



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
AMBIENTAL**

TESIS

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE CONCRETO CONVENCIONAL Y
RECICLADO DE $f'c = 35\text{MPa}$, BAJO CRITERIOS DE DESEMPEÑO
TECNOLÓGICO, AMBIENTAL Y ECONÓMICO”**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:

Rosalía Ruiz Ruiz

ASESOR:

Dr. Hugo Luis Chávez García

CO-ASESORA:

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán

Morelia, Michoacán, Octubre de 2018



MCIA

**Maestría en Ciencias
en Ingeniería Ambiental**

UMSNH



ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	III
ÍNDICE DE TABLAS.....	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
DEDICATORIAS	IX
AGRADECIMIENTOS	X
1.-INTRODUCCIÓN	1
2.-MARCO TEÓRICO	3
2.1.- RESIDUOS.....	3
2.1.1.- Generalidades.....	3
2.1.2.-Clasificación	4
2.1.3.-Generación.....	6
2.1.4.-Legislación	13
2.2.-CONCRETO RECICLADO	15
2.2.1.-Generalidades.....	15
2.2.2.-Componentes.....	16
2.2.3.-Diseño de concreto	23
2.2.4.- Trabajabilidad.....	24
2.2.5.-Resistencia	25
2.2.6.-Durabilidad	25
2.3.-ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.....	29
2.3.1.- Generalidades.....	29
2.3.2.- Fases	30
2.3.3.- Métodos.....	32
2.4.- ANÁLISIS DE COSTOS.....	33
3.-ANTECEDENTES.....	35



4.-JUSTIFICACIÓN.....	37
5.-HIPÓTESIS	38
6.-OBJETIVOS	39
6.1.- GENERAL	39
6.2.- ESPECÍFICOS	39
7.-METODOLOGÍA.....	40
7.1.- MATERIALES SUJETOS DE ESTUDIO.....	40
7.2.- METODOLOGÍA	40
7.2.1.- <i>Análisis tecnológico</i>	42
7.2.2.- <i>Análisis de ciclo de vida</i>	44
7.2.3.- <i>Análisis de costos</i>	72
8.-RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	73
8.1.- ANÁLISIS TECNOLÓGICO	73
8.1.1.- <i>Análisis de propiedades físico-mecánicas</i>	73
8.1.2.- <i>Análisis de parámetros de durabilidad</i>	75
8.1.3.- <i>Propuesta de calificación de desempeño tecnológico</i>	77
8.2.- ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	78
8.2.1.- <i>Evaluación de impactos ambientales asociados al ciclo de vida (EICV) del concreto reciclado y convencional</i>	78
8.2.2.- <i>Interpretación</i>	98
8.3.- ANÁLISIS DE COSTOS.....	111
9.-CONCLUSIONES.....	113
BIBLIOGRAFÍA	115



Índice de figuras

Figura 1.- Generación de RSU por estado (INECC; SEMARNAT, 2012).....	8
Figura 2.- Generación de RP por estado (SEMARNAT, 2012).....	11
Figura 3.- Generación de RP por tipo de industria para el periodo 2004-2011 (SEMARNAT, 2012).....	12
Figura 4.-Esquema general del proceso de producción del cemento (CANACEM, 2016).....	17
Figura 5.- Etapas del ciclo de vida de un producto (Lehtinen, y otros, 2011).....	29
Figura 6.- Metodología del proyecto de investigación.	41
Figura 7.- Sistema del producto CC.	46
Figura 8.- Sistema del producto CR.	47
Figura 9.- Proceso de producción de arena volcánica.	51
Figura 10.- Proceso de producción de agregado grueso natural (AN).	52
Figura 11.- Proceso de producción de agregado grueso reciclado (AR).	53
Figura 12.- Ubicación de sitios para CC.	54
Figura 13.- Ubicación de sitios para CR.	55
Figura 14.- Ubicación de planta de cemento.	55
Figura 15.- Planta de mezclado de concreto.	58
Figura 16.- Representación general de la metodología de análisis de ciclo de vida mediante Eco-indicator 99 (Goedkoop, y otros, 2001).....	65
Figura 17.- Resistencia a la compresión de CC y CR.	74
Figura 18.- Módulo de ruptura de CC y CR.	74
Figura 19.- Resistividad eléctrica de CC y CR.....	76
Figura 20.- VPU de CC y CR.....	76
Figura 21.- Porosidad efectiva de CC y CR	77
Figura 22.- Caracterización de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CC-1. .	80
Figura 23.- Caracterización de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CR-1. .	81
Figura 24.- Caracterización de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CC-2. .	82



Figura 25.- Caracterización de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CR-2. .	83
Figura 26.- Normalización de daños ocasionados por los subprocesos para m ³ de CC-1.....	85
Figura 27.- Normalización de daños ocasionados por los subprocesos para m ³ de CR-1.....	85
Figura 28.- Normalización de daños ocasionados por los subprocesos para m ³ de CC-2.....	86
Figura 29.- Normalización de daños ocasionados por los subprocesos para m ³ de CR-2.....	86
Figura 30.- Normalización de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CC-1....	87
Figura 31.- Normalización de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CR-1....	88
Figura 32.- Normalización de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CC-2....	89
Figura 33.- Normalización de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CR-2....	90
Figura 34.- Puntuación única de daños ocasionados por los subprocesos para m ³ de CC-1. ...	92
Figura 35.- Puntuación única de daños ocasionados por los subprocesos para m ³ de CR-1. ...	92
Figura 36.- Puntuación única de daños ocasionados por los subprocesos para m ³ de CC-2.....	93
Figura 37.- Puntuación única de daños ocasionados por los subprocesos para m ³ de CR-2.....	93
Figura 38.- Puntuación única de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CC-1.	94
Figura 39.- Puntuación única de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CR-1.	95
Figura 40.- Puntuación única de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CC-2.	96
Figura 41.- Puntuación única de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CR-2.	97
Figura 42.- Comparativa de indicadores de impacto asociados a m ³ del concreto convencional y reciclado.....	98



Índice de tablas

Tabla 1.- Clasificación de generadores [12].	7
Tabla 2.- Composición de residuos por subproducto [16].	9
Tabla 3.- Indicadores de generación de algunas corrientes de RME [16].	10
Tabla 4.-Clasificación de los cementos en México [22].	18
Tabla 5.- Factores de los agregados que inciden en la calidad de las mezclas (NMX-C-003-2010).	20
Tabla 6. Clasificación de aditivos químicos de acuerdo con la norma NMX-C-255-ONNCCE-2013).	23
Tabla 7.- Riesgo de corrosión de acuerdo con el valor de resistividad [34].	27
Tabla 8.- Calidad del concreto de acuerdo con la Red DURAR [35].	28
Tabla 9.- Comparación entre métodos para realizar un ACV [41].	33
Tabla 10.- Métodos de estimación de costos [44].	34
Tabla 11.- Caracterización de los agregados finos y gruesos.	43
Tabla 12.- Cantidades de materiales necesarios para elaborar 1m ³ de concreto.	43
Tabla 13.- Entradas y salidas del proceso de producción del CC.	48
Tabla 14.- Entradas y salidas del proceso de producción del CR.	49
Tabla 15.- Descripción y escenarios de transporte de CC.	56
Tabla 16.- Descripción y escenarios de transporte de CR.	57
Tabla 17.- Consumo energético en la etapa de producción de 1m ³ concreto.	59
Tabla 18.- Consumo energético en la etapa de demolición de 1m ³ de concreto.	59
Tabla 19.- Resumen de consumo energético para cada proceso.	60
Tabla 20.- Inventario de ciclo de vida para m ³ de concreto convencional y reciclado.	61
Tabla 21.- Modelos Ecoinvent 3.3 asignados a los subprocesos para producir m ³ de CC y CR.	64
Tabla 22.- Categorías de impacto del método Eco-Indicator 99.	70
Tabla 23. Parámetros de clasificación	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 24.- Calificación de desempeño tecnológico propuesta.	78



Tabla 25.- Caracterización de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CC-1....	80
Tabla 26.- Caracterización de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CR-1....	81
Tabla 27.- Caracterización de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CC-2....	82
Tabla 28.- Caracterización de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CR-2....	83
Tabla 29.- Normalización de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CC-1....	87
Tabla 30.- Normalización de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CR-1....	88
Tabla 31.- Normalización de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CC-2....	89
Tabla 32.- Normalización de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CR-2....	90
Tabla 33.- Ecopuntos de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CC-1.....	94
Tabla 34.- Ecopuntos de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CR-1.....	95
Tabla 35.- Ecopuntos de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CC-2.....	96
Tabla 36.- Ecopuntos de impactos ocasionados por los subprocesos para m ³ de CR-2.....	97
Tabla 37.- Identificación de aspectos significativos en la producción de m ³ de los concretos convencional y reciclado en el escenario 1 (parte I).	103
Tabla 38.- Identificación de aspectos significativos en la producción de m ³ de los concretos convencional y reciclado en el escenario 1 (parte II).	104
Tabla 39.- Identificación de aspectos significativos en la producción de m ³ de los concretos convencional y reciclado en el escenario 2 (parte I).	109
Tabla 40.- Identificación de aspectos significativos en la producción de m ³ de los concretos convencional y reciclado en el escenario 2 (parte II).	110
Tabla 41.- Costo directo para m ³ de CC-1.....	111
Tabla 42.- Costo directo para m ³ de CR-1.....	111
Tabla 43.- Costo directo para m ³ de CC-2.....	112
Tabla 44.- Costo directo para m ³ de CR-2.....	112



Resumen

La presente investigación consiste en determinar la factibilidad de valorización del concreto reciclado adicionado a un nuevo concreto como sustituto parcial del agregado grueso, mediante la evaluación de su desempeño tecnológico, ambiental y económico; la cual será comparada con la evaluación de un concreto convencional. El desempeño tecnológico será analizado mediante sus propiedades físico-mecánicas y de durabilidad, mediante ensayos como: resistencia a la compresión, flexión, resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico y porosidad efectiva. La evaluación del desempeño ambiental se hará mediante un análisis de ciclo de vida, utilizando el método orientado a daños llamado Eco-indicator 99. Finalmente el aspecto económico será evaluado mediante un análisis de costos. La ponderación de cada uno de estos aspectos se realizará conforme a las especificaciones de las normativas correspondientes. La valorización del concreto reciclado será factible si de acuerdo con los criterios de evaluación propuesta su desempeño en los tres aspectos mencionados iguala o supera al concreto convencional.

Palabras clave: valorización, residuo, concreto reciclado, ACV, eco-indicator 99



Abstract

This research consists to determinate the feasibility of valorization of recycled concrete added to a new concrete as partial substitute of coarse aggregate, through the evaluation of technological, environmental and economic performance which will be compared with the performance of the conventional concrete. Technological performance will be analyzed by means of its durability and physical- mechanical properties, by means of tests such as: compressive, flexural strength, electrical resistivity, ultrasonic pulse velocity and effective porosity. The evaluation of environmental performance will be done by means of a life cycle assessment using a damage oriented method, called Eco-indicator 99. Finally the economic aspect will be evaluated through a costs analysis. The weighing of each one of aspects will be accordingly to standard specifications. Recycled concrete valorization will be feasible if its performance in all aspects is equal or better than conventional concrete performance in accordingly to proposed evaluation criteria.

Keywords: valorization, waste, recycled concrete, LCA, eco-indicator 99



Dedicatorias

A **Díos**, a quien constantemente pido por los dones de sabiduría y fortaleza; sabiduría para que cada una de mis decisiones me lleve al lugar donde quiero estar y fortaleza para resistir cada una de las batallas que debo librar para llegar a tan anhelado sitio.

A mis padres: **Bernardo y Teresa**; a quienes amo, respeto y admiro por su dedicación al cuidado mío y de mis hermanos, así como por buscar que nosotros tuviéramos mejores oportunidades que las que ellos tuvieron.

A mis hermanos: **Chuya, Berna, Herman, Juan, Tere, Cochí, Nana y Faílo**; a quienes amo, respeto y admiro porque consiguen transformar mis días grises en otros un tanto coloridos.

A mi novio, por su comprensión en la realización de este proyecto y por ser mi motivación.

A **Rotaract**, por haber cambiado mi vida e inspirarme a ser mejor.



Agradecimientos

Al posgrado de Ciencias en Ingeniería Ambiental, adscrito a la Facultad de Ingeniería Civil de la U.M.S.N.H., por la formación académica recibida por parte de los profesores que ahí laboran y por las facilidades brindadas durante mis estudios de posgrado.

Al M.A. Wílfredo Martínez Molina, director de la Facultad de Ingeniería Civil, quien siempre ha mostrado un compromiso real con los estudiantes adscritos a la facultad que está a su cargo.

A mis asesores, el Dr. Hugo Luis Chávez García y la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán; por la confianza, orientación, paciencia y apoyo incondicional que siempre me han brindado les estaré eternamente agradecida.

A mis sinodales, el Dr. José María Ponce Ortega, el Dr. Otoniel Buenrostro Delgado y el Dr. Luis Armando Ochoa Franco; por sus valiosas aportaciones para el desarrollo de este proyecto.

A la M.I.T. Cindy y al M.I.T. Felipe de Jesús, por las facilidades brindadas para que la ejecución de este proyecto fuera más sencilla.

A los integrantes del proyecto de concreto reciclado: Mayra Guíza, Elí, Arturo, Ramón y Tony; por la información y ayuda brindada.

A mis amigos Judy, Gabriel y Checo, por compartir sus conocimientos y experiencia conmigo.

A los jóvenes de servicio social y a todos los que de alguna forma u otra colaboraron activamente en el desarrollo de esta investigación.



1.-INTRODUCCIÓN

La intensificación de la industrialización en México ha producido una mayor demanda de materias primas para satisfacer el creciente consumo de bienes y servicios de una población en aumento y con patrones de consumo cada vez más demandantes, tanto en aspectos de la calidad de los productos y servicios que reciben, como en la conservación de los recursos naturales y en la protección del ambiente [1]. Como consecuencia del rápido crecimiento en la producción y consumo de bienes y servicios, se han incrementado la generación de residuos de distintos tipos y los problemas asociados para su disposición adecuada, así como las afectaciones a la salud humana y a los ecosistemas [2].

El concreto es el material más ampliamente utilizado y producido a nivel mundial debido a sus buenas solicitaciones. Sin embargo, cuando llega al final de su vida útil o es necesario hacer algunas modificaciones a las edificaciones hechas a base de éste, resulta necesaria su demolición. Lo anterior conlleva a la generación de una gran cantidad de residuos producto de la demolición lo cual dificulta su manejo, convirtiéndose en un grave problema medioambiental. Sin embargo, si estos residuos son procesados pueden ser aprovechados para producir un nuevo concreto: el concreto reciclado, el cual puede abatir costos, disminuir la contaminación y abaratar la edificación [3]. La Ley General para la Prevención y la Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) establece que los planes de manejo para un residuo deben tener como objetivo minimizar su generación y maximizar su valorización bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social.

El análisis de ciclo vida (ACV) surgió en 1969 como una propuesta para comparar las bondades ambientales de productos. Hoy en día, se ha convertido en un método estandarizado que provee bases científicas sólidas para lograr el desarrollo sostenible en las industrias y el gobierno [4]. El análisis de ciclo de vida es una compilación de las entradas, salidas e impactos ambientales potenciales de un producto o servicio durante todo su ciclo de vida, que permite identificar las etapas e impactos más significativos que deben ser orientados para maximizar las mejoras [5].



La evaluación de los impactos ambientales se logra mediante la utilización de métodos que permitan calcular los indicadores para salud humana, ecosistema y recursos naturales [6]. El eco-indicator 99 es un método cuantitativo de evaluación de impacto de ciclo de vida orientado a daños o efectos finales, cuyo objetivo es expresar la carga medioambiental total de un producto mediante una puntuación única [7].

La eficiencia tecnológica de las mezclas de concreto con material reciclado se evalúa desde los puntos de vista de comportamiento físico, mecánico, durabilidad, formas de falla, fluidez, trabajabilidad y revenimiento, edad, hidratación del cemento y grado de compactación del concreto. El desempeño mecánico usualmente es evaluado con pruebas destructivas como: esfuerzo de compresión, tensión indirecta y flexión cuando se tienen especímenes cúbicos o cilíndricos, y el método de Point load para muestras sin labrar. Pruebas no destructivas como velocidad de pulso ultrasónico y resistividad eléctrica, pueden ser empleadas como indicadores de durabilidad [3]. Para mejorar el desempeño de las mezclas de concreto hidráulico se recurre a diseños de mezclas con factores de seguridad, disminución de las relaciones A/C; curado prolongado por inmersión o por aspersion [8]. Otra manera de incidir en la modificación de las propiedades de los concretos reciclados es el empleo de aditivos y adiciones o sustituciones de cemento por materiales con actividad puzolánica. Se pueden elaborar concretos activados alcalinamente con agregados producto del reciclaje del concreto hidráulico [9].



2.-MARCO TEÓRICO

2.1.- Residuos

2.1.1.- Generalidades

Los residuos existen desde que nuestro planeta tiene seres vivos, hace unos 4.000 millones de años. Anteriormente, la eliminación de los residuos humanos no planteaba un problema significativo, ya que la población era pequeña y la cantidad de terreno disponible para la asimilación de los residuos era grande. Sin embargo, la problemática de los residuos comienza con el desarrollo de la sociedad moderna en la que vivimos, no sólo en el aspecto referido a la cantidad de residuos que ésta genera (difícilmente asimilable por la naturaleza), sino también a la calidad de los mismos. El problema de gestión de los residuos ha ido agravándose año con año. A continuación se enlistan los factores principales que han provocado el rápido incremento de los residuos:

1. El rápido crecimiento demográfico.
2. La concentración de la población en los centros urbanos.
3. La utilización de bienes materiales de rápido deterioro.
4. El uso cada vez más generalizado de envases sin retorno, fabricados con materiales no degradables [10].

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente(LGEEPA) lo define como: cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó [11]; mientras que la LGPGIR, lo define como: material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final conforme a lo dispuesto en dicha Ley y demás ordenamientos que de ella deriven [12]. Ambas definiciones son muy precisas; sin embargo, en el presente trabajo los residuos serán abordados de acuerdo con la definición de la LGPGIR.



2.1.2.-Clasificación

De acuerdo con lo dispuesto en el artículo 15 de la LGPGIR, los residuos se clasifican en las siguientes categorías: residuos peligrosos, sólidos urbanos y de manejo especial, los cuales serán descritos enseguida.

2.1.2.1.-Residuos peligrosos (RP)

Son aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio [12]. Algunos ejemplos de éstos son: lodos de destilación de solventes, residuos de catalizadores agotados, residuos de la producción del carbonilo de níquel, cenizas de incineración de residuos, ácidos gastados en la manufactura de TNT, residuos de pigmentos base cromo y base plomo, etc. [13].

La clasificación de un residuo como peligroso, se establecerá de acuerdo con lo dispuesto en la norma oficial mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005 donde se especifica la forma de determinar sus características, los límites de concentración de las sustancias contenidas en ellos, así como un listado de los mismos [12].

2.1.2.2.-Residuos sólidos urbanos (RSU)

Son los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos [12].

Los residuos sólidos urbanos de acuerdo con la LGPGIR se clasifican como:

- ❖ **Orgánicos:** son aquellos de origen natural, ya sea de origen vegetal o animal. Algunos ejemplos de éstos son: desperdicios de frutas, verduras, cáscaras de huevo, restos de comida, etc.



-
- ❖ Inorgánicos: son aquellos que no son naturales y que sus componentes han pasado por algún proceso industrial sin que esto los convierta en un residuo peligroso. Algunos ejemplos de éstos son: papel, cartón, plástico, vidrio y metal [14].

2.1.2.3.-Residuos de manejo especial (RME)

Son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos. De acuerdo con lo dispuesto en el artículo 19 de la LGPGIR, este tipo de residuos se subclasifican como sigue:

- ❖ Residuos de las rocas o los productos de su descomposición que sólo puedan utilizarse para la fabricación de materiales de construcción o se destinen para este fin, así como los productos derivados de la descomposición de las rocas.
- ❖ Residuos de servicios de salud, generados por los establecimientos que realicen actividades médico-asistenciales a las poblaciones humanas o animales, centros de investigación, con excepción de los biológico-infecciosos.
- ❖ Residuos generados por las actividades pesqueras, agrícolas, silvícolas, forestales, avícolas, ganaderas, incluyendo los residuos de los insumos utilizados en esas actividades.
- ❖ Residuos de los servicios de transporte, así como los generados a consecuencia de las actividades que se realizan en puertos, aeropuertos, terminales ferroviarias y portuarias y en las aduana.
- ❖ Lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales.
- ❖ Residuos de tiendas departamentales o centros comerciales generados en grandes volúmenes.
- ❖ Residuos de la construcción, mantenimiento y demolición en general.
- ❖ Residuos tecnológicos provenientes de las industrias de la informática, fabricantes de productos electrónicos o de vehículos automotores y otros que al transcurrir su vida útil, por sus características, requieren de un manejo específico.



-
- ❖ Pilas que contengan litio, níquel, mercurio, cadmio, manganeso, plomo, zinc, o cualquier otro elemento que permita la generación de energía en las mismas, en los niveles que no sean considerados como residuos peligrosos en la norma oficial mexicana correspondiente.
 - ❖ Los neumáticos usados.
 - ❖ Otros que determine la Secretaría de común acuerdo con las entidades federativas y municipios, que así lo convengan para facilitar su gestión integral.

Cuando las Entidades Federativas soliciten la inclusión de uno o varios residuos en la categoría de RME, deberán cumplir con los siguientes criterios establecidos en la NOM-161-SEMARNAT-2011:

1. Que se generen en cualquier actividad relacionada con la extracción, beneficio, transformación, procesamiento y/o utilización de materiales para producir bienes y servicios, y que no reúnan características domiciliarias o no posean alguna de las características de peligrosidad en los términos de la norma NOM-052-SEMARNAT-2005.
2. Que sea un RSU generado por un gran generador en una cantidad igual o mayor a 10ton al año y que requiera un manejo específico para su valorización y aprovechamiento.
3. Que sea un residuo, incluido en el Diagnóstico Básico Estatal para la Gestión Integral de Residuos de una o más Entidades Federativas, o en un Estudio Técnico-Económico.

En la misma Norma, se incluyen los criterios para determinar los RME que están sujetos a plan de manejo, así como su correspondiente listado.

2.1.3.-Generación

El desarrollo económico, la industrialización y la implantación de modelos económicos que conllevan al aumento sostenido del consumo, han impactado significativamente el volumen y la composición de los residuos producidos por las sociedades del mundo [2]. La generación de residuos es una consecuencia directa de cualquier tipo de actividad desarrollada por el hombre;



hace años un gran porcentaje de los residuos eran reutilizados en muy diversos usos, pero hoy en día nos encontramos en una sociedad de consumo que genera gran cantidad y variedad de residuos procedentes de un amplio abanico de actividades [15]. Las consecuencias ambientales de la inadecuada disposición de los residuos pueden ser negativas para la salud de las personas y de los ecosistemas naturales. Algunos de sus impactos son los siguientes: generación de contaminantes y gases de efecto invernadero, adelgazamiento de la capa de ozono, contaminación de los suelos y cuerpos de agua; y proliferación de fauna nociva y transmisión de enfermedades [2].

De acuerdo con lo citado anteriormente, resulta necesario conocer cuánto y qué tipo de residuos se generan en el país, para establecer estrategias que permitan darles el manejo adecuado. La LGPGIR divide a los generadores de residuos en 3 categorías de acuerdo con la cantidad de residuos que generan, tal y como son mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1.- Clasificación de generadores [12].

Categoría	Cantidad de residuos generados anualmente
Microgenerador	$\leq 400\text{kg}$ de residuos peligrosos
Pequeño generador	$>400\text{kg}$ y $<10\text{ton}$
Gran generador	$\geq 10\text{ton}$

Por otro lado, en el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos 2012 (DBGIR 2012) se presenta información referente al manejo de residuos sólidos urbanos, residuos de manejo especial y residuos peligrosos en México hasta el año 2012. Tomando como referencia el número de habitantes reportado por el INEGI y los datos de generación per cápita ($370\text{kg}/\text{hab}/\text{año}$) del DBGIR, se estima que la generación de RSU fue de $102\,895\text{ ton}/\text{día}$ y de $41\,000\,000\text{ ton}/\text{año}$ en el 2011. En la Figura 1 son presentados los datos de generación de RSU por estado; ahí se puede notar que en el Estado de México, Distrito Federal y Jalisco se genera la mayor cantidad de éstos ($15\,000$, $11\,500$ y $9\,000\text{ton}/\text{día}$ respectivamente), lo que representa el 33% del total [16].

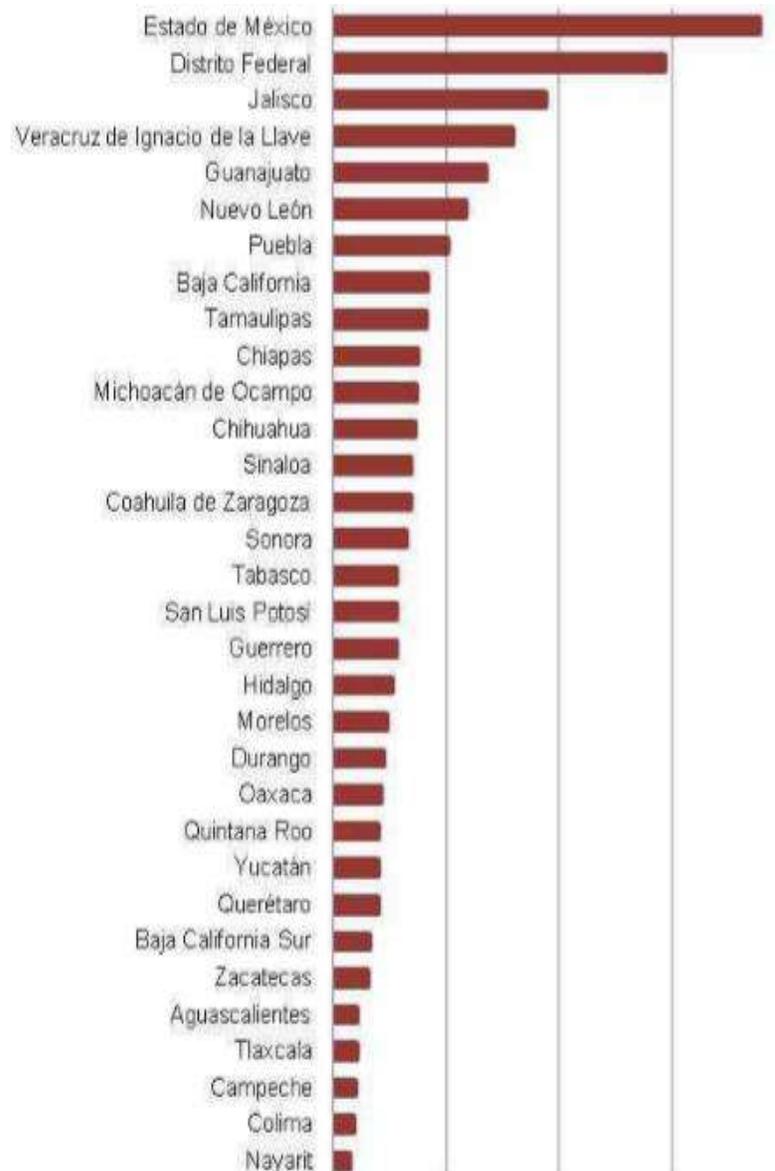


Figura 1.- Generación de RSU por estado [16].

Además de conocer la cantidad de residuos generados per cápita, también es importante conocer la composición de éstos, con la finalidad de darles un manejo enfocado a su valorización. En la Tabla 2 es presentada dicha composición y puede observarse que casi el 40% de los RSU en México es susceptible de ser aprovechado; y que la cuarta parte de los RSU están conformados por residuos alimenticios [16]



Tabla 2.- Composición de residuos por subproducto [16].

Categoría	Subproductos	Porcentaje
Susceptibles de aprovechamiento 39.57%	Cartón	6.54
	Papel	6.20
	Material ferroso	2.09
	Material no ferroso	0.60
	Plástico rígido y película	7.22
	Envase de cartón encerado	1.50
	Fibras sintéticas	0.90
	Poliestireno expandido	1.65
	Hule	1.21
	Lata	2.28
	Vidrio de color	2.55
	Vidrio transparente	4.03
	Poliuretano	2.80
	Orgánicos 37.97%	Cuero
Fibra dura vegetal		0.67
Residuos alimenticios		25.57
Hueso		0.59
Residuos de jardinería		9.38
Madera		1.25
Otros 22.46%	Residuo fino	3.76
	Pañal desechable	6.25
	Algodón	0.7
	Trapo	3.57
	Loza y cerámica	0.55
	Material de construcción	1.46
	Varios	5.90
TOTAL		100.00

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI, MORSU (2010).

En el caso de los RME, el DBGIR 2012 presenta los datos de los volúmenes de generación de 15 corrientes de RME, los cuales son presentados en la Tabla 3. En dicha tabla se observa que la mayor generación de este tipo de residuos en el periodo de 2006-2012 corresponde a los vehículos al final de su vida útil (805 202.50 vehículos/año), las excretas de ganado porcino y bovino (66 708 270 ton/año), papel y cartón (6 819 830 ton/año) y residuos de la construcción



y la demolición (6 111 090ton/año), mientras que la menor contribución es de 8004ton/año y corresponde a los residuos generados en el aeropuerto de la Cd. de México. De acuerdo con los datos presentados en esta tabla, podría decirse que la generación anual de RME excede las 84 147 880 ton/año [16].

Tabla 3.- Indicadores de generación de algunas corrientes de RME [16].

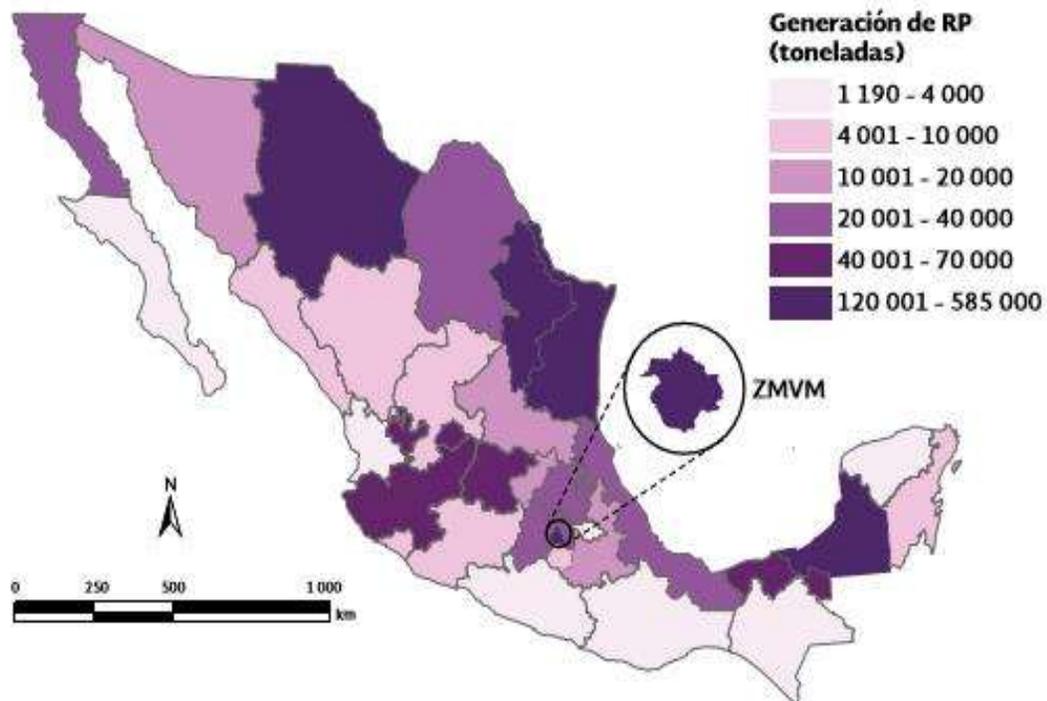
RME	Generación (mil ton/año)
Agroplásticos	313.13
Excretas de bovino y porcino	66 708.27
Pesca	799.02
Residuos del Aeropuerto de la Cd. de México	8.04
Lodos PTAR (municipales)	232.00
Tiendas de autoservicio: Wal-Mart	407.19
Construcción y Demolición	6 111.09
Electrodomésticos	21.66
Electrónicos	263.85
Vehículos al final de su vida útil (vehículos/año)	805 202.50
Llantas	1 011.03
Vidrio	1 142.57
Pilas	33.98
Papel y cartón	6 819.83
Residuos de hoteles	276.22

Fuente: Elaboración propia con datos de planes de manejo, diagnósticos y estudios.

Finalmente, la información sobre generación de RP, se obtiene a partir de los registros que hacen las empresas incorporadas al Padrón de Generadores de Residuos Peligrosos (PGRP) a la SEMARNAT. Según la información contenida en dicho registro, para el periodo 2004-2011, las 68 733 empresas registradas generaron 1.92 millones de toneladas, de las cuales el 95.7%



corresponden a los grandes generadores, el 3.7% a los pequeños generadores y el 0.6% a los microgeneradores [2]. En la Figura 2 es presentada la contribución de cada estado a la generación de RP durante el periodo 2004-2011, ahí se aprecia que los estados de Chihuahua, Nuevo León, Tamaulipas, Campeche y la Zona Metropolitana del Valle de México son los generadores de la mayor cantidad de RP. En contraste, los estados del Sur (Guerrero, Oaxaca y Chiapas) son los que generan menor cantidad de RP.



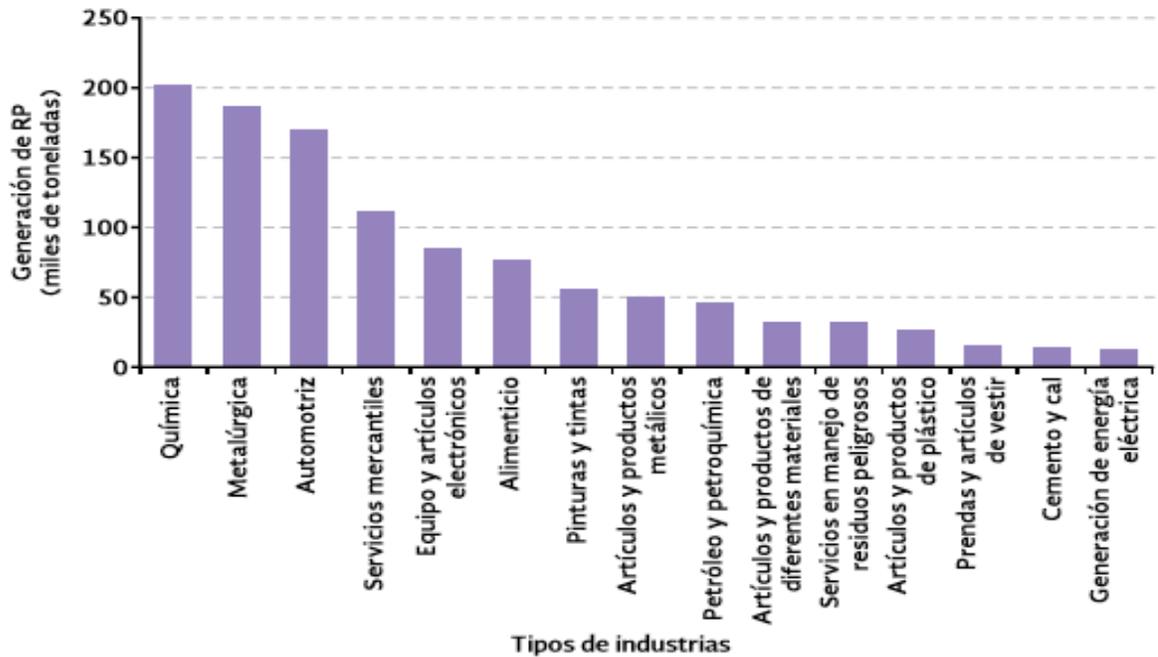
Fuente:
Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas, Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental. Semamar. México. 2012.

