostró cada aditivo incorporado; siendo estos usados como aplanados, para unión de bloques de mampostería, como elementos estructurales, etc.

A partir del análisis comparativo del desempeño ambiental global, se observó que, de los seis morteros en estudio, los morteros CEL-5 y CHBOF-5 no pueden ser considerados ambientalmente mejores que los morteros control (T1-H y T2-L) ya que la diferencia entre los resultados del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es menor al 10% entre los primeros y los segundos. En cambio, para las mezclas elaboradas con CBC, CCV, EAH y CM si se puede concluir que presentan un mejor desempeño ambiental que sus respectivas mezclas testigo, puesto que su impacto disminuyó un 36% en las primeras tres mezclas y un 18% en la última, aproximadamente.

Considerando las tres categorías de daño que se analizan durante un ACV, el ecosistema, la salud humana y los recursos, la mayor afectación generada por la producción de mortero se da en la categoría de salud humana que representa cerca de un 90% del impacto total. De manera específica, las categorías de impacto más afectadas son cambio climático y efectos respiratorios por sustancias inorgánicas según la metodología Eco indicador 99, las cuales representan el 30% y el 70% del impacto generado en la categoría de daño a la salud humana. Así mismo, con el método ReCiPe (2016), se obtuvo el mismo resultado; las categorías con mayor valor de impacto fueron cambio climático y toxicidad humana, con aportaciones aproximadas a los resultados de impacto finales de 16% y 23%, respectivamente. Por otro lado, con la implementación del método ReCiPe (2016) se encontró que, gracias a la disposición



final evitada de los residuos, el impacto en la eutroficación de agua dulce es reducido de tal modo que, en los morteros con mejor desempeño ambiental, se llegó a impactos negativos.

A partir de los sistemas establecidos para llevar a cabo un ACV de la cuna a la puerta con la finalidad de analizar el impacto generado por la producción de los morteros en análisis, de todos los elementos que conforman dichos sistemas, el cemento es el que mayor aporte tiene al impacto ambiental generado por la producción de morteros. Su porcentaje de contribución varía entre el 70 y 90%. Posteriormente, le sigue el transporte, cuyo impacto se ve mayormente en la categoría de efectos respiratorios por sustancias inorgánicas, que, de hecho, está entre las dos categorías más afectadas globalmente. Los resultados de ACV obtenidos para la aportación generada por el transporte en la producción de morteros llega a representar aproximadamente el 10% del impacto total en el sistema. A primera instancia, ese 10% podría considerarse no tan relevante, sin embargo, a niveles globales, llega a representar grandes cantidades.

Una vez analizados tanto el desempeño mecánico como el desempeño ambiental, de todos los materiales de estudio, los morteros elegidos como el material óptimo son el mortero elaborado con el 20% de sustitución de ceniza de bagazo de caña (CBC-20) y el mortero elaborado con el 20% de sustitución de escoria de alto horno (EAH-20). Estos resultados positivos obtenidos por el ingreso de dichos residuos a un nuevo material de construcción es una gran oportunidad para los países en desarrollo, como México, en donde el cultivo de la caña de azúcar y los procesos siderúrgicos generan industrias relevantes en la economía nacional, acrecentando con su implementación la economía circular.

Dentro de toda la logística de la producción de morteros con implementación de residuos industriales, es necesario analizar adecuadamente ciertos elementos que conforman todo el sistema y que suelen pasar desapercibidos, puesto que son elementos en los cuales, cualquier cambio realizado en ellos podría afectar directamente los resultados de impacto ambiental. Primeramente, se tiene el transporte, siendo necesario siempre utilizar la materia prima más cercana a la planta de producción, porque, dentro



del área de análisis de impacto ambiental, el transporte cero siempre será la prioridad. Lo anterior tiene como objetivo evitar los grandes traslados de materiales y así, reducir al máximo posible cualquier impacto ambiental generado por el mismo. El segundo elemento a considerar es el proceso de tratamiento del residuo, cuya influencia será mayor dentro del impacto ambiental entre más se tarde en llevar a cabo; es decir, se recomienda que dicho proceso de tratamiento se lleve a cabo justo después de su generación, aunado al proceso de almacenamiento. Se pretende que, con esta decisión, la energía requerida para su tratamiento sea la mínima.

