



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Evaluación comparativa de concreto con agregado natural y concreto a partir de agregado reciclado de prefabricados de concreto, bajo un análisis de ciclo de vida.

Ing. Eduardo Enrique Fonseca Medina

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Artes, Maestría en Construcción.
Bogotá, Colombia
2018

Evaluación comparativa de concreto con agregado natural y concreto a partir de agregado reciclado de prefabricados, bajo un análisis de ciclo de vida.

Ing. Eduardo Enrique Fonseca Medina

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Construcción.

Director:

D.I. Paulo Andrés Romero Larrahondo MSc. Ph.D.

Línea de Investigación:

Materiales constructivos.

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Artes, Maestría en Construcción.
Bogotá, Colombia

2018

“...Ningún marinero se hace experto en un mar tranquilo...”

Anónimo.

Dedicado a todos los que de alguna forma tuvieron que ver o aportaron su grano de arena, para que esta investigación llegara a feliz término y que el esfuerzo que la misma acarrió, fuera disminuido por una ayuda, una información valiosa o una orientación. También dedico este trabajo a los que amenizaron el camino con una voz de aliento, un consejo, un abrazo, un beso...

A todos ustedes, mil gracias por desinteresadamente estar ahí.

EFT, fue un momento difícil dentro de este viaje pero siempre serás motivación y no tristeza.

Agradecimientos

Resumen

Esta investigación realiza un comparativo entre mezclas de concreto con Agregados Naturales AN, y con Agregados Reciclados AR de piezas de prefabricados de concreto, obtenidos en la ciudad de Bogotá D.C., con el fin de definir, a la luz de un Análisis de Ciclo de Vida ACV, cuáles presentan mayores ventajas ambientales. Para esto se usó la metodología CML 2001, definiendo la Unidad Funcional UF como 1 metro cúbico de concreto de 280 kgf/cm² de resistencia. Para esto se realizaron ensayos de compresión de cilindros de Concreto con Agregado Reciclado CAR, con 25, 50, 75% y 100% de contenido de AR y Concretos con Agregados Naturales CAN. Se usaron los métodos de compensación y presaturación para manejo de la absorción en agregados, y de envuelto en plástico y sumergido para el curado de los especímenes. Se usó la misma cantidad de cemento y relación a/c para todos los concretos, encontrando mejores resistencias en los reemplazos del 100% de AR, que las en las mezclas de control CAN. Por este motivo, y observando un mejor comportamiento en las mezclas Presaturadas-Sumergidas PS, se optó por tomar este tipo de mezcla y verificar si una mezcla con 16% de cemento cumplía la UF. Finalmente, se analizaron tres mezclas: CAN-PS, 100%-PS y 100%-PS (-16%). El ACV arrojó que las mezclas 100%-PS y 100%PS (-16%), presentan una reducción de los indicadores de impacto considerables, y que el consumo de materias primas naturales es un 40% inferior a la de los CAN-PS.

Palabras clave: concreto reciclado, prefabricados, análisis de ciclo de vida, curado.

Contenido

Resumen	IX
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XIV
Lista de Símbolos y abreviaturas	XVI
Introducción	1
1. Planteamiento del problema	5
1.1 Justificación.	6
1.1.1 Conveniencia estratégica ambiental.	7
1.1.2 Valor teórico.	9
1.2 Preguntas de investigación.	13
1.3 Objetivos.	14
1.3.1 Objetivo general.	14
1.3.2 Objetivos específicos.	14
1.4 Hipótesis.	15
2. Marco teórico.	17
2.1 Generalidades.	18
2.1.1 Propiedades de los agregados naturales.	19
2.1.2 Propiedades de los agregados reciclados.	21
2.1.3 Fuente de los agregados reciclados.	23
2.2 Mezclas de concreto.	24
2.2.1 Mezclas de agregados reciclados.	25
2.3 Análisis de Ciclo de Vida.	26
2.3.1 Definición del objetivo y alcance.	27
2.3.2 Desarrollo del Inventario del Ciclo de Vida (ICV).	34
2.3.3 Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV).	36
2.3.4 Interpretación del Análisis de Ciclo de Vida ACV.	39