Figura 2.- Generación de RP por estado [2].

Los volúmenes de generación de RP por tipo de industria durante el periodo 2004-2011 son presentados en la Figura 3, donde se nota que la mayor generación de RP corresponde a las industrias química, metalúrgica y automotriz (201 781.95, 186 393.22 y 170 194.94 ton



respectivamente). En contraste, las industrias de asbesto, comunicaciones y vida silvestre tuvieron la menor generación de RP (223,228 y 36 ton respectivamente).



Fuente: Dirección General de Gestión Integral de Materiales y Actividades Riesgosas, Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental. Semarnat. México, 2012.

Figura 3.- Generación de RP por tipo de industria para el periodo 2004-2011 [2].

La LGPGIR en su artículo 25 establece que la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) deberá formular e instrumentar el Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos mediante el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos y demás disposiciones aplicables. Dicho programa deberá basarse en el principio de las 3R's (reducción, reutilización y reciclado de residuos), en los que aplique la responsabilidad compartida y diferenciada entre los diferentes sectores sociales y productivos, y entre los tres órdenes de gobierno (federal, estatal y municipal).

Así mismo, en su artículo 26 establece que los estados y municipios también deberán elaborar e instrumentar Programas Locales para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos sólidos



urbanos y de manejo especial mediante el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos y demás disposiciones aplicables.

Por otro lado, la misma Ley en su artículo 27 establece la elaboración de planes de manejo con la finalidad de promover la prevención y la valorización de los residuos, así como su manejo integral desde perspectivas ambientales, tecnológicas, económicas y sociales.

Un plan de manejo es un instrumento cuyo objetivo es minimizar la generación y maximizar la valorización de residuos sólidos urbanos, residuos de manejo especial y residuos peligrosos específicos, bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social.

El manejo integral de los residuos se refiere a las actividades de reducción en la fuente, separación, reutilización, reciclaje, co-procesamiento, tratamiento biológico, químico, físico o térmico, acopio, almacenamiento, transporte y disposición final de residuos, individualmente realizadas o combinadas de manera apropiada, para adaptarse a las condiciones y necesidades de cada lugar, cumpliendo objetivos de valorización, eficiencia sanitaria, ambiental, tecnológica, económica y social. La LGPGIR establece que la responsabilidad del manejo y disposición final de los residuos peligrosos corresponde a quien los genera, además de que su manejo deberá ser de manera segura y ambientalmente adecuada. Así mismo, el control y vigilancia del manejo integral de residuos de manejo especial y residuos sólidos urbanos corresponderá a las entidades federativas y municipios respectivamente, los cuales deberán coordinarse para formular e implementar un sistema de gestión integral de residuos que asegure su manejo, valorización y disposición final [12].

2.1.4.-Legislación

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, publicada el 8 de Octubre de 2003 y reformada por última vez el 22 de Mayo de 2015, tiene por objeto garantizar el derecho de toda persona al medio ambiente sano y propiciar el desarrollo sustentable a través de la prevención de la generación, la valorización y la gestión integral de los residuos peligrosos,



de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; prevenir la contaminación de sitios con estos residuos y llevar a cabo su remediación.

En el artículo 7 establece que la Federación, a través de la SEMARNAT, será la encargada de expedir las normas oficiales mexicanas, reglamentos y demás disposiciones jurídicas en materia de residuos; también tendrá a su cargo las actividades encaminadas a la regulación y control de los residuos peligrosos provenientes de pequeños y grandes generadores o de microgeneradores, cuando éstos últimos no sean controlados por las entidades federativas.

En el artículo 9 se establecen las facultades de las entidades federativas, siendo las más relevantes la formulación de leyes de carácter estatal que sean necesarias para cumplir con lo dispuesto en la presente Ley y que corresponde al estado las acciones referentes a la regulación y control de los residuos de manejo especial.

Finalmente, en el artículo 10 se establece que los municipios tienen a su cargo las funciones de manejo integral de residuos sólidos urbanos, que consisten en la recolección, traslado, tratamiento, y su disposición final [12].

Además de las leyes LGPGIR y LGEEPA, existen las normas oficiales mexicanas que son las encargadas de establecer procedimientos, límites máximos permisibles y demás especificaciones para lograr con el objetivo de dichas leyes. En materia de residuos algunos de las NOM aplicables son enlistadas enseguida:

- ❖ NOM 161-SEMARNAT-2011, que establece los criterios para clasificar a los residuos de manejo especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo.
- ❖ NOM-157-SEMARNAT-2009, que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros.
- ❖ NOM-052-SEMARNAT-2005, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y lo listados de los residuos peligrosos.



- ❖ NOM-053-SEMARNAT-1993, que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.
- ❖ NOM-54-SEMARNAT-1993, que establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados peligroso por la NOM 052.
- ❖ NOM-055-SEMARNAT-2003, que establece los requisitos que deben reunir los sitios que se destinarán para un confinamiento controlado de residuos peligrosos previamente estabilizados.
- ❖ NOM-083-SEMARNAT-2003, que incluye las especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de RSU y RME.
- ❖ NOM-098-SEMARNAT-2002, Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes [17].

2.2.-Concreto reciclado

2.2.1.-Generalidades

El concreto es una mezcla de 2 componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento portland y agua, une los agregados, normalmente arena y grava (piedra triturada piedra machacada, pedrejón, etc.), creando una masa similar a una roca. Esto ocurre por el endurecimiento de la pasta en consecuencia de la reacción química del cemento con el agua. Otros materiales cementosos (cementantes) y adiciones minerales se pueden incluir en la pasta [18].

El concreto es el material más utilizado a nivel mundial debido a su gran versatilidad y respuesta ante sollicitaciones mecánicas. Es usado en la construcción y/o reparación de obras civiles, tales como: edificios, monumentos, presas, puentes, pavimentos, muelles, etc. Se estima que se producen 25 mil millones de toneladas de concreto anualmente. Si bien el concreto ha sido un material que ha propiciado el desarrollo económico de los países gracias a la mejora de su



infraestructura, hoy en día, se enfrenta a grandes retos ambientales debido a que su producción genera un alto impacto al ambiente [19].

Las consideraciones medioambientales están afectando cada vez más al suministro de agregados, desde las objeciones a la extracción de canteras hasta los problemas de disposición final de los residuos producto de demolición de las edificaciones y el vertido de residuos domésticos. Ambos tipos de residuos pueden ser procesados en agregado para su uso en concreto, y esto es muy deseable tanto desde el punto de vista económico como medioambiental, pero debe tenerse precaución al considerar el agregado reciclado para uso en concreto. El agregado producto de la demolición de estructuras de concreto es reciclado y puede ser utilizado como reemplazamiento del agregado grueso o fino en la elaboración de un nuevo concreto, ya sea total o parcialmente. Se espera que el uso de agregado reciclado incremente en el futuro debido a dos razones complementarias. Primero, las fuentes de roca que pueden ser trituradas están disminuyendo y, en algunos países, es agregado un impuesto en todas las canteras nuevas. Segundo, hay escasez de sitios de disposición para material de demolición que incluye concreto viejo y, otra vez, hay un impuesto en vertedero [20].

2.2.2.-Componentes

2.2.2.1.-Cemento

El cemento es el componente principal del concreto y usualmente se trata de cemento Pórtland (CP), el cual es un sílico aluminato de calcio, que se obtiene mediante la cocción de material calcáreo y arcilloso a una temperatura de clinkerización, que es de 1400°C aproximadamente [20]. En la Figura 4 es mostrado un esquema general del proceso de producción del cemento.

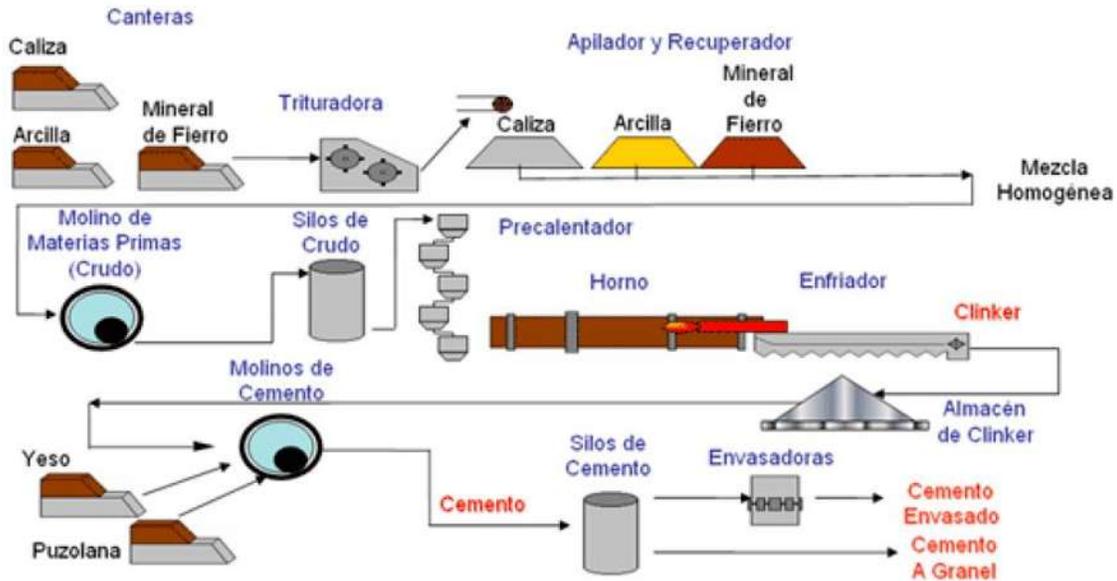


Figura 4.-Esquema general del proceso de producción del cemento [21].

Los cementos hidráulicos al entrar en contacto con el agua generan una reacción química llamada hidratación, la cual ocasiona el fraguado de éstos. Durante la hidratación del cemento, se forma una pasta que al ser adicionada a los agregados actúa como aglutinante y une los agregados, ya sea para formar morteros y/o concretos que son ampliamente utilizados en la industria de la construcción [18].

Los constituyentes principales del CP son: silicato tricálcico (C_2S), silicato dicálcico (C_3S), aluminato tricálcico (C_3A) y aluminoferrito tetracálcico (C_4AF); los 2 primeros son los más importantes y son los responsables de la resistencia de la pasta hidratada, el C_3A es benéfico en la fabricación de cemento ya que facilita la combinación de cal y sílice y el C_4AF reacciona con el yeso para formar sulfoferrita de calcio y su presencia puede acelerar la hidratación de los silicatos. La composición química del CP se puede variar de acuerdo con las propiedades que se deseen. Tomando en cuenta esto, todos los países desarrollados tienen sus propias normas para cementos, donde definen los estándares de composición, así como los requisitos de desempeño establecidos según las propiedades deseadas [20]. La norma mexicana NMX-C-414-



ONNCCE-2010 presenta la clasificación de los cementos en México, la cual es mostrada en la Tabla 4.

Tabla 4.-Clasificación de los cementos en México [22].

Tipo	Denominación	Clase resistente	Características especiales
CPO	Cemento Pórtland Ordinario	20	RS Resistente a los sulfatos
CPP	Cemento Pórtland Puzolánico	30	BRA Baja reactividad álcali agregado
CPEG	Cemento Pórtland con Escoria Granulada de Alto Horno	30R	BCH Bajo calor de hidratación
CPC	Cemento Pórtland Compuesto	40	B Blanco
CPS	Cemento Pórtland Con Humo de Sílice	40R	
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno		

Es importante señalar que si bien hay gran variedad de tipos de cementos, no todos son adecuados para las condiciones donde se realizará la obra; así que la elección de éstos, deberá estar en función de las condiciones particulares de cada obra.

México es uno de los principales productores de cemento en América latina y debido al constante desarrollo su producción se encuentra en aumento. De acuerdo con información de la [23], la producción de cemento pronosticada para México en el 2017 fue de 41.81 millones de toneladas, mientras que su consumo per cápita fue de 320kg. Por otro lado, Benhelal *et al* (2012) [25] indica que la industria cementera es responsable del 5-7% de las emisiones globales de CO₂. Por esta razón, la industria cementera ha buscado diversas alternativas para mejorar los



procesos de producción de cemento que permitan disminuir dichas emisiones. Como resultado de los esfuerzos que ha hecho la industria cementera para bajar estas emisiones, en la Figura 5 se muestra como han ido disminuyendo en el periodo de 1990 a 2011. De acuerdo con [24] las emisiones específicas netas de CO₂ por tonelada de producto cementante a nivel mundial fueron de 640kg, mientras que para Latinoamérica fueron de 597kg para el año 2016.

2.2.2.2.-Agregados

Los agregados son fragmentos de roca que al agregarse a la pasta de cemento y agua forman el concreto, éstos constituyen aproximadamente del 60 al 75% del volumen total del concreto, es por ello, que su selección es muy importante [18]. Originalmente, el agregado era visto como un material inerte y económico que al unirse con la pasta de cemento producía grandes volúmenes de concreto. De hecho, el agregado no es realmente inerte, ya que sus propiedades físicas, térmicas y algunas veces químicas influyen en el comportamiento del concreto, por ejemplo, mejoran su estabilidad volumétrica y durabilidad. Desde el punto de vista económico, es ventajoso usar una mezcla con mucho más agregado que cemento, pero el costo-beneficio tiene que balancearse con las propiedades deseadas del concreto, tanto en estado fresco como endurecido [20]. Los agregados deben componerse de partículas con resistencia mecánica adecuada y con resistencia a las condiciones de exposición y no deben contener materiales que puedan causar deterioro del concreto [18].

Los agregados naturales son los más utilizados; sin embargo, el concreto triturado reciclado y materiales manufacturados como escorias de horno, arcillas expandidas y pellets de pizarras también son usados [26]. Los agregados naturales son formados por procesos de erosión y abrasión, o por trituración artificial de una roca más grande. En consecuencia, muchas propiedades del agregado dependen de las propiedades de la roca madre, por ejemplo: composición química y mineralógica, clasificación petrográfica, gravedad específica, dureza, resistencia, estabilidad física y química, estructura de poro, color, etc. Además, hay otras propiedades que no dependen de la roca madre, tales como: forma y tamaño de partícula, textura superficial y absorción. Todas estas propiedades influyen en la calidad del concreto fresco y



endurecido [20]. Por su parte, en la NMX-C-003-2010 es mencionada la influencia que tienen algunos factores del agregado en la calidad de las mezclas, tal y como es mostrado en la Tabla 5.

Generalmente los agregados para su uso en concreto se dividen en dos grupos: finos y gruesos (áridos). Los agregados finos pueden ser arena natural o artificial (manufacturadas) con partículas de hasta 9.5 mm; agregados gruesos son las partículas retenidas en la malla 1.18 mm (tamiz no.16) y pueden llegar hasta 150 mm. El tamaño máximo del agregado grueso comúnmente empleado es 19 mm o 25 mm [18].

Tabla 5.- Factores de los agregados que inciden en la calidad de las mezclas (NMX-C-003-2010)

Componente	Factor	Manifestación
Agregados	Contaminación por materia orgánica o vegetal (troncos, hojas, raíces, etc.)	Inhibición de reacciones puzolánicas, falta de resistencia, agrietamientos, poca trabajabilidad y plasticidad.
	Alto índice de lajas	Problemas estructurales y de resistencia.
	Granulometría no adecuada	Falta de adhesión, problemas de resistencia, mayor requerimiento de aglomerante.
	Alto contenido de finos	Mayor requerimiento de aglomerantes, problemas de adhesión entre partículas.

Kostmatka *et al* (2004) menciona que la granulometría continua de tamaños de partículas es deseable para el uso eficiente de la pasta, cuando no sea así, será necesario hacer un mejoramiento de la granulometría.

Según Neville & Brooks (2010) el concreto producto de la demolición de edificaciones es utilizado principalmente en pavimentos y concreto no-estructural. Sin embargo, ya hay algunos usos en el concreto estructural. Es evidente que para producir el agregado de concreto reciclado se necesita triturar el viejo concreto para que el tamaño de partícula sea aceptable. Sin embargo,



el tamaño no es el único criterio, la forma y la textura son otros factores que deben ser considerados, los cuales pueden no ser óptimos debido a que la absorción de agua se incrementa normalmente debido a los poros adicionales en el concreto que resultan del concreto viejo reciclado. Por esta razón, el agregado de concreto reciclado se suele mezclar con agregados de otras fuentes. Si el agregado reciclado del concreto se va a utilizar para elaborar un concreto nuevo, deberán tomarse en cuenta los siguientes criterios:

- ❖ La densidad será menor que el concreto convencional.
- ❖ La absorción y porosidad serán más altas que el concreto convencional.
- ❖ Su alta absorción puede ser aprovechada; si el agregado es saturado antes de mezclarse, proveerá un curado interno.
- ❖ La resistencia a la compresión disminuirá substancialmente, si el agregado fino convencional es sustituido parcial o totalmente por el agregado reciclado.
- ❖ Disminuye la trabajabilidad del concreto fresco, incrementa la demanda de agua, incrementa la contracción por secado y reduce el módulo de elasticidad. Estos efectos resultan más grandes, si los agregados finos y gruesos son sustituidos por el agregado reciclado.
- ❖ La resistencia al congelamiento-deshielo del nuevo concreto, dependerá de los vacíos y resistencia del viejo concreto así como de las propiedades correspondientes del nuevo concreto.
- ❖ Los aditivos químicos, inclusores de aire y minerales del viejo concreto no tendrán un efecto significativo en las propiedades del nuevo. Sin embargo, altas concentraciones del ión cloruro en el agua del viejo concreto, podrían contribuir a la corrosión acelerada del nuevo concreto.

2.2.2.3.-Agua

La cantidad de agua de mezclado es de vital importancia para lograr la resistencia mecánica deseada del concreto; sin embargo, no sólo debe tenerse cuidado en la cantidad de agua utilizada, también es importante asegurarse que tenga la calidad adecuada para ser utilizada en el concreto.



La calidad del agua es importante debido a que las impurezas presentes en ella podrían interferir con el fraguado del cemento, afectar gravemente la resistencia del concreto o causar manchas en su superficie, y podría iniciar la corrosión del acero de refuerzo [20].

De manera general, puede decirse que si el agua es potable es apta para ser utilizada en concreto [18]. Sin embargo, lo más adecuado es hacer análisis al agua para determinar si cumple con las especificaciones de la norma NMX-C-122-ONNCCE-2004.

El uso de agua de mar es considerado en algunos casos; sin embargo, debe evitarse cuando se trata de concreto reforzado, ya que aumenta el riesgo de corrosión del acero de refuerzo, especialmente en países tropicales [20].

2.2.2.4.-Aditivos

Los aditivos son productos químicos, que son añadidos al concreto o mortero en el momento de hacer la mezcla, para modificar las propiedades, ya sea estado fresco o endurecido. Generalmente, los aditivos deben ser añadidos a menos del 5% en peso del cemento, pero la mayoría de las mezclas usan menos del 2%. La dosificación puede expresarse en litros o kg por 100kg de cemento [26].

Kosmatka *et al* (2004) menciona que las razones principales para el uso de aditivos son:

1. Reducción del costo de la construcción de concreto.
2. Obtención de ciertas propiedades en el concreto de manera más efectiva que otras.
3. Mantenimiento de la calidad del concreto durante las etapas de mezclado, transporte, colado y curado en condiciones de clima adverso.
4. Superación de ciertas emergencias durante las operaciones de mezclado, transporte, colocación y curado.

De acuerdo con Neville & Brooks (2010), los aditivos se pueden clasificar según sus funciones en: acelerantes, retardantes, plastificantes, superplastificantes, fillers, adherentes, a prueba de agua y antibacteriales.



Si bien el efecto de cada uno de los aditivos es conocido por separado, deberá tenerse especial cuidado cuando se pretenda utilizar una combinación de éstos, ya que pudieran no ser compatibles.

Por su parte, la norma mexicana [27] presenta la clasificación de aditivos químicos, tal y como se muestra en Tabla 6.

Tabla 6. Clasificación de aditivos químicos de acuerdo con la norma NMX-C-255-ONNCCE-2013).

Tipo A	Reductor de agua
Tipo B	Retardante
Tipo C	Acelerante del fraguado inicial
Tipo C2	Acelerante de resistencia
Tipo D	Reductor de agua y retardante
Tipo E	Reductor de agua y acelerante
Tipo F	Reductor de agua de alto rango
Tipo G	Reductor de agua de alto rango y retardante
Tipo F2	Superplastificante
Tipo G2	Superplastificante y retardante
Tipo AA	Modificador del contenido de aire

2.2.3.-Diseño de concreto

El diseño de concreto consiste en la determinación de las características requeridas, las cuales pueden incluir: propiedades del concreto fresco y endurecido, así como la inclusión, exclusión o límites de componentes específicos. La elección de las características estará en función del uso que tendrá el concreto, así como las condiciones de exposición, tamaño y forma de los elementos y las propiedades físicas del concreto requeridas para la estructura.

Por otro lado, el proporcionamiento de la mezcla se refiere a la determinación de las cantidades necesarias de cada uno de los componentes para que se logre cumplir con las características requeridas [18]. Las mezclas de concreto deberán cumplir los siguientes requisitos básicos:



1. La mezcla en estado fresco deberá tener la trabajabilidad, consistencia y cohesividad que permitan su adecuada colocación en la cimbra. Esta mezcla deberá estar libre de segregación y tener una exudación mínima.
2. La mezcla en estado endurecido deberá tener las propiedades especificadas en función del empleo que tendrán la estructura.
3. El costo del concreto deberá ser el mínimo compatible con la calidad deseada [28].

En el diseño de una mezcla, el factor determinante para cumplir los requerimientos especificados es la relación agua/cementante (A/C), que es simplemente la masa del agua dividida por la masa del material cementante (cemento Pórtland, cemento adicionado, ceniza volante, escoria, humo de sílice y puzolanas naturales. Este valor debe ser el menor valor necesario para resistir las condiciones de exposición anticipadas. Cuando la durabilidad no es el factor que gobierne, la elección de la relación agua/cementante se debe basar en los requisitos de resistencia a la compresión [18].

2.2.4.- Trabajabilidad

Rivva López (2000) [28] define a la trabajabilidad como la facilidad con la cual una cantidad determinada de materiales puede ser mezclada para formar el concreto, y posteriormente, manipularlo, transportarlo y colocarlo con el mínimo trabajo y máxima homogeneidad.

Los factores que influyen en la trabajabilidad del concreto son: el método y la duración del transporte; la cantidad y características de los materiales cementantes; la consistencia del concreto; tamaño, forma y textura superficial de los agregados finos y gruesos; el aire incluido (aire incorporado), la cantidad de agua; la temperatura del concreto y del aire y los aditivos.

Las propiedades relacionadas con la trabajabilidad incluyen consistencia, segregación, movilidad, bombeabilidad, exudación y facilidad de acabado. La consistencia es considerada un buen indicador de trabajabilidad. El revenimiento es una medida de la consistencia de la mezcla y es medido mediante el cono de Abrams, tal y como se indica en la norma [29].



2.2.5.-Resistencia

La resistencia del concreto es comúnmente considerada la propiedad más importante, aunque en muchos casos prácticos otras propiedades son más importantes, tales como: durabilidad, impermeabilidad y estabilidad volumétrica. No obstante, la resistencia nos ofrece un panorama general de la calidad del concreto debido a que está directamente relacionada con la estructura de la pasta de cemento. Los factores que influyen en la resistencia del concreto son: relación A/C, grado de compactación y edad; relación agregado/cemento, propiedades de los agregados y la interface agregado-pasta [20].

La resistencia a la compresión se puede definir como la medida máxima de la resistencia a la carga axial de especímenes de concreto y usualmente es medida en Megapascales (MPa) o kg/cm^2 a la edad de 28 días. Los concretos para uso general tienen una resistencia a compresión entre 20 y 40 MPa.

La resistencia a flexión o el módulo de ruptura se usa en el diseño de pavimentos u otras losas (pisos, placas) sobre el terreno. Su medición no está fácil como la de resistencia a la compresión, razón por la cual es poco común su determinación. Sin embargo, existe una correlación entre la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión. La segunda es de 0.7 a 0.8 veces la raíz cuadrada de la primera en MPa o de 1.99 a 2.65 veces la raíz cuadrada en kg/cm^2 . La norma mexicana [30] establece los métodos de prueba y procedimientos de cálculo para la flexión del concreto.

2.2.6.-Durabilidad

Sarja & Vesikari (2005) [31] definen la durabilidad como la capacidad de un edificio, un ensamblaje, un componente, una estructura o un producto para mantener un rendimiento mínimo durante al menos un tiempo determinado bajo la influencia de factores de degradación. De acuerdo con esto, puede decirse que un concreto durable debe conservar su forma original, calidad y condiciones de servicio cuando sea expuesto al ambiente.



La falta de durabilidad puede ser causada por agentes externos provenientes del medio ambiente o por agentes internos dentro del concreto. Estas causas pueden ser físicas, químicas y mecánicas. Las primeras pueden provenir de la acción del hielo y las diferencias entre las propiedades térmicas del agregado y la pasta de cemento, mientras que las mecánicas están asociadas a la abrasión. Finalmente, las causas químicas, tales como: ataque por sulfatos, ácidos, agua de mar y cloruros, los cuales inducen a la corrosión electroquímica del acero de refuerzo. Para que ocurra el ataque, estas sustancias deben estar dentro del concreto, por tanto, estos agentes deben penetrar a través del concreto, lo cual puede lograrse si el concreto es permeable. De acuerdo con esto, la permeabilidad del concreto es el factor a controlar si requiere que el concreto sea durable [20]. Kosmatka *et al* (2004) mencionan que la permeabilidad del concreto es afectada por la relación A/C, el grado de hidratación del cemento y el periodo del curado húmedo. La disminución de la permeabilidad aumenta la resistencia al congelamiento y deshielo, resaturación, penetración de iones sulfatos y cloruros, así como otros ataques químicos que degradan al concreto.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, si se busca elaborar un concreto durable deberá controlarse la permeabilidad del concreto, la cual está en función de la porosidad efectiva, misma que afecta la resistividad eléctrica del material y velocidad de pulso ultrasónico. Tomando en cuenta estas consideraciones dichos parámetros pueden ser usados como indicadores de durabilidad. Enseguida se da una breve descripción de estas propiedades.

Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material, y corresponde al recíproco de su conductividad. Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del mortero y en menor grado, de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa en función de variables tales como: el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras. Su unidad de medida es el $K\Omega\text{-cm}$ u $\Omega\text{-m}$. En cuanto a materiales y equipos puede efectuarse en el laboratorio sobre testigos de concreto extraídos de la estructura o directamente sobre la estructura en campo [32].



La resistividad eléctrica del concreto puede variar en un amplio intervalo, de 10^1 a $10^5 \Omega\cdot m$. En general, la resistividad eléctrica del concreto aumentará con el tiempo. Los aumentos serán mayores para el curado al aire que el curado húmedo. [33].

No existe un acuerdo de carácter general entre los diferentes investigadores acerca del nivel límite de resistividad eléctrica por encima del cual el riesgo de corrosión de las armaduras puede ser considerado despreciable. Sin embargo, la práctica ha demostrado que se puede utilizar como criterio general los mostrados en la Tabla 7.

Tabla 7.- Riesgo de corrosión de acuerdo con el valor de resistividad [34]

Resistividad eléctrica $k\Omega\cdot cm$	Riesgo de corrosión
100-200	Muy bajo
50-100	Bajo
10-50	Moderado
<10	Alto

Deberá tenerse en cuenta que la resistividad es sólo uno de los parámetros que controla la velocidad de corrosión del acero de refuerzo en el concreto, por lo tanto no podrá considerarse como único criterio para definir o prever un posible daño sobre la estructura [35].

Velocidad de pulso ultrasónico

Este método es una alternativa de NDT para evaluar la calidad del concreto, la cual se ha utilizado desde hace aproximadamente 50 años. La idea básica del método de velocidad de pulso ultrasónico es establecer que la velocidad de un pulso de onda de compresión a través de un medio depende de las propiedades elásticas y de la densidad del medio [36].

La velocidad de pulso ultrasónico es la relación que existe entre la distancia de viaje a través del concreto de una onda ultrasónica y el tiempo que tarda en recorrerla. La determinación de la velocidad de pulso ultrasónico nos da una idea de la homogeneidad del material, la cual es una cualidad del concreto por lo la cual sus componentes aparecen regularmente distribuidos en toda



su masa, de manera tal que se encuentre en toda ella, uniformidad de características, estructura, composición y propiedades físicas, mecánicas y químicas [35].

La velocidad de pulso para un concreto ordinario es típicamente de 3700 a 4200m/s. En la Red temática DURAR se presentan los criterios de evaluación para determinar la calidad del concreto, los cuales son presentados en la Tabla 8.

Tabla 8.- Calidad del concreto de acuerdo con la Red DURAR [35].

Velocidad de propagación (m/s)	Calidad del concreto
<2000	Deficiente
2001-3000	Normal
3001-4000	Alta
>4000	Durable

Absorción capilar

La absorción capilar se considera la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los capilares cuando el concreto se encuentra en contacto con agua líquida. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua y por tanto a los agresivos ambientales. Según la Red Temática DURAR, el ensayo de absorción capilar puede realizarse siguiendo el método propuesto por Göran Fagerlund [37] que describe la cinética de la absorción capilar de morteros y hormigones a través de 3 coeficientes: resistencia a la penetración del agua (m), coeficiente de absorción capilar (K) y porosidad efectiva ($\epsilon\epsilon$). Los criterios de evaluación establecidos por esta Red temática indican que para un concreto durable, es decir, con una relación A/C < 0.4, se recomienda:

- Sorción capilar $S \leq 3\text{mm/h}^{1/2}$ ($5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^{1/2}$) para espesor de recubrimiento de 30mm en ambientes severos; en medios menos severos puede ser hasta $6\text{mm/h}^{1/2}$ ($10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$). Si el espesor de la cubierta se incrementa, la sorción capilar puede modificarse proporcionalmente.
- En cuanto al porcentaje de porosidad:



$\leq 10\%$	Indica un concreto de buena calidad y compacidad
10-15%	Indica un concreto de moderada calidad
$> 15\%$	Indica un concreto de durabilidad inadecuada

2.3.-Análisis de ciclo de vida

2.3.1.- Generalidades

Hoy en día, el desarrollo sostenible es uno de los principales tópicos de las agendas nacionales e internacionales. Se requieren muchas cosas para conseguirlo, pero sobre todo se requiere el rápido mejoramiento en eco-eficiencia, o en la eficiencia del uso de la energía y del amplio rango de materiales tomados de la naturaleza, así como la minimización de los residuos [38]. Con la finalidad de alcanzar el desarrollo sostenible se han desarrollado diversas herramientas de gestión ambiental, cuya finalidad es suministrar información cuantificable para alcanzar dicho objetivo [1].

El ACV es una herramienta analítica que captura los impactos ambientales en general de un producto, proceso o actividad humana desde la adquisición de la materia prima, pasando por el uso y producción, hasta la gestión del residuo [4]. En la Figura 5 son presentadas de manera esquemática las etapas del ciclo de vida de un producto, es decir, las etapas por las que pasa de la cuna a la tumba.

Materia prima	Producción	Distribución	Uso	Fin de vida
<ul style="list-style-type: none">•Se refiere a la obtención de los materiales requeridos para el producto o servicio.	<ul style="list-style-type: none">•Se refiere a la transformación de las materias primas y al ensamblaje del producto.	<ul style="list-style-type: none">•Se refiere a la obtención del producto por parte del usuario final.	<ul style="list-style-type: none">•Se refiere a la aplicación que el usuario final da al producto o servicio.	<ul style="list-style-type: none">•Se refiere a la disposición que tendrá el producto o servicio cuando haya terminado su vida útil.

Figura 5.- Etapas del ciclo de vida de un producto [5].



La metodología de ACV intenta identificar, cuantificar y caracterizar los diferentes impactos ambientales potenciales, asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto. Estos impactos son evaluados por un amplio rango de tipos de impacto, tales como agotamiento de recursos, daño a la salud humana y a los ecosistemas, cambio climático, acidificación y eutrofización. Originalmente, el ACV era únicamente una forma de comparar las bondades ambientales de productos; sin embargo, hoy en día, se ha convertido en un método estandarizado que proporciona bases científicas sólidas para la sostenibilidad ambiental en la industria y el gobierno [39]. Lehtinen *et al* (2011) [1] menciona que el ACV tiene las siguientes aplicaciones: desarrollo y mejoramiento de un producto, identificación de productos o servicios más sustentables, eco-etiquetado y formulación de políticas y comercialización. Romero Rodríguez (2003) indica que la principal función del ACV es la de brindar soporte en la toma de decisiones relacionadas con productos o servicios; y más específicamente, la de conocer las posibles consecuencias ambientales relacionadas con el uso de un producto o con la configuración y utilización de un producto.

Si bien el ACV tiene varias aplicaciones, al igual que todas las metodologías presenta algunas limitaciones, tales como: transparencia insuficiente de los resultados, los cuales pueden dificultar la utilización de estudios existentes como fuente de información y comparaciones [5]. También es importante mencionar que el tipo de información que proporciona un ACV, es meramente un indicador [38].

2.3.2.- Fases

De acuerdo con la norma [40], el ACV considera una serie de fases de trabajo interrelacionadas, que siguen una secuencia más o menos definida. Las fases que comprende esta metodología son:

1. Definición de objetivos y alcance. En la definición de objetivos se incluye la razón por lo cual se hace el ACV, a quién va dirigido, así como la aplicación pretendida; mientras que el alcance implica establecer los límites del sistema, así como el nivel de detalle.



2. Análisis de inventario de la entrada de materiales y energía, así como emisiones ambientales. En esta fase se trata de recabar la información necesaria para cumplir los objetivos del ACV mediante el inventario de los datos de entrada y los de salida del sistema estudiado. Las posibles fuentes de información incluyen mediciones en el sitio de producción, bases de datos existentes e investigaciones bibliográficas.
3. Evaluación de los impactos ambientales potenciales asociados con las entradas y emisiones. El propósito esta fase es convertir los resultados del análisis de inventario en impactos ambientales relacionados-efectos en el uso de los recursos naturales, ecosistemas y salud humana. Hay 2 pasos obligatorios en la evaluación de impacto: la clasificación y la caracterización. El primero paso consiste en dividir los resultados del análisis de inventario en categorías de impacto, por ejemplo calentamiento global, acidificación, y toxicidad humana. En la caracterización, el impacto potencial de cada emisión o uso de recurso es estimado, usando ciertos factores científicos. Los 2 pasos restantes de esta fase, la normalización y ponderación, son opcionales. La normalización coloca a los impactos estimados en un contexto apropiado; mientras que la ponderación permite decidir cuáles impactos son más importantes, asignando pesos de importancia a cada impacto.
4. Interpretación de los resultados. Esta es la fase final de la metodología de ACV, en donde los resultados tanto de análisis de inventario como de evaluación de impacto son resumidos y discutidos para proporcionar fundamentos para conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones, en función dela definición de objetivos y alcances [5].