Cada nuevo material alternativo que es elaborado tiene la necesidad de ser evaluado bajo criterios de desempeño mecánico para tener la certeza de su utilización en la industria, pero también bajo criterios ambientales, los cuales nos brindan la seguridad de la producción de un material más amigable con el medio ambiente y, además, nos permiten impulsar su uso.

Con todo lo anterior, el presente trabajo demuestra de forma técnica la factibilidad de la implementación de puzolanas de origen residual como cementantes alternativos. Se muestran cuáles son las propiedades físico-mecánicas que se mejoran, se mantienen o se disminuyen. Y, finalmente, se muestra cuáles son las ventajas ambientales y en qué magnitud se dan con el uso de los materiales aquí estudiados. Con la presente investigación se abona al conocimiento técnico y científico de dichos materiales, sirviendo para los tomadores de decisiones en cuestiones de materiales, construcción y sostenibilidad.

Con base en las consideraciones y resultados encontrados, se recomienda llevar a cabo el análisis considerando varios escenarios de transporte, tratamiento de residuos y producción del mortero para poder calibrar adecuadamente las relaciones entre los factores mencionados, que son los más críticos a la hora de obtener los impactos en el medio ambiente.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. Santos, J. Almeida, J. D. Silvestre, and P. Faria, “Life cycle assessment of mortars: A review on technical potential and drawbacks,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 288, p. 123069, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123069.
- [2] E. R. Teixeira, R. Mateus, A. Camões, and F. G. Branco, “Quality and durability properties and life-cycle assessment of high volume biomass fly ash mortar,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 197, pp. 195–207, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.173.
- [3] C. B. Farinha, J. D. Silvestre, J. de Brito, and M. do R. Veiga, “Life Cycle Assessment of Mortars with Incorporation of Industrial Wastes,” *Fibers*, vol. 7, no. 7, p. 59, Jul. 2019, doi: 10.3390/fib7070059.
- [4] A. Srivastava and S. K. Singh, “Utilization of alternative sand for preparation of sustainable mortar: A review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 253, p. 119706, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119706.
- [5] J. Li, W. Zhang, C. Li, and P. J. M. Monteiro, “Eco-friendly mortar with high-volume diatomite and fly ash: Performance and life-cycle assessment with regional variability,” *J. Clean. Prod.*, vol. 261, p. 121224, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121224.
- [6] F. Colangelo, I. Farina, M. Travaglioni, C. Salzano, R. Cioffi, and A. Petrillo, “Eco-efficient industrial waste recycling for the manufacturing of fibre reinforced innovative geopolymer mortars: Integrated waste management and green product development through LCA,” *J. Clean. Prod.*, vol. 312, p. 127777, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127777.
- [7] J. C. B. Moraes *et al.*, “Durability to chemical attacks and life cycle assessment of alkali-activated binders based on blast furnace slag and sugar cane straw ash,” *J. Build. Eng.*, vol. 76, p. 107261, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.job.2023.107261.
- [8] M. Bellart Crevillen and S. Mesa Marcos, “Impacto Ambiental y Ciclo de Vida de los Materiales de Construcción,” Universidad Politécnica de Catalunya,



2009.

- [9] C. K. Valenzuela Leyva, “Implementación de diagramas de interacción de propiedades del concreto convencional y con microsílice: comparativa entre métodos destructivos y no destructivos,” Universidad Autónoma de Sinaloa, 2018.
- [10] S. H. Kosmatka, B. Kerkhoff, W. C. Panarese, and J. Tanesi, *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. México: Portland Cement Association, 2004.
- [11] SCT, “N-CMT-2-01-004/02 Materiales para mampostería. Morteros,” 2002.
- [12] UNE, “UNE-EN 998-1 Especificaciones de los morteros de albañilería. Parte 1: Morteros para revoco y enlucido,” 2018.
- [13] UNE, “UNE-EN 998-2 Especificaciones de los morteros de albañilería. Parte 2: Morteros para albañilería,” 2018.
- [14] ONNCCE, “NMX-C-464-ONNCCE-2010/Ratificada 2021, Determinación de la resistencia a compresión y módulo de cortante de muretes, así como determinación de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad de pilas de mampostería de arcilla o de concreto,” 2010.
- [15] M. Arreola Sánchez, W. Martínez Molina, and J. I. Escalante García, “Actividad puzolánica de materiales (sustitutos parciales del cemento) para mejorar la durabilidad de morteros para reparación y/o construcción de estructuras de concreto,” Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2013.
- [16] SECO, “NTC-2017 Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería,” 2017.
- [17] O. Rodríguez Mora, *Morteros. Guía General*. AFAM, 2003.
- [18] A. Navas Carro and E. Arias Barrantes, “Propiedades del mortero empacado en seco para pega de bloques de mampostería,” *Ingeniería*, vol. 25, no. 2, pp. 45–58, 2015.