2.3.5	Relación del ACV con las mezclas de concreto.	41
2.4	Herramientas para análisis del ciclo de vida.	44
2.5	Estudios relacionados de mezclas de concreto con agregados reciclados y ACV. 48	
2.6	Conceptualización del estudio.	54
3.	Metodología.	57
3.1	Criterios de agrupación o “<i>matching</i>”.	58
3.2	Grupos.	58
3.3	Variables.	59
3.4	Validez.	60
3.5	Alcance.	63
3.6	Diagrama lógico experimental.	63
3.7	Programa experimental.	66
3.7.1	Fase I	66
3.7.2	Fase II	67
3.7.3	Fase III.	69
3.8	Mapa conceptual del estudio completo.	70
4.	Resultados.	73
4.1	Resultados pruebas mecánicas.	73
4.1.1	Fase I	73
4.1.2	Dosificación de mezclas.	75
4.1.3	Fase II	76
4.2	Análisis de Ciclo de Vida ACV.	81
4.2.1	Parámetros del ACV.	82
4.2.2	Diagrama Sankey.	85
4.2.3	Inventario de ACV	91
4.2.4	Evaluación de impactos de ciclo de vida.	92
5.	Discusión.	95
5.1	Resultados de pruebas mecánicas.	96
5.2	Análisis de los resultados del ACV.	98
6.	Conclusiones, recomendaciones y futuras investigaciones.	103
6.1	Recomendaciones y futuras investigaciones.	105
7.	Anexos	112
7.1	Resultados de caracterización de agregados.	113

7.1.1	Agregado natural fino.	113
7.1.2	Agregado natural grueso.	115
7.1.3	Agregado reciclado grueso.	117

Lista de figuras

Pág.

Figura 2-1 Fases de un análisis de ciclo de vida	27
Figura 2-2 Esquema de la Fase de EICV según la norma ISO 14040	37
Figura 2-3 Mapa conceptual del estudio	56
Figura 3-1 Diagrama lógico experimental de la investigación.	65
Figura 3-2 Mapa conceptual del estudio completo.	72
Figura 4-1 Alcance y límites CAN.....	84
Figura 4-2 Alcance y límites CAR.....	85
Figura 4-3 Diagrama Sankey general ACV	87
Figura 4-4 Diagrama Sankey CAN-PS	88
Figura 4-5 Diagrama Sankey 100%-PS	89
Figura 4-6 Diagrama Sankey 100%-PS (-16%)	90

Lista de gráficas.

Gráfica 1-1 Artículos de Concreto con Agregados Reciclados por país	10
Gráfica 1-2 Bibliografía concerniente a concretos con agregados reciclados por año	11
Gráfica 1-3 Bibliografía concerniente a Concretos con agregados reciclados y análisis de ciclo de vida por año	11
Gráfica 1-4 Bibliografía concerniente a concretos con agregados reciclados y análisis de ciclo de vida por país	12
Gráfica 2-1 Formas de análisis de ciclo de vida	29
Gráfica 2-2 Contribución a los indicadores de impacto ambiental en ACV's para concretos CAR y CAN.	41
Gráfica 2-5 Medición ambiental de muestras de concreto de 20 mm de tamaño de agregado	50
Gráfica 4-1 Resistencias de mezclas CAR según manejo de agua de mezclado y curado	78
Gráfica 4-2 Resultados de ensayos de compresión de cilindros de Fase II	79
Gráfica 4-3 Resultados de compresión de cilindros para condición presaturada y curado sumergido	81
Gráfica 4-4 Diagrama de barras por categoría de impacto CML-2001	93
Gráfica 5-1 Promedios de resistencia a la compresión f_c por tipo de mezcla	96
Gráfica 5-2 Potencial de Calentamiento Global	100

Lista de tablas

Pág.