Es importante mencionar que la metodología de ACV es muy dinámica, en la cual puede pasarse de una fase a otra las veces que sea necesario con la finalidad de cada una de las etapas quede bien definida.



2.3.3.- Métodos

Los métodos difieren en las categorías de impacto que cubren, la selección de indicadores, y su enfoque geográfico. De acuerdo con la guía elaborada por el Institute for Environment and Sustainability (2010) y publicada por la Unión Europea, el impacto de las áreas de protección que deben considerarse son: salud humana, ecosistema y recursos naturales [6].

Los métodos de análisis de impacto ambiental están compuestos por conjuntos de procedimientos cuyo objetivo es identificar, predecir e interpretar los efectos e impactos en el ambiente como consecuencia de acciones propuestas. Los métodos para hacer un ACV se clasifican en 3 tipos:

1. Método clásico. En este método el análisis de cada categoría de impacto se hace en el punto medio. El objetivo es modelar cuantitativamente el impacto en el punto mencionado. Los puntos medios del efecto invernadero, la reducción de la capa de ozono y la acidez se convierten en porcentaje de impacto, después se hace el análisis ambiental general. Esta metodología intenta disminuir las incertidumbres de los otros métodos que consideran un simple indicador para cada tipo de sustancia. Los métodos CML 2002 y EDIP pertenecen a esta categoría.
2. Métodos orientados a daños. El objetivo de éstos es modelar cuantitativamente hasta llegar a un indicador final. Las categorías de impacto o los puntos medios se convierten en un indicador individual que puede ser añadido como un resultado simple de impacto. Muchas veces, estos métodos presentan altas incertidumbres; sin embargo, para el análisis de productos es conveniente debido a la facilidad de comparación que proporciona. Dentro de esta categoría se encuentran el Eco-indicator 99 y EPS 2000.
3. Método combinado. Su objetivo es reducir las incertidumbres de los métodos orientados a daños usando cuatro grupos de indicadores ambientales, debido a esto los enfoques son más suaves y con esto se deducen errores. El IMPACT 2002+ es un ejemplo de esta metodología.

La Tabla 9 muestra la comparación entre los diferentes métodos contemplados en un ACV.



Tabla 9.- Comparación entre métodos para realizar un ACV [41].

Criterio	CML	EDIP	Eco-indicator 99	EPS 2000	Impact 2002+
Comparación de productos	+	+	++	++	+
Fácil entendimiento de los datos generados	+	+	++	++	+
Fácil adquisición de la información en el método	+	+	++	+	+
+ Cumple los requerimientos parcialmente					
++ Cumple los requerimientos integralmente					

2.4.- Análisis de costos

El análisis de costo es simplemente, el proceso de identificación de la calidad y cantidad de los recursos económicos necesarios para llevar a cabo un proyecto. Dicho análisis no sólo ayuda a determinar el costo del proyecto y su mantenimiento sino que también sirve para determinar si vale o no la pena llevarlo a cabo [42]. El costo de cualquier producto o proyecto está íntimamente ligado con el tiempo y la técnica empleada para su producción o ejecución. Dado que el análisis de un costo es, en forma genérica la evaluación de un proceso determinado, su análisis será: aproximado, específico y dinámico. El análisis de costo puede elaborarse inductiva y deductivamente. Los principales aspectos a considerarse son: materiales, equipo y recursos humanos [43].

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, para hacer un correcto análisis de costo de algún producto o proyecto es fundamental el conocimiento del proceso de productivo, para que sean tomados en cuenta todos los gastos implicados en cada uno de los procesos. Por ejemplo, el costo de un concreto deberá estar constituido por: costo de los agregados, cementante, agua, y aditivos; costo del equipo de mezclado y mano de obra. A su vez, el costo de los agregados implica costos de extracción, explosivos, equipo, etc.



En el área de la construcción, la estimación de costos puede hacerse por distintos métodos, los más conocidos son mencionados en la Tabla 10.

Tabla 10.- Métodos de estimación de costos [44].

Método	Precisión	Tiempo	Información
Orden de magnitud	± 35%	1-60 minutos	Muy poca
Paramétricos	± 30%	1-4h	Conceptual
Por fases	± 25%	1-2 días	Conceptual
Por elementos	± 20%	1-7 días	Conceptual/ anteproyecto
Precio Unitario	± 10%	3-4 semanas	Proyecto completo

Los primeros métodos son denominados conceptuales en virtud de que se emplean en etapas conceptuales de un proyecto: concepción, pre-inversión y anteproyecto. Estos exigen menos tiempo de elaboración, pero presentan una menor precisión o alta incertidumbre. Por dicha razón, cuando se requiere mayor precisión es utilizado el último método: precio unitario [44].



3.-ANTECEDENTES

La valorización de un residuo no es tarea sencilla, ya que implica entre otras cosas que el residuo susceptible de ser valorizado se desempeñe adecuadamente en el nuevo proceso productivo bajo criterios tecnológicos, ambientales y económicos. Martínez Molina *et al* (2015) [19] mencionan que el reuso del concreto demolido o colapsado para elaborar nuevas mezclas de concreto, cumple diversos objetivos, tales como: reuso de residuos sólidos, con lo cual se minimiza el daño al ambiente y a los humanos por la acumulación de estos; diseño, innovación y elaboración de nuevos materiales ecoamigables; conservación de los recursos naturales, debido a que la extracción de las canteras no es requerida; y disminución de la contaminación atmosférica, al darle un nuevo uso a un material que para su producción emitió CO y CO₂.

En los últimos años, varios países han desarrollado prácticas sostenibles mediante el reciclaje de diferentes materiales, entre estos el concreto y otros residuos de la construcción y demolición (RCD). Las tasas de reciclaje de concreto y RCD en Europa, EE.UU. y Japón son del 30.82 y 80% respectivamente. En el mismo informe también se menciona que los agregados reciclados representan entre el 6 y 8% del total de agregados utilizados en Europa [45]. En México según el DBGIR fueron reciclados el 13.5% de RCD generados en el Distrito Federal durante el 2007 [16].

Han sido realizadas diversas investigaciones sobre el desempeño mecánico y de durabilidad que presentan los concretos elaborados con agregados reciclados (AR). Las investigaciones hechas por Ho *et al* (2013) [46] muestran que el CR puede ser diseñado para lograr una resistencia a la compresión y módulo de elasticidad similares e incluso mayores que el concreto elaborado con agregados naturales; sin embargo, el CR presenta mayores contracciones por secado que el concreto convencional (CC), aunque permanecen dentro de los límites recomendados. Letelier *et al* (2014) [47] presenta 2 alternativas para el mejoramiento del desempeño mecánico de los agregados de concreto reciclado: la primera consiste en aumentar la cantidad de cemento empleado, mientras que la segunda consiste en someter a los AR al desgaste con la finalidad de retirar la mayor cantidad de motero adherido posible. Ambas alternativas mostraron resultados



prometedores, ya que el concreto con AR igualó e incluso superó la resistencia a la compresión del concreto convencional. También se consiguió disminuir la absorción del AR a través de la abrasión. Bergman (2015) [48] indica que el incremento en la relación agregados naturales/agregados reciclados generalmente ocasiona un decremento en la vida útil del concreto reforzado debido al incremento de la contaminación por cloruros; sin embargo, mediante el uso de adiciones de materiales cementantes suplementarios se puede incrementar la vida útil.

Guignot *et al* (2015) [49] hizo una comparación de las implicaciones ambientales de la distribución de AR procesados mediante fragmentación eléctrica y AR sin procesar, mediante un ACV; se encontró que los primeros presentaron un menor impacto en todas las categorías evaluadas. Dicho beneficio ambiental es atribuido a que las distancias de transporte son menores y por tanto, se reducen las emisiones a la atmósfera. De Schepper *et al* (2014) [50] realizaron un ACV para concreto elaborado con cemento completamente reciclable, utilizando como materia prima el concreto demolido. Al analizar su ciclo de vida y comparándolo con un concreto convencional, encontró que es posible reducir el calentamiento global potencial entre un 66 y 70% cuando se diseña un concreto de alta resistencia y bajo contenido de clínker, mientras que para un concreto de resistencia normal y contenido de clínker más alto, las reducciones pueden ser de 7 a 35%. Por su parte, Simion *et al* (2013) [51] utilizaron 3 métodos para evaluar el impacto de ciclo de vida (Eco-indicator 99, EDIP/UMIP y Demanda acumulada de energía) de agregados reciclados y agregados naturales. Los análisis indican que los impactos ambientales disminuyen alrededor de un 40% con el uso de AR.

Con respecto al aspecto económico, se ha reportado que en algunas obras civiles que se ha optado por el uso de agregados reciclados, éstos han representado un ahorro importante respecto al costo total de la obra. En otros casos, se ha presentado reducción en los costos de la gestión de desechos que van desde 29-90% cuando se tiene un programa de reciclaje para los residuos generados por la demolición de obras importantes [45].



4.-JUSTIFICACIÓN

Los residuos producto de la construcción y demolición representan uno de los más grandes volúmenes de residuos generados en el mundo. Se estima que el sector de la construcción usa el 50% de la materia prima del planeta y genera el 50% de sus residuos, por lo cual resulta crucial el desarrollo de nuevos materiales que sean más durables y sustentables [49]. La cantidad de RCD a nivel mundial asciende a 900 millones de ton/año [52], mientras que en México su generación en el 2010 fue de 6.1 millones aproximadamente [16]. De acuerdo con el DBGIR 2012, el concreto representa el 25% de los RCD. Usualmente se reconoce que no son peligrosos, pero su acumulación puede generar graves problemas ambientales, principalmente afectación del suelo. A pesar de que los RCD tienen alto potencial de reuso/reciclo, es necesario evaluar los procedimientos prácticos en términos de consecuencias ambientales [51].

Si bien el aprovechamiento del concreto producto de demolición ha sido ampliamente estudiado y llevado a la práctica con éxito en varios países desarrollados, tal es el caso de los pertenecientes a la Unión Europea y los Estados Unidos de América, en México no se ha logrado su valorización como agregados reciclados en la producción de un nuevo concreto debido en gran parte a que se cuenta con grandes depósitos de agregados naturales, y por otro lado, a que la mayoría de los estudios realizados se han enfocado únicamente a cuestiones de desempeño tecnológico, dejando de lado los aspectos ambientales y económicos.

De acuerdo con lo anteriormente mencionado, la presente investigación pretende hacer un análisis del concreto reciclado integrando los tres aspectos citados, mediante: el análisis de su desempeño físico-mecánico y de durabilidad, el análisis de ciclo de vida y un análisis de costos, y finalmente compararlo con los análisis hechos a un concreto convencional, elaborado con agregados naturales.



5.-HIPÓTESIS

La utilización de agregados reciclados en la elaboración de un nuevo concreto presentará grandes ventajas en el desempeño ambiental y económico respecto a un concreto elaborado con agregados triturados naturales, debido principalmente a que la extracción de material virgen será mínima y las distancias para su adquisición serán más cortas; sin embargo, su desempeño físico-mecánico y de durabilidad difícilmente será equiparable con el del concreto convencional.



6.-OBJETIVOS

6.1.- General

Analizar y comparar el concreto reciclado con respecto al concreto convencional de manera integral, tomando en cuenta criterios tecnológicos, ambientales y económicos con la finalidad de hacer una aportación importante para que se logre su valorización en México.

6.2.- Específicos

- Analizar propiedades físico-mecánicas y de durabilidad de los concretos reciclado y convencional.
- Evaluar los impactos ambientales de los concretos reciclado y convencional, mediante un análisis de ciclo de vida.
- Analizar los costos de producción de los concretos reciclado y convencional.



7.-METODOLOGÍA

7.1.- Materiales sujetos de estudio

Esta investigación se enfoca en el estudio del concreto reciclado, elaborado con agregado reciclado, el cual es un RME, que es generado en los procesos de construcción y demolición de obras civiles. Al mismo tiempo será evaluado un concreto convencional, elaborado con agregados naturales de la región, con la finalidad de hacer una comparación entre éstos y determinar si es factible la valorización del primero.

7.2.- Metodología

La metodología de esta investigación está conformada por 3 ejes principales: tecnológico, ambiental y económico, los cuales serán analizados como sigue:

- ❖ Tecnológico
 - Análisis de propiedades físico-mecánicas de los concretos objeto de estudio, a través de los ensayos de resistencia a la compresión y flexión.
 - Análisis de algunos parámetros de durabilidad, mediante los ensayos de porosidad efectiva, resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico.
 - Propuesta de calificación de desempeño tecnológico, basada en los criterios establecidos en las normativas correspondientes.
- ❖ Ambiental
 - Análisis de ciclo de vida de los concretos estudiados, mediante un método orientado a daños llamado eco-indicator 99, el cual proporciona indicadores de impacto ambiental para categorías como: extracción de recursos naturales, uso de suelo y potencial de emisiones.
- ❖ Económico
 - Análisis de costo de la producción de ambos concretos, mediante un análisis de precios unitarios.



En la Figura 6 se presenta de manera esquemática la metodología de este proyecto de investigación.

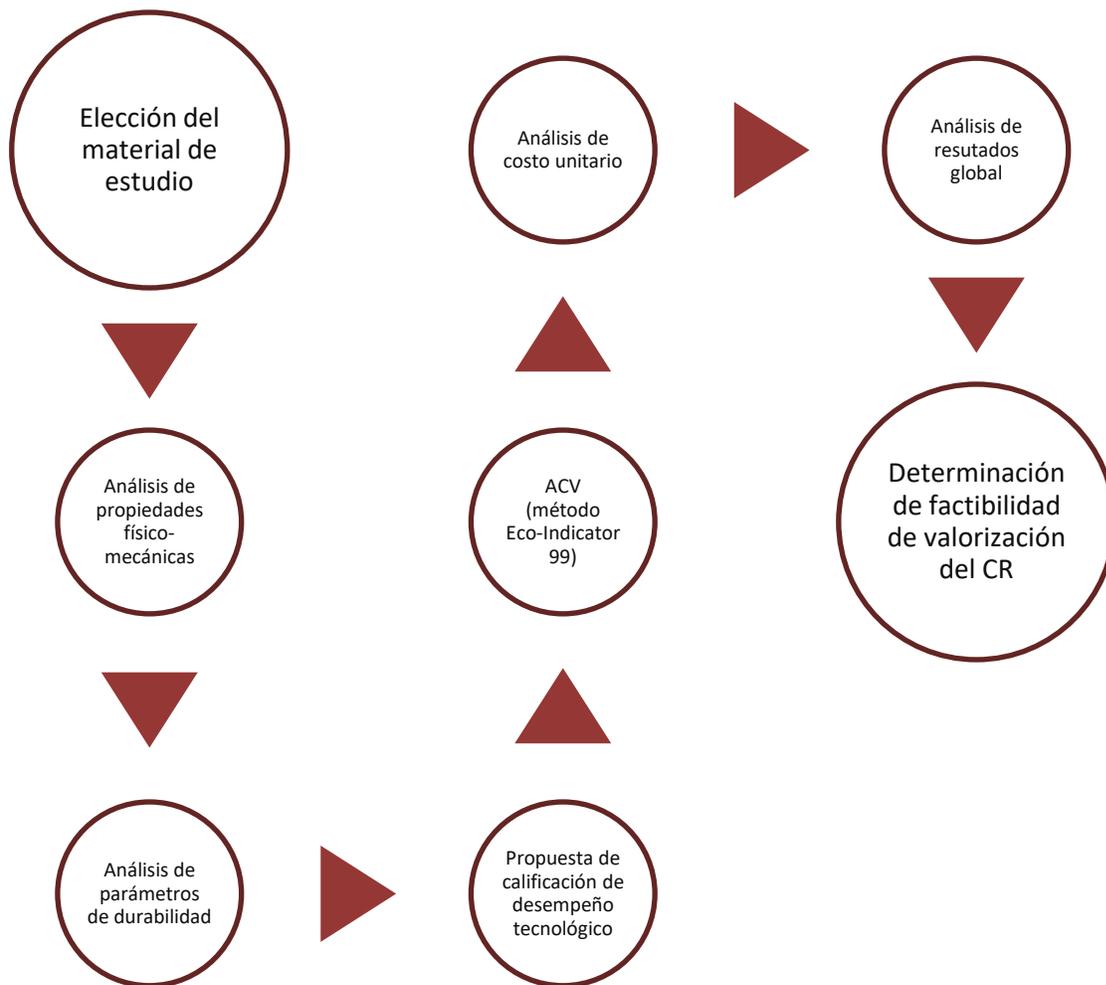


Figura 6.- Metodología del proyecto de investigación.



7.2.1.- Análisis tecnológico

En la sección 7.1 se menciona que la presente investigación se enfoca en un estudio comparativo entre el CR y el CC; sin embargo, ambos concretos pueden presentar muchísimas variaciones en sus propiedades y desempeño ante diferentes solicitaciones, las cuales dependerán de su diseño de mezcla y proporcionamiento. Por tanto, resulta necesario acotar cuáles son los materiales objeto de estudio. Tomando en cuenta lo anterior, este estudio se basa en los materiales estudiados por Contreras Marín (2016) [53], así que los datos presentados en esta sección fueron recopilados de su trabajo de investigación.

Las mezclas de CC y CR fueron diseñadas con $f'c=350\text{kg/cm}^2$, relación $A/C=0.48$ y revenimiento de 10cm, mediante el método del ACI. La mezcla CC está compuesta por cemento CPC 30R; agregado grueso natural (AN) proveniente de la planta de agregados triturados “la Roca” ubicado en la localidad Cuto del Porvenir, Tarímbaro, Michoacán; agregado fino natural (arena) proveniente de la planta de agregados naturales “San José” ubicado en Cerritos, Morelia, Michoacán; fluidificante de alto rango y agua de la red de agua potable del Laboratorio de Materiales “Luis Silva Ruelas” de la UMSNH. La mezcla CR fue elaborada con el mismo tipo de cemento, arena, fluidificante y agua que la mezcla CC, únicamente el agregado grueso fue sustituido por agregado grueso reciclado (AR) proveniente de la demolición de estructuras de concreto de Morelia, Michoacán.

En la Tabla 11 se presentan las características de los agregados utilizados en la elaboración de ambas mezclas, así como la normativa utilizada para el desarrollo del ensayo. Las diferencias más significativas entre los agregados gruesos naturales y reciclados se presentaron en los ensayos de absorción y densidad.

En la Tabla 12 se indican las cantidades necesarias para elaborar 1m^3 de ambos concretos, mismas cantidades que serán utilizadas en el inventario de ciclo de vida.



Tabla 11.- Caracterización de los agregados finos y gruesos.

Ensayo	Arena	AN	AR	Norma
Absorción (%)	1.56	1.42	8.68	NMX-C-165-ONNCCE-2004
M.V.S.S. (g/cm ³)	1.14	1.54	1.11	NMX-C-073-ONNCCE-2004
M.V.S.V. (g/cm ³)	1.52	1.65	1.2	NMX-C-073-ONNCCE-2004
Densidad (g/cm ³)	2.52	2.74	1.94	ASTM C128-04
Módulo de finura	3.52	No aplica		NMX-C-077-ONNCCE-1997
Tamaño máximo (in)	No aplica	3/4	3/4	NMX-C-111-ONNCCE-2004

Tabla 12.- Cantidades de materiales necesarios para elaborar 1m³ de concreto.

f'c (kg/cm²)	350.00	
Relación A/C	0.48	
Revenimiento (cm)	10.00	
PRODUCTO	CC	CR
Cemento (Kg)	427.08	450.00
Agua (Kg)	175.10	184.50
AN (Kg)	949.40	No aplica
AR (Kg)	No aplica	657.89
Arena (Kg)	675.09	795.29
Aditivo fluidificante (Kg)	2.82	2.97

NOTA: Las cantidades de agua fueron disminuidas en un 12% debido a la utilización de fluidificante.

7.2.1.1.- Análisis de propiedades físico-mecánicas

Las propiedades físico-mecánicas a tomar en cuenta son: esfuerzo de compresión y flexión, para lo cual fueron elaborados especímenes cilíndricos de 10x20cm y prismáticos de 15x15x60cm de acuerdo con la norma [54]. La resistencia a la compresión fue determinada de acuerdo con



lo establecido en la norma [55], a edades de 7, 28, 45, 90, 360, 450 y 500 días. La determinación de resistencia a la flexión o módulo de ruptura fue con base en la norma [30], a edades de 28, 45 y 90 días. La realización de ambos ensayos fue mediante una máquina universal de pruebas Forney con capacidad de 150T y aditamentos correspondientes para cada ensayo.

7.2.1.2.- Análisis de parámetros de durabilidad

Los parámetros a evaluar en esta sección son aquellos que son indicadores de la durabilidad del material en cuestión, tales como: resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico y porosidad efectiva. Los ensayos de resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico fueron determinados en especímenes cilíndricos en condiciones de saturación a edades de 7, 300, 450 y 500 días. La medición del primer ensayo fue determinada con un resistómetro marca Nilsson, modelo 400, que mide la resistividad en suelos y materiales porosos, siguiendo el método directo de acuerdo con lo establecido en la norma mexicana [34]. La medición de velocidad de pulso ultrasónico fue determinada con un equipo UPV E49, de acuerdo con la norma [56]. La porosidad efectiva fue determinada mediante el ensayo de absorción capilar, el cual fue realizado en especímenes cilíndricos de 10cm de diámetro y espesor de 5cm en condiciones de secado según lo indicado en el manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado [35].

7.2.1.3.- Propuesta de calificación de desempeño tecnológico

Como último punto del análisis tecnológico, se propone una clasificación paramétrica de los concretos evaluados, tomando en cuenta los parámetros establecidos en la normativa mexicana para los ensayos de resistencia a la compresión y módulo de ruptura, así como los rangos que establece la Red DURAR para desempeño por durabilidad.

7.2.2.- Análisis de ciclo de vida

7.2.2.1.- Definición de objetivo y alcance

El presente estudio tiene como objetivo principal hacer un análisis comparativo entre uno de los materiales de construcción más ampliamente utilizados a nivel mundial: el concreto convencional y un concreto reciclado, mediante el cálculo de los impactos potenciales generados



desde la extracción de la materia prima hasta el fin de vida, con la finalidad de aportar un estudio con bases científicas sólidas que sea de apoyo para lograr la valorización del concreto reciclado en México.

Sistema del producto

Existen diferentes tipos de concreto, así como diferentes dosificaciones del mismo según las especificaciones requeridas para el elemento constructivo en cuestión. De acuerdo con mencionado en la sección 2.2.2 del presente trabajo, los productos objeto de estudio son concreto simple, el cual es elaborado con cemento, agregados finos y gruesos, agua y en algunos casos aditivos. Sin embargo, debido a que el agregado grueso utilizado varía, se tendrán 2 sistemas del producto: el 1 que corresponde al concreto convencional y el 2 que corresponde al concreto reciclado.

En las figuras 7 y 8 son presentados los sistemas del producto CC y CR, así como los límites de los mismos. En dichas Figuras se aprecia que la única diferencia entre ambos sistemas es la adquisición del agregado grueso; en el primer caso es necesaria la explotación de algún banco de materiales, mientras que para obtener el agregado grueso reciclado sólo se necesita hacer la recolección de concreto colapsado o demolido y darle el tratamiento adecuado para su uso como agregado. Además, en el sistema del producto CR se evita la disposición final en vertederos, ya que los residuos son tratados para producir el agregado grueso reciclado.

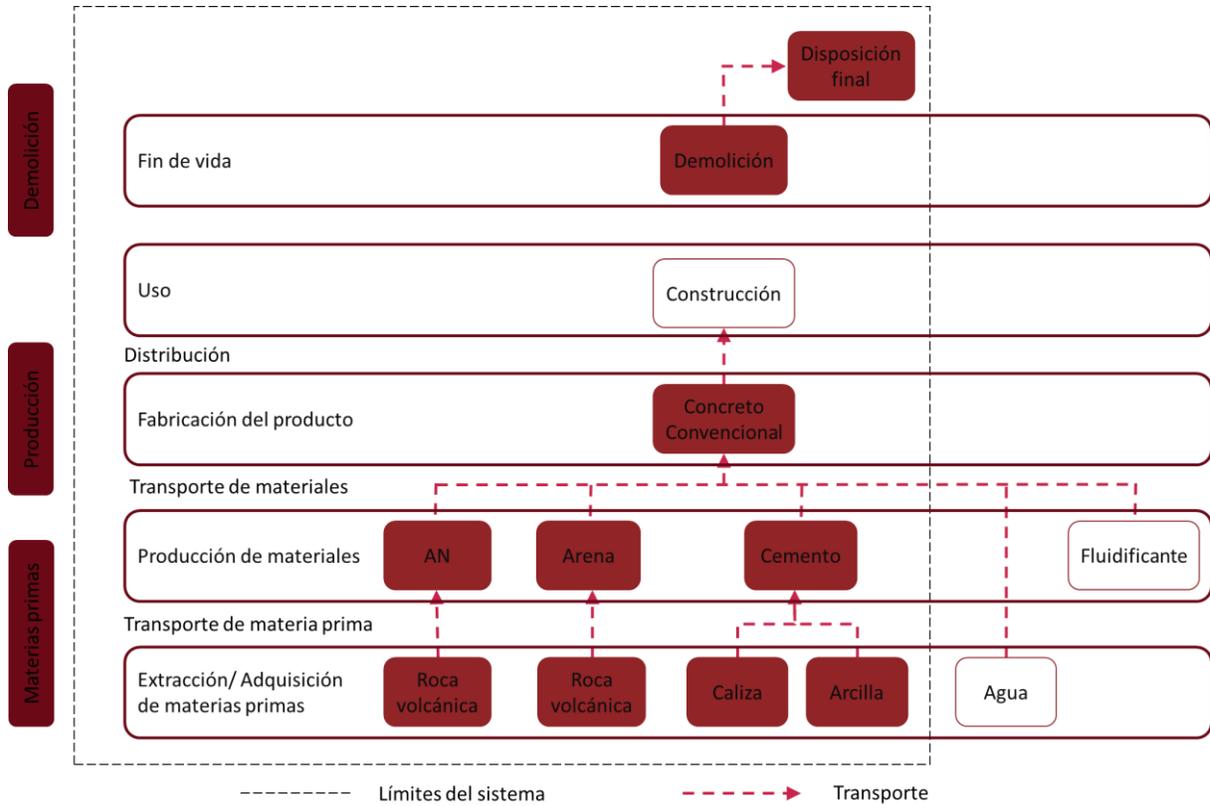


Figura 7.- Sistema del producto CC.

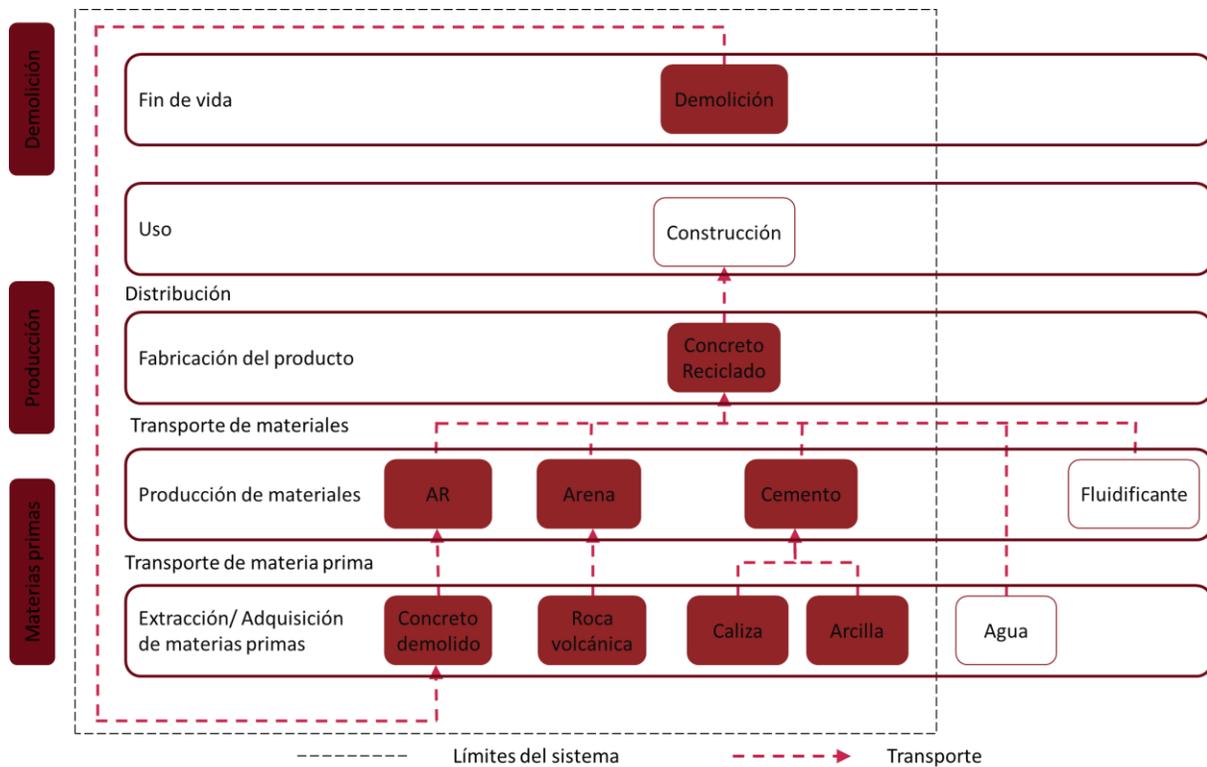


Figura 8.- Sistema del producto CR.

Función

El concreto es un material ampliamente utilizado en diferentes elementos constructivos, tales como losas, muros, trabes, pantallas, entre otros, en los cuales cumple funciones estructurales, de soporte y/o de barrera física.

Unidad funcional

El concreto es utilizado desde que es elaborado hasta que las características que lo conforman presentan cambios que comprometen su desempeño adecuado o hasta que es destruido, por tanto, la frecuencia de uso no es aplicable a este sistema.

La unidad funcional para ambos sistemas es:

1m^3 de concreto simple



De acuerdo con la unidad funcional, las cantidades de los distintos materiales a tomar en cuenta en el ACV son los mostrados en la Tabla 12 presentada en la sección 7.2.1.

Límites del sistema

La unidad funcional de este ACV incluye las etapas de extracción y/o adquisición, transporte de materia prima, producción de materiales y componentes, fabricación del producto final, demolición, reciclaje o disposición final. Si bien se trata de un ACV *de la cuna a la tumba*, la etapa de uso se excluye de este análisis debido a las múltiples aplicaciones que tiene el concreto y además sería igual para ambos productos.

Las entradas y salidas a evaluar son materias primas y energía utilizadas en la fabricación del concreto, mientras que las salidas a evaluar son el producto final (concreto) y las emisiones a la atmósfera generadas durante la fabricación del cemento Pórtland, principal constituyente del concreto; así como la derivadas del uso de combustible en la operaciones de transporte y utilización de maquinaria. Las entradas y salidas a evaluar de los procesos de producción del CC y CR son mostradas en las Tablas 13 y 14 respectivamente.

Tabla 13.- Entradas y salidas del proceso de producción del CC.

Proceso	Entradas		Salidas		
	Insumo	Tipo	Tecnosfera	Atmósfera	
Producción de concreto convencional	Materias primas	Cemento			
		AN			
		Arena			
		Agua		Concreto convencional	Emisiones, Residuos
	Energía	Fluidificante			
		Electricidad			
		Gasolina			
		Diésel			



Tabla 14.- Entradas y salidas del proceso de producción del CR.

Proceso	Entradas		Salidas	
	Insumo	Tipo	Tecnosfera	Atmósfera
Producción de concreto reciclado	Materias primas	Cemento		
		AR		
		Arena		
		Agua		Concreto reciclado
	Fluidificante			
	Electricidad			
	Energía	Gasolina		
		Diésel		

Los subprocesos a considerar en el ACV del proceso de producción de ambos concretos son:

- Materias primas. Involucra las actividades de extracción y/o adquisición de materias primas, así como la producción de materiales necesarias para producir un m^3 de concreto. La extracción y/o adquisición de materias primas se refiere a la explotación de la cantera, ya sea con o sin uso de explosivos, para obtener la materia prima necesaria para producir los agregados naturales y reciclados, así como el cemento Pórtland. Por su parte, la producción de materiales contempla las operaciones necesarias para obtener el material requerido. Básicamente incluye actividades de trituración y cribado para los agregados pétreos. La producción del cemento es un proceso más complejo, ya que incluye un gran número de operaciones, las cuales son: trituración, molienda, calcinación y clinkerización. La producción del fluidificante no será considerada debido a que está protegido por derechos de patente. Aunque la cantidad de agua es pequeña en comparación de los otros componentes y es prácticamente similar para ambos concretos, sí será tomada en cuenta con la finalidad de que el estudio esté más completo.
- Transporte. Se refiere al traslado de los materiales, desde el lugar de su producción hasta la planta de mezclado de concreto. También incluye el traslado del concreto demolido a la planta de reciclaje o sitio de disposición final.



-
- Producción. Se refiere a las actividades de dosificación, mezclado y colado para producir un m³ de concreto.
 - Demolición. Se refiere a las actividades necesarias para fragmentar una estructura cuando ésta llega al final de su vida útil o se requiere hacer algún cambio a la edificación.
 - Disposición final. Se refiere a depositar o confinar permanentemente residuos en sitios e instalaciones que estén diseñados para evitar que su liberación ocasione graves daños a la salud humana y el ambiente. Este proceso está contemplado para CC, mientras que para CR el impacto se deberá al vertido de residuos que es evitado, por lo que el impacto tendrá signo negativo.
 - Reciclaje. Se refiere al tratamiento dado al concreto demolido para convertirlo en agregado reciclado, el cual es valorizado e incluido en la cadena productiva de un nuevo concreto. Este proceso ya está contemplado en el de materias primas para CR.

7.2.2.2.- Inventario de ciclo de vida de concreto reciclado y convencional

Tomando en cuenta lo mencionado en la sección anterior, las entradas a considerar son las correspondientes a materias primas, cuyas cantidades ya fueron fijadas anteriormente por la dosificación del tipo de concreto, y consumo energético, el cual engloba a la energía y los combustibles utilizados por el equipo y/o maquinaria para procesar las materias primas y transformarlas en materiales de construcción.

En el subproceso 1, el consumo energético de las actividades de extracción y/o adquisición, así como de la producción de materiales fue determinado en una misma ficha debido a la forma en que fue recopilada la información. El consumo energético correspondiente al cemento fue obtenido del Informe estadístico 2013 que emite la Federación Interamericana del Cemento, mientras que el de los agregados fue calculado a partir de la información recopilada a través de las visitas a cada uno de las plantas involucradas, así como por las búsquedas hechas en las páginas de algunas instituciones de gobierno, fabricantes y proveedores de maquinaria. La producción de arena no requirió del uso de explosivos para su extracción, sólo fue necesaria la excavación, carga y acarreo de materia prima hasta el punto de clasificación (cribado) por



gravedad, por lo cual sólo fue considerado el consumo de diésel basado en el rendimiento del mismo para cada actividad involucrada (ver Figura 9).