- [19] UNE, “UNE-EN 1015-19 Métodos de ensayo de los morteros de albañilería,” 1999.
- [20] A. Naji Givi, S. Abdul Rasshid, F. N. A. Aziz, and M. Amran Mohn Salleh, “Contribution of Rice Husk Ash to the Properties of Mortar and Concrete: A Review,” *J. Am. Sci.*, vol. 3, pp. 157–165, 2010.
- [21] R. Siddique and J. Klaus, “Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review,” *Appl. Clay Sci.*, vol. 43, no. 3–4, pp. 392–400, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.clay.2008.11.007.
- [22] G. Bumanis, L. Vitola, L. Stipniece, J. Locs, A. Korjakins, and D. Bajare, “Evaluation of Industrial by-products as pozzolans: A road map for use in concrete production,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 13, p. e00424, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.cscm.2020.e00424.
- [23] E. Carreón Gonzalez, E. M. Alonso Guzmán, J. L. Ruvalcaba Sil, and F. M. González Valdez, “Valoración de morteros adicionales con sílice de las termoeléctricas de Los Azufres, Michoacán y Cerro Prieto, Baja California,” Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2021.
- [24] ASTM, “ASTM C618-22 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete,” 22AD.
- [25] M. Ayub *et al.*, “Promoting sustainable cleaner production paradigms in palm oil fuel ash as an eco-friendly cementitious material: A critical analysis,” *J. Clean. Prod.*, vol. 295, p. 126296, May 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126296.
- [26] T. Van Lam, T. Chuc Nguyen, N. Xuan Hung, D. Van Phi, B. Bulgakov, and S. Bazhenova, “Effect of natural pozzolan on strength and temperature distribution of heavyweight concrete at early ages,” *MATEC Web Conf.*, vol. 193, p. 03024, Aug. 2018, doi: 10.1051/mateconf/201819303024.
- [27] A. M. Zeyad, M. A. Megat Johari, B. A. Tayeh, and M. O. Yusuf, “Pozzolanic



- reactivity of ultrafine palm oil fuel ash waste on strength and durability performances of high strength concrete,” *J. Clean. Prod.*, vol. 144, pp. 511–522, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.121.
- [28] F. Lencinas Valeriano, C. Incahuanaco Callata, and B. Iran Puno, “Evaluación de mezclas de concreto con adiciones de ceniza de paja de trigo como sustituto en porcentaje del cemento Portland puzolánico IP en la zona Altiplánica,” Universidad Nacional de Altiplano, 2017.
- [29] A. V. Cuevas Melo, “Estado del arte sobre el análisis de ciclo de vida en la construcción de vivienda potencial de aplicación en Colombia,” Universidad Piloto de Colombia, 2012.
- [30] K. A. Ibrahim Menoufi, A. Castell Casol, and L. F. Cabeza, “Life Cycle Analysis and Life Cycle Impact Assessment methodologies: A state of the art,” Universitat de Lleida, 2011.
- [31] H. A. Balmaceda Castillo and I. Vázquez Rowe, “Análisis de ciclo de vida comparativo entre el uso de concreto convencional y alternativas de concreto reciclado,” Pontificia Universidad Católica del Perú, 2021.
- [32] A. Ruiz Frutos and J. Pérez Navarro, “Análisis del Ciclo de Vida de materiales de construcción. Estudio y comparación de los principales materiales de edificación,” Universidad Politécnica de Cartagena, 2012.
- [33] S. A. Corzo Remigio and R. Kahhat Abedrabbo, “Análisis de ciclo de vida de una vivienda unifamiliar en Huancayo,” Pontificia Universidad Católica de Perú, 2016.
- [34] N. Rango Campo, J. Trujillo Velásquez, and B. Giraldo Gómez, “Análisis comparativo del ciclo de vida del bloque de suelo cemento (BSC) VS el bloque de concreto tradicional,” Escuela de Ingeniería de Antioquia Envigado, 2014.
- [35] V. Francioso, M. Lopez-Arias, C. Moro, N. Jung, and M. Velay-Lizancos, “Impact of Curing Temperature on the Life Cycle Assessment of Sugarcane