Tabla 2-1: Normas utilizadas en la caracterización de los agregados.....	19
Tabla 2-2: Gradación requerida de agregados para concreto según ASTM-33, (2010)..	20
Tabla 2-3: Características físicas y mecánicas de los agregados gruesos.	22
Tabla 2-4 Categorías de impacto tenidas en cuenta para la investigación.	38
Tabla 2-5 Contribución (%) para cada componente del concreto según la mezcla	41
Tabla 2-6 Eco-perfil para 1 kg de súper plastificante de acuerdo con la NF P 01-010	43
Tabla 2-7: Características generales de las herramientas para el ACV.....	46
Tabla 2-8 Impactos ambientales para 1 kg de CAN y CAR, escenario de transporte 1...	49
Tabla 2-9 Impactos ambientales para 1 kg de CAN y CAR, escenario de transporte 2..	49
Tabla 2-10 Revisión de literatura - Estudios similares de mezclas de concreto con agregados reciclados y ACV.	51
Tabla 2-11 Investigadores que aportan conceptualmente al planteamiento investigación	54
Tabla 3-1 Ensayos de Fase I	67
Tabla 3-2 Ensayos de Fase II.	68
Tabla 3-3 Ensayos de Fase III	70
Tabla 4-1 Caracterización de agregados finos	74
Tabla 4-2 Caracterización del agregado natural grueso AN	74
Tabla 4-3 Caracterización del agregado reciclado grueso AR.....	74
Tabla 4-4 Diseño de mezcla Concreto con Agregados Naturales CAN	75
Tabla 4-5 Diseño de mezcla Concreto con Agregados Reciclados CAR-25 y CAR-50...	76
Tabla 4-6 Diseño de mezcla Concreto con Agregados Reciclados CAR-75 y CAR-100.	76
Tabla 4-7 Resultados de ensayos a compresión de cilindros	77
Tabla 4-8 Dosificación de mezcla óptima Fase III.....	79

Tabla 4-9 Resultados de compresión f_c para mezcla 100-PS (-16%)	80
Tabla 4-10 Origen de información para diagrama.....	83
Tabla 4-11 Consumo de energía según literatura	91
Tabla 4-12 Distancia de recorrido de camiones	92
Tabla 4-13 Emisiones al aire por tipo de concreto	92
Tabla 4-14 Resultados de categoría de impacto.....	93
Tabla 5-1 Calentamiento Global Equivalente por proceso.....	102
Tabla 5-2 Comparación de indicadores por categoría de impacto	102

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura	Término
ACV	Análisis de ciclo de vida
AF	Agregado fino
AN	Agregado natural
AR	Agregado reciclado
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAN	Concreto con agregado natural
CAR	Concreto con agregado reciclado a partir de piezas prefabricadas de concreto.
CH ₄	Metano
cm	Centímetro
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
EICV	Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida
GEAR	Guía Española de Áridos Reciclados Procedentes de Residuos de Construcción y Demolición
HC	Cianuro de hidrógeno
HCl	Cloruro de hidrógeno
ICV	Inventario de Ciclo de Vida
ISO	International Organization for Standardization
Kg. Eq C ₂ H ₄	Kilogramos equivalentes de etileno
Kg. Eq CO ₂	Kilogramos equivalentes de dióxido de carbono
Kg. Eq NO ₃	Kilogramos equivalentes de trióxido de nitrato
Kg. Eq SO ₂	Kilogramos equivalentes de dióxido de azufre
kgf	Kilogramo fuerza
MJ	Mega Joules
MPa	Mega Pascales
N ₂ O	Óxido nitroso
NM VOC	Compuestos orgánicos volátiles
NO _x	Óxidos de nitrógeno

<i>NTC</i>	Norma Técnica Colombiana
<i>PM 2.5</i>	Partículas de polvo de 2.5 micrómetros
<i>RDC</i>	Residuos de demolición y construcción
<i>SOx</i>	Óxido de azufre
<i>T/m3</i>	Tonelada metro cúbico
<i>UF</i>	Unidad funcional
<i>UNE</i>	Una Norma Española