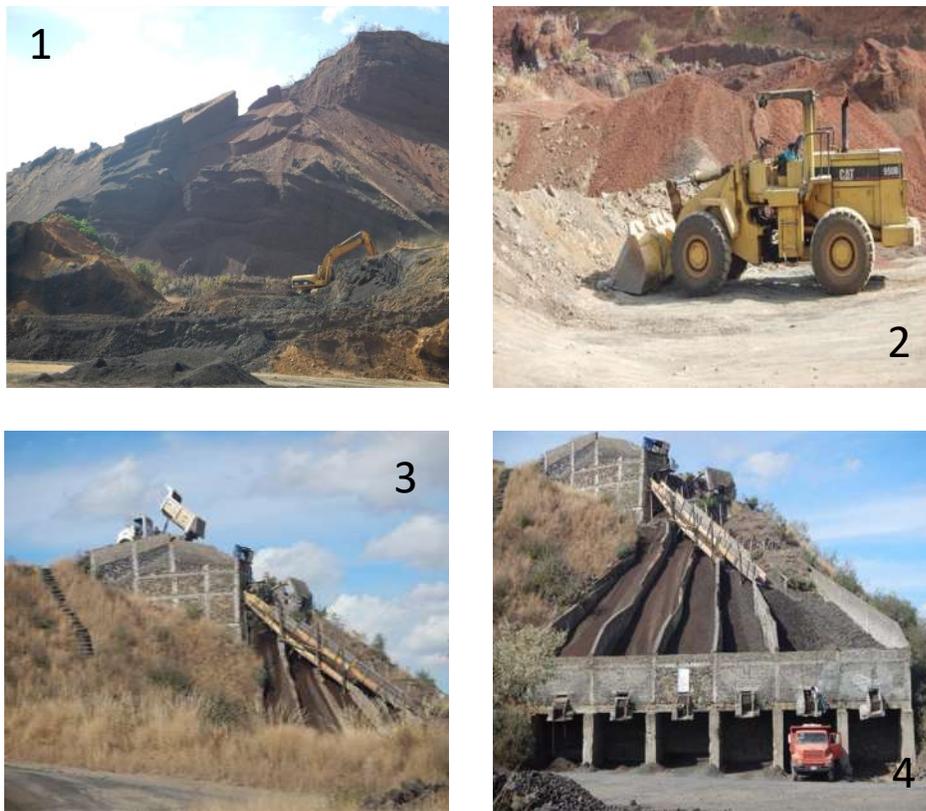


Figura 9.- Proceso de producción de arena volcánica.

Por su parte, la producción de agregado triturado natural requiere que la materia prima sea una roca más resistente como el basalto, el cual es extraído mediante barrenación y voladura. Es por ello que la producción de AN involucra más etapas que la producción de arena, tal y como puede verse en la Figura 10. De acuerdo con esto, las actividades contempladas en este proceso se agrupan en trabajo en la cantera y planta de agregados triturados. El primero grupo involucra la perforación para barrenos y las voladuras mediante el uso de explosivos para obtener la materia prima; mientras que el segundo incluye actividades de carga, acarreo, trituración y clasificación para producir AN, por lo cual fueron contemplados los consumos de diésel, explosivos y electricidad necesarios para llevar a cabo dichas actividades. Finalmente, la materia prima para



la producción de agregado reciclado es el concreto colapsado o demolido, el cual tiene que recibir algún tratamiento para que su valor económico sea restaurado.



Figura 10.- Proceso de producción de agregado grueso natural (AN).

En la Figura 11 puede observarse que la producción de AR únicamente son contempladas las actividades llevadas a cabo dentro de la planta de AR, las cuales son: excavación, carga, trituración primaria y secundaria, y clasificación. El cálculo del consumo energético del AR fue determinado tomando en cuenta la productividad y el rendimiento de combustible (diésel) de cada uno de los equipos o máquinas, así como de las características del agregado y el % de producción con respecto a la materia prima alimentada. El consumo energético de la demolición no fue tomado en cuenta en la adquisición de AR debido a que será tomado en cuenta en la etapa de fin de vida, la cual requiere hacerse sin importar si se trata de CC o CR.



Figura 11.- Proceso de producción de agregado grueso reciclado (AR).

El subproceso 2 corresponde al transporte, el cual se trata de un proceso unitario en el que muchos combustibles fósiles, tales como: el diésel y la gasolina, son consumidos por los vehículos. Las cargas de trabajo de los vehículos están en función del peso de los materiales transportados y por las distancias entre los lugares de extracción de materia prima y producción de materiales, o entre los lugares de producción de los materiales y el sitio de fabricación del concreto. Este proceso se calcula mediante unidades tkm, las cuales equivalen al producto de la distancia recorrida por las toneladas transportadas, independientemente del tipo de producto que sea transportado. En este trabajo de investigación se proponen 2 escenarios de transporte: el primero, en el que las distancias de transporte de AN y AR, así como las de RCD-CC y RDC-CR son las reales (calculadas); y el segundo, en el que supone que la distancias de AN y RCD-CC son iguales a las de AR y RDC-CR. Las cantidades de materiales transportados son las cantidades necesarias para producir un m^3 de concreto. Para el caso de los residuos de la



construcción y demolición se asumió que la masa volumétrica del concreto es de 2200kg/m^3 y las pérdidas no fueron consideradas. El cálculo de las distancias fue determinado mediante Google Earth Pro, para lo cual fue necesario ubicar cada uno de los sitios involucrados. En las Figuras 12, 13 y 14 es presentada la ubicación de cada uno de estos sitios, mientras que en las Tablas 15 y 16 son presentados los escenarios de transporte para CC y CR, respectivamente.



Figura 12.- Ubicación de sitios para CC.

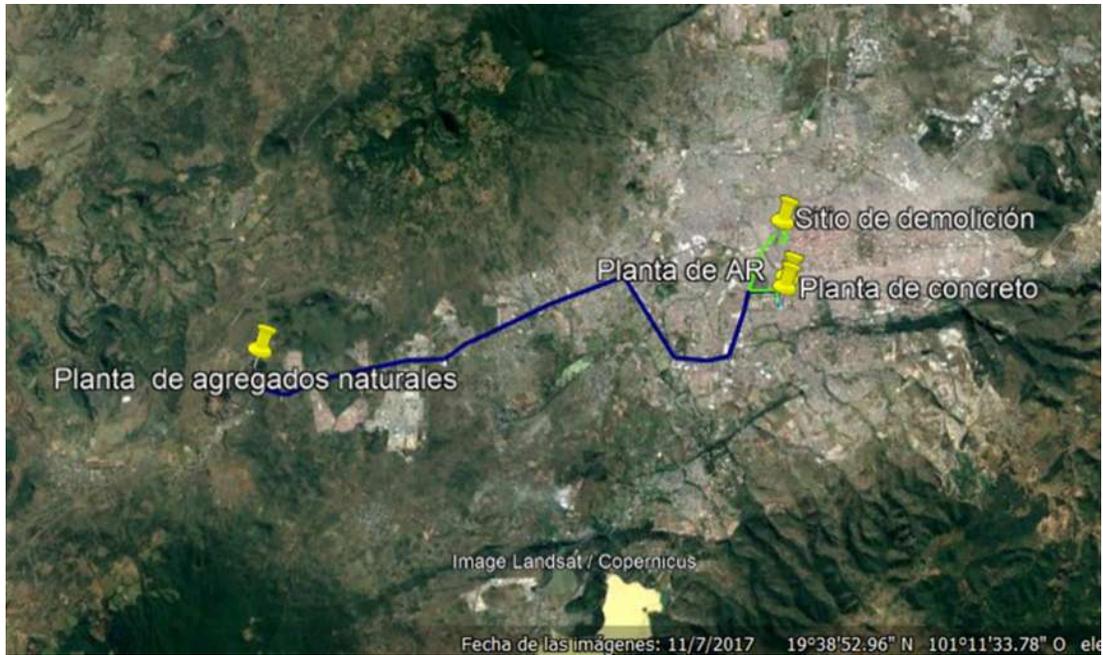


Figura 13.- Ubicación de sitios para CR.



Figura 14.- Ubicación de planta de cemento.



Tabla 15.- Descripción y escenarios de transporte de CC.

	Cantidad (t)	Descripción	Escenario 1		Escenario 2		Tipo de vehículo
			Distancia (km)	Transporte (tkm)	Distancia (km)	Transporte (tkm)	
CP	0.43	De planta de cemento a punto de venta.	231.00	98.64	231.00	98.64	Camión de 32t
CP	0.43	De punto de venta a planta de concreto.	1.64	0.70	1.64	0.70	Camioneta de 1.5t
AN	0.95	De planta de trituración a planta de concreto.	34.90	33.12	20.00	18.98	Volteo de 7m ³
Arena	0.68	De planta de agregados a planta de concreto.	18.00	12.15	18.00	12.15	Volteo de 7m ³
RCD-CC	2.20	De sitio de demolición a sitio de disposición final.	15.00	33.00	20.00	44.00	Volteo de 7m ³



Tabla 16.- Descripción y escenarios de transporte de CR.

	Cantidad (t)	Descripción	Escenario 1		Escenario 2		Tipo de vehículo
			Distancia (km)	Transporte (tkm)	Distancia (km)	Transporte (tkm)	
CP	0.45	De planta de cemento a punto de venta.	231.00	103.95	231.00	103.95	Camión de 32t
CP	0.45	De punto de venta a planta de concreto.	1.64	0.74	1.64	0.74	Camioneta de 1.5t
AR	0.66	De planta de agregados reciclados a planta de concreto.	0.30	0.20	20.00	13.16	Volteo de 7m ³
Arena	0.80	De planta de agregados a planta de concreto.	18.00	14.31	18.00	14.31	Volteo de 7m ³
RCD-CR	2.20	De sitio de demolición a planta de agregados reciclados.	4.00	8.80	20.00	44.00	Volteo de 7m ³

En el subproceso 3, que es el de producción de concreto, se asume que tanto el proceso para producir CC como el CR tienen el mismo consumo energético. La información para este caso fue obtenida mediante la visita a plantas de concreto y complementando con la información disponible en distintas páginas de fabricantes y proveedores de equipo de mezclado de concreto. Las actividades consideradas son carga de materiales, dosificación y mezclado de concreto. En la Figura 15 se aprecian los equipos básicos de una planta de mezclado de concreto, mientras que en la Tabla 17 se presentan los equipos contemplados y el correspondiente consumo energético.



El subproceso de demolición se hace tanto para CC como para CR, así que únicamente será presentada una ficha, la cual contempla el consumo de combustible de una excavadora utilizada para la demolición de concreto. El consumo energético fue calculado tomando en cuenta la productividad y rendimiento de combustible y es presentado en la Tabla 18.

Finalmente, para el proceso de disposición final no se tomará en cuenta ningún consumo de energía, ya que los RCD son simplemente vertidos.



Figura 15.- Planta de mezclado de concreto.



Tabla 17.- Consumo energético en la etapa de producción de 1m³ concreto.

	Máquina	Productividad (m ³ /h)	Diésel (L/h)	Electricidad (kWh)
Planta mezcladora de concreto				
Carga	Cargador frontal	25.00	6.00	
Dosificación	Dosificadora CamelWay HZS25	25.00		25.9
Mezclado	Mezclador JS500	25.00		26.1
Consumo de diésel (L/m ³)			0.24	
Consumo de energía eléctrica (kWh/m ³)				2.08
Consumo total de diésel (MJ/m ³)			9.14	
Consumo total de energía eléctrica (MJ/m ³)				7.488
Consumo energético total (MJ/m ³)		16.63		

Tabla 18.- Consumo energético en la etapa de demolición de 1m³ de concreto.

	Máquina	Productividad (t/h)	Diésel (L/h)
Sitio de demolición			
Demolición	Retroexcavadora	30.80	6.50
Carga	Caterpillar 528/Liebher	100.00	20.00
Consumo de diésel (L/t)		0.20	
Consumo de diésel (L/m ³)		0.45	
Consumo total de diésel (MJ/m ³)		16.98	
Consumo energético total (MJ/m ³)		16.98	



En la tabla 19 se resume el consumo energético de cada uno de los procesos involucrados para producir un m³ de concreto, tomando en cuenta las cantidades necesarias de cada uno de los componentes, así como el consumo por tipo de energía y el consumo total para cada tipo de concreto y escenario.

Tabla 19.- Resumen de consumo energético para cada proceso.

	Cemento (t)		Arena (t)		AN (t)		AR (t)		Concreto (m ³)	Demolición (m ³)	Transporte (para 1m ³ de concreto) tkm				Consumo energético total (para 1m ³ de concreto)			
	CC	CR	CC	CR	CC	CR	CC-1	CC-2			CR-1	CR-2	CC-1	CC-2	CR-1	CR-2		
	0.427	0.45	0.675	0.795	0.949	0.658	1.00	1.00										
Energía (MJ)																		
Gasolina											7.88	7.88	8.57	8.57	7.88	7.88	8.57	8.57
Diesel			65.53	77.18	374.68	45.13	9.14	16.98			3698.37	3650.36	2995.42	3729.61	4164.70	4116.69	3143.85	3878.03
Fósiles alternos	125.15	131.89													125.15	125.15	131.89	131.89
Biomasa	178.81	188.44													178.81	178.81	188.44	188.44
Eléctrica	164.48	173.34			13.89		7.49								185.86	185.86	180.83	180.83
Química					4.19										4.19	4.19	0.00	0.00
Térmica	1067.44	1124.94													1067.44	1067.44	1124.94	1124.94
TOTAL	1535.88	1618.61	65.53	77.18	392.77	45.13	16.63	16.98			3706.25	3658.24	3003.99	3738.17	5734.04	5686.03	4778.51	5512.70



Si bien el consumo energético fue determinado para la mayoría de procesos, se ha decidido utilizar información que no dependa únicamente del consumo energético y que sea más estandarizada. Por tanto, el inventario de materiales, transporte y energía que será utilizado para la evaluación de impactos del ciclo de vida es presentado en la Tabla 20.

Tabla 20.- Inventario de ciclo de vida para m³ de concreto convencional y reciclado.

	Cemento (kg)		Arena (kg)		AN (kg)		AR (kg)		Agua (kg)		Transporte (tkm)				Producción (m ³)	Demolición (m ³)	Disposición final (m ³)
	CC	CR	CC	CR	CC	CR	CC	CR	CC-1	CC-2	CR-1	CR-2					
ENTRADAS																	
Materiales (kg)																	
Cemento	427.00	450.00															
Arena			675.00	795.00													
AN					949.00												
AR						658.00											
Agua							175.10	184.50									
Transporte																	
Camioneta 1.5t									0.70	0.70	0.74	0.74					
Volteo 7m ³									78.27	75.13	23.31	71.47					
Camión de 32t									98.64	98.64	103.95	103.95					
Energía (MJ)																	
Diesel														9.14	16.98		
Eléctrica														7.49			
SALIDAS																	
Tecnósfera																	
Concreto														1.00			
Atmósfera																	
Concreto															1.00		
Concreto Vertido																	1.00



Una vez que se tiene el inventario de materiales, transporte y energía, se procede a obtener el inventario de sustancias emitidas y recursos gastados para estos subprocesos. Para ello es necesario, elegir una base de datos apropiada que incluya estos procesos unitarios o algunos similares y asignarlos a las actividades contempladas en los sistemas de producto. En este estudio, se eligió la base de datos Ecoinvent versión 3.3, debido a su confiabilidad y a que se tenía acceso a ésta.

En la Tabla 21 se presentan los modelos asignados a cada una de las actividades involucradas en el análisis objeto de estudio. Se buscó que la mayoría de los modelos tuvieran gran similitud con los procesos estudiados en este trabajo de investigación y que fueran para una misma ubicación geográfica. Respecto al punto de similitud de procesos se llegó a buena compatibilidad, ya que se pudo encontrar modelos muy acordes. Por ejemplo, el modelo para AN sí contempla la producción de grava triturada, la cual sería muy diferente si se tratara de grava redondeada, ya que la extracción de la primera requiere de mayor uso de energía y maquinaria, lo cual se traduce en emisiones mucho mayores; el consumo de diésel es derivado de las operaciones de los equipos y maquinaria para producir y/o demoler concreto, por tanto, el modelo utilizado es el correspondiente al diésel consumido por operación de maquinaria utilizada en edificación; el modelo para el cemento es precisamente acorde para un cemento tipo II que es el utilizado en este estudio; el modelo para agua es el correspondiente al agua del grifo que es la utilizada en la industria de la construcción para que cumpla las características de potabilidad; los modelos para disposición de residuos también corresponden a las 2 acciones propuestas de reciclaje y vertido según sea el caso; y el modelo de electricidad utilizado es el de alto voltaje que es utilizado en el sector industrial, al cual pertenece la industria de la construcción. Aunque el último punto no fue posible, sí se logró que en la comparación de materiales uno a uno se tuviera la misma ubicación. Por ejemplo, para los agregados y el diésel se tomaron medidas globales (GLO); mientras que para el cemento y el agua que son iguales para ambos concretos se adoptó una medida tomada para todos los países, excepto los europeos (RoW); en el caso del tratamiento de los residuos (vertido y reciclaje de concreto) se adoptó el modelo desarrollado por Suiza (CH), que era el único existente para comparar ambos escenarios;



y finalmente, en el caso de la electricidad se usó el modelo mexicano (MX), para que fuera más cercano al caso de estudio aquí abordado.



Tabla 21.- Modelos Ecoinvent 3.3 asignados a los subprocesos para producir m³ de CC y CR.

Proceso	Modelo	Ubicación geográfica	Descripción
Materiales			
Cemento	Cement production, alternative constituents 6-20% (1kg)	RoW	Incluye todas las actividades desde la cuna hasta la producción del cemento en el molino, es decir, no incluye actividades de empaque y administración.
Arena	Market for sand(1kg)	GLO	Incluye todas las actividades desde la cuna.
AN	Market for gravel, crushed (1kg)	GLO	
AR	Treatment of waste concrete, recycling (1kg)	CH	Incluye todas las actividades desde la cuna. Incluso energía para el desmantelamiento, emisión de partículas por desmantelamiento y manipulación.
Agua	Market for tap water(1kg)	RoW	Este conjunto de datos describe el promedio del agua del grifo disponible, en el usuario, a nivel global.
Transporte			
Camioneta 1.5t	Transport 3.5-7t (1tkm)	RoW	Incluye todas las actividades desde la cuna. Toma como datos de entrada la infraestructura de la red de camiones y carreteras, los materiales y esfuerzos necesarios para el mantenimiento de éstos y el combustible consumido en el vehículo por el viaje. La actividad finaliza con el servicio de transporte de 1 tkm y las emisiones de gases de escape y no escape en el aire, el agua y el suelo.
Volteo 7m ³	Transport 7.5-16t (1tkm)	RoW	
Camión de 32t	Transport 16-32t (1tkm)	RoW	
Energía			
Diésel	Diesel, burned in building machine (1MJ)	GLO	Incluye todas las actividades desde la cuna. Toma como entradas las máquinas de construcción para la infraestructura, el aceite lubricante y el consumo de combustible, y algunas emisiones atmosféricas medidas como salida.
Eléctrica	Electricity, high voltage, production mix (1kWh)	MX	Incluye todas las actividades desde la cuna.
Disposición final			
Concreto vertido	Treatment of waste concrete, inert to landfill (1kg)	CH	Incluye todas las actividades desde la cuna. No se hacen inventarios de emisiones directas de material inerte (lixiviado) por considerarse insignificantes. El módulo contiene solo intercambios para cargas específicas del proceso (energía, uso del suelo) e infraestructura.

Las abreviaturas para la ubicación geográfica son RoW (Resto del mundo), GLO(Global), CH (Suiza) y MX (México).



7.2.2.3.- Evaluación de impactos ambientales asociados al ciclo de vida (EICV) del concreto reciclado y convencional

El propósito de esta etapa es convertir los resultados de la fase de inventario de ciclo de vida en impactos ambientales potenciales a una categoría de daño. Existen diferentes metodologías para realizar la evaluación de impacto del ciclo de vida, pero como se mencionó anteriormente el método elegido para hacer esta evaluación es el método orientado a daños conocido como Eco-indicador 99 con perspectiva jerárquica y ponderación promedio (H, A). La finalidad de esta metodología es hacer una comparación entre las diferencias que existen entre sistemas y los componentes del mismo, mediante el cálculo de un valor único que indica el impacto ambiental total asociado a los efectos resultantes del ICV. Dicho valor es denominado ecoindicador y su unidad de medida es el ecopunto (Pt). En la Figura 16 se muestra una representación de la metodología Eco- indicador 99, donde se aprecia claramente cómo se llega a los indicadores de punto final.

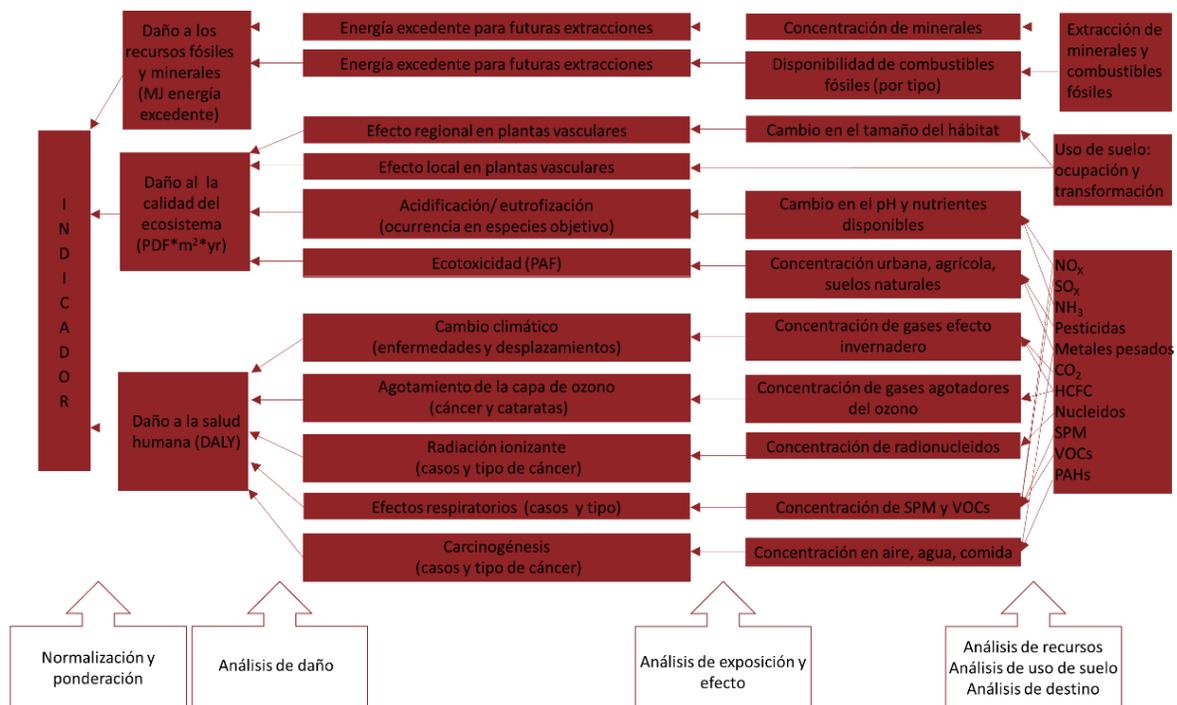


Figura 16.- Representación general de la metodología de análisis de ciclo de vida mediante Eco-indicador 99 [57].



El método Eco-indicator 99 contempla diversas categorías de impacto que representan indicadores de impacto de punto medio que pueden ser transformados en indicadores de daño de punto final, mediante la agrupación de los impactos en las categorías de daño que serán descritas enseguida.

Salud humana. Toma en cuenta que la salud de cualquier individuo, siendo un miembro de la generación presente o futura, pueda dañarse al reducir su expectativa de vida debido a una muerte prematura o al causar una reducción temporal o permanente de sus funciones corporales causada por emisiones de procesos industriales y agrícolas al aire, agua y suelo. Tomando en cuenta el conocimiento que se tiene, tales daños son ocasionados por: enfermedades infecciosas, cardiovasculares y respiratorias, así como el desplazamiento forzado debido al cambio climático; cáncer ocasionado por la radiación ionizante, el agotamiento de la capa de ozono y la liberación de químicos tóxicos en el aire, agua potable y alimentos; y daños oculares debido al agotamiento de la capa de ozono. Dichos daños a la salud son los más importantes causados por las emisiones de los sistemas de productos. Sin embargo, existen muchos otros daños que no están contemplados en esta categoría, debido a la poca información que se tiene y a que no pueden ser modelados [57]. Esta categoría de daño compara el tiempo vivido con discapacidad y el tiempo perdido debido a la mortalidad prematura. Se mide en DALYs (Años de vida ajustados por discapacidad), que es una índice que también es usado por el Banco Mundial y la Organización Mundial de la Salud y mide la cantidad total de mala salud, debido a la discapacidad y muerte prematura que se atribuye a lesiones y enfermedades específicas [58]. Atendiendo a lo mencionado anteriormente, dentro de esta categoría de daño se han desarrollado modelos para los efectos respiratorios y carcinógenos, de cambio climático, agotamiento de la capa de ozono y radiación ionizante, para los cuales son usados los pasos siguientes:

- ❖ Análisis de destino, que permite vincular una emisión (expresada como masa) a un cambio temporal en una concentración.
- ❖ Análisis de exposición, que relaciona la concentración temporal a una dosis.



- ❖ Análisis de efecto, que relaciona la dosis a un número de efectos en la salud, como el número y el tipo de cáncer.
- ❖ Análisis de daño, que vincula los efectos en la salud a DALYs, usando el número de años vividos con discapacidad (YLD) y el número de años de vida perdidos (YLL).

Calidad del ecosistema. Abarca la idea de que las especies no humanas no deberían sufrir cambios abruptos de sus poblaciones y distribución geográfica [58]. Los ecosistemas son muy complejos, por lo que resulta muy difícil determinar todos los daños infligidos sobre éstos. Se diferencia de la categoría de daños a la salud humana en que no concierne a un organismo, planta o animal individual. Además de que como se tienen diferentes grupos de especies representativas y niveles para determinar los efectos, no se tiene una unidad de daño uniforme para evaluar el daño al ecosistema. Más bien se utiliza la diversidad de especies como un indicador de la calidad del ecosistema. Por tanto, el daño al ecosistema se expresa como el porcentaje de especies que son amenazadas o desaparecidas de cierta área, durante cierto tiempo. Así que se tienen 2 indicadores, el primero que es la fracción de especies potencialmente afectadas (PAF) y es determinado con base en la información de toxicidad para organismos acuáticos y terrestres como los microorganismos, plantas, gusanos, algas, anfibios, moluscos, crustáceos y peces. El PAF es una medida para el estrés tóxico, y en efecto, no es un daño real. El segundo indicador es la fracción de especies potencialmente desaparecidas (PDF) y se usa para las categorías de impacto de acidificación, eutrofización y uso de suelo. El PDF es usado para expresar los efectos en las poblaciones de plantas vasculares en un área, y puede ser interpretado como la fracción de especies que tiene alta probabilidad de no existir en una región debido a condiciones desfavorables. Como las unidades PAF y PDF son muy diferentes, no se puede simplemente agregar el daño expresado como PAF y PDF. Tomando en cuenta varios registros de poblaciones de diferentes especies, se llegó a la conclusión de que del total de especies potencialmente amenazadas, sólo una décima parte es la que llegará a ser potencialmente desaparecida. Por tanto, para combinar ambas unidades se propone dividir los resultados de PAF entre un factor de 10 antes de que pueda ser añadido a los daños de acidificación/eutrofización y uso de suelo [57]. El daño a los ecosistemas tiene 2 enfoques



diferentes. El primero es para las emisiones tóxicas y las emisiones que cambian la acidez y los niveles de nutrientes, para lo cual se procede de la siguiente manera:

- ❖ Análisis de destino, que vincula emisiones a concentraciones.
- ❖ Análisis de efecto, que vincula concentraciones a estrés tóxico o incremento de los niveles de nutrientes o acidez.
- ❖ Análisis de daño, que vincula estos efectos al incremento de la PDF para plantas.

En el segundo enfoque el uso de suelo es modelado con base en la información empírica de la calidad de ecosistemas, como función del tipo de uso de suelo y el tamaño de la zona.

Recursos. Esta categoría está relacionada con el parámetro que indica la calidad de los recursos minerales y fósiles remanentes. En ambos casos, la extracción de estos recursos generará requerimientos de energía más altos para las extracciones futuras, por lo que el daños a los recursos se expresa como la energía excedente necesaria para extracciones futuras de minerales y combustibles fósiles [58]. El modelo para daño a los recursos se compone de 2 partes: la primera es la correspondiente a análisis de recursos que puede ser comparada con un tipo de modelación de análisis de destino inverso, es decir, la disminución en la concentración de los recursos es modelada; la segunda parte corresponde al modelo de daño real, donde las concentraciones reducidas se traducen en el concepto de energía excedente. Para el análisis de recursos minerales, el parámetro de calidad más importante es la concentración, ya que mientras menor sea la concentración, mayor será el esfuerzo para extraer el recurso. En cambio, para el análisis de combustibles fósiles, se utiliza el esfuerzo necesario para extraer el recurso.

De acuerdo con la normativa ISO 14044, para realizar la EICV es necesario llevar a cabo los siguientes pasos:

- 1. Selección de categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización**



Se entiende como categoría de impacto o punto medio a los efectos que provocan los procesos unitarios y flujos de los sistemas de producto sobre el medio ambiente. A este sistema causa-efecto se le conoce como mecanismo ambiental, y es el sistema que relaciona los datos del ICV y los transforma a impactos o daños ambientales a través de indicadores de categoría y modelos de caracterización según la metodología aplicada. En la Tabla 22 se presentan las categorías de impacto seleccionadas para este estudio de caso, las cuales están asociadas a las áreas de daño del método Eco-indicador 99 y que fueron mencionadas en la sección anterior, así como una breve descripción de la categoría y sus unidades correspondientes.

1. Clasificación

Consiste en asignar los resultados del ICV a las diferentes categorías seleccionadas mediante la identificación y correlación de todas las cargas ambientales a una o más categorías de impacto potenciales mediante los modelos de referencia.

2. Caracterización

Consiste en transformar los datos del ICV previamente clasificados en las sustancias equivalentes de sus respectivos indicadores de categoría, a través de los modelos seleccionados y factores de caracterización, los cuales expresan la fuerza de la sustancia medida en relación a una sustancia de referencia y convertirán las unidades del ICV a unidades de EICV [59]. En este caso de estudio la unidad a comparar es el porcentaje, que representa el grado de intervención de cada etapa del proceso objeto de estudio.



Tabla 22.- Categorías de impacto del método Eco-Indicator 99.

Categoría de impacto	Descripción	Unidades
Carcinogénesis	Toma en cuenta el efecto causado por la exposición a sustancias químicas que provocan anomalías en el material genético de las células y su propagación a través del cuerpo.	
Cambio climático	Esta categoría toma en cuenta las predicciones de los daños que serán causados por las emisiones actuales, principalmente de los gases de efecto invernadero que tienden a cambiar la temperatura del planeta.	
Radiación ionizante	Contempla los efectos en la salud causados por la liberación de radionucleidos de las centrales termoeléctricas a la atmósfera.	
Agotamiento de la capa de ozono	Se refiere a la disminución de los niveles de O ₃ estratosférico debido al incremento de los niveles de CFCs y Br, debido a la liberación de CFCs con un largo tiempo de residencia atmosférica, lo cual da como resultado un incremento en los niveles de radiación UV que es perjudicial para la salud humana.	DALY
Efectos respiratorios	Se refiere a los daños causados en el sistema respiratorio humano debido a la inhalación de sustancias orgánicas, inorgánicas y polvo presentes en el entorno. Los principales compuestos y partículas causantes de esto son O ₃ , SO _x , NO _x y las partículas con diámetro menor a 10µm (PM ₁₀) y 2.5µm (PM _{2.5}).	
Acidificación/ Eutrofización	La acidificación es causada por el retorno de SO _x y NO _x descargados en forma de lluvia ácida provocando la pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua; mientras que la eutrofización es ocasionada por la disminución de la concentración de oxígeno debido a un incremento anormal de nutrientes y de sales minerales que causa el crecimiento acelerado de la biomasa provocando la muerte de algunas especies.	PAF*m ² *yr
Ecotoxicidad	Se refiere a los efectos nocivos en los seres vivos causados por sustancias químicas como metales pesados (Cd, Pb y Hg) y compuestos orgánicos persistentes (dioxinas, furanos e hidrocarburos policíclicos aromáticos).	PDF*m ² *yr
Uso de suelo	Toma en cuenta la ocupación y/o transformación del suelo, el daño local y regional en el terreno ocupado y/o transformado por la realización de actividades.	
Consumo de minerales	Parte del hecho de que mientras la concentración de minerales sea menor, mayor será la energía excedente necesaria para extraer minerales en el futuro, por lo que la disponibilidad de este recurso en el futuro se verá comprometida.	MJ surplus
Consumo de combustibles fósiles	Toma en cuenta que la extracción de éstos provocará cambios abruptos en la calidad del recurso a medida que su disponibilidad cambie.	



3. Normalización

La finalidad de esta fase es determinar la contribución relativa de cada categoría de impacto con respecto al daño total causado por un sistema de referencia, además de que se resuelve la incompatibilidad de las unidades y posibilita la comparación de resultados entre categorías. En este paso los resultados del cálculo de daño son divididos por valor de referencia “normal”. Si bien este es un paso opcional al igual que la ponderación, resulta conveniente hacerlo debido a que facilita la interpretación de resultados. Como el método Eco-indicator 99 es desarrollado en Europa, se usarán valores de normalización europeos [57].

4. Ponderación

Este es el paso más crítico y controversial, ya que depende de los juicios de valor que permiten dar mayor importancia a problemas ambientales de acuerdo a criterios políticos, sociales y económicos de los panelistas involucrados [58]. Los resultados normalizados de los indicadores de categoría de impacto o de daños son multiplicados por un factor de ponderación, después se suman para obtener una calificación total [59]. En este caso de estudio la calificación final será medida en ecopuntos, que permitirán identificar cuáles etapas del proceso fueron más contaminantes, bajo una perspectiva jerárquica con ponderación promedio, es decir, que los porcentajes de ponderación para las categorías de daño a la salud humana, ecosistemas y recursos son 40,40 y 20%, respectivamente.

De acuerdo con lo anterior, es importante indicar que los factores de daño, normalización y ponderación utilizados en esta investigación son los establecidos en la metodología Eco-indicator 99 y con los cuales se obtuvieron los resultados de caracterización, normalización y puntuación única para cada uno de los tipos de concreto y escenarios correspondientes.