- Bagasse Ash as a Partial Replacement of Cement in Mortars,” *Sustainability*, vol. 15, no. 1, p. 142, Dec. 2022, doi: 10.3390/su15010142.
- [36] D. Gil García, “Análisis de ciclo de vida en fachadas,” Universidad Politécnica de Madrid, 2012. [Online]. Available: <https://oa.upm.es/14363/>
- [37] O. Jolliet, M. Saadé-Sbeih, S. Shaked, A. Jolliet, and P. Crettaz, *Environmental Life Cycle Assessment*. New York: Taylor & Francis Group, 2016.
- [38] S. Demirel, H. Ö. Öz, M. Güneş, F. Çiner, and S. Adın, “Life-cycle assessment (LCA) aspects and strength characteristics of self-compacting mortars (SCMs) incorporating fly ash and waste glass PET,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 24, no. 6, pp. 1139–1153, Jun. 2019, doi: 10.1007/s11367-018-1562-5.
- [39] Área metropolitana del Valle de Aburrá, “Análisis del ciclo de vida,” *Valle de Aburrá - Colombia.*, 2019. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/Paginas/consumo-sostenible/analisis-de-ciclo-de-vida.aspx>
- [40] P. Turrado Rabanedo and J. Rodríguez Hernández, “Trabajo de investigación sobre la influencia en la fase de construcción de la aplicación de declaraciones ambientales de productos a infraestructuras,” Universidad de Cantabria, 2015.
- [41] E. Doval, “Análisis de ciclo de vida: la transparencia en el desempeño ambiental de nuestros productos,” *BARBIERI*, 2021. <https://www.adbarbieri.com/blog/transparencia-desempeño-ambiental-nuestros-productos>
- [42] E. Haya Leiva, *Analisis de Ciclo de Vida*. Escuela de Organización Industrial, 2016.
- [43] ISO, “ISO 14001. Environmental management systems - Requirements with guidance for use,” Switzerland, Geneva, 2015.
- [44] ISO, “ISO 14004. Environmental management systems - General guidelines on implementation,” Switzerland, Geneva, 2016.



- [45] ISO, “ISO 14006. Environmental management systems - Guidelines for incorporating ecodesign,” Swtzerland, Geneva, 2016.
- [46] ISO, “ISO 14020. Environmental statements and programmes for products - Principles and general requirements,” Swtzerland, Geneva, 2022.
- [47] ISO, “ISO 14021. Environmental labels and declarations - Self-declared environmental claims (Type II environmental labelling),” Swtzerland, Geneva, 2016.
- [48] ISO, “ISO 14024. Environmental labels and declarations - Type I environmental labelling - Principles and procedures,” Swtzerland, Geneva, 2018.
- [49] ISO, “ISO 14025. Environmental labels and declarations - Type III environmental declarations - Principles and procedures,” Swtzerland, Geneva, 2006.
- [50] ISO, “ISO 14031. Environmental management - Environmental performance evaluation - Guidelines,” Swtzerland, Geneva, 2021.
- [51] ISO, “ISO 14040. Environmental Management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework.,” Switzerland, Geneva, 2006.
- [52] ISO, “ISO 14044. Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requeriments and Guidelines,” Swtzerland, Geneva, 2006.
- [53] ISO, “ISO 14045. Environmental managemen - Eco-efficiency assessment of product systems - Principles, requirements and guidelines,” Swtzerland, Geneva, 2012.
- [54] ISO, “ISO 14046. Environmental management - Water footprint - Principles, requirements and guidelines,” Swtzerland, Geneva, 2014.
- [55] ISO, “ISO 14063. Environmental management - environmental communication - Guidelines and examples,” Swtzerland, Geneva, 2020.
- [56] ISO, “ISO 14064-1. Greenhouse gases - part 1: Specification with guidance al



the organization level for quantification and reporting of greenhouse gas emissions and removals,” Swtzerland, Geneva, 2018.