Introducción

Es innegable la creciente preocupación mundial, por parte de gobiernos, empresas y entidades, de implementar políticas sostenibles que ayuden a reducir los impactos que las industrias causan al medio ambiente. Esta necesidad ha redundado en la implementación de estrategias que conlleven a un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles y a un pensamiento más cíclico que tenga en cuenta la generación de productos y materiales desde la extracción de materias primas, hasta el desecho de los mismos después de cumplida su vida útil. Esto ha llevado a la industria de la construcción a pensar en nuevas maneras de generar productos como el concreto, donde los desechos de su producción u otras demoliciones, puedan ser usados para generar concreto nuevo y reducir de alguna manera la utilización de recursos no renovables.

Este trabajo de investigación ahonda en el campo del conocimiento de los factores que permiten, o impiden, que los concretos con agregados reciclados a partir de piezas de concreto prefabricado, denominados CAR para este estudio, sean un producto con características que le permitan tener menores impactos negativos al medio ambiente, que los generados por los concretos de agregados con agregados naturales, a los cuales se denominó CAN, donde se utiliza como herramienta comparativa el Análisis de Ciclo de Vida, o ACV de aquí en adelante.

No cabe duda que la construcción es una actividad de vital importancia para el crecimiento cultural y económico de la sociedad, debido a que a partir de ella se materializa toda la infraestructura que la soporta (Acevedo Agudelo, Vásquez Hernández, & Ramírez Cardona, 2012). Además de esto, las construcciones y la industria en sí, cambian constantemente con las tendencias, costumbres, cultura y avances tecnológicos, pero es esa misma dinámica la que ha hecho que a través de los años y en todo mundo se generen repercusiones en el medio ambiente, hasta el punto de consumir una gran cantidad de recursos y energía, y debido al crecimiento de la

población mundial, la tendencia es a empeorar (Dixit, Fernández-Solís, Lavy, & Culp, 2010). Esto obliga a la industria de la construcción a tratar de reinventarse para tratar de revertir los efectos que ha generado y lograr que algún día se pueda seguir creciendo como sociedad sin comprometer los recursos naturales y la subsistencia de las nuevas generaciones.

Lo anterior se fundamenta en que, por un lado, el uso de los agregados reciclados en general, reducen la explotación de los recursos naturales y minimizan la disposición final al medio ambiente, pero a su vez, las distancias de transporte de los reciclados por encima de los 15 km (Knoeri, Sanyé-Mengual, & Althaus, 2013), el método de producción y las características físicas y mecánicas, pueden implicar un nivel tal en los impactos del ACV, que pueden terminar siendo iguales o más nocivos para el medio ambiente que el uso de agregados de origen natural, mostrando un aumento de, por ejemplo el 11.41% en el potencial de calentamiento global y un 21.35% en eutrofización (Marinković, Radonjanin, Malešev, & Ignjatović, 2010).

Por otro lado, se ha demostrado mediante estudios, que las condiciones intrínsecas de algunos agregados reciclados, como la de tener alrededor de un 11% de menor densidad, gracias al mortero adherido (Mattey, Robayo, Silva, Alvarez, & Arjona, 2014), y un incremento entre el 4 y 9.5% (Kwan, Ramli, Kam, & Sulieman, 2012), pueden afectar las propiedades mecánicas y de durabilidad de los concretos producidos con estos agregados. Esto, implicaría que en la medida que los concretos de los cuales son obtenidos los agregados reciclados, tengan mejores resistencias y calidad, se tendrá un mejor comportamiento al ser usados en nuevas mezclas, lo que podría representar un tratamiento y uso similar a los agregados naturales al realizar el concreto sin tener que modificar las cantidades de los demás componentes como el cemento, siendo este el que más contaminantes aporta al ambiente.