7.2.2.4.- Interpretación

Esta es la fase final del procedimiento de un ACV, en la cual los resultados de las fases de ICV y EICV son resumidos y discutidos como una base para la formulación de conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance planteados. En esta



fase se usa un procedimiento sistemático para identificar, calificar, revisar, evaluar y formular conclusiones basadas en los resultados. Dicho procedimiento se hace de manera iterativa entre las fases de interpretación y otras fases del LCA, y debe ofrecer resultados que sean consistentes con el objetivo y alcance definidos y que sean suficientes para formular conclusiones, explicar limitaciones y dar recomendaciones [40]. La interpretación permite identificar qué etapas y/o subprocesos del ciclo de vida son responsables de la mayor carga ambiental, por lo tanto, se logra identificar qué partes del sistema del producto necesitan ser mejoradas si se quiere reducir dicha carga ambiental. Además, cuando se trata de comparaciones entre productos, se puede determinar cuál presenta el mejor desempeño ambiental [60]. Uno de los pasos fundamentales de la interpretación es la identificación de aspectos positivos, la cual pretende estructurar los datos obtenidos en el ICV y EICV, de tal forma que se puedan detectar aspectos relevantes y emitir un juicio. La información suele estructurarse por etapas de ciclo de vida, por grupos e procesos unitarios, por grados de influencia, etc. Algunos aspectos significativos podrían ser datos del inventario (materiales, transporte, energía, emisiones, vertidos,..), categorías de impacto o procesos unitarios individuales [59].

7.2.3.- Análisis de costos

El análisis de costos incluye materiales, equipo y mano de obra. Sin embargo, en este análisis únicamente serán tomados en cuenta los materiales con lo que se obtendrá el costo directo. Para ello se procede de la siguiente manera:

1. Se identifican las cantidades de los materiales, así como sus propiedades por si el costo de éstos está en función de otra característica.
2. Se determina el precio unitario para cada uno de los materiales tomando en cuenta el costo de éstos en planta y el acarreo.
3. Se calcula el precio unitario para los consumibles del equipo y/o maquinaria utilizada.
4. Se calcula el costo directo para m³ de los concretos convencionales y reciclados para los escenarios de transporte contemplados.



8.-RESULTADOS Y DISCUSIONES

8.1.- Análisis tecnológico

8.1.1.- Análisis de propiedades físico-mecánicas

En las Figuras 17 y 18 se muestran los resultados promedio obtenidos en los ensayos de compresión y flexión, los cuales fueron hechos por triplicado. En la figura 17 se aprecia que ambos concretos presentan valores de resistencia a la compresión mayores a los de diseño a partir de los 28 días y su tendencia es creciente. Si bien puede notarse que el CC presenta valores mayores de resistencia a la compresión que el CR; dicha disminución no es significativa en la mayoría de los casos (diferencia < 10%), únicamente a edades de 360 y 450 esta diferencia es excedida (13.9 y 14.5% respectivamente).

En la figura 18 se muestra que el módulo de ruptura (MR) de ambos concretos está dentro del rango esperado a 28 días para concretos diseñados con un $f'c$ de 20 a 40MPa, los cuales han sido usados convencionalmente en el diseño de pavimentos [53]. En este ensayo la diferencia entre CC y CR no fue significativa en todos los casos (diferencia máxima = 1.6%). Además, el CR supera al CC a la edad de 45 días.

Los resultados obtenidos en los ensayos de compresión y flexión sugieren que el reemplazamiento de agregado grueso natural triturado por reciclado no afecta considerablemente el desarrollo de las propiedades físico-mecánicas, a pesar de que las características de éstos difieren considerablemente. Tomando en cuenta estos ensayos, podría decirse que el uso de CR puede ser una buena alternativa en la construcción de losas de pavimento rígido.

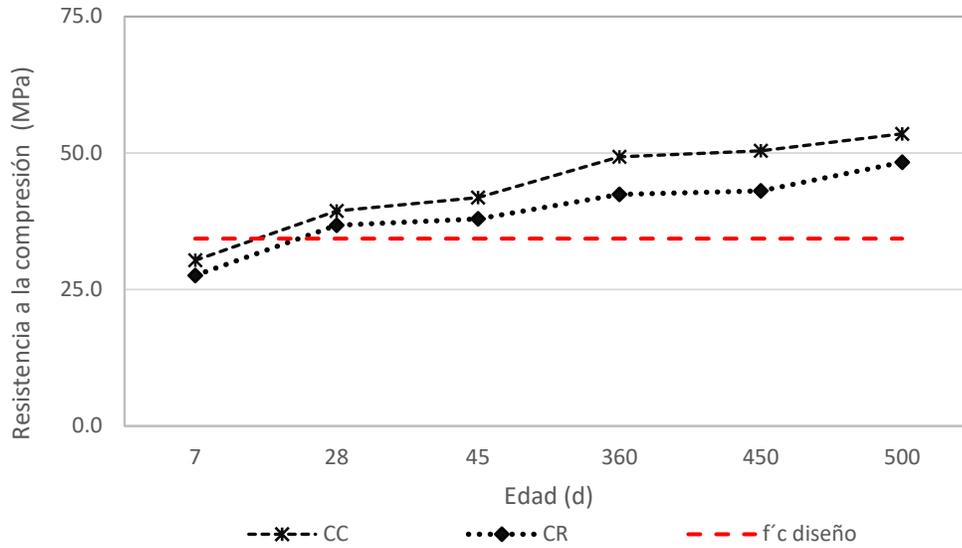


Figura 17.- Resistencia a la compresión de CC y CR.

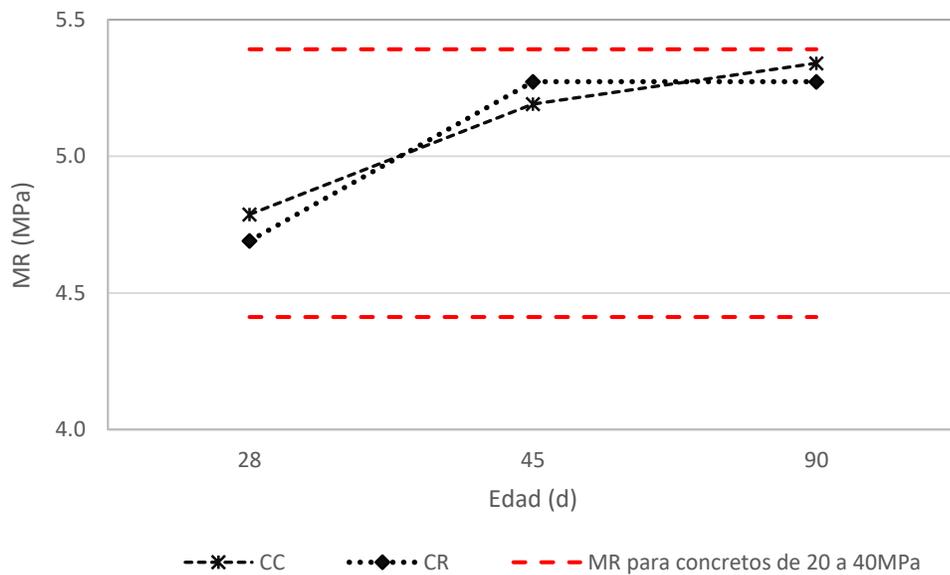


Figura 18.- Módulo de ruptura de CC y CR.



8.1.2.- Análisis de parámetros de durabilidad

Los resultados correspondientes a los ensayos de parámetros de durabilidad son mostrados en las figuras 19,20 y 21. En la figura 19 se aprecia que la resistividad eléctrica (ρ) incrementa considerablemente a medida que transcurre el tiempo (300 y 400% para CC y CR respectivamente). Además, se puede notar que ambos materiales se encuentran en el rango de riesgo de corrosión moderado a edades de 450 y 500 días, aunque el CR estuvo en la zona de alto riesgo hasta la edad de 300 días de acuerdo con los criterios de evaluación de la norma [34]. Sin embargo, el comportamiento del CR con respecto al CC no fue favorable, debido a que presenta resistividad eléctrica 26.4% inferior a la de éste.

En la Figura 20 se aprecia que el CC presentó valores mayores de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) que el CR en la mayoría de las edades de prueba, excepto a la edad de 450 días. Sin embargo, el comportamiento fue errático y la diferencia entre ambos concretos fue inferior al 10%, por tanto podría decirse que no fue significativa. Además de acuerdo con los criterios de evaluación de la Red DURAR, ambos concretos exhiben buenas propiedades, ya que sus valores de VPU corresponden a concretos durables y de alta calidad [35].

Finalmente, en la Figura 21 se muestra que la porosidad efectiva (ϵ_e) del CR (19.2%) es mayor que la del CC (13.9%), con una diferencia significativa de 27.6%. De acuerdo con los resultados mostrados y los criterios de evaluación de la Red DURAR, el CR presenta alto riesgo de corrosión, mientras que el CC se encuentra en el rango moderado.

De acuerdo con los parámetros evaluados en esta sección, puede decirse que el CC presenta mejores características de durabilidad que el concreto convencional. Si bien la durabilidad depende de los parámetros aquí evaluados, hay otro factor que es determinante: el ambiente al que estará sujeta la estructura. Dicho esto, aunque el CR evaluado en este trabajo no cumpla cabalmente con los parámetros asociados a la durabilidad, su uso no se descarta, ya que podría ser usado en lugares con ambientes menos agresivos.

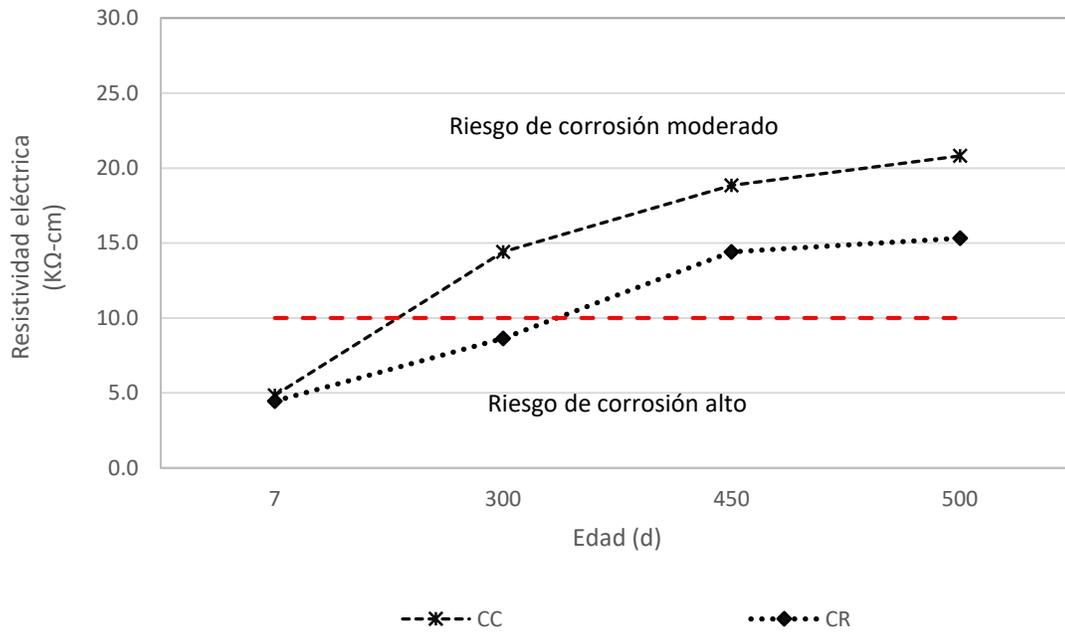


Figura 19.- Resistividad eléctrica de CC y CR.

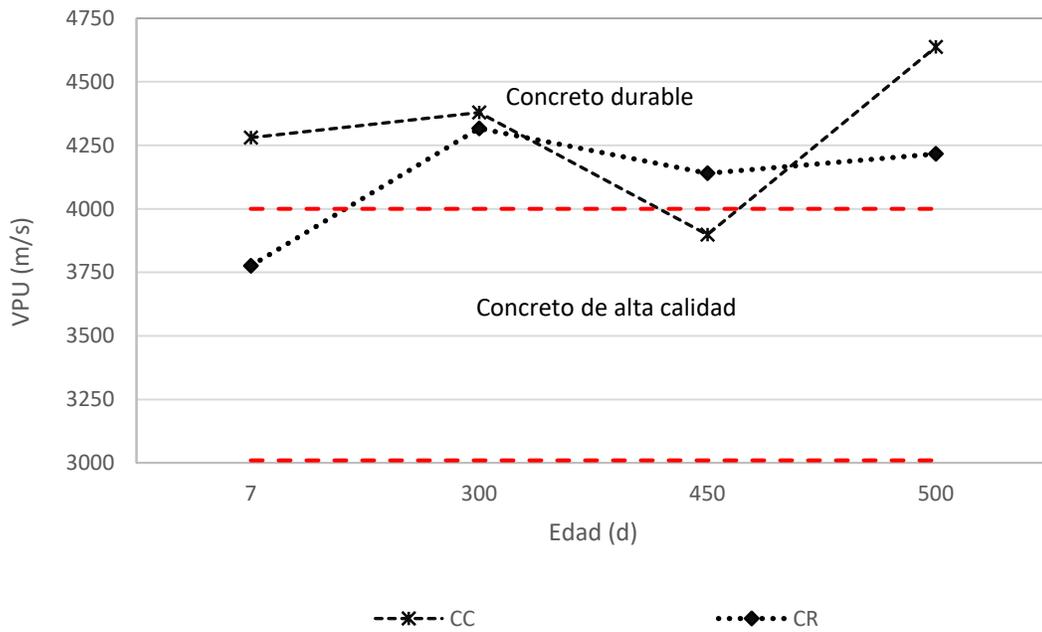


Figura 20.- VPU de CC y CR.

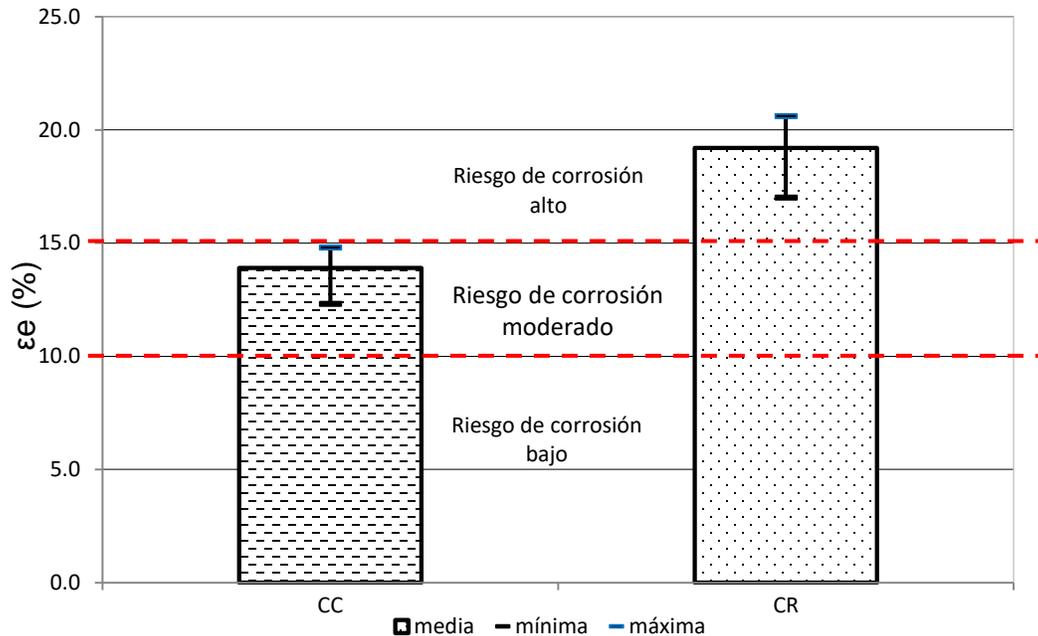


Figura 21.- Porosidad efectiva de CC y CR

8.1.3.- Propuesta de calificación de desempeño tecnológico

Tomando en cuenta lo mencionado en la sección 7.2.1.3, se propone asignar la calificación indicada en la Tabla 23 según el resultado que haya tenido cada tipo de concreto en los distintos ensayos, y posteriormente se hace la sumatoria para cada uno, la cual es mostrada en la Tabla 24. De acuerdo con la calificación de desempeño tecnológico propuesta en este estudio, puede decirse que aunque el CC exhibe mejor comportamiento que el CR de manera general, la diferencia es realmente mínima y equivale al 5% aproximadamente.

Calificación	f'_c MPa	MR MPa	ρ k Ω -cm	VPU m/s	ϵ_e %
10.0	>35	>4.4	100-200	>4000	<10
7.5			50-100	3001-4000	10-15
5.0	<35	<4.4	10-100	2001-3000	>15
2.5			<10	<2000	



Ensayo	Calificación	
	CC	CR
f'c	10.0	10.0
MR	10.0	10.0
ρ	5.0	5.0
VPU	10.0	10.0
εε	7.5	5.0
Total	42.5	40.0

8.2.- Análisis de ciclo de vida

8.2.1.- Evaluación de impactos ambientales asociados al ciclo de vida (EICV) del concreto reciclado y convencional

Los resultados obtenidos después de aplicar el marco metodológico descrito en la sección 7.2.2 del presente trabajo, son agrupados y presentados enseguida.

En las Figuras 22 a la 25 son mostrados los resultados de caracterización en porcentaje, lo cual permite identificar cuáles procesos tiene mayor intervención en los impactos ocasionados, mientras que en las Tablas 25 a la 29 son reportados los resultados de caracterización en sus unidades correspondientes.

En la Figura 22 se muestra la caracterización para CC-1, en la cual se aprecia que la producción del cemento fue la que tuvo la mayor contribución en casi todas las categorías de impacto (siendo para cambio climático de 80% aproximadamente), a excepción de las categorías de ecotoxicidad y uso de suelo donde la mayor contribución fue debido al transporte con 42 y 35%, respectivamente. Por otro lado, en la Tabla 26 se puede apreciar que los mayores daños a la salud humana, calidad del ecosistema y recursos, asociados al CC-1 son: $5.41E-01$ DALY debido a efectos respiratorios causados por la producción del cemento, $9.80E-07$ PDF*m²*yr debido a la ecotoxicidad generada por el transporte, y $1.33E-06$ MJ surplus debido al consumo de combustibles fósiles en la producción de cemento, respectivamente.



La caracterización en porcentaje para CR-1 es presentada en la Figura 23 donde es posible apreciar que nuevamente la producción de cemento del cemento es la que genera un mayor impacto en casi todas las categorías, alcanzando hasta 85% para cambio climático; únicamente, el transporte tiene una contribución más grande que el cemento en ecotoxicidad (43%). En esa misma Figura, se observa que debido a que se evita el vertido de residuos de concreto, se tiene contribuciones en pro del ambiente, principalmente en las categorías de impacto de agotamiento de la capa de ozono y consumo de combustibles fósiles (21%). Los daños más grandes registrados por el CR-1 son debido a la ecotoxicidad ocasionada por el transporte, efectos respiratorios y consumo de combustibles fósiles derivados de la producción del cemento; cuyos valores pueden observarse en la Tabla 27 y son $5.70E-1DALY$, $8.27E-07PDF*m^2*yr$ y $1.40E-06MJ$ surplus, respectivamente.

En la caracterización en porcentaje para CC-2 (ver Figura 24), se presenta una situación muy similar a la observada para CC-1, sólo que ahora la contribución debida al transporte presenta una ligera disminución, mientras que la contribución de los otros materiales permanece casi igual o presenta un ligero aumento. De hecho, ahora el impacto generado por el transporte (34%) supera al del cemento (29%), sólo en la categoría de uso de suelo. Tomando en cuenta esto, es de esperarse que los valores correspondientes a los mayores daño ocasionados por el CC-2 sean los mismos que para CC-1, siendo ligeramente menor el de ecotoxicidad debido al transporte ($9.69E-07PDF*m^2*yr$), tal y como puede apreciarse en la Tabla 28.

En la Figura 25 se presentan los resultados correspondientes a la caracterización para el CR-2, donde se puede observar que el impacto del cemento es mayor en la mayoría de las categorías, excepto en ecotoxicidad y uso de suelo donde el transporte tiene impactos correspondientes al 47 y 36%, respectivamente. De igual manera que en el caso del CR-1, se tienen impactos que contrarrestan la problemática ambiental, sólo que ahora son del 19 y 20% para agotamiento de la capa de ozono y consumo de combustibles fósiles. Los valores de los daños correspondientes son presentados en la Tabla 29, donde se aprecia que los daños más grandes son $5.70E-01DALY$ debido a efectos respiratorios y $1.40E-06MJ$ surplus por el consumo de combustibles fósiles en



la producción del cemento, así como $9.94E-07 \text{ PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{yr}$ por ecotoxicidad causada por el transporte.

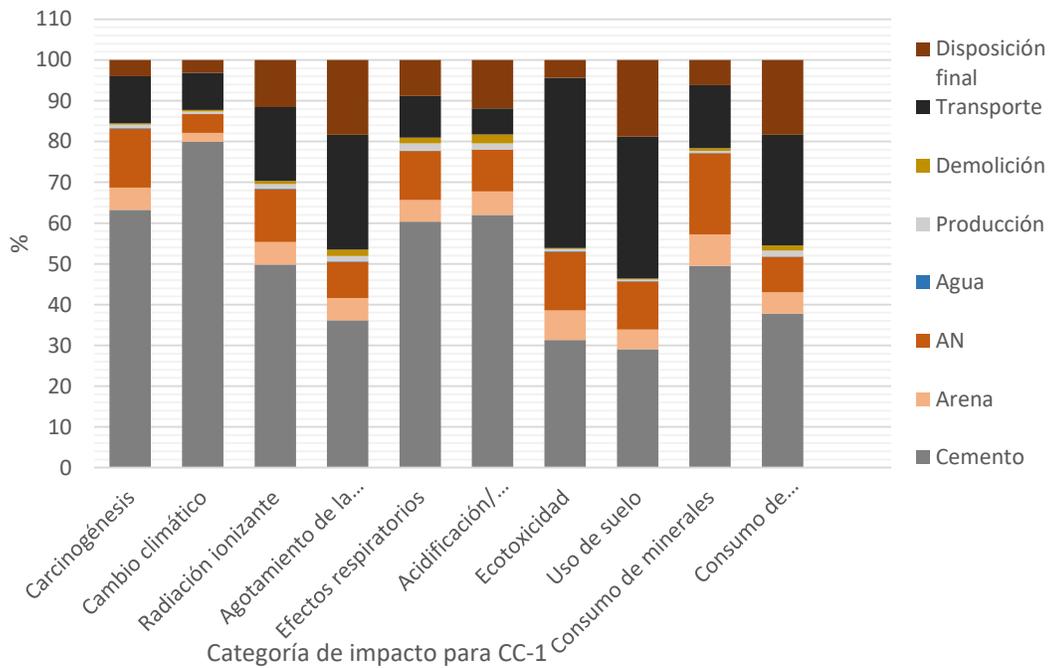


Figura 22.- Caracterización de impactos ocasionados por los subprocessos para m^3 de CC-1.

Tabla 23.- Caracterización de impactos ocasionados por los subprocessos para m^3 de CC-1.

Categoría de impacto	Unidades	Cemento	Arena	AN	Agua	Producción	Demolición	Transporte	Disposición final	Total
Carcinogénesis		2.45E-06	2.12E-07	5.61E-07	4.66E-09	3.37E-08	1.10E-08	4.47E-07	1.55E-07	3.87E-06
Cambio climático		9.64E-06	2.62E-07	5.57E-07	3.76E-09	6.62E-08	5.13E-08	1.10E-06	3.81E-07	1.21E-05
Radiación ionizante	DALY	2.52E-10	2.78E-11	6.58E-11	5.56E-13	5.72E-12	3.99E-12	9.16E-11	5.83E-11	5.06E-10
Agotamiento de la capa de ozono		1.16E-10	1.74E-11	2.84E-11	4.13E-13	4.19E-12	5.11E-12	9.04E-11	5.87E-11	3.21E-10
Efectos respiratorios		8.92E-05	7.87E-06	1.77E-05	1.35E-07	2.63E-06	2.15E-06	1.50E-05	1.31E-05	1.48E-04
Acidificación/ Eutroficación		2.25E-01	2.09E-02	3.71E-02	1.42E-04	5.53E-03	7.86E-03	2.33E-02	4.29E-02	3.62E-01
Ecotoxicidad	$\text{PDF} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{yr}$	3.05E-01	7.10E-02	1.40E-01	1.87E-03	5.03E-03	2.39E-03	4.08E-01	4.25E-02	9.76E-01
Uso de suelo		1.06E+00	1.78E-01	4.28E-01	1.44E-03	1.35E-02	1.07E-02	1.26E+00	6.85E-01	3.63E+00
Consumo de minerales		1.61E-02	2.50E-03	6.50E-03	3.21E-05	1.49E-04	2.16E-04	5.03E-03	2.02E-03	3.26E-02
Consumo de combustibles fósiles	MJ surplus	4.61E+01	6.34E+00	1.06E+01	3.83E-02	1.80E+00	1.55E+00	3.31E+01	2.23E+01	1.22E+02

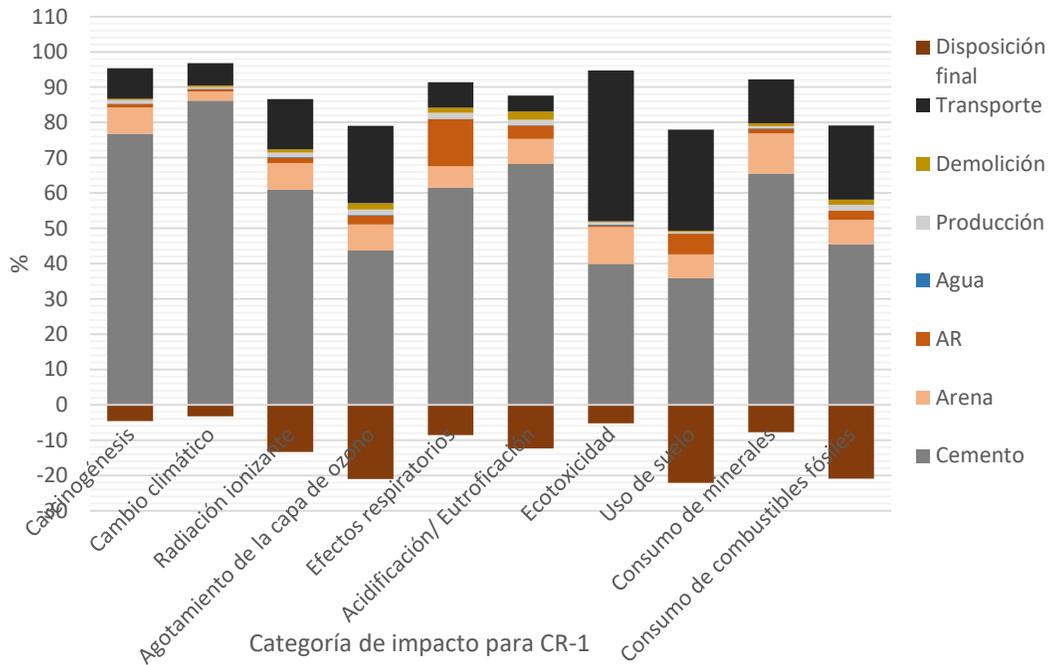


Figura 23.- Caracterización de impactos ocasionados por los subprocesos para m³ de CR-1.

Tabla 24.- Caracterización de impactos ocasionados por los subprocesos para m³ de CR-1.

Categoría de impacto	Unidades	Cemento	Arena	AR	Agua	Producción	Demolición	Transporte	Disposición final	Total
Carcinogénesis		2.58E-06	2.50E-07	3.26E-08	4.91E-09	3.37E-08	1.10E-08	2.91E-07	-1.55E-07	3.04E-06
Cambio climático		1.02E-05	3.08E-07	8.69E-08	3.96E-09	6.62E-08	5.13E-08	7.38E-07	-3.81E-07	1.10E-05
Radiación ionizante	DALY	2.66E-10	3.28E-11	6.76E-12	5.86E-13	5.72E-12	3.99E-12	6.19E-11	-5.83E-11	3.19E-10
Agotamiento de la capa de ozono		1.22E-10	2.04E-11	7.24E-12	4.35E-13	4.19E-12	5.11E-12	6.12E-11	-5.87E-11	1.62E-10
Efectos respiratorios		9.40E-05	9.27E-06	2.04E-05	1.42E-07	2.63E-06	2.15E-06	1.11E-05	-1.31E-05	1.27E-04
Acidificación/ Eutroficación	PDF*m ² yr	2.37E-01	2.46E-02	1.33E-02	1.50E-04	5.53E-03	7.86E-03	1.58E-02	-4.29E-02	2.61E-01
Ecotoxicidad		3.22E-01	8.36E-02	4.04E-03	1.97E-03	5.03E-03	2.39E-03	3.44E-01	-4.25E-02	7.21E-01
Uso de suelo		1.11E+00	2.10E-01	1.80E-01	1.51E-03	1.35E-02	1.07E-02	8.88E-01	-6.85E-01	1.73E+00
Consumo de minerales	MJ surplus	1.70E-02	2.95E-03	3.66E-04	3.38E-05	1.49E-04	2.16E-04	3.23E-03	-2.02E-03	2.19E-02
Consumo de combustibles fósiles		4.86E+01	7.47E+00	2.63E+00	4.04E-02	1.80E+00	1.55E+00	2.24E+01	-2.23E+01	6.21E+01

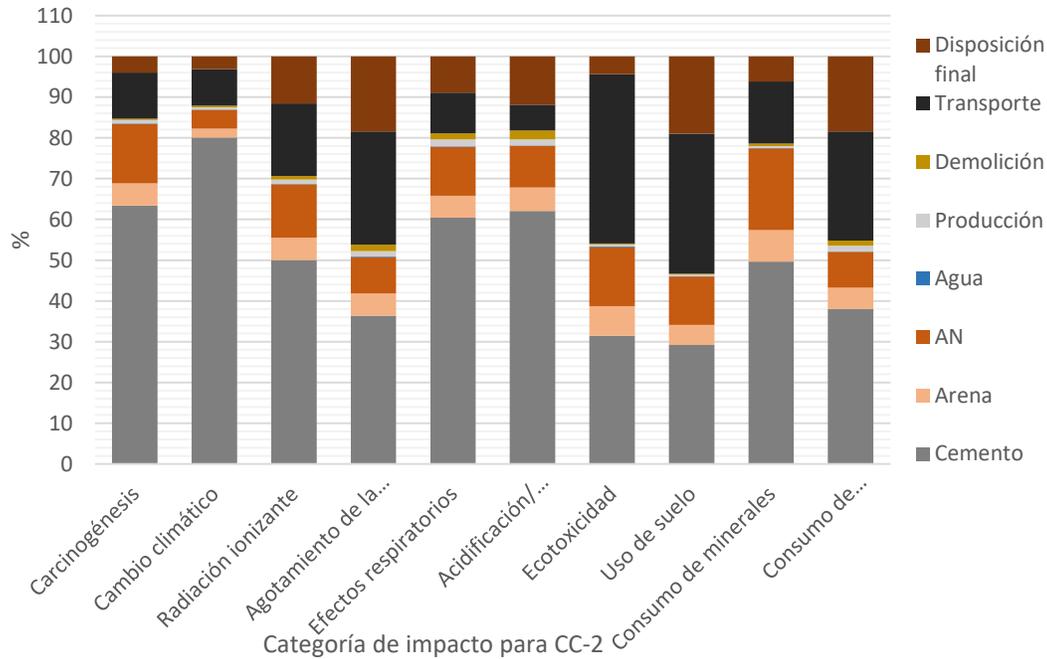


Figura 24.- Caracterización de impactos ocasionados por los subprocesos para m³ de CC-2.

Tabla 25.- Caracterización de impactos ocasionados por los subprocesos para m³ de CC-2.

Categoría de impacto	Unidades	Cemento	Arena	AN	Agua	Producción	Demolición	Transporte	Disposición final	Total
Carcinogénesis		2.4E-06	2.1E-07	5.6E-07	4.7E-09	3.4E-08	1.1E-08	4.4E-07	1.5E-07	3.86E-06
Cambio climático		9.6E-06	2.6E-07	5.6E-07	3.8E-09	6.6E-08	5.1E-08	1.1E-06	3.8E-07	1.20E-05
Radiación ionizante	DALY	2.5E-10	2.8E-11	6.6E-11	5.6E-13	5.7E-12	4.0E-12	9.0E-11	5.8E-11	5.04E-10
Agotamiento de la capa de ozono		1.2E-10	1.7E-11	2.8E-11	4.1E-13	4.2E-12	5.1E-12	8.9E-11	5.9E-11	3.19E-10
Efectos respiratorios		8.9E-05	7.9E-06	1.8E-05	1.3E-07	2.6E-06	2.1E-06	1.5E-05	1.3E-05	1.48E-04
Acidificación/ Eutroficación		2.2E-01	2.1E-02	3.7E-02	1.4E-04	5.5E-03	7.9E-03	2.3E-02	4.3E-02	3.62E-01
Ecotoxicidad	PDF*m ² yr	3.1E-01	7.1E-02	1.4E-01	1.9E-03	5.0E-03	2.4E-03	4.0E-01	4.3E-02	9.72E-01
Uso de suelo		1.1E+00	1.8E-01	4.3E-01	1.4E-03	1.3E-02	1.1E-02	1.2E+00	6.8E-01	3.61E+00
Consumo de minerales		1.6E-02	2.5E-03	6.5E-03	3.2E-05	1.5E-04	2.2E-04	4.9E-03	2.0E-03	3.25E-02
Consumo de combustibles fósiles	MJ surplus	4.6E+01	6.3E+00	1.1E+01	3.8E-02	1.8E+00	1.6E+00	3.2E+01	2.2E+01	1.21E+02

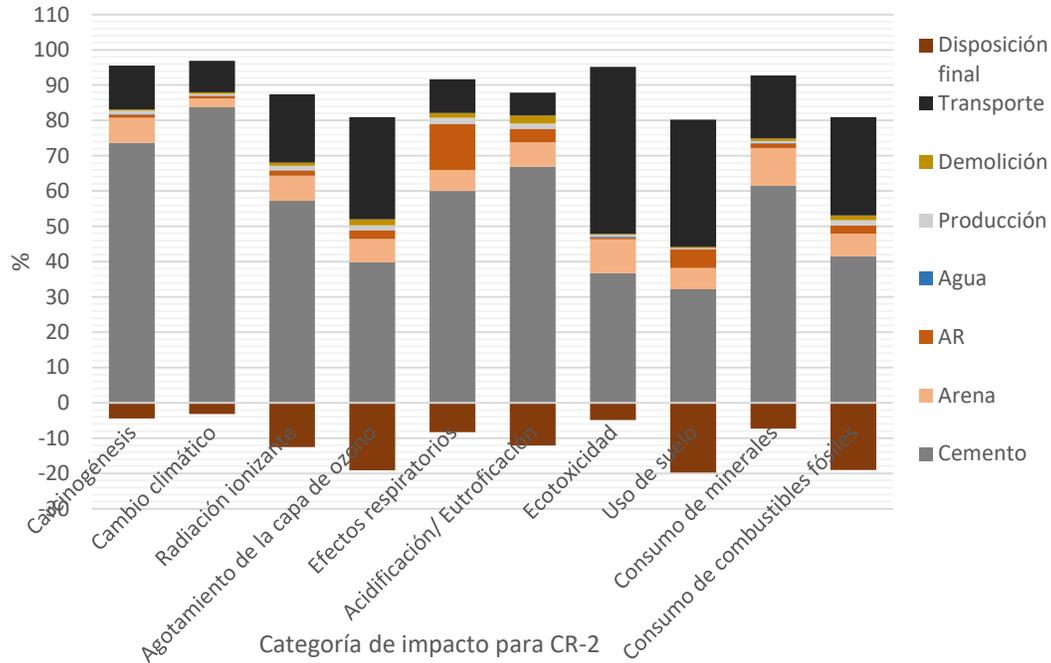


Figura 25.- Caracterización de impactos ocasionados por los subprocesos para m³ de CR-2.