- [57] ISO, “ISO 14064-2. Greenhouse gases - Par 2: Specification with guidance at the projec level for quantification, monotoring and reporting of greenhouse gas emissions reductions or removal enhancements,” Swtzerland, Geneva, 2019.
- [58] ISO, “ISO 14064-3. Greenhouse gases - Part 3: Specification with guidance for the verification and validation of greenhouse gas statements,” Swtzerland, Geneva, 2019.
- [59] ISO, “ISO 14065. General principles and requirements for bodies validation and verifying environmental information,” Swtzerland, Geneva, 2020.
- [60] M. Vergé Expósito and I. Valero López, “Bases para la evaluación de la sostenibilidad en obra civil,” Universidad Politécnica de Cataluña, 2017.
- [61] G. M. Cuenca-Moyano, S. Zanni, A. Bonoli, and I. Valverde-Palacios, “Development of the life cycle inventory of masonry mortar made of natural and recycled aggregates,” *J. Clean. Prod.*, vol. 140, pp. 1272–1286, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.10.029.
- [62] J. L. Cámbara Villanueva, J. V. Álvarez Cabal, and R. Luiña Fernández, “Análisis de la confiabilidad de las metodologías EICV,” Universidad de Oviedo, 2012.
- [63] K. A. Estupiñan Ruiz, “Determinación de impactos ambientales mediante el Análisis de Ciclo de Vida y propiedades térmicas de morteros de pañete con adición de partículas de caucho triturado reciclado de llantas,” Universidad Nacional de Colombia, 2019.
- [64] R. Ruiz Ruiz, E. M. Alonso Guzmán, W. Martínez Molina, and A. A. Torres Acosta, “Comportamiento físico-mecánico de morteros CP con sustituciones parciales minerales, orgánicas, de fibras y residuos industriales a edades de 1000 días,” Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2015.



- [65] R. Ruiz Ruiz, H. L. Chávez García, and E. M. Alonso Guzmán, “Análisis comparativo de concreto convencional y reciclado de $f'c=350$ MPA, bajo criterios de desempeño tecnológico, ambiental y económico,” Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2018.
- [66] J. A. Duque Sierra, “Medición del impacto ambiental de bloques de suelo-cemento, bloques cerámicos y bloques de concreto por el método de análisis de ciclo de vida,” Universidad Nacional de Colombia, 2020.
- [67] E. Contreras Marin, “Evaluación de agregados reciclados, para su implementación en pavimentos rígidos,” Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2016.
- [68] B. F. Giannetti, F. Agostinho, J. J. C. Eras, Z. Yang, and C. M. V. B. Almeida, “Cleaner production for achieving the sustainable development goals,” *J. Clean. Prod.*, vol. 271, p. 122127, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122127.
- [69] M. Alnahhal, U. Alengaram, M. Jumaat, M. Alqedra, K. Mo, and M. Sumesh, “Evaluation of Industrial By-Products as Sustainable Pozzolanic Materials in Recycled Aggregate Concrete,” *Sustainability*, vol. 9, no. 5, p. 767, May 2017, doi: 10.3390/su9050767.
- [70] C. B. Reyes, “Adiciones minerales de alta temperatura a morteros de cemento como modificadores de comportamiento físico-mecánico,” Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2012.
- [71] J. R. Bucio, “Ceniza de origen orgánico:su efecto sobre las propiedades físico-mecánicas de morteros de cemento,” Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2012.
- [72] L. Cruz Jiménez, W. Martínez-Molina, and M. Arreola Sánchez, “Comportamiento mecánico del carbón mineral y de la escoria de alto horno en morteros como sustitutos parciales del cemento,” Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2012.