Visto desde esta perspectiva, los agregados reciclados a partir de concreto prefabricado constituyen un nicho interesante de investigación, ya que su producción se hace con altos estándares de calidad, intrínsecamente son separados en la fuente, debido a que no se mezclan con otros residuos de demolición, y si el triturado y reutilización se hace en la misma planta, se podrían reducir en gran medida los impactos por transporte.

Esta investigación se basa en estudios como el de Hossain, Poon, Lo, & Cheng (2016), Marinković et al. (2010) y el de Serres, Braymand, & Feugeas (2016), los cuales se

basaron en evaluar qué tan sostenibles son los procesos de producción de los CAR, para condiciones particulares o puntos geográficos específicos, en comparación con concretos a partir de agregados naturales o CAN, donde se notaron aspectos críticos de los impactos que genera el aumento del cemento en las mezclas y el transporte de los agregados al lugar de trituración y producción.

Para hacer la comparación, CAR vs CAN, se hizo necesario establecer una Unidad Funcional (UF), que permitiera constituir una equivalencia o comportamiento esperado que fuera válido para los dos concretos, pudiendo así analizar los requerimientos energéticos y cantidad de emisiones al medio ambiente que cada uno de los tipos de concreto genera. Así, se pudo determinar un comportamiento similar ante propiedades deseables y proponer un punto de partida en común para la comparación de ambas mezclas.

La investigación está soportada en un marco teórico que demarca el estado actual del conocimiento, intentando compilar los conceptos relacionados a la producción de agregados reciclados, las implicaciones a nivel de comportamiento mecánicas del uso de estos en las mezclas de concreto y los resultados encontrados en otras investigaciones al ser analizados en el plano ambiental.

Finalmente, este trabajo hace un planteamiento metodológico del estudio de tipo cuantitativo, ya que se hace necesario establecer una comparación objetiva de variables y resultados que determinen las ventajas de un material sobre otro. Esto es acompañado de un programa experimental que se fundamenta en los protocolos vigentes de pruebas de materiales y técnicas de laboratorio establecidas por la Norma Técnica Colombiana NTC, para la caracterización de agregados pétreos y ensayos de resistencia mecánica al concreto, que a su vez se basa en los estándares internacionales de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, ASTM por sus siglas en inglés, lo que le da validez, confiabilidad y posibilidad de réplica a los especímenes del estudio.

Con lo anterior, se pretende despertar aún más la curiosidad científica en la comunidad académica que le competen los temas relacionados con la sostenibilidad ambiental en la construcción, mezclas de concreto, sistemas de aprovechamiento y reducción de residuos, entre otros, pero también se espera que dentro de la industria se genere el interés suficiente para que nuevos procesos y materiales de la construcción, sean considerados como potenciales soluciones a los problemas causados por la industria,

acercándonos cada vez más a un diseño de “cuna-a-la-cuna” (Braungart, McDonough, & Bollinger, 2006), donde los materiales de construcción, una vez cumplida su vida útil, sean el insumo para nuevas construcciones.

1.Planteamiento del problema

El uso de los agregados reciclados para concreto, han demostrado ampliamente su aplicabilidad en la elaboración de nuevos concretos tanto estructurales como no estructurales que han dado lugar a guías de uso como la Guía Española de Áridos Reciclados Procedentes de Residuos de Construcción y Demolición GEAR (2011), donde se pretende reusar el desperdicio generado por la eliminación elementos que llegan al final de su vida útil, presentan algún defecto o que por algún motivo deben ser demolidos.

Lo anterior nace como una solución innovadora al problema que representa la explotación sistemática de los recursos no renovables para la elaboración del concreto y como una respuesta sostenible a la necesidad de continuar su uso en proyectos arquitectónicos e ingenieriles en todo el mundo, pero deben establecerse claramente las características y condiciones que permiten a los agregados reciclados para concreto, constituirse como una materia prima que efectivamente tiene un aporte positivo en la preservación del medio ambiente, y no que disfracen sus posibles implicaciones ambientales negativas con aparentes ventajas en su aprovechamiento. En otras palabras, definir bajo qué condiciones el uso de agregados reciclados de concreto es verdaderamente menos contaminante.