Tabla 26.- Caracterización de impactos ocasionados por los subprocesos para m³ de CR-2.

Categoría de impacto	Unidades	Cemento	Arena	AR	Agua	Producción	Demolición	Transporte	Disposición final	Total
Carcinogénesis	DALY	2.58E-06	2.50E-07	3.26E-08	4.91E-09	3.37E-08	1.10E-08	4.37E-07	-1.55E-07	3.19E-06
Cambio climático		1.02E-05	3.08E-07	8.69E-08	3.96E-09	6.62E-08	5.13E-08	1.08E-06	-3.81E-07	1.14E-05
Radiación ionizante		2.66E-10	3.28E-11	6.76E-12	5.86E-13	5.72E-12	3.99E-12	9.00E-11	-5.83E-11	3.47E-10
Agotamiento de la capa de ozono		1.22E-10	2.04E-11	7.24E-12	4.35E-13	4.19E-12	5.11E-12	8.89E-11	-5.87E-11	1.90E-10
Efectos respiratorios		9.40E-05	9.27E-06	2.04E-05	1.42E-07	2.63E-06	2.15E-06	1.50E-05	-1.31E-05	1.30E-04
Acidificación/ Eutroficación	PDF*m ² yr	2.37E-01	2.46E-02	1.33E-02	1.50E-04	5.53E-03	7.86E-03	2.29E-02	-4.29E-02	2.68E-01
Ecotoxicidad		3.22E-01	8.36E-02	4.04E-03	1.97E-03	5.03E-03	2.39E-03	4.14E-01	-4.25E-02	7.90E-01
Uso de suelo		1.11E+00	2.10E-01	1.80E-01	1.51E-03	1.35E-02	1.07E-02	1.25E+00	-6.85E-01	2.09E+00
Consumo de minerales	MJ surplus	1.70E-02	2.95E-03	3.66E-04	3.38E-05	1.49E-04	2.16E-04	4.92E-03	-2.02E-03	2.36E-02
Consumo de combustibles fósiles		4.86E+01	7.47E+00	2.63E+00	4.04E-02	1.80E+00	1.55E+00	3.25E+01	-2.23E+01	7.23E+01



La normalización por categoría de daño para los diferentes tipos de concreto y escenarios objeto de estudio es presentada en las Figuras 26 a la 29, en las cuales se aprecia que el área de daño más afectada debido a los concretos convencionales es la de recursos, seguida por salud humana y calidad al ecosistema; mientras que en el caso de los concretos reciclados, el daño a los recursos se ve disminuido hasta quedar debajo que el daño a la salud humana, lo cual se debe principalmente a que es evitado el consumo de combustibles fósiles por las actividades que implica el vertido de residuos. También es importante mencionar que el daño a los recursos disminuye para CR-1 y CR-2, debido a que las etapas de transporte y producción de agregado grueso tienen un impacto menor que en CC-1 y CC-2.

Por otro lado, las Figuras 30 a la 33, así como las Tablas 29 a la 32 muestran la normalización por categoría de impactos, la cual permite identificar de manera más particular cuáles son los impactos que contribuyen más al daño. Se aprecia que el mayor impacto se presenta en el consumo de combustibles fósiles, seguido por efectos respiratorios y cambio climático; mientras que la radiación ionizante, el agotamiento de la capa de ozono y el consumo de minerales no son significativos. El impacto por consumo de combustibles fósiles para CC-1 y CC-2 está alrededor de 0.029, mientras que para CR-1 y CR-2 son de 0.015 y 0.017, respectivamente. En el caso del impacto causado por efectos respiratorios, los valores son de 0.014 para los concretos convencionales y de 0.012 para los reciclados. En lo que concierne al impacto debido al cambio climático, se aprecia que es de 0.005 en todos los casos. Respecto a los procesos que generan el mayor impacto en las categorías mencionados son la producción de cemento y agregados gruesos naturales, transporte y disposición final, la cual tiene impacto desfavorable (0.007) en los concretos convencionales, mientras que en los concretos reciclados el impacto ambiental es favorable (-0.007), ya que se evita el vertido de residuos.

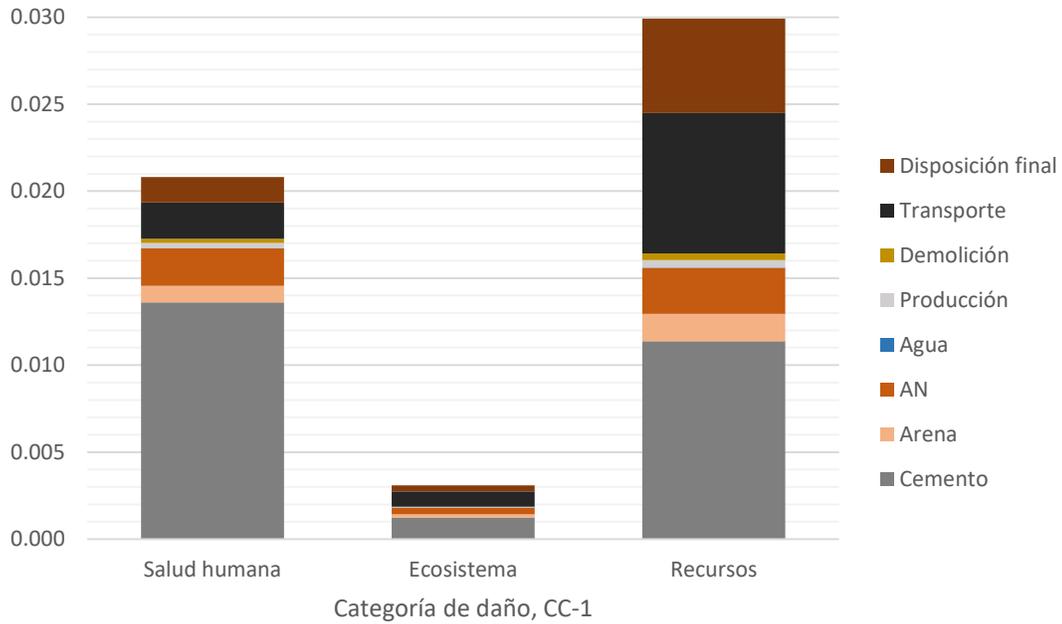


Figura 26.- Normalización de daños ocasionados por los subprocesos para m³ de CC-1.

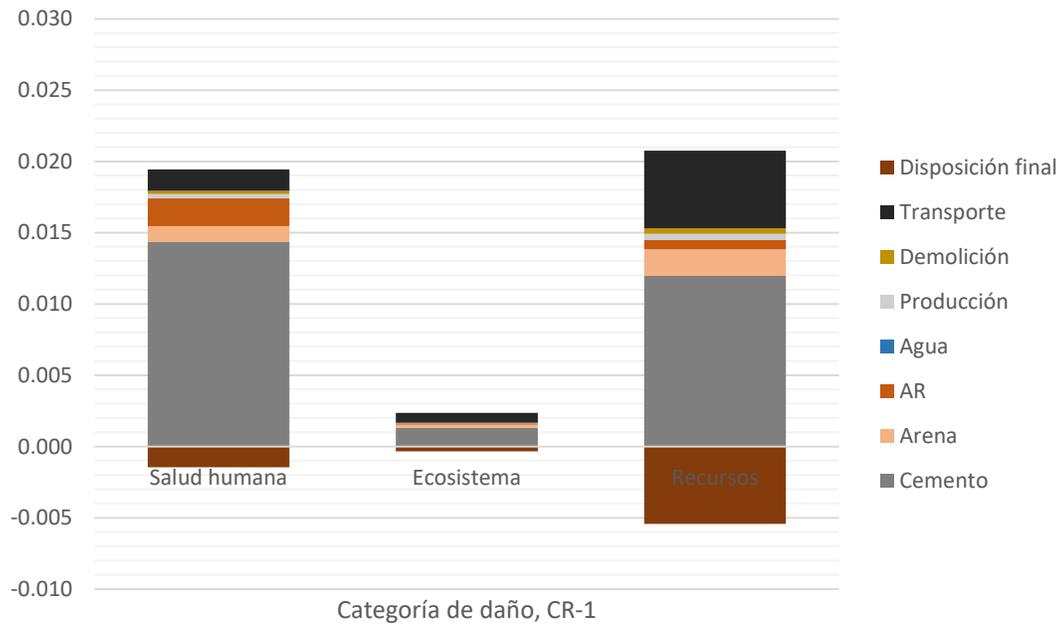


Figura 27.- Normalización de daños ocasionados por los subprocesos para m³ de CR-1.

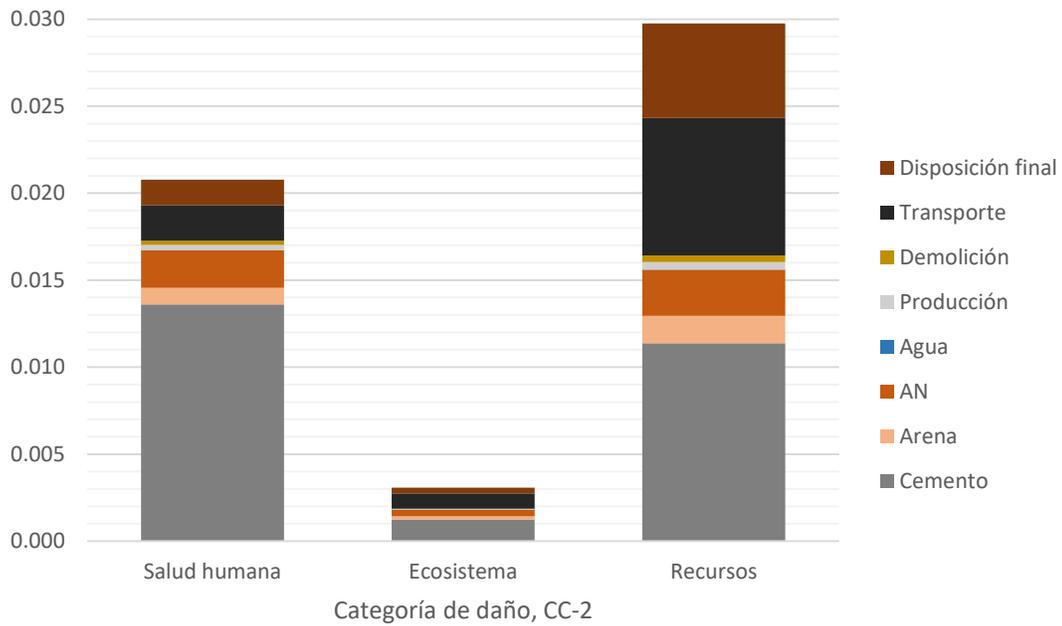


Figura 28.- Normalización de daños ocasionados por los subprocesos para m³ de CC-2.

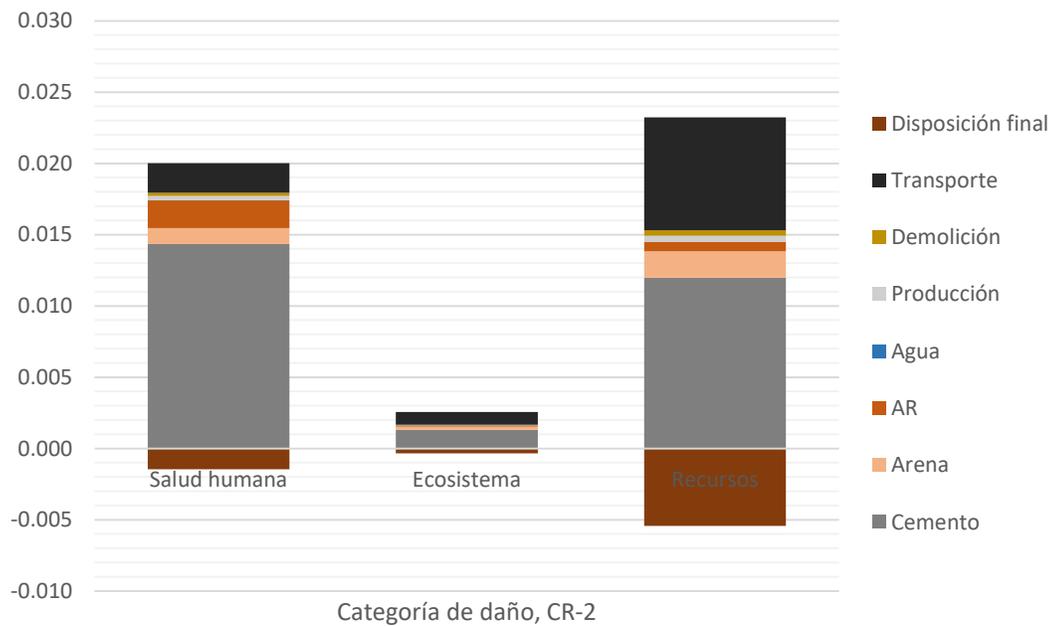


Figura 29.- Normalización de daños ocasionados por los subprocesos para m³ de CR-2.

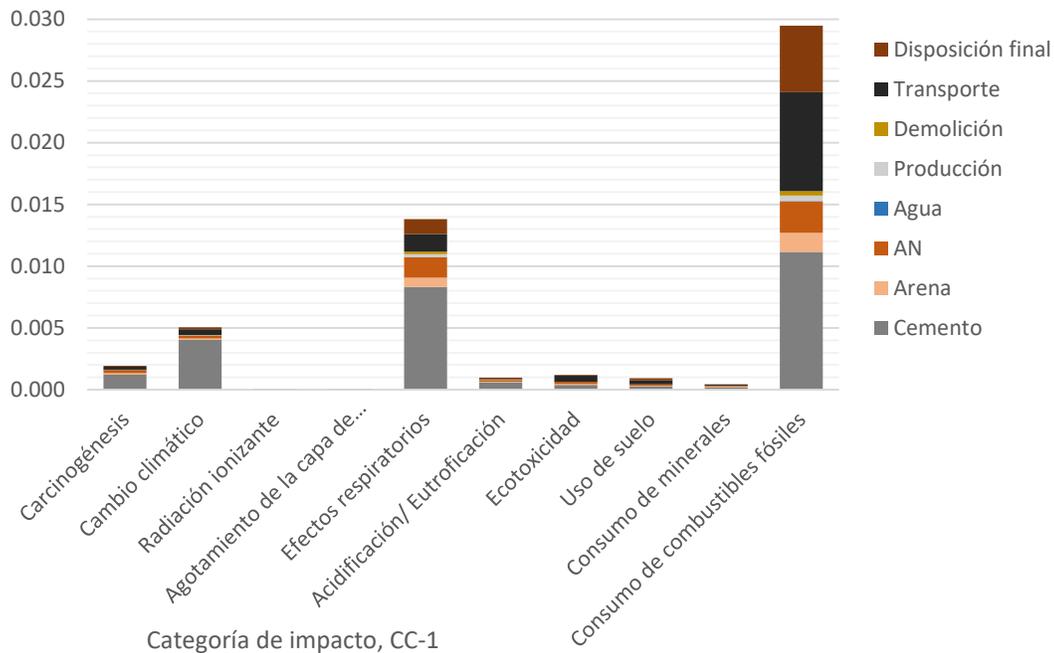


Figura 30.- Normalización de impactos ocasionados por los subprocesos para m³ de CC-1.

Tabla 27.- Normalización de impactos ocasionados por los subprocesos para m³ de CC-1.

Categoría de impacto	Cemento	Arena	AN	Agua	Producción	Demolición	Transporte	Disposición final	Total
Carcinogénesis	1.22E-03	1.06E-04	2.80E-04	2.33E-06	1.69E-05	5.52E-06	2.23E-04	7.74E-05	1.93E-03
Cambio climático	4.04E-03	1.09E-04	2.33E-04	1.57E-06	2.77E-05	2.15E-05	4.59E-04	1.59E-04	5.05E-03
Radiación ionizante	9.40E-06	1.04E-06	2.45E-06	2.07E-08	2.13E-07	1.49E-07	3.42E-06	2.18E-06	1.89E-05
Agotamiento de la capa de ozono	5.30E-07	7.93E-08	1.30E-07	1.88E-09	1.91E-08	2.33E-08	4.13E-07	2.68E-07	1.46E-06
Efectos respiratorios	8.33E-03	7.36E-04	1.65E-03	1.26E-05	2.46E-04	2.01E-04	1.40E-03	1.22E-03	1.38E-02
Acidificación/ Eutroficación	5.99E-04	5.57E-05	9.91E-05	3.79E-07	1.47E-05	2.10E-05	6.21E-05	1.15E-04	9.66E-04
Ecotoxicidad	3.77E-04	8.75E-05	1.73E-04	2.30E-06	6.20E-06	2.94E-06	5.03E-04	5.24E-05	1.20E-03
Uso de suelo	2.67E-04	4.52E-05	1.08E-04	3.64E-07	3.41E-06	2.70E-06	3.20E-04	1.73E-04	9.20E-04
Consumo de minerales	2.15E-04	3.34E-05	8.66E-05	4.28E-07	1.99E-06	2.88E-06	6.71E-05	2.69E-05	4.34E-04
Consumo de combustibles fósiles	1.12E-02	1.54E-03	2.57E-03	9.28E-06	4.35E-04	3.76E-04	8.00E-03	5.40E-03	2.95E-02

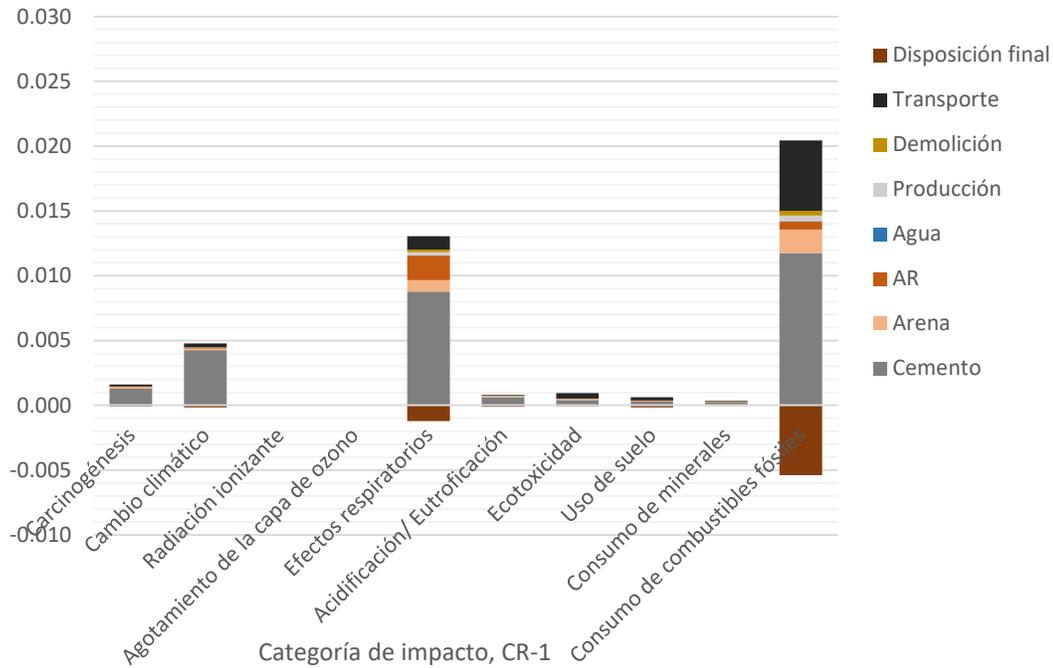


Figura 31.- Normalización de impactos ocasionados por los subprocesos para m³ de CR-1.

Tabla 28.- Normalización de impactos ocasionados por los subprocesos para m³ de CR-1.

Categoría de impacto	Cemento	Arena	AR	Agua	Producción	Demolición	Transporte	Disposición final	Total
Carcinogénesis	1.29E-03	1.25E-04	1.63E-05	2.46E-06	1.69E-05	5.52E-06	1.45E-04	-7.74E-05	1.52E-03
Cambio climático	4.25E-03	1.29E-04	3.64E-05	1.66E-06	2.77E-05	2.15E-05	3.09E-04	-1.59E-04	4.62E-03
Radiación ionizante	9.91E-06	1.22E-06	2.52E-07	2.19E-08	2.13E-07	1.49E-07	2.31E-06	-2.18E-06	1.19E-05
Agotamiento de la capa de ozono	5.58E-07	9.34E-08	3.30E-08	1.99E-09	1.91E-08	2.33E-08	2.79E-07	-2.68E-07	7.41E-07
Efectos respiratorios	8.78E-03	8.67E-04	1.90E-03	1.33E-05	2.46E-04	2.01E-04	1.04E-03	-1.22E-03	1.18E-02
Acidificación/ Eutroficación	6.31E-04	6.56E-05	3.55E-05	4.00E-07	1.47E-05	2.10E-05	4.21E-05	-1.15E-04	6.96E-04
Ecotoxicidad	3.97E-04	1.03E-04	4.99E-06	2.43E-06	6.20E-06	2.94E-06	4.24E-04	-5.24E-05	8.88E-04
Uso de suelo	2.81E-04	5.32E-05	4.57E-05	3.83E-07	3.41E-06	2.70E-06	2.25E-04	-1.73E-04	4.38E-04
Consumo de minerales	2.27E-04	3.93E-05	4.88E-06	4.51E-07	1.99E-06	2.88E-06	4.31E-05	-2.69E-05	2.92E-04
Consumo de combustibles fósiles	1.18E-02	1.81E-03	6.38E-04	9.77E-06	4.35E-04	3.76E-04	5.42E-03	-5.40E-03	1.50E-02

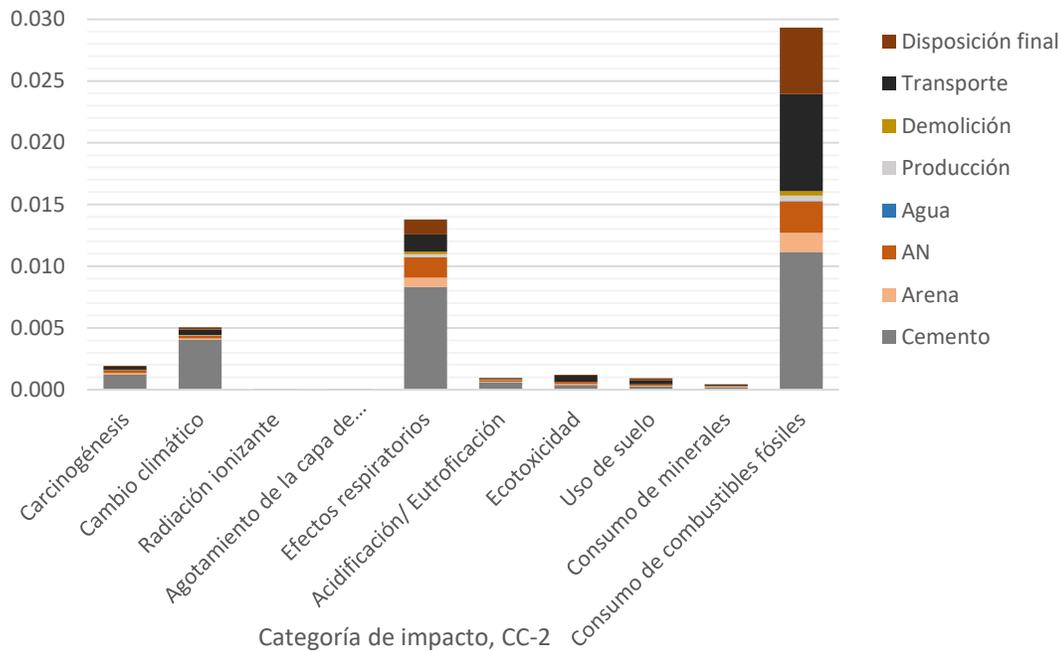


Figura 32.- Normalización de impactos ocasionados por los subprocesos para m³ de CC-2.

Tabla 29.- Normalización de impactos ocasionados por los subprocesos para m³ de CC-2.

Categoría de impacto	Cemento	Arena	AN	Agua	Producción	Demolición	Transporte	Disposición final	Total
Carcinogénesis	1.22E-03	1.06E-04	2.80E-04	2.33E-06	1.69E-05	5.52E-06	2.19E-04	7.74E-05	1.93E-03
Cambio climático	4.04E-03	1.09E-04	2.33E-04	1.57E-06	2.77E-05	2.15E-05	4.50E-04	1.59E-04	5.04E-03
Radiación ionizante	9.40E-06	1.04E-06	2.45E-06	2.07E-08	2.13E-07	1.49E-07	3.35E-06	2.18E-06	1.88E-05
Agotamiento de la capa de ozono	5.30E-07	7.93E-08	1.30E-07	1.88E-09	1.91E-08	2.33E-08	4.04E-07	2.68E-07	1.46E-06
Efectos respiratorios	8.33E-03	7.36E-04	1.65E-03	1.26E-05	2.46E-04	2.01E-04	1.38E-03	1.22E-03	1.38E-02
Acidificación/ Eutroficación	5.99E-04	5.57E-05	9.91E-05	3.79E-07	1.47E-05	2.10E-05	6.09E-05	1.15E-04	9.65E-04
Ecotoxicidad	3.77E-04	8.75E-05	1.73E-04	2.30E-06	6.20E-06	2.94E-06	4.97E-04	5.24E-05	1.20E-03
Uso de suelo	2.67E-04	4.52E-05	1.08E-04	3.64E-07	3.41E-06	2.70E-06	3.14E-04	1.73E-04	9.14E-04
Consumo de minerales	2.15E-04	3.34E-05	8.66E-05	4.28E-07	1.99E-06	2.88E-06	6.56E-05	2.69E-05	4.33E-04
Consumo de combustibles fósiles	1.12E-02	1.54E-03	2.57E-03	9.28E-06	4.35E-04	3.76E-04	7.84E-03	5.40E-03	2.93E-02

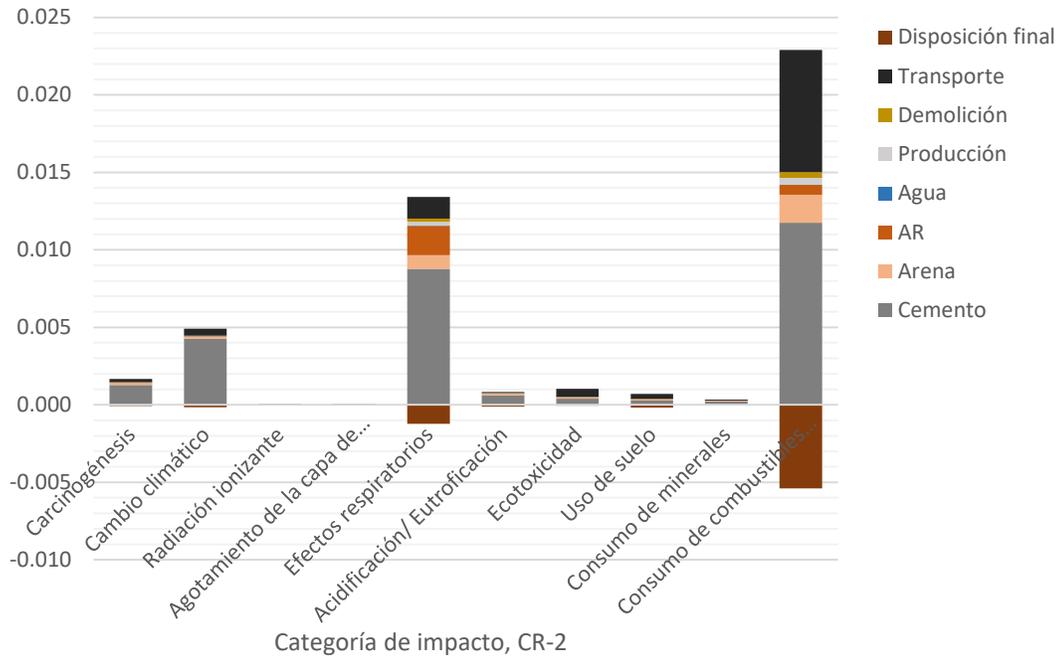


Figura 33.- Normalización de impactos ocasionados por los subprocesos para m³ de CR-2.

Tabla 30.- Normalización de impactos ocasionados por los subprocesos para m³ de CR-2.

Categoría de impacto	Cemento	Arena	AR	Agua	Producción	Demolición	Transporte	Disposición final	Total
Carcinogénesis	1.29E-03	1.25E-04	1.63E-05	2.46E-06	1.69E-05	5.52E-06	2.19E-04	-7.74E-05	1.60E-03
Cambio climático	4.25E-03	1.29E-04	3.64E-05	1.66E-06	2.77E-05	2.15E-05	4.51E-04	-1.59E-04	4.76E-03
Radiación ionizante	9.91E-06	1.22E-06	2.52E-07	2.19E-08	2.13E-07	1.49E-07	3.36E-06	-2.18E-06	1.30E-05
Agotamiento de la capa de ozono	5.58E-07	9.34E-08	3.30E-08	1.99E-09	1.91E-08	2.33E-08	4.06E-07	-2.68E-07	8.67E-07
Efectos respiratorios	8.78E-03	8.67E-04	1.90E-03	1.33E-05	2.46E-04	2.01E-04	1.40E-03	-1.22E-03	1.22E-02
Acidificación/ Eutroficación	6.31E-04	6.56E-05	3.55E-05	4.00E-07	1.47E-05	2.10E-05	6.11E-05	-1.15E-04	7.15E-04
Ecotoxicidad	3.97E-04	1.03E-04	4.99E-06	2.43E-06	6.20E-06	2.94E-06	5.10E-04	-5.24E-05	9.74E-04
Uso de suelo	2.81E-04	5.32E-05	4.57E-05	3.83E-07	3.41E-06	2.70E-06	3.16E-04	-1.73E-04	5.30E-04
Consumo de minerales	2.27E-04	3.93E-05	4.88E-06	4.51E-07	1.99E-06	2.88E-06	6.56E-05	-2.69E-05	3.15E-04
Consumo de combustibles fósiles	1.18E-02	1.81E-03	6.38E-04	9.77E-06	4.35E-04	3.76E-04	7.87E-03	-5.40E-03	1.75E-02



Finalmente, son presentados los resultados correspondientes a la puntuación única por área de daño (ver Figuras 34 a la 37) y por subproceso (ver Figuras 38 a la 41 y Tablas 33 a la 36). Estos valores permiten hacer una comparativa directa asumiendo la valoración indicada por el método y perspectiva seleccionados, ya sea entre subprocesos, impactos o daños.

En todos los casos se aprecia que el área de daño más afectada es la de salud humana, seguida por la de recursos y calidad del ecosistema, siendo estos daños más grandes en el caso de concretos convencionales que en el de reciclados. Los valores de daño a la salud humana son de 8.32, 7.19, 8.31 y 7.42 ecopuntos para CC-1, CR-1, CC-2 y CR-2, respectivamente; mientras que para recursos son de 5.98, 3.07, 5.95 y 3.56Pt, y para calidad del ecosistema son de 1.10, 0.95, 1.09 y 1.03Pt.

Con respecto al impacto que tienen los subprocesos en la producción de los diferentes tipos de concreto sujetos a diferentes escenarios de transporte, se puede notar que las etapas que causan el mayor impacto son la producción de cemento y agregados gruesos, el transporte y la disposición final, mientras que las etapas cuya contribución es prácticamente nula son la adquisición de agua, producción y demolición del concreto. La producción del cemento presenta impactos de 8.21Pt en concretos convencionales y de 8.65Pt en los reciclados, mientras que el AN tiene 1.55Pt y el AR tiene 0.95Pt. En el caso del transporte se tienen 2 escenarios para cada tipo de concreto. Por lo tanto, se tiene que los impactos son de 2.80 y 1.97Pt para CC y CR en el escenario 1; mientras que son de 2.75 y 2.77Pt en el escenario 2. Tomando en cuenta lo establecido en los sistemas de producto, la disposición final de los concretos convencionales tiene impacto de 1.67Pt, mientras que la de los concretos reciclados es de -1.67Pt.

En la figura 42, es presentado el impacto ocasionado por los diferentes tipos de concreto sujetos a los escenarios de transporte propuestos en esta investigación. Se aprecia claramente que el concreto reciclado (11.21Pt para CR-1 y de 12.01Pt para CR-2) presenta un impacto ambiental menor que el concreto convencional (15.41Pt para CC-1 y de 15.35Pt para CC-2) en ambos escenarios de transporte, siendo las categorías más afectadas efectos respiratorios, consumo de combustibles fósiles y cambio climático.

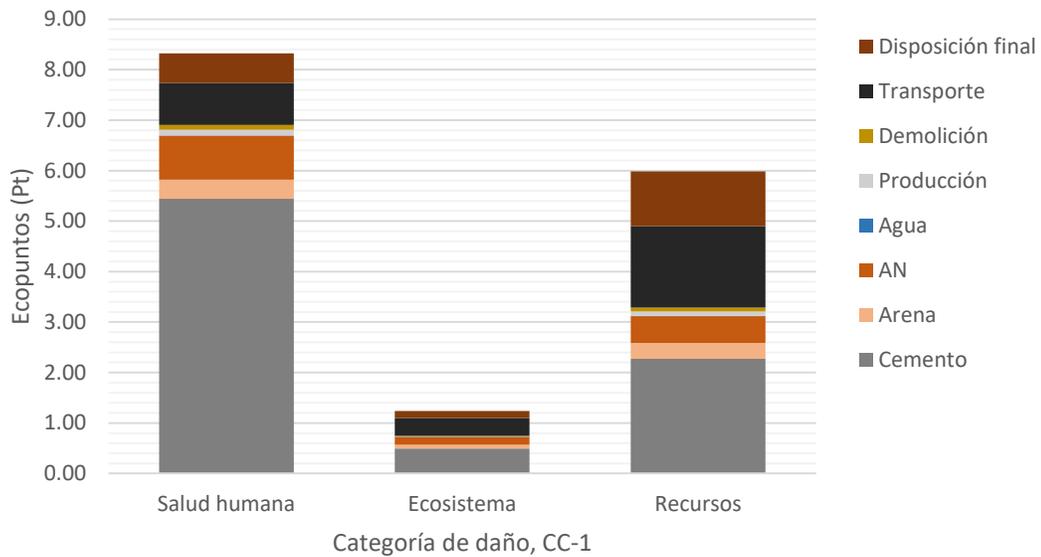


Figura 34.- Puntuación única de daños ocasionados por los subprocessos para m3 de CC-1.