- [73] J. A. N. Hurtado, “Comportamiento físico - mecánico de morteros de cemento con sustitución de ceniza y material orgánico en diferentes porcentajes,” Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2013.
- [74] D. García-Gusano, I. Herrera, D. Garraín, Y. Lechón, and H. Cabal, “Life cycle assessment of the Spanish cement industry: implementation of environmental-friendly solutions,” *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 17, no. 1, pp. 59–73, Jan. 2015, doi: 10.1007/s10098-014-0757-0.
- [75] N. E. H. Khitas *et al.*, “Modeling and optimizing the properties of mortars based on natural pozzolan, silica sand, and recycled brick waste mixture design: A technical and environmental study,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 459, p. 139706, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139706.
- [76] R. Palod, S. V. Deo, and G. D. Ramtekkar, “Utilization of waste from steel and iron industry as replacement of cement in mortars,” *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 21, no. 6, pp. 1361–1375, Nov. 2019, doi: 10.1007/s10163-019-00889-3.
- [77] F. Agrela, M. Rosales, M. L. Alonso, J. Ordóñez, and G. M. Cuenca-Moyano, “Life-Cycle Assessment and Environmental Costs of Cement-Based Materials Manufactured with Mixed Recycled Aggregate and Biomass Ash,” *Materials (Basel)*, vol. 17, no. 17, p. 4357, Sep. 2024, doi: 10.3390/ma17174357.
- [78] A. Petek Gursel, E. Masanet, A. Horvath, and A. Stadel, “Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 51, pp. 38–48, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.03.005.
- [79] R. Bajpai, K. Choudhary, A. Srivastava, K. S. Sangwan, and M. Singh, “Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based geopolymer concrete,” *J. Clean. Prod.*, vol. 254, p. 120147, May 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120147.
- [80] Y. Zhang, W. Luo, J. Wang, Y. Wang, Y. Xu, and J. Xiao, “A review of life cycle assessment of recycled aggregate concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol.



- 209, pp. 115–125, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.078.
- [81] P. Jagadesh *et al.*, “Recycled concrete powder on cement mortar: Physico-mechanical effects and lifecycle assessments,” *J. Build. Eng.*, vol. 86, p. 108507, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.jobbe.2024.108507.
- [82] L. Rodgers, “La enorme fuente de emisiones de CO2 que está por todas partes y que quizá no conocías,” *BBC News*, Dec. 17, 2018. [Online]. Available: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783>
- [83] IEA, “Global cement production in the Net Zero Scenario, 2010-2030,” *IEA Paris*, 2023. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-cement-production-in-the-net-zero-scenario-2010-2030-5260>
- [84] C. N. del C. CANACEM, “Cámara Nacional del Cemento. Contexto actual,” México. [Online]. Available: <https://canacem.org.mx/historia-de-la-canacem/>
- [85] FICEM, “Informe Estadístico,” 2021.
- [86] N. Renne, P. Kara De Maeijer, B. Craeye, M. Buyle, and A. Audenaert, “Sustainable Assessment of Concrete Repairs through Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Cost Analysis (LCCA),” *Infrastructures*, vol. 7, no. 10, p. 128, Sep. 2022, doi: 10.3390/infrastructures7100128.
- [87] UN, “Población. Una población en crecimiento,” *Naciones Unidas*, 2023. <https://www.un.org/es/global-issues/population>
- [88] S. del C. Arguello Hernández, E. A. Alonso Guzmán, and J. I. Escalante García, “Análisis comparativo entre técnicas no destructivas y destructivas aplicadas a morteros con sustituciones minerales de alta temperatura, cenizas orgánicas e inorgánicas, residuos industriales y fibras de cactus,” Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2012.
- [89] ONNCCE, “NMX-C-414-ONNCCE-2017, Cementos hidráulicos - especificaciones y métodos de ensayo,” 2017.
- [90] ASTM, “ASTM C 150/C150M, Standard Specification for Portland Cement,”



2022.