Por las características que presentan en el control de calidad y ambientes controlados en su producción, los elementos de concreto prefabricado constituyen una interesante población a analizar, ya que presentan condiciones favorables que al ser analizadas en un Análisis de Ciclo de Vida o ACV, tendrían, en teoría, ciertas ventajas frente al aprovechamiento de concretos convencionales, como el conocimiento de las fuentes de materias primas, características del concreto antes de ser demolido, entre otras. Para esta investigación, se tomará la abreviatura AR para hacer referencia a los agregados reciclados a partir de prefabricados de concreto.

6 Evaluación comparativa de concreto con agregado natural y concreto a partir de agregado reciclado de prefabricados, bajo un análisis de ciclo de vida.

Como puede verse, el estudio de las ventajas de los agregados reciclados de concreto, en el campo de la sostenibilidad, genera un claro interés investigativo donde se pueda conocer si su aplicación en los concretos es efectivamente una respuesta a la problemática ambiental que implica la actividad constructiva y bajo qué condiciones se valida su carácter benéfico al conjugarse con las condiciones propias de una ciudad como Bogotá, siendo el ACV la herramienta para determinar su verdadero impacto.

El presente planteamiento del problema se hace con base en la metodología planteada por Hernández, Fernandez, & Baptista, (2010) y Creswell, (2014), para un tipo de estudio cuantitativo, donde, por medio de la cuasi-experimentación, se busca alcanzar los objetivos propuestos a lo largo de éste capítulo y poner a prueba la hipótesis al encontrar las respuestas a las preguntas de investigación, que de igual forma se plantean en esta parte del documento.

1.1 Justificación.

A pesar de que podría considerarse obvia la importancia de un estudio que permitiría el aprovechamiento de los desechos de concreto y una reducción de los residuos de demolición y construcción, es importante mencionar la relevancia que tiene la investigación en el campo ambiental, asociado a la sostenibilidad y la innovación, y su valor teórico, inherente al aporte científico que se generaría en el desarrollo del mismo. Esto teniendo en cuenta que estos desechos representan un problema para la administración de una ciudad del tamaño y nivel de complejidad de Bogotá D.C., que solo en el año 2016 se dispusieron 2.950.876 toneladas de RDC (Residuos de Demolición y Construcción) provenientes de mega obras y obras superiores a 5000 m² (Observatorio Ambiental de Bogotá, 2017).

Dicha relevancia se explicará a continuación, planteando desde diferentes perspectivas la trascendencia que tiene el estudio y tratando de dar respuesta al para qué y por qué se realiza el mismo.

A su vez, el desarrollo de esta justificación atiende una estructura basada en Hernández et al. (2010), la cual busca sustentar la justificación desde varios enfoques como se verá más adelante. Se formularán unas preguntas de investigación basadas en los objetivos

que direccionaron esta investigación y por último se da lugar a la formulación de la hipótesis que pretende resolver este estudio.

1.1.1 Conveniencia estratégica ambiental.

Uno de las principales preocupaciones de los investigadores en el tema de los ACV, como los planteados por Marinković et al., (2010), en los estudios de concretos con agregados reciclados, radica en que estos podrían llegar a producir un mayor impacto ambiental que los mismos CAN, debido a que el proceso de obtención y transporte de los agregados, así como la necesidad de una mayor cantidad de cemento y aditivos para igualar las propiedades de concretos convencionales, podrían generar un incremento en los indicadores de impacto ambiental, lo que indicaría que los CAR son poco beneficiosos para el medio ambiente. Es por eso que se tiene la necesidad de identificar las ventajas que presentan los unos frente a los otros.