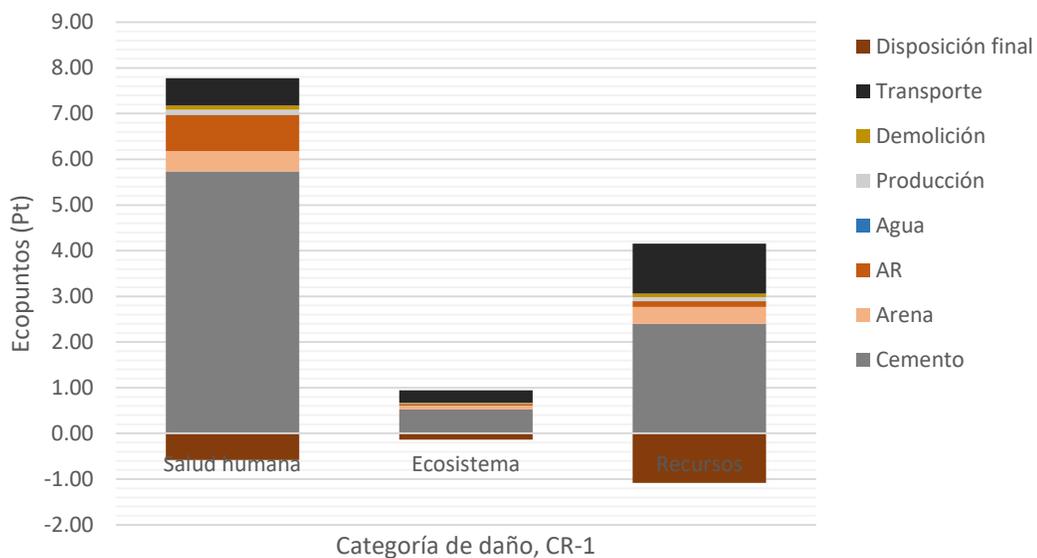


Figura 35.- Puntuación única de daños ocasionados por los subprocessos para m3 de CR-1.

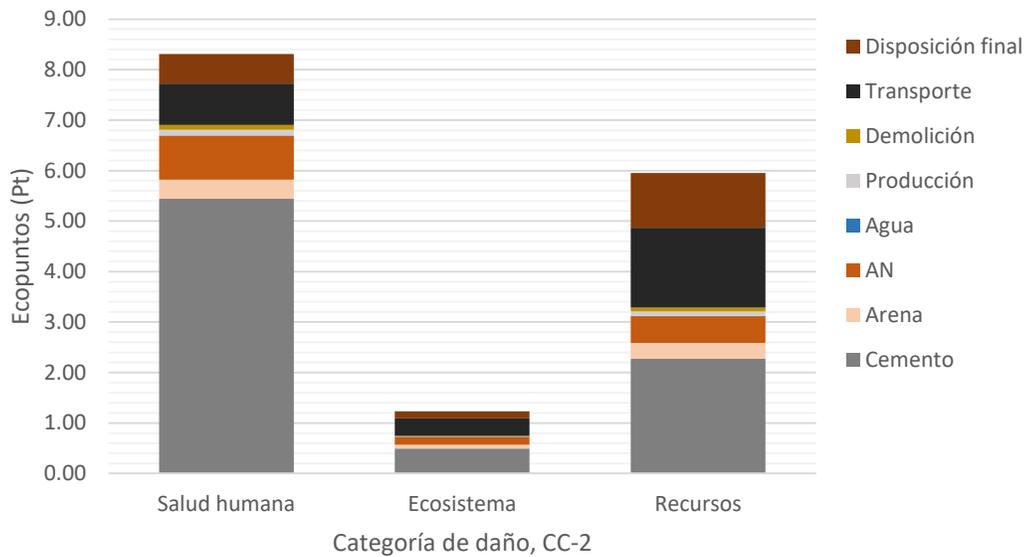


Figura 36.- Puntuación única de daños ocasionados por los subprocesos para m³ de CC-2.

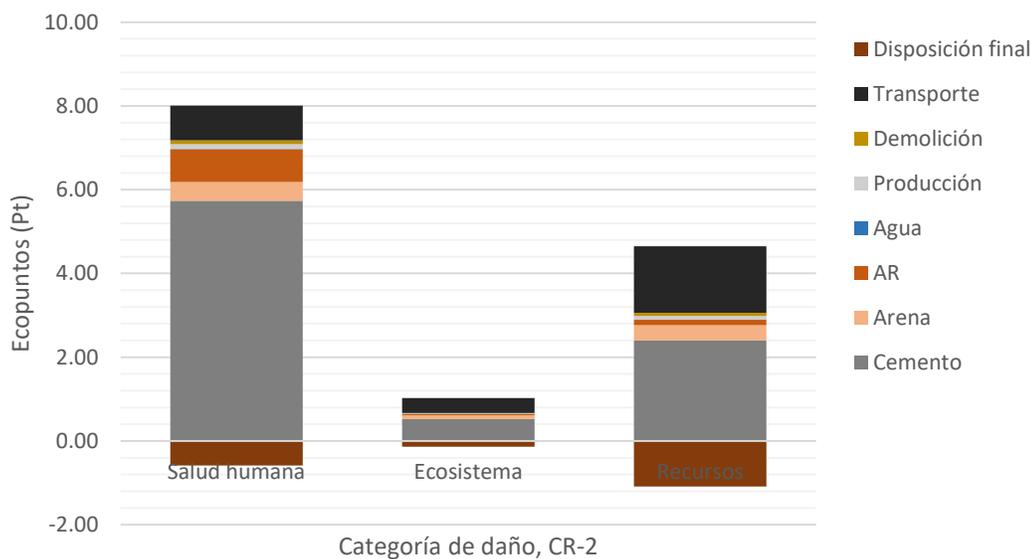


Figura 37.- Puntuación única de daños ocasionados por los subprocesos para m³ de CR-2.

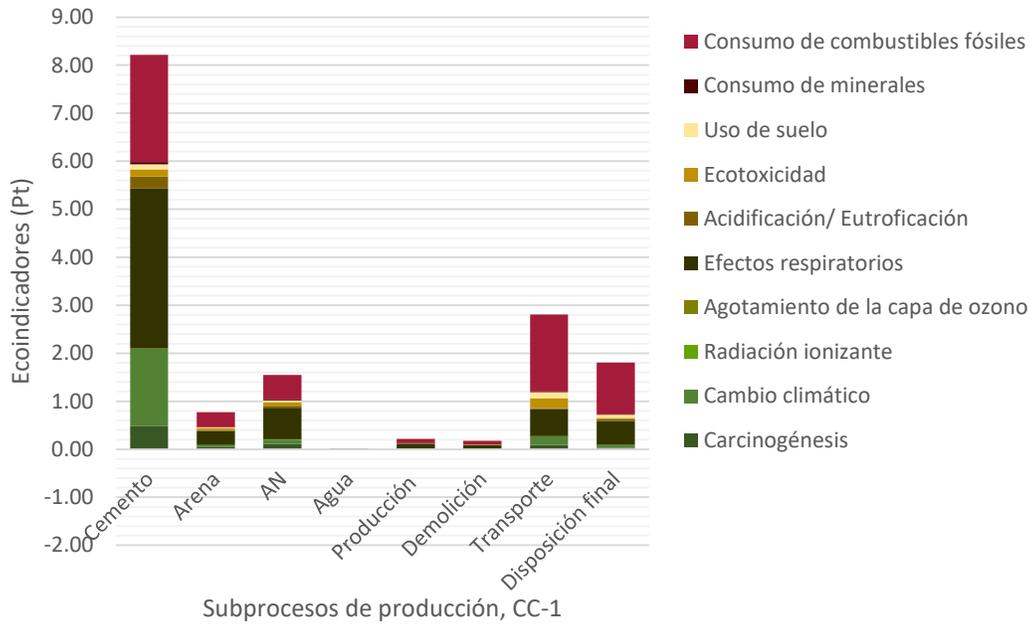


Figura 38.- Puntuación única de impactos ocasionados por los subprocesos para m³ de CC-1.

Tabla 31.- Ecopuntos de impactos ocasionados por los subprocesos para m³ de CC-1.

Categoría de impacto	Cemento	Arena	AN	Agua	Producción	Demolición	Transporte	Disposición final	Total
Carcinogénesis	4.89E-01	4.24E-02	1.12E-01	9.32E-04	6.74E-03	2.21E-03	8.94E-02	3.10E-02	7.74E-01
Cambio climático	1.61E+00	4.38E-02	9.32E-02	6.29E-04	1.11E-02	8.59E-03	1.84E-01	6.37E-02	2.02E+00
Radiación ionizante	3.76E-03	4.16E-04	9.82E-04	8.30E-06	8.53E-05	5.96E-05	1.37E-03	8.71E-04	7.55E-03
Agotamiento de la capa de ozono	2.12E-04	3.17E-05	5.19E-05	7.54E-07	7.65E-06	9.33E-06	1.65E-04	1.07E-04	5.86E-04
Efectos respiratorios	3.33E+00	2.94E-01	6.61E-01	5.03E-03	9.83E-02	8.02E-02	5.62E-01	4.89E-01	5.52E+00
Acidificación/ Eutroficación	2.40E-01	2.23E-02	3.96E-02	1.52E-04	5.90E-03	8.39E-03	2.48E-02	4.58E-02	3.87E-01
Ecotoxicidad	1.51E-01	3.50E-02	6.92E-02	9.21E-04	2.48E-03	1.18E-03	2.01E-01	2.10E-02	4.81E-01
Uso de suelo	1.07E-01	1.81E-02	4.34E-02	1.46E-04	1.36E-03	1.08E-03	1.28E-01	6.93E-02	3.68E-01
Consumo de minerales	4.30E-02	6.68E-03	1.73E-02	8.56E-05	3.98E-04	5.76E-04	1.34E-02	5.38E-03	8.69E-02
Consumo de combustibles fósiles	2.23E+00	3.07E-01	5.14E-01	1.86E-03	8.71E-02	7.53E-02	1.60E+00	1.08E+00	5.90E+00

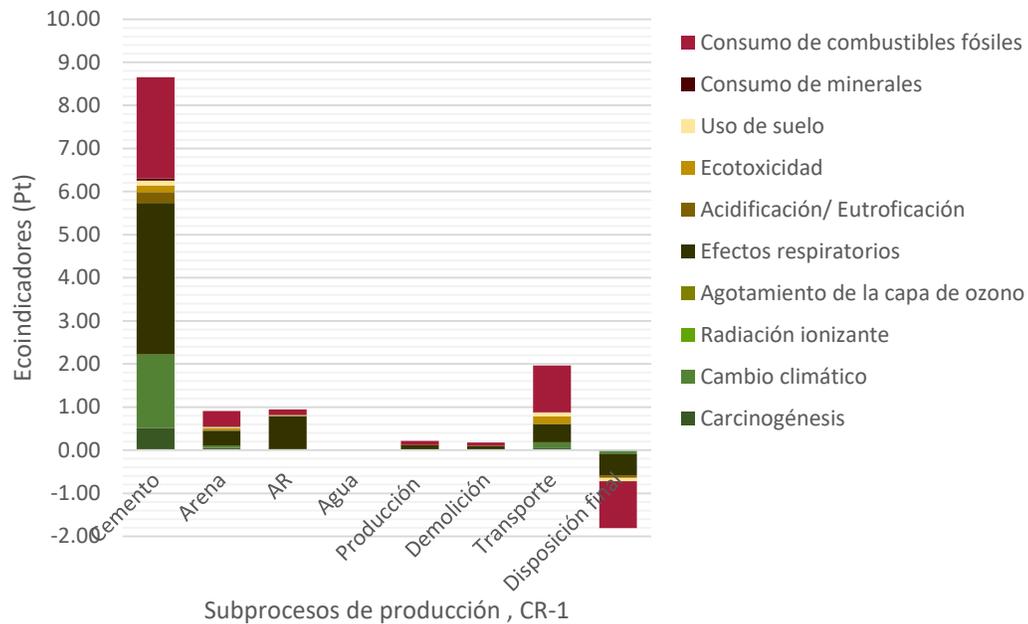


Figura 39.- Puntuación única de impactos ocasionados por los subprocesos para m³ de CR-1.

Tabla 32.- Ecopuntos de impactos ocasionados por los subprocesos para m³ de CR-1.

Categoría de impacto	Cemento	Arena	AR	Agua	Producción	Demolición	Transporte	Disposición final	Total
Carcinogénesis	5.15E-01	4.99E-02	6.51E-03	9.82E-04	6.74E-03	2.21E-03	5.82E-02	-3.10E-02	6.09E-01
Cambio climático	1.70E+00	5.16E-02	1.45E-02	6.63E-04	1.11E-02	8.59E-03	1.24E-01	-6.37E-02	1.85E+00
Radiación ionizante	3.96E-03	4.89E-04	1.01E-04	8.74E-06	8.53E-05	5.96E-05	9.23E-04	-8.71E-04	4.76E-03
Agotamiento de la capa de ozono	2.23E-04	3.73E-05	1.32E-05	7.94E-07	7.65E-06	9.33E-06	1.12E-04	-1.07E-04	2.96E-04
Efectos respiratorios	3.51E+00	3.47E-01	7.62E-01	5.30E-03	9.83E-02	8.02E-02	4.14E-01	-4.89E-01	4.73E+00
Acidificación/ Eutroficación	2.52E-01	2.62E-02	1.42E-02	1.60E-04	5.90E-03	8.39E-03	1.69E-02	-4.58E-02	2.78E-01
Ecotoxicidad	1.59E-01	4.12E-02	1.99E-03	9.71E-04	2.48E-03	1.18E-03	1.70E-01	-2.10E-02	3.55E-01
Uso de suelo	1.13E-01	2.13E-02	1.83E-02	1.53E-04	1.36E-03	1.08E-03	9.00E-02	-6.93E-02	1.75E-01
Consumo de minerales	4.53E-02	7.87E-03	9.75E-04	9.02E-05	3.98E-04	5.76E-04	8.62E-03	-5.38E-03	5.85E-02
Consumo de combustibles fósiles	2.35E+00	3.62E-01	1.28E-01	1.95E-03	8.71E-02	7.53E-02	1.08E+00	-1.08E+00	3.01E+00

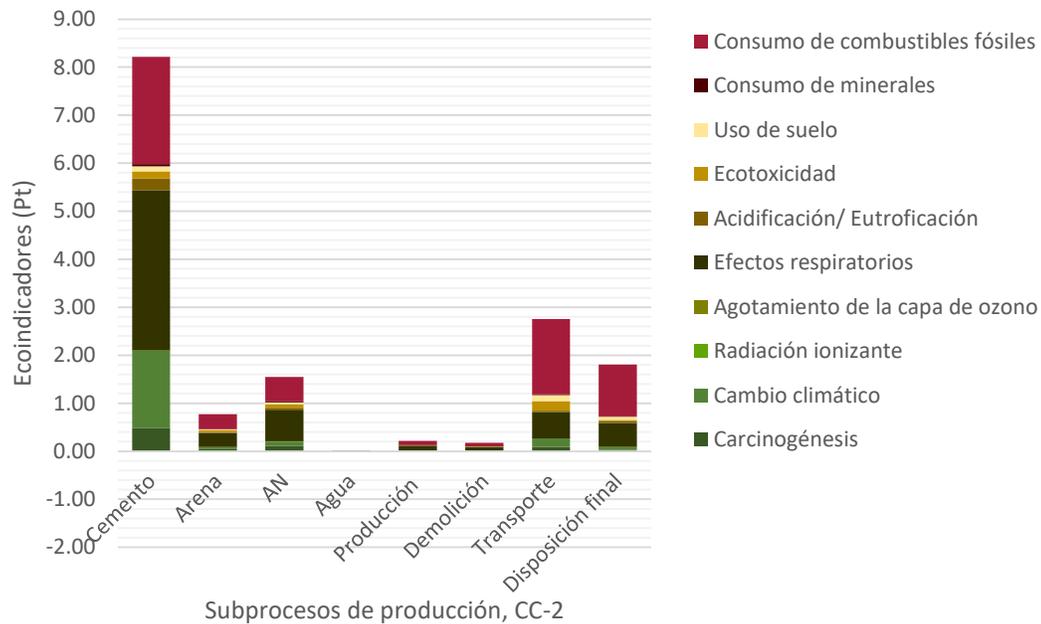


Figura 40.- Puntuación única de impactos ocasionados por los subprocesos para m³ de CC-2.

Tabla 33.- Ecopuntos de impactos ocasionados por los subprocesos para m³ de CC-2.

Categoría de impacto	Cemento	Arena	AN	Agua	Producción	Demolición	Transporte	Disposición final	Total
Carcinogénesis	4.89E-01	4.24E-02	1.12E-01	9.32E-04	6.74E-03	2.21E-03	8.74E-02	3.10E-02	7.72E-01
Cambio climático	1.61E+00	4.38E-02	9.32E-02	6.29E-04	1.11E-02	8.59E-03	1.80E-01	6.37E-02	2.02E+00
Radiación ionizante	3.76E-03	4.16E-04	9.82E-04	8.30E-06	8.53E-05	5.96E-05	1.34E-03	8.71E-04	7.52E-03
Agotamiento de la capa de ozono	2.12E-04	3.17E-05	5.19E-05	7.54E-07	7.65E-06	9.33E-06	1.62E-04	1.07E-04	5.82E-04
Efectos respiratorios	3.33E+00	2.94E-01	6.61E-01	5.03E-03	9.83E-02	8.02E-02	5.52E-01	4.89E-01	5.51E+00
Acidificación/ Eutroficación	2.40E-01	2.23E-02	3.96E-02	1.52E-04	5.90E-03	8.39E-03	2.43E-02	4.58E-02	3.86E-01
Ecotoxicidad	1.51E-01	3.50E-02	6.92E-02	9.21E-04	2.48E-03	1.18E-03	1.99E-01	2.10E-02	4.79E-01
Uso de suelo	1.07E-01	1.81E-02	4.34E-02	1.46E-04	1.36E-03	1.08E-03	1.26E-01	6.93E-02	3.66E-01
Consumo de minerales	4.30E-02	6.68E-03	1.73E-02	8.56E-05	3.98E-04	5.76E-04	1.31E-02	5.38E-03	8.66E-02
Consumo de combustibles fósiles	2.23E+00	3.07E-01	5.14E-01	1.86E-03	8.71E-02	7.53E-02	1.57E+00	1.08E+00	5.87E+00

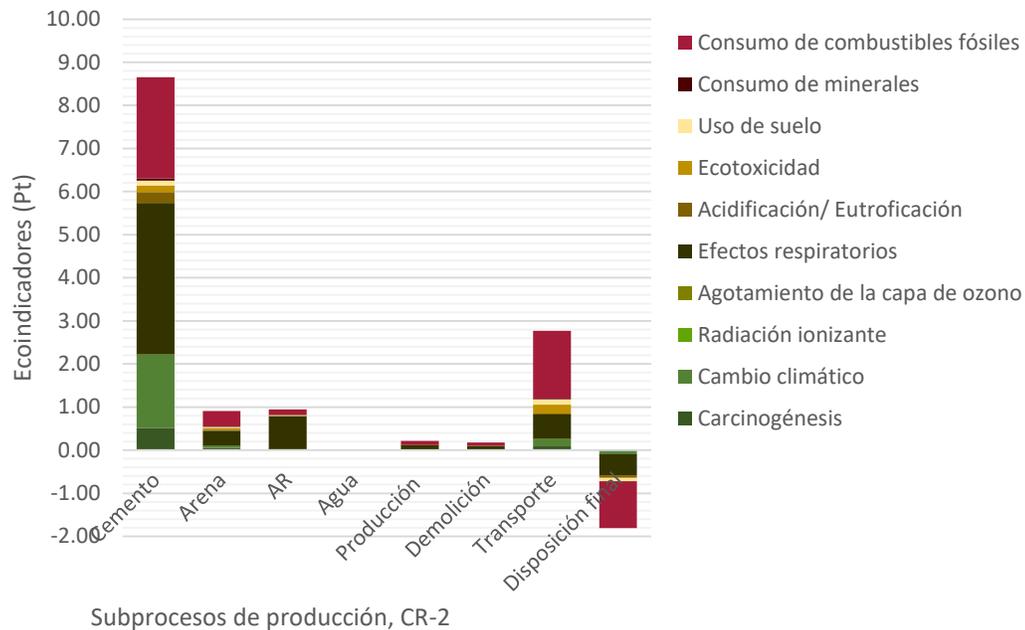


Figura 41.- Puntuación única de impactos ocasionados por los subprocesos para m³ de CR-2.

Tabla 34.- Ecopuntos de impactos ocasionados por los subprocesos para m³ de CR-2.

Categoría de impacto	Cemento	Arena	AR	Agua	Producción	Demolición	Transporte	Disposición final	Total
Carcinogénesis	5.15E-01	4.99E-02	6.51E-03	9.82E-04	6.74E-03	2.21E-03	8.75E-02	-3.10E-02	6.38E-01
Cambio climático	1.70E+00	5.16E-02	1.45E-02	6.63E-04	1.11E-02	8.59E-03	1.81E-01	-6.37E-02	1.90E+00
Radiación ionizante	3.96E-03	4.89E-04	1.01E-04	8.74E-06	8.53E-05	5.96E-05	1.34E-03	-8.71E-04	5.18E-03
Agotamiento de la capa de ozono	2.23E-04	3.73E-05	1.32E-05	7.94E-07	7.65E-06	9.33E-06	1.62E-04	-1.07E-04	3.47E-04
Efectos respiratorios	3.51E+00	3.47E-01	7.62E-01	5.30E-03	9.83E-02	8.02E-02	5.59E-01	-4.89E-01	4.88E+00
Acidificación/ Eutroficación	2.52E-01	2.62E-02	1.42E-02	1.60E-04	5.90E-03	8.39E-03	2.44E-02	-4.58E-02	2.86E-01
Ecotoxicidad	1.59E-01	4.12E-02	1.99E-03	9.71E-04	2.48E-03	1.18E-03	2.04E-01	-2.10E-02	3.90E-01
Uso de suelo	1.13E-01	2.13E-02	1.83E-02	1.53E-04	1.36E-03	1.08E-03	1.26E-01	-6.93E-02	2.12E-01
Consumo de minerales	4.53E-02	7.87E-03	9.75E-04	9.02E-05	3.98E-04	5.76E-04	1.31E-02	-5.38E-03	6.30E-02
Consumo de combustibles fósiles	2.35E+00	3.62E-01	1.28E-01	1.95E-03	8.71E-02	7.53E-02	1.57E+00	-1.08E+00	3.50E+00

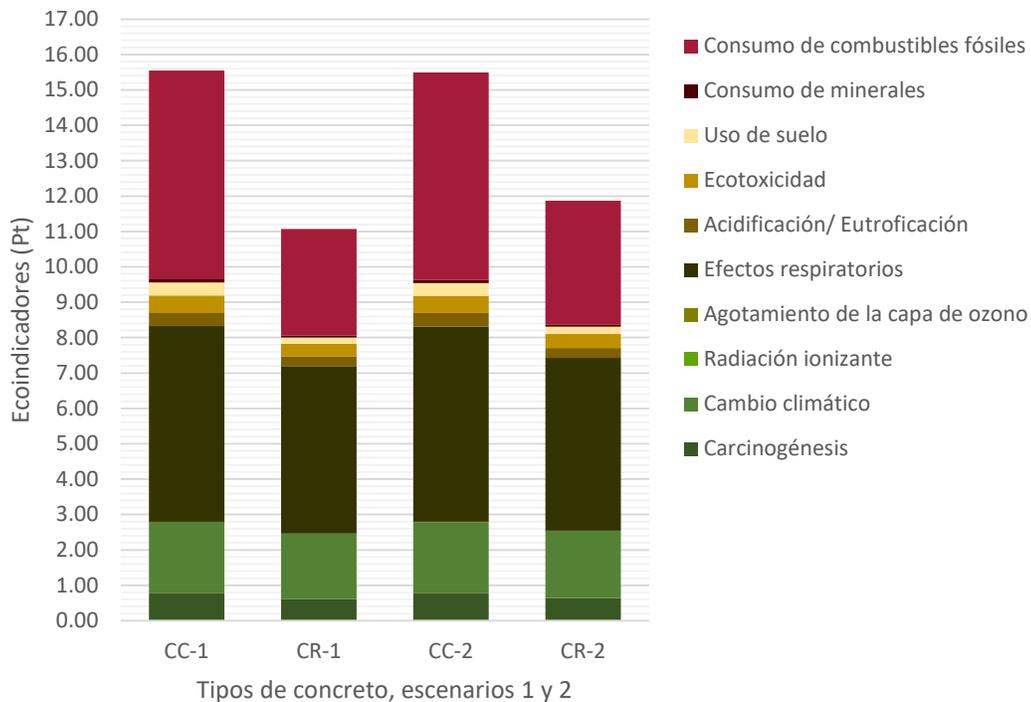


Figura 42.- Comparativa de indicadores de impacto asociados a m³ del concreto convencional y reciclado.

La contribución que tiene cada uno de los subprocesos al daño ambiental coinciden con lo reportado en los trabajos de Marinkovic *et al* (2010), De Schepper *et al* (2014), Jiménez *et al* y Turk *et al* (2015), Ding *et al* (2016) y Yazdanbakhsh *et al* (2017), en los cuales a pesar de que algunas categorías de impacto seleccionadas difieren con las del presente trabajo, el porcentaje de contribución en las categorías que hay en común es similar, es decir, el cemento es el que tiene la mayor contribución, seguido por el transporte de materiales y producción de agregados, y también se presenta un impacto a favor del medio ambiente por que la disposición final es evitada en el caso de los concretos reciclados [61- 65].

8.2.2.- Interpretación

Por un lado, en las Tablas 37 y 38 se presenta la identificación de aspectos significativos de cada uno de los subprocesos para la producción de un m³ de los diferentes concretos del escenario 1. De acuerdo con esto, se puede decir que los resultados de inventario son consistentes con



los de evaluación de impactos ambientales. Enseguida se mencionan estas consistencias, así como los aspectos significativos identificados:

1. El inventario de entradas y salidas, nos permite identificar que la principal diferencia entre el CC-1 y el CR-1, es el transporte de los materiales para producirlos, así como la disposición final de los residuos de estos concretos cuando llegan al final de su vida útil.
 - a. Los materiales para producir ambos concretos representan una contribución similar, únicamente varía de manera significativa para los agregados finos y gruesos, siendo los primeros de 46% y 54% para CC-1 y CR-1, respectivamente; mientras que los gruesos representan el 59% y 41%.
 - b. El transporte de agregados para producir CC-1 representa el 77% de las entradas de este rubro, mientras que el de agregados para CR-1 representa sólo el 23% de éstas.
 - c. La disposición final de ambos residuos tiene la misma contribución para ambos concretos; sólo que en el caso del CC-1 su valor es positivo, ya que el residuo es simplemente vertido y en el caso del CR-1 es negativo, ya que éste es tratado para formar parte una nueva cadena productiva.
2. Los impactos causados por la producción de cemento representan el 63.38% de los daños totales calculados.
 - a. 32.52% de éstos se atribuye a la producción de 450kg para CR-1, de los cuales 13.20% son por efectos respiratorios, 8.84% por consumo de combustibles fósiles y 6.39% por cambio climático.
 - b. 30.86% corresponde a la producción de cemento utilizado para CC-1, de los cuales 12.53% son por efectos respiratorios, 8.38% por consumo de combustibles fósiles y 6.07% por cambio climático.
3. Los impactos causados por la disposición final de los residuos marcan una diferencia importante entre los CC-1 y CR-1, ya que en los segundos el impacto es negativo, es decir, el impacto es a favor del medio ambiente.



-
- a. El impacto por consumo de combustibles fósiles debido a la disposición final para CR-1 es de -4.06%.
 - b. El impacto por efectos respiratorios debido a la disposición final para CR-1 es de -1.84%.
 - c. El impacto por uso de suelo debido a la disposición final para CR-1 es de -0.26%.
4. Los impactos por efectos respiratorios son los que mayor contribución generan al daño ambiental y representan 38.53% de los daños totales calculados para el escenario 1.
 - a. 20.76% se deben a la producción de CC-1, principalmente por la producción de 427kg de cemento (12.53%), 949kg de AN (2.48%), así como por el transporte de 177.61tkm (2.11%).
 - b. 17.78% corresponde a la producción de CR-1, principalmente por la producción de 450kg de cemento (13.20%), 658kg de AR (2.86%), así como por el transporte de 128tkm (1.56%).
 5. Los impactos causados por el consumo de combustibles fósiles también tienen una contribución importante al daño ambiental, específicamente a los recursos; representan el 33.46% de los daños totales calculados.
 - a. 22.16% se deben a la producción de CC-1, de los cuales 8.38% corresponden a la producción de 427kg de cemento, 6.02% debido al transporte de 177.61tkm de materiales y 4.06% por la disposición final de éste.
 - b. 11.30% son causados por la producción de CR-1, de los cuales 8.84% son por la producción del cemento utilizado, 4.07% por el transporte de 128tkm de materiales y 1.36% por la producción de 658kg de AR.
 6. El 14.53% de los daños totales calculados corresponde a los impactos por cambio climático.
 - a. La producción de CC-1 representa el 7.59%, siendo la mayor contribución debido a la producción de cemento (6.07%), transporte de materiales (0.69%) y producción de agregado grueso triturado (0.35%).
-



-
- b. La producción de CR-1 representa el 6.94%, siendo la mayor contribución debido a la producción de cemento (6.39%), transporte de materiales (0.46%) y producción de arena (0.19%).
7. Los impactos por carcinogénesis son 5.20% de los daños totales calculados.
 - a. 2.91% son ocasionados por la producción de CC-1, de los cuales 1.84% se deben a la producción de 427kg de cemento, 0.42% a la producción de 949kg de AN y 0.34% al transporte de materiales.
 - b. 2.29% son ocasionados por la producción de CR-1, de los cuales 1.94% se deben a la producción de 450kg de cemento, 0.22% % al transporte de materiales y 0.19% a la producción de agregado fino.
 8. Los daños al ecosistema por ecotoxicidad son de 3.14% del total de daños calculados.
 - a. 1.81% debido a la producción de CC-1, siendo la mayor contribución por el transporte de 177.61tkm (0.76%), seguido por la producción de cemento (0.57%) y AN (0.26%).
 - b. 1.34% debido a la producción de CR-1, siendo la mayor contribución por el transporte de 128tkm (0.64%) de materiales, seguido por la producción de cemento (0.60%) y arena (0.15%).
 9. La acidificación/eutroficación causa el 2.50% del daño total.
 - a. 1.45% corresponde a la producción de CC-1, de los cuales 0.90% se deben a la producción de cemento, 0.17% a la disposición final del concreto en vertederos y 0.15% a la producción de AN.
 - b. 1.05% corresponde a la producción de CR-1, de los cuales 0.95% y 0.10% se deben a la producción de cemento y arena, respectivamente.
 10. Los impactos ocasionados por uso de suelo son de 2.04% de los daños totales.
 - a. 1.38% debidos a la producción de CC-1, de los cuales 0.48% son por el transporte de materiales, 0.40% por la producción de cemento y 0.16% por la producción de AN.
-



- b. 0.66% debidos a la producción de CR-1, de los cuales 0.42% son por la producción de cemento, 0.34% por el transporte y 0.08% por la producción de arena.
11. Los impactos ocasionados por consumo de minerales, radiación ionizante y agotamiento de la capa de ozono representan el 0.60% en conjunto, por lo cual podría decirse que su contribución al daño ambiental no es significativa.



Tabla 35.- Identificación de aspectos significativos en la producción de m³ de los concretos convencional y reciclado en el escenario 1 (parte I).

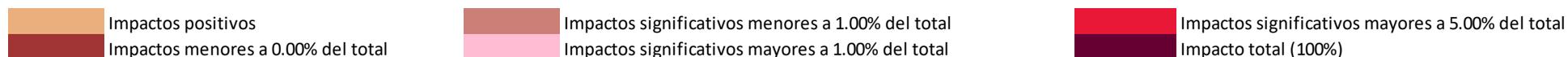
Subproceso	Materiales								Transporte						Energía				Residuos	
	Cemento		Arena		AN/AR		Agua		Camioneta 1.5t		Volteo 7m ³		Camión de 32t		Diésel		Electricidad		Concreto	
	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	tkm	%	tkm	%	tkm	%	MJ	%	MJ	%	m ³	%
CONCRETOS	877.00	100	1470.00	100	1607.00	100	359.60	100	1.44	100	101.58	100	202.59	100	52.24	100	14.98	100	2.00	100
CC-1	427.00	49	675.00	46	949.00	59	175.10	49	0.70	49	78.27	77	98.64	49	26.12	50	7.49	50	1.00	50
Cemento	427.00	49																		
Arena			675.00	46																
AN					949.00	59														
Agua							175.10	49												
Producción														9.14	17	7.49	50			
Demolición														16.98	33					
Transporte									0.70	49	78.27	77	98.64	49						
Disposición final																			1.00	50
CR-1	450.00	51	795.00	54	658.00	41	184.50	51	0.74	51	23.31	23	103.95	51	26.12	50	7.49	50	-1.00	-50
Cemento	450.00	51																		
Arena			795.00	54																
AR					658.00	41														
Agua							184.50	51												
Producción														9.14	17	7.49	50			
Demolición														16.98	33					
Transporte									0.74	51	23.31	23	103.95	51						
Disposición final																			-1.00	-50

 Porcentaje más alto



Tabla 36.- Identificación de aspectos significativos en la producción de m³ de los concretos convencional y reciclado en el escenario 1 (parte II).