- [91] ASTM, “ASTM C 109/C109M-02 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars,” 2012.
- [92] ONNCCE, “NMX-C-061-ONNCCE-2010, Cementos hidráulicos - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos,” 2010.
- [93] ASTM, “ASTM C293/C293M Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading),” 2002.
- [94] ASTM, “ASTM C597 Standar Test Method for Pulse Velocity Through Concrete,” 2009.
- [95] ONNCCE, “NMX-C-514-ONNCCE-2019, Resistividad Eléctrica del Concreto Hidráulico,” 2019.
- [96] C. R. DURAR, *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrección de estructuras de hormigón armado*. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, 1998.
- [97] D. R. Vieira, J. L. Calmon, and F. Z. Coelho, “Life cycle assessment (LCA) applied to the manufacturing of common and ecological concrete: A review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 124, pp. 656–666, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.125.
- [98] GreenDelta, “openLCA Nexus.” <https://nexus.openlca.org/>
- [99] M. Goedkoop and S. Renilde, *The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology Report*. Amersfoot: PRé Consultants b.v., 2000.
- [100] M. Goedkoop, S. Effting, and M. Collignon, *Anexo Eco-indicator 99. Manual para diseñadores*. 2000.
- [101] M. Goedkoop, R. Heijungs, M. Huijbregts, A. De Schryver, J. Struijs, and R.



van Zelm, “A life cycle impact assessment method wich comprises harmonised category indicators at the mindpoint and the endpoint level. First edition. Report I: Characterisation,” *Ruimte en Milieu. Minist. van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeh.*, 2008.

- [102] S. S. Ahmadi, M. Maysami, R. Abdi, M. Zarei, and S. Dröge, “Environmental and energy analysis of chromium recovery from residual tanned leather using alkaline thermal hydrolysis,” *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 11202, Apr. 2025, doi: 10.1038/s41598-024-84726-0.
- [103] M. A. J. Huijbregts *et al.*, “ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level,” *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 22, no. 2, pp. 138–147, Feb. 2017, doi: 10.1007/s11367-016-1246-y.
- [104] V. S, “Innovative guidelines for mix design and construction practices for concrete manufactured using rice husk ash and waste marble slurry: insights from experimental study,” *Eng. Res. Express*, vol. 7, no. 1, p. 015133, Mar. 2025, doi: 10.1088/2631-8695/adbb39.
- [105] M. Laghaei, N. Haque, W. J. Bruckard, M. I. Pownceby, and H. Masoumi, “Environmental impact assessment of valuable heavy minerals production through sand separation processes using life cycle assessment,” *Miner. Eng.*, vol. 232, p. 109556, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.mineng.2025.109556.
- [106] U. Fresán, M. Núñez, I. Valls, and R. K. Rosenbaum, “Quantifying the environmental human health burden of food demand in Spain: A life cycle assessment study,” *Environ. Res.*, vol. 284, p. 122147, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.envres.2025.122147.
- [107] A. López Parco and L. GarcíaPedro, “Evaluación del impacto ambiental de nuevas tecnologías de tratamiento de aguas,” Universidad de Alcalá, 2022.

María Guadalupe Gómez Valdovinos

Evaluación de morteros con residuos industriales como sustituciones parciales del cemento con análisis de ciclo de vid...

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:500034563

Fecha de entrega

17 sep 2025, 12:36 p.m. GMT-6

Fecha de descarga

17 sep 2025, 12:45 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

Evaluación de morteros con residuos industriales como sustituciones parciales del cemento conpdf

Tamaño del archivo

5.4 MB

127 páginas

33.753 palabras

190.469 caracteres

11% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 10%  Fuentes de Internet
- 5%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental	
Título del trabajo	Evaluación de morteros con residuos industriales como sustituciones parciales del cemento con análisis de ciclo de vida y su comportamiento mecánico	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Maria Guadalupe Gomez Valdovinos	maria.vldovinos@umich.mx
Director	Wilfrido Martinez Molina	wilfrido.martinez@umich.mx
Codirector	Elia Mercedes Alonso Guzman	elia.alonso@umich.mx
Coordinador del programa	Salomon Ramiro Vasquez Garcia	mae.cs.ingenieria.ambiental@umich.mx

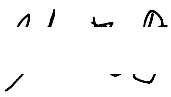
Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	Inglés	Traducción del resumen de español a inglés
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	No	
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	María Guadalupe Gomez Valdovinos 
Lugar y fecha	Morelia, Michoacán, 17 de septiembre de 2025