Teniendo en cuenta la necesidad de masificar el uso de sistemas, tecnologías y materiales que permitan actividades productivas más limpias en Colombia, lo cual ya se observa en varios países de la comunidad europea con el aumento de políticas en materia de uso de agregados reciclados para nuevos concretos (Ceia, Raposo, Guerra, Júlio, & de Brito, 2016), se debe, en el entorno local, generar más investigaciones y actividades que además de promover el uso de los desechos de la construcción, como lo son los residuos de concreto, validen su uso como una forma efectiva de disminuir la contaminación y afectaciones ambientales que el sector constructivo provoca.

Para conseguir lo anterior, se deben considerar las múltiples variables que intervienen en la producción de un concreto cualquiera para identificar las partes del proceso o características de los materiales que pueden modificarse en pro de una reducción de las afectaciones ambientales, sin que disminuyan las propiedades del producto final. Esto podrá conllevar a medidas que permitan la reducción de afectaciones ambientales, que pueden consistir en la sustitución de materiales, modificación en las dosificaciones, tamaños de los agregados o relaciones agua/cemento, proponer mejoras en los procesos de extracción, mezclado y transporte, etc.

La contaminación asociada a la labor constructiva abarca aspectos que van desde la explotación desmedida de recursos no renovables, pasando por afectaciones al aire, al

8 Evaluación comparativa de concreto con agregado natural y concreto a partir de agregado reciclado de prefabricados, bajo un análisis de ciclo de vida.

agua y a la salud humana, hasta llegar al deterioro de la capa de ozono y aumento del calentamiento global, por lo cual las medidas que los países puedan aplicar mediante políticas claras, encaminadas a la mitigación de los impactos que estas actividades generan, jugarán un papel importante en la calidad de vida de las generaciones futuras. Es por eso que países como Holanda, encaminan sus políticas al aprovechamiento total de los residuos de concreto, privilegiando el uso de los RAC's. Por su parte, Alemania, es uno de los países de Europa que cuenta con mayor cantidad de plantas de reciclaje (Ricardo Rozo Bobadilla Asesor & Vargas, 2012).

La curiosidad investigativa que genera el planteamiento de este trabajo de tesis, proviene del interés particular del autor en el tema de los concretos generados a partir de agregados reciclados y un cuestionamiento crítico a la realidad actual de la construcción sostenible en Colombia, contrastada con los resultados de investigaciones a nivel mundial que se han encontrado en el estudio de la bibliografía.

Lo anterior conllevó a una secuencia lógica de afirmaciones y finalmente una pregunta que, sin ser como tal una de las de preguntas de investigación, se convierten en la base que motivó la generación de este estudio y lo enmarca metodológicamente. Dicha secuencia es la siguiente:

- La producción de concreto es un gran contaminante a nivel mundial (Pacheco-Torgal & Jalali, 2012).
- Se ha propuesto el reciclaje de concreto para la implementación en nuevos concretos, como una solución válida a la contaminación generada por la actividad constructiva y sus productos, entre ellos el mismo concreto (Serres et al., 2015).
- Los concretos de mayores resistencias producen agregados reciclados de mejores características (Padmini, Ramamurthy, & Mathews, 2009).
- El transporte y extracción de los agregados reciclados son factores que aumentan el consumo de energía (Marinković et al., 2010).
- La utilización de concreto prefabricado en la producción de agregados reciclados ha mostrado resultados favorables en la calidad de los concretos finales fabricados a partir de estos (Duarte & Brito, 2011).

- ¿La utilización de agregados reciclados de concreto prefabricado generan una condición ambiental más favorable en su uso, en concretos no estructurales, si se les compara con concretos convencionales?