Subproceso	Evaluación de impactos ambientales																					
	Carcinogénesis		Cambio climático		Radiación ionizante		Agotamiento de la capa de ozono		Efectos respiratorios		Acidificación/ Eutroficación		Ecotoxicidad		Uso de suelo		Consumo de minerales		Consumo de combustibles fósiles		Total	
	Pt	%	Pt	%	Pt	%	Pt	%	Pt	%	Pt	%	Pt	%	Pt	%	Pt	%	Pt	%	Pt	%
CONCRETOS	1.38E+00	5.20	3.87E+00	14.53	1.23E-02	0.05	8.82E-04	0.00	1.03E+01	38.53	6.65E-01	2.50	8.37E-01	3.14	5.43E-01	2.04	1.45E-01	0.55	8.91E+00	33.46	2.66E+01	100.00
CC-1	7.74E-01	2.91	2.02E+00	7.59	7.55E-03	0.03	5.86E-04	0.00	5.52E+00	20.76	3.87E-01	1.45	4.81E-01	1.81	3.68E-01	1.38	8.69E-02	0.33	5.90E+00	22.16	1.55E+01	58.41
Cemento	4.89E-01	1.84	1.61E+00	6.07	3.76E-03	0.01	2.12E-04	0.00	3.33E+00	12.53	2.40E-01	0.90	1.51E-01	0.57	1.07E-01	0.40	4.30E-02	0.16	2.23E+00	8.38	8.21E+00	30.86
Arena	4.24E-02	0.16	4.38E-02	0.16	4.16E-04	0.00	3.17E-05	0.00	2.94E-01	1.11	2.23E-02	0.08	3.50E-02	0.13	1.81E-02	0.07	6.68E-03	0.03	3.07E-01	1.15	7.70E-01	2.89
AN	1.12E-01	0.42	9.32E-02	0.35	9.82E-04	0.00	5.19E-05	0.00	6.61E-01	2.48	3.96E-02	0.15	6.92E-02	0.26	4.34E-02	0.16	1.73E-02	0.07	5.14E-01	1.93	1.55E+00	5.83
Agua	9.32E-04	0.00	6.29E-04	0.00	8.30E-06	0.00	7.54E-07	0.00	5.03E-03	0.02	1.52E-04	0.00	9.21E-04	0.00	1.46E-04	0.00	8.56E-05	0.00	1.86E-03	0.01	9.76E-03	0.04
Producción	6.74E-03	0.03	1.11E-02	0.04	8.53E-05	0.00	7.65E-06	0.00	9.83E-02	0.37	5.90E-03	0.02	2.48E-03	0.01	1.36E-03	0.01	3.98E-04	0.00	8.71E-02	0.33	2.13E-01	0.80
Demolición	2.21E-03	0.01	8.59E-03	0.03	5.96E-05	0.00	9.33E-06	0.00	8.02E-02	0.30	8.39E-03	0.03	1.18E-03	0.00	1.08E-03	0.00	5.76E-04	0.00	7.53E-02	0.28	1.78E-01	0.67
Transporte	8.94E-02	0.34	1.84E-01	0.69	1.37E-03	0.01	1.65E-04	0.00	5.62E-01	2.11	2.48E-02	0.09	2.01E-01	0.76	1.28E-01	0.48	1.34E-02	0.05	1.60E+00	6.02	2.80E+00	10.54
Disposición final	3.10E-02	0.12	6.37E-02	0.24	8.71E-04	0.00	1.07E-04	0.00	4.89E-01	1.84	4.58E-02	0.17	2.10E-02	0.08	6.93E-02	0.26	5.38E-03	0.02	1.08E+00	4.06	1.81E+00	6.79
CR-1	6.09E-01	2.29	1.85E+00	6.94	4.76E-03	0.02	2.96E-04	0.00	4.73E+00	17.78	2.78E-01	1.05	3.55E-01	1.34	1.75E-01	0.66	5.85E-02	0.22	3.01E+00	11.30	1.11E+01	41.59
Cemento	5.15E-01	1.94	1.70E+00	6.39	3.96E-03	0.01	2.23E-04	0.00	3.51E+00	13.20	2.52E-01	0.95	1.59E-01	0.60	1.13E-01	0.42	4.53E-02	0.17	2.35E+00	8.84	8.65E+00	32.52
Arena	4.99E-02	0.19	5.16E-02	0.19	4.89E-04	0.00	3.73E-05	0.00	3.47E-01	1.30	2.62E-02	0.10	4.12E-02	0.15	2.13E-02	0.08	7.87E-03	0.03	3.62E-01	1.36	9.07E-01	3.41
AR	6.51E-03	0.02	1.45E-02	0.05	1.01E-04	0.00	1.32E-05	0.00	7.62E-01	2.86	1.42E-02	0.05	1.99E-03	0.01	1.83E-02	0.07	9.75E-04	0.00	1.28E-01	0.48	9.46E-01	3.55
Agua	9.82E-04	0.00	6.63E-04	0.00	8.74E-06	0.00	7.94E-07	0.00	5.30E-03	0.02	1.60E-04	0.00	9.71E-04	0.00	1.53E-04	0.00	9.02E-05	0.00	1.95E-03	0.01	1.03E-02	0.04
Producción	6.74E-03	0.03	1.11E-02	0.04	8.53E-05	0.00	7.65E-06	0.00	9.83E-02	0.37	5.90E-03	0.02	2.48E-03	0.01	1.36E-03	0.01	3.98E-04	0.00	8.71E-02	0.33	2.13E-01	0.80
Demolición	2.21E-03	0.01	8.59E-03	0.03	5.96E-05	0.00	9.33E-06	0.00	8.02E-02	0.30	8.39E-03	0.03	1.18E-03	0.00	1.08E-03	0.00	5.76E-04	0.00	7.53E-02	0.28	1.78E-01	0.67
Transporte	5.82E-02	0.22	1.24E-01	0.46	9.23E-04	0.00	1.12E-04	0.00	4.14E-01	1.56	1.69E-02	0.06	1.70E-01	0.64	9.00E-02	0.34	8.62E-03	0.03	1.08E+00	4.07	1.97E+00	7.39
Disposición final	-3.10E-02	-0.12	-6.37E-02	-0.24	-8.71E-04	0.00	-1.07E-04	0.00	-4.89E-01	-1.84	-4.58E-02	-0.17	-2.10E-02	-0.08	-6.93E-02	-0.26	-5.38E-03	-0.02	-1.08E+00	-4.06	-1.81E+00	-6.79





Por otro lado, en las tablas 39 y 40 se presentan los aspectos significativos del inventario de ciclo de vida y de la evaluación de impacto del inventario de ciclo de vida de los concretos convencional y reciclado en el escenario 2, en las cuales se pueden identificar que:

1. Las entradas y salidas del inventario para producir un m³ de CC-2 y CR-2 indican que aunque existen algunas variaciones significativas en el consumo de algunos materiales, la principal diferencia entre los concretos se debe a la disposición final de sus residuos.
 - a. El consumo de materiales para producir ambos concretos es prácticamente el mismo, únicamente presenta variación significativa en el consumo de agregados finos y gruesos, siendo de 46% (CC-2) y 54% (CR-2) para los primeros y de 59% (CC-2) y 41% (CR-2) para los segundos.
 - b. El transporte de cemento, agregados y residuos de concreto para ambos concretos es similar. El transporte de cemento representa el 49% y 51% para CC-2 y CR-2, respectivamente; mientras que el de agregados y residuos es de 51% y 49%.
 - c. La disposición de final de residuos de concreto tiene el mismo porcentaje de contribución que los concretos convencionales y reciclados del escenario 1.
2. La producción de cemento es el subproceso que tiene el mayor impacto y representa el 61.63% del daño ambiental calculado para este escenario.
 - a. 30.01% de los impactos corresponde a la producción de 427kg para producir CC-2, de los cuales 12.18% son por efectos respiratorios, 8.15% por consumo de combustibles fósiles y 5.90% por cambio climático.
 - b. 31.62% de los impactos corresponde a la producción de 450kg para producir CR-2, de los cuales 12.84% son por efectos respiratorios, 8.59% por consumo de combustibles fósiles y 6.22% por cambio climático.
3. Los impactos causados por la disposición final de residuos merece mención especial, ya que contribuye de manera significativa, siendo positivos para CC-2 y negativos para CR-2, lo cual significa que la contribución en el segundo es favor del medio ambiente.



-
- a. 6.60% de los impactos totales calculados son por la disposición final de un m³ de CC-2 en vertederos, de los cuales 3.95% son por consumo de combustibles fósiles, 1.79% por efectos respiratorios y 0.25% por uso de suelo.
 - b. -6.60% de los impactos totales calculados se deben a que los residuos provenientes de un concreto viejo fueron procesados mediante un tratamiento físico y reincorporados a una nueva cadena de producción, la del CR-2, de los cuales -3.95% son por consumo de combustibles fósiles, -1.79% por efectos respiratorios y -0.25% por uso de suelo.
4. Los impactos por efectos respiratorios representan la mayor contribución al daño ambiental y representan el 37.97% de los daños totales.
 - a. 20.15% se deben a la producción de CC-2, principalmente a los impactos ocasionados por la producción de 427kg de cemento (12.18%) y 949kg de AN (2.42%), así como por el transporte de 177.61tkm de materiales (2.02%).
 - b. 17.82% se deben a la producción de CR-2, principalmente a los impactos ocasionados por la producción de 450kg de cemento (12.84%) y 658kg de AR (2.78%), así como por el transporte de 128tkm de materiales (2.04%).
 5. El consumo de combustibles fósiles representa el 34.22% de los impactos totales calculados.
 - a. 21.43% es causado por la producción de CC-2, de los cuales 8.15% se deben a la producción de cemento, 5.73% al transporte de materiales y 3.95% a la disposición final de este concreto.
 - b. 12.79% es causado por la producción de CR-2, de los cuales 8.59% se deben a la producción de cemento, 5.75% al transporte de materiales y 1.32% a la producción de AR.
 6. Los impactos por cambio climático son 14.32% de los daños totales calculados.
 - a. 7.36% son causados por la producción de CC-2, de los cuales 5.90% se debe a la producción de cemento, 0.66% al transporte de materiales y 0.34% a la producción de AR.
-



-
- b. 6.96% son causados por la producción de CR-2, de los cuales 6.22% se debe a la producción de cemento, 0.66% al transporte de materiales y 0.19 % a la producción de arena.
 7. Los impactos por carcinogénesis representan el 5.15% de los daños totales de este escenario.
 - a. 2.82% se deben a la producción de CC-2, de los cuales 1.79% y 0.41% son causados por la producción de cemento y AN, respectivamente; mientras que 0.32% se deben al transporte de éstos.
 - b. 2.33% se deben a la producción de CR-2, de los cuales 1.88% son causados por la producción de cemento, 0.32% por el transporte de materiales y 0.18% por la producción de arena.
 8. Los impactos por ecotoxicidad son de 3.18% de los daños totales calculados.
 - a. 1.75% corresponden a la producción de CC-2, los cuales se deben principalmente al transporte de materiales (0.73%), la producción de cemento (0.55%) y de AN (0.25%).
 - b. 1.42% corresponden a la producción de CR-2, de los cuales el transporte de materiales (0.75%), la producción de cemento (0.58%) y de arena (0.15%) son los que tienen mayor contribución.
 9. Los impactos por acidificación son del 2.46% de todos los daños calculados para este escenario.
 - a. 1.41% se deben a la producción de CC-2, de los cuales 0.88% son por la producción del cemento, 0.17 por la disposición de los residuos de concreto y 0.14% por la producción de AN.
 - b. 1.05% se deben a la producción de CR-2, de los cuales 0.92% son por la producción del cemento, 0.10 por la producción de arena y 0.09% por el transporte de materiales.
 10. El uso de suelo ocasiona impactos del 2.11% de los daños totales calculados para este escenario.
-



-
- a. 1.34% se deben a la producción de CC-2, principalmente por el transporte de materiales (0.46%), la producción de cemento (0.39%) y la disposición final de residuos de CC-2 (0.25%).
 - b. 0.77% se deben a la producción de CR-2, principalmente por el transporte de materiales (0.46%), la producción de cemento (0.41%) y arena (0.08%).
11. Los impactos por consumo de minerales, radiación ionizante y agotamiento de la capa de ozono no son significativos, ya que en conjunto sólo representan 0.60% de los daños totales calculados.



Tabla 37.- Identificación de aspectos significativos en la producción de m³ de los concretos convencional y reciclado en el escenario 2 (parte I).

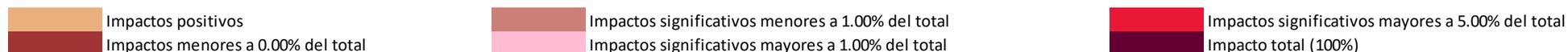
Subproceso	Materiales								Transporte						Energía				Residuos	
	Cemento		Arena		AN/AR		Agua		Camioneta 1.5t		Volteo 7m ³		Camión de 32t		Diésel		Electricidad		Concreto	
	kg	%	kg	%	kg	%	kg	%	tkm	%	tkm	%	tkm	%	MJ	%	MJ	%	m ³	%
CONCRETOS	877.00	100	1470.00	100	1607.00	100	359.60	100	1.44	100	146.60	100	202.59	100	52.24	100	14.98	100	2.00	100
CC-2	427.00	49	675.00	46	949.00	59	175.10	49	0.70	49	75.13	51	98.64	49	26.12	50	7.49	50	1.00	50
Cemento	427.00	49																		
Arena			675.00	46																
AN					949.00	59														
Agua							175.10	49												
Producción														9.14	17	7.49	50			
Demolición														16.98	33					
Transporte									0.70	49	75.13	51	98.64	49						
Disposición final																			1.00	50
CR-2	450.00	51	795.00	54	658.00	41	184.50	51	0.74	51	71.47	49	103.95	51	26.12	50	7.49	50	-1.00	-50
Cemento	450.00	51																		
Arena			795.00	54	658.00	41														
AR																				
Agua							184.50	51												
Producción														9.14	17	7.49	50			
Demolición														16.98	33					
Transporte									0.74	51	71.47	49	103.95	51						
Disposición final																			-1.00	-50

■ Porcentaje más alto



Tabla 38.- Identificación de aspectos significativos en la producción de m³ de los concretos convencional y reciclado en el escenario 2 (parte II).

Subproceso	Carcinogénesis		Cambio climático		Radiación ionizante		Agotamiento de la capa de ozono		Efectos respiratorios		Acidificación/ Eutroficación		Ecotoxicidad		Uso de suelo		Consumo de minerales		Consumo de combustibles fósiles		Total	
	Pt	%	Pt	%	Pt	%	Pt	%	Pt	%	Pt	%	Pt	%	Pt	%	Pt	%	Pt	%	Pt	%
CONCRETOS	1.41E+00	5.15	3.92E+00	14.32	1.27E-02	0.05	9.29E-04	0.00	1.04E+01	37.97	6.72E-01	2.46	8.69E-01	3.18	5.78E-01	2.11	1.50E-01	0.55	9.36E+00	34.22	2.74E+01	100.00
CC-2	7.72E-01	2.82	2.02E+00	7.36	7.52E-03	0.03	5.82E-04	0.00	5.51E+00	20.15	3.86E-01	1.41	4.79E-01	1.75	3.66E-01	1.34	8.66E-02	0.32	5.87E+00	21.43	1.55E+01	56.61
Cemento	4.89E-01	1.79	1.61E+00	5.90	3.76E-03	0.01	2.12E-04	0.00	3.33E+00	12.18	2.40E-01	0.88	1.51E-01	0.55	1.07E-01	0.39	4.30E-02	0.16	2.23E+00	8.15	8.21E+00	30.01
Arena	4.24E-02	0.15	4.38E-02	0.16	4.16E-04	0.00	3.17E-05	0.00	2.94E-01	1.08	2.23E-02	0.08	3.50E-02	0.13	1.81E-02	0.07	6.68E-03	0.02	3.07E-01	1.12	7.70E-01	2.81
AN	1.12E-01	0.41	9.32E-02	0.34	9.82E-04	0.00	5.19E-05	0.00	6.61E-01	2.42	3.96E-02	0.14	6.92E-02	0.25	4.34E-02	0.16	1.73E-02	0.06	5.14E-01	1.88	1.55E+00	5.67
Agua	9.32E-04	0.00	6.29E-04	0.00	8.30E-06	0.00	7.54E-07	0.00	5.03E-03	0.02	1.52E-04	0.00	9.21E-04	0.00	1.46E-04	0.00	8.56E-05	0.00	1.86E-03	0.01	9.76E-03	0.04
Producción	6.74E-03	0.02	1.11E-02	0.04	8.53E-05	0.00	7.65E-06	0.00	9.83E-02	0.36	5.90E-03	0.02	2.48E-03	0.01	1.36E-03	0.00	3.98E-04	0.00	8.71E-02	0.32	2.13E-01	0.78
Demolición	2.21E-03	0.01	8.59E-03	0.03	5.96E-05	0.00	9.33E-06	0.00	8.02E-02	0.29	8.39E-03	0.03	1.18E-03	0.00	1.08E-03	0.00	5.76E-04	0.00	7.53E-02	0.28	1.78E-01	0.65
Transporte	8.74E-02	0.32	1.80E-01	0.66	1.34E-03	0.00	1.62E-04	0.00	5.52E-01	2.02	2.43E-02	0.09	1.99E-01	0.73	1.26E-01	0.46	1.31E-02	0.05	1.57E+00	5.73	2.75E+00	10.06
Disposición final	3.10E-02	0.11	6.37E-02	0.23	8.71E-04	0.00	1.07E-04	0.00	4.89E-01	1.79	4.58E-02	0.17	2.10E-02	0.08	6.93E-02	0.25	5.38E-03	0.02	1.08E+00	3.95	1.81E+00	6.60
CR-2	6.38E-01	2.33	1.90E+00	6.96	5.18E-03	0.02	3.47E-04	0.00	4.88E+00	17.82	2.86E-01	1.05	3.90E-01	1.42	2.12E-01	0.77	6.30E-02	0.23	3.50E+00	12.79	1.19E+01	43.39
Cemento	5.15E-01	1.88	1.70E+00	6.22	3.96E-03	0.01	2.23E-04	0.00	3.51E+00	12.84	2.52E-01	0.92	1.59E-01	0.58	1.13E-01	0.41	4.53E-02	0.17	2.35E+00	8.59	8.65E+00	31.62
Arena	4.99E-02	0.18	5.16E-02	0.19	4.89E-04	0.00	3.73E-05	0.00	3.47E-01	1.27	2.62E-02	0.10	4.12E-02	0.15	2.13E-02	0.08	7.87E-03	0.03	3.62E-01	1.32	9.07E-01	3.31
AR	6.51E-03	0.02	1.45E-02	0.05	1.01E-04	0.00	1.32E-05	0.00	7.62E-01	2.78	1.42E-02	0.05	1.99E-03	0.01	1.83E-02	0.07	9.75E-04	0.00	1.28E-01	0.47	9.46E-01	3.46
Agua	9.82E-04	0.00	6.63E-04	0.00	8.74E-06	0.00	7.94E-07	0.00	5.30E-03	0.02	1.60E-04	0.00	9.71E-04	0.00	1.53E-04	0.00	9.02E-05	0.00	1.95E-03	0.01	1.03E-02	0.04
Producción	6.74E-03	0.02	1.11E-02	0.04	8.53E-05	0.00	7.65E-06	0.00	9.83E-02	0.36	5.90E-03	0.02	2.48E-03	0.01	1.36E-03	0.00	3.98E-04	0.00	8.71E-02	0.32	2.13E-01	0.78
Demolición	2.21E-03	0.01	8.59E-03	0.03	5.96E-05	0.00	9.33E-06	0.00	8.02E-02	0.29	8.39E-03	0.03	1.18E-03	0.00	1.08E-03	0.00	5.76E-04	0.00	7.53E-02	0.28	1.78E-01	0.65
Transporte	8.75E-02	0.32	1.81E-01	0.66	1.34E-03	0.00	1.62E-04	0.00	5.59E-01	2.04	2.44E-02	0.09	2.04E-01	0.75	1.26E-01	0.46	1.31E-02	0.05	1.57E+00	5.75	2.77E+00	10.13
Disposición final	-3.10E-02	-0.11	-6.37E-02	-0.23	-8.71E-04	0.00	-1.07E-04	0.00	-4.89E-01	-1.79	-4.58E-02	-0.17	-2.10E-02	-0.08	-6.93E-02	-0.25	-5.38E-03	-0.02	-1.08E+00	-3.95	-1.81E+00	-6.60





8.3.- Análisis de costos

En las Tablas 41 y 42 se presenta el costo directo para el concreto convencional y reciclado en el escenario de transporte 1, en las cuales se observa que si bien el costo del CR es menor que el CC, la diferencia es realmente pequeña. En el escenario de transporte 2 ocurre lo contrario, el CC tiene un costo menor que el CR, pero ahora la diferencia es un poco mayor (ver Tablas 43 y 44). Es importante mencionar que si bien la diferencia de costo unitario entre concretos es pequeña, si lo ponemos en el contexto adecuado, esta diferencia podría representar un ahorro económico alto.

Tabla 39.- Costo directo para m³ de CC-1.

Material	Cantidad	Unidad	P.U. (MXN)	Importe (MXN)
Cemento	427.00	kg	2.57	1097.39
Arena	0.27	m ³	156.95	42.04
AN	0.35	m ³	288.78	100.06
Agua	175.10	L	0.05	9.28
Aditivo	2.82	L	20.00	56.38
Diesel	4.98	L	17.10	85.16
Costo directo				1390.31

Tabla 40.- Costo directo para m³ de CR-1.

Material	Cantidad	Unidad	P.U. (MXN)	Importe (MXN)
Cemento	450.00	kg	2.57	1156.50
Arena	0.27	m ³	156.95	49.53
AR	0.35	m ³	73.49	24.92
Agua	184.50	L	0.05	9.78
Aditivo	2.97	L	20.00	59.40
Diesel	4.98	L	17.10	85.16
Costo directo				1385.29



Tabla 41.- Costo directo para m³ de CC-2.

Material	Cantidad	Unidad	P.U. (MXN)	Importe (MXN)
Cemento	427.00	kg	2.57	1097.39
Arena	0.27	m ³	156.95	42.04
AN	0.35	m ³	225.45	78.12
Agua	175.10	L	0.05	9.28
Aditivo	2.82	L	20.00	56.38
Diesel	4.98	L	17.10	85.16
Costo directo				1368.37

Tabla 42.- Costo directo para m³ de CR-2.

Material	Cantidad	Unidad	P.U. (MXN)	Importe (MXN)
Cemento	450.00	kg	2.57	1156.50
Arena	0.32	m ³	156.95	49.53
AR	0.34	m ³	154.24	52.31
Agua	184.50	L	0.05	9.78
Aditivo	2.97	L	20.00	59.40
Diesel	4.98	L	17.10	85.16
Costo directo				1412.67



9.-CONCLUSIONES

En términos generales, podría decirse que tomando en cuenta el criterio tecnológico, el CC presenta una ligera ventaja sobre el CR, aunque en la mayoría de los ensayos (excepto ϵ_c) ambos concretos están dentro de la misma zona de clasificación de acuerdo con la normativa correspondiente. Por un lado, la utilización de agregados reciclados en la elaboración de un nuevo concreto no repercutió de manera significativa en el desarrollo de propiedades mecánicas, tales como resistencia a la compresión y módulo de ruptura, puesto que los valores alcanzados están acorde a los estándares correspondientes y son un poco inferiores a los exhibidos por el CC. Por otro lado, el alto porcentaje de absorción y porosidad del AR generó un decremento considerable en la resistividad eléctrica, así como un incremento en la porosidad efectiva del CR, lo cual podría comprometer la durabilidad de la estructura de concreto si está expuesta a un ambiente agresivo, como es el caso de estructuras localizadas en zonas costeras o ciudades muy industrializadas.

En cambio, el análisis comparativo bajo criterios de desempeño ambiental hecho a través de un ACV mediante Eco-indicator 99 indica que el CR-1 presenta una ventaja importante sobre el CC-1, ya que el impacto ambiental se reduce en un 27%. Sin embargo, esta ventaja disminuye (22%) cuando los concretos son evaluados en el segundo escenario de transporte, debido a que las distancias de traslado de materiales son igualadas. Si bien el mayor daño ambiental se debe a la etapa de producción del cemento (63%) debido al alto consumo energético y emisión de sustancias contaminantes que contribuyen principalmente al cambio climático, causan graves efectos respiratorios y agotan los combustibles fósiles; la ventaja es atribuida principalmente a: el transporte de materiales para elaborar CR que es menor en el escenario 1 (caso de estudio), lo cual disminuye las emisiones de contaminantes a la atmósfera, así como el consumo de combustibles fósiles; la producción de AR tiene menor impacto que la de AN, ya que no es necesaria la extracción de material virgen; y la disposición final de residuos de concreto en vertederos es evitada cuando el material es reciclado para formar parte de una nueva cadena productiva. Por otro lado, las áreas que sufren mayor daño por la producción de concreto son



salud humana y recursos, el cual es debido principalmente por efectos respiratorios y consumo de combustibles fósiles, respectivamente.

Finalmente, si bien el costo unitario del CR-1 es ligeramente menor que el del CC-1, cuando es escalado a la producción anual de concreto premezclado de una de las empresas más importantes en México, representa un ahorro de \$57.42 millones anuales.

Aunque el análisis bajo criterios de desempeño tecnológico, ambiental y económico de los concretos evaluados en la presente investigación brinda elementos suficientes para determinar la factibilidad de utilización de agregados reciclados como reemplazo total de agregados triturados naturales en la elaboración de concretos con las características especificadas, la utilización de éstos queda sujeta al criterio del constructor.



Bibliografía

- [1] B. Romero Rodríguez, «El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental,» Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, México, 2003.
- [2] SEMARNAT, «Residuos,» México, 2012.
- [3] W. Martínez Molina, A. Torres Acosta, E. Alonso Guzmán, H. Chávez García, H. Hernández Barrios, C. Lara Gómez, W. Martínez Alonso, J. Pérez Quiroz, J. Bedolla Arroyo y F. González Valdez, «Concreto reciclado:una revisión,» *ALCONPAT*, pp. 235-248, 2015.
- [4] M. Curran, «Life cycle assessment: a review of the methodology and its application to sustainability,» *Current Opinion in Chemical Engineering*, pp. 273-277, 2013.
- [5] H. Lehtinen, A. Saarentaus, J. Rouhiainen, M. Pitts y A. Azapagic, «A review of LCA Methods and Tools and their suitability for SMEs,» 2011.
- [6] Institute for Environment and Sustainability, «International reference life cycle data system handbook-Framework and Requirements for life cycle assessment models and indicators,» European Union, Luxemburgo, 2010.
- [7] J. Vivancos Bono, D. Collado Ruiz, M. Bastante Ceca, T. Gómez Navarro y S. Capuz Rizo, «Análisis de diversas metodologías de evaluación del impacto de ciclo de vida,» *Universidad Politécnica de Valencia*, pp. 963-978.
- [8] N. Fonseca, J. Brito y L. Evangelista, «The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste,» *Cement & Concrete Composites*, pp. 637-643, 2011.



-
- [9] P. Kathirvel y R. Saravana, «Influence of recycled concrete aggregates on the flexural properties of reinforced alkali activated slag concrete,» *Construction and Buildings Materials*, pp. 51-58, 2016.
- [10] «INFOAGRO,» 18 Enero 2017. [En línea]. Available: http://www.infoagro.com/documentos/problemativa__clasificacion_y_gestion_residuos_solidos_urbanos.asp.
- [11] SEMARNAT, *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*, 1988.
- [12] SEMARNAT, *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*, 2003.
- [13] NOM-052-SEMARNAT-2005, 2005.
- [14] ASECA, «ASECA,» 03 Enero 2016. [En línea]. Available: <http://www.aseca.com/FAQRetrieve.aspx?ID=38859>.
- [15] Revista Ambientum, «Generación de residuos sólidos urbanos,» 2013.
- [16] INECC; SEMARNAT, «Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos,» México, 2012.
- [17] SEMARNAT, «Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales,» 05 Enero 2017. [En línea]. Available: <http://www.semarnat.mx/leyes-y-normas/nom-residuos>.
- [18] S. Kosmatka, B. Kerkhoff, W. Panarese y J. Tanesi, *Diseño y control de mezclas de concreto*, Skokie, Illinois: Portland Cement Association, 2004.
- [19] W. Martínez Molina, E. Alonso Guzmán, H. Chávez García, C. Lara Gómez y F. González valdez, «Recycled concrete, a solution for fine and coarse raw material for new



concrete,» de *International conference on structural, mechanical and materials engineering*, Dalian, China, 2015.

- [20] A. M. Neville y J. Brooks, *Concrete Technology*, Second ed., England: Pearson Education Limited, 2010.
- [21] CANACEM, «Cámara Nacional de la Industria del Cemento,» 26 Agosto 2018. [En línea]. Available: www.canacem.org.mx/procesos_de_produccion.htm.
- [22] NMX-C-414-ONNCCE-2010, *Industria de la construcción-Cementantes hidráulicos-Especificaciones y métodos de prueba*, 2010.
- [23] CANACEM, «Producción y Consumo,» México, 2016.
- [24] FICEM, «Informe estadístico,» Bogotá, 2018.
- [25] Benhelal, E.; Zahedi, G.E. & et al, «Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry,» *Journal of Cleaner Production*, pp. 142-161, 2012.
- [26] J. Newman and B. S. Choo, *Advanced concrete technology*, First ed., ENGLAND: Elsevier, 2003.
- [27] NMX-C-255-ONNCCE-2013, *Industria de la construcción-Aditivos químicos para concreto-Especificaciones y métodos de ensayo*, 2013.
- [28] E. Rivva López, *Naturaleza y materiales del concreto*, Lima, Perú, 2000.
- [29] NMX-C-156-ONNCCE-2010, *Industria de la Construcción-Concreto hidráulico-Determinación del revenimiento en el concreto fresco*, México, 2010.



-
- [30] NMX-C-191-C-0NNCCE-2015, *Industria de la Construcción-Concreto-Determinación de la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios del claro*, 2015.
- [31] A. Sarja y E. Vesikari, «Durability design of concrete structures,» Chapman and Hall, Londres, Reino Unido, 2005.
- [32] A. Torres Acosta, W. Martínez Molina, M. Lomelí González y A. Pérez Gallardo, «Adiciones en base a cactus como inhibidor de corrosión para acero de refuerzo en concreto,» *Publicación Técnica No. 328, Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Instituto Mexicano del Transporte*, 2010.
- [33] R. Polder, C. Andrade, B. Elsener, V. J., J. Gulikers y R. Weidert, «RILEM TC 154 EMC: electrochemical techniques for measuring metallic corrosion,» *Materials and Structures*, pp. 603-611, 2000.
- [34] NMX-C-514-ONNCCE-2016, *Industria de la construcción-Resistividad eléctrica del concreto hidráulico-Especificaciones y métodos de ensayo*, 2016.
- [35] R. DURAR.CYTED, «Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado,» 1998.
- [36] V. Malhotra y N. Carino, *Handbook on nondestructive testing of concrete*, U.S.A.: CRC Press, 2004.
- [37] F. Göran, «On the capillarity of Concrete,» *Nordic Concret Research*, nº 1, 1986.
- [38] A. Jensen, L. Hoffman, B. Moller y A. Schmidt, *Life cycle assessment. A guide to approaches, experiences and information sources*, 1997.



-
- [39] A. Contarini y A. Meijer, «LCA comparison of roofing materials for flat roofs,» *Smart and Sustainable Built Environment*, pp. 97-109, 2015.
- [40] ISO 14040:2006(E), *Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework*, ISO 2006, 2006.
- [41] L. Novak y C. Lie Ugaya, «The cost and environmental impact methodology to products,» de *19th International congress of mechanical engineering*, Brasilia, 2007.
- [42] «Fastonline,» 25 Enero 2017. [En línea]. Available: http://www.fastonline.org/CD3WD_40/HLTHES/PC/R044BS/ES/R044BS09.HTM.
- [43] C. Suárez Salazar, *Costo y tiempo en edificación*, México: Limusa, 2004.
- [44] L. Varela, *Costos de construcción para arquitectos e ingenieros*, Distrito Federal: Intercost, 2011.
- [45] H. Klee, «Iniciativa por la sostenibilidad del concreto. Reciclando concreto,» WMCSO, Washington,D.C., 2009.
- [46] T. Bergman, *Integrating service-life modeling and life-cycle assessment for recycled-aggregate concrete*, University of Colorado, 2015.
- [47] N. Y. Ho, Y. P. K. Lee, W. F. Lim, T. Zayed, K. C. Chew, G. L. Low y S. K. Ting, «Efficient utilization of recycled concrete aggregate in structural concrete,» *Journal of materials in civil engineering* , pp. 318-327, 2013.
- [48] V. Letelier, R. Osses, G. Valdés y G. Moricomi, «Utilización de metodlogías para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón estructural fabricado con áridos reciclados,» *Ingeniería y Ciencia*, pp. 180-195, 2014.



-
- [49] M. De Schepper, P. Van den Heede, I. Van Driessche y N. De Belie, «Life cycle assessment of completely recyclable concrete,» *Materials*, pp. 6010-6027, 2014.
- [50] S. Guignot, S. Touzé, F. Von der Weid y Y. Ménard, «Recycling construction and demolition wastes as buildings materials,» *Journal of Industrial Ecology*, pp. 1030-1043, 2015.
- [51] I. Simion, M. Fortuna, A. Bonoli y M. Gavrilescu, «Comparing environmental impacts of natural inert and recycled construction and demolition waste processing using LCA,» *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, pp. 273-287, 2013.
- [52] X. Jianzhuang, W. Li, Y. Fan y X. Huang, «An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011),» *Construction and Buildings Materials*, pp. 364-383, 2012.
- [53] E. Contreras Marín, *Evaluación de agregados reciclados, para su implementación en pavimentos rígidos*, Morelia, Michoacán: UMSNH, 2016.
- [54] NMX-C-159-ONNCCE-2016, *Industria de la Construcción-Concreto-Elaboración y curado de especímenes en el laboratorio*, México, 2016.
- [55] NMX-C-083-ONNCCE-2014, *Industria de la construcción-Concreto-Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes-Métodos de ensayo*, 2014.
- [56] NMX-C-275-ONNCCE-2004, *Industria de la construcción-Concreto-Determinación de velocidad de pulso a través del concreto-Método de ultrasonido*, 2004.
- [57] M. Goedkoop y R. Spriensma, *The eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology report*, Amsterdam: Pre Consultants B.V., 2001.



-
- [58] Ministry of housing, spatial planning and the environment, Eco-indicator 99. Manual for designers. A damage oriented method for Life Cycle Assessment, Amsterdam: Pre Consultants , 2000.
- [59] F. González Maza, *Análisis de ciclo de vida de materiales de construcción convencionales y alternativos*, San Luis Potosí: UASLP, 2012.
- [60] M. Antón Vallejo, *Utilización del análisis de ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo*, Barcelona, España: UPC, 2004.
- [61] S. Marinkovic, V. Radonjanin, M. Malesev y I. Ignjatovic, «Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete,» *Waste Management*, vol. 30, pp. 2255-2264, 2010.
- [62] C. Jiménez, M. Barra, A. Josa y S. Valls, «LCA of recycled and conventional concretes designed using equivalent mortar volume and classic methods,» *Construction and Building Materials*, pp. 245-252, 2015.
- [63] J. Turk, Z. Cotic, A. Mladenovic y A. Sajna, «Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA,» *Waste management*, vol. 45, pp. 194-205, 2015.
- [64] T. Ding, J. Xiao y V. Tam, «A closed-loop life cycle assessment of recycled aggregateutilization in China,» *Waste Management*, pp. 367-375, 2016.
- [65] A. Yazdanbakhsh, L. Banck, T. Baez y I. Wernick, «Comparative LCA of concrete with natural and recycled coarse aggregate in the New York City area,» *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 23, nº 6, pp. 1163-1173, 2018.



-
- [66] NMX-C-122-ONNCCE-2004, *Industria de la construcción-Agua para concreto-Especificaciones*, 2004.
- [67] A. Aguirre y R. Mejía de Gutiérrez, «Durability of reinforced concrete exposed to aggressive conditions,» *Materiales de Construcción*, pp. 7-38, 2013.
- [68] NMX-C-163-ONNCCE-1997, *Industria de la Construcción-Concreto-Determinación de la resistencia a la tensión por compresión diametral de cilindros de concreto*, 1997.
- [69] K. Caffrey y M. Chinn, «Life cycle assessment: description and methodology».
- [70] I. Zbicinski, «LCA methods and methodology,» de *26th European Meeting of Statisticians*, Torun, 2006.
- [71] D. Klees y C. Coccato, «Ciclo de vida sostenible de los materiales de construcción,» *Comunicaciones científicas y tecnológicas*, 2005.
- [72] M. Goedkoop y R. Spriensma, «The eco-indicator 99.A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology Report,» PRe Consultants, Amersfoort, 2001.
- [73] F. González Masa, *Análisis de ciclo de vida de materiales de construcción convencionales y alternativos*, San Luis Potosí, S.L.P.: UASLP, 2012.
- [74] F. Oliveira, «CLA Construcción latinoamericana,» 2017 Diciembre 2017. [En línea]. Available:<https://www.construccionlatinoamericana.com/cemex-una-historia-global/130743.article>. [Último acceso: 29 Septiembre 2018].