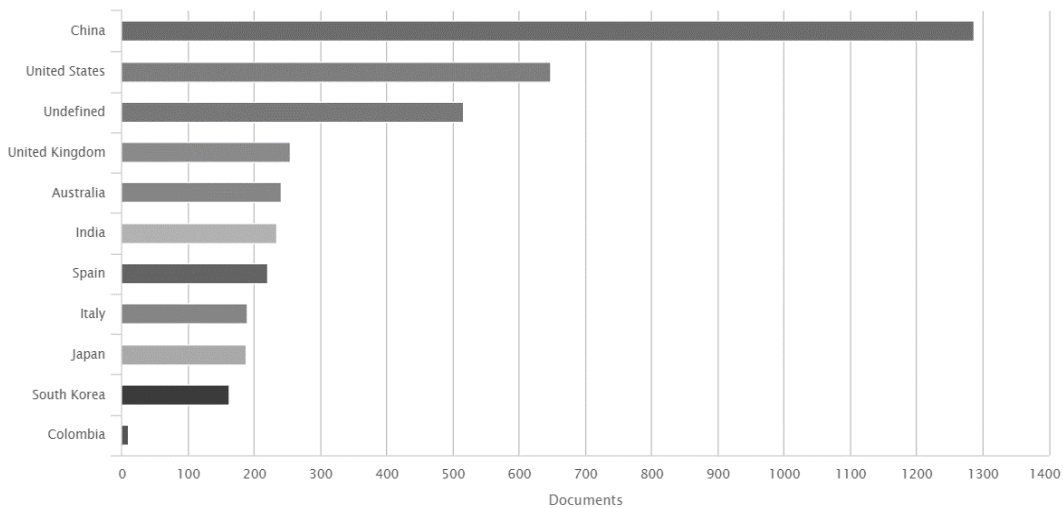
El planteamiento anterior hará parte del desarrollo del Marco Teórico, pero antepone el sustento fundamental del interés y justificación del tema propuesto, razón por la cual es presentado en primera instancia.

Además del enfoque sostenible, el estudio tiene un potencial importante de innovación en el proceso de producción, y en el producto mismo, para las empresas productoras de concreto, ya que marcaría una significativa mejora, recurriendo a materias primas que no son comúnmente usadas para producir mezclas en nuestro medio, y se incursionaría en procesos tendientes al aprovechamiento de desechos y generación de menores cargas ecológicas para el ambiente, enmarcándose en el concepto de innovación dado por OCDE & EUROSTAT (2006), de igual forma con lo que Schumpeter en 1964 hacía alusión en su concepto de innovación por medio de la derivación de nuevos métodos y nuevas fuentes de materias primas, lo que claramente puede darse como un resultado del aprovechamiento comercial de esta investigación.

1.1.2 Valor teórico.

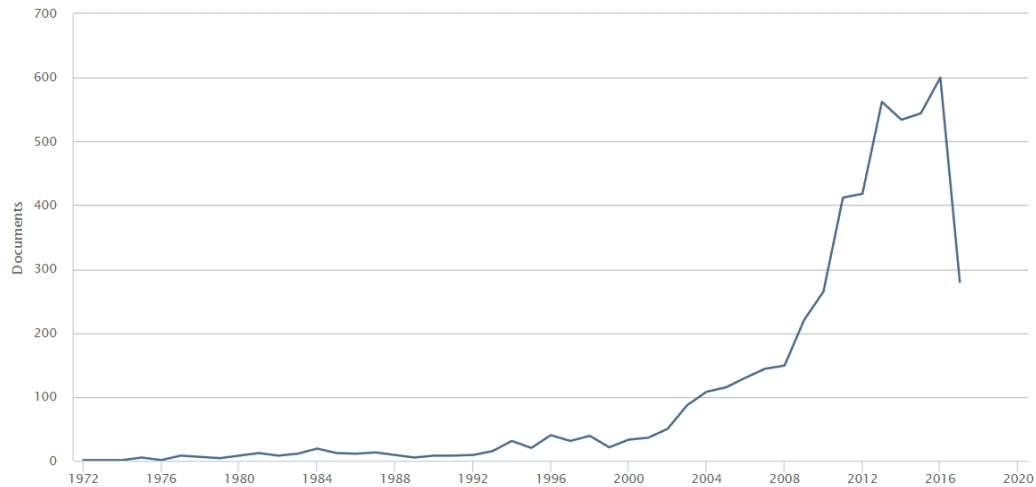
El trabajo con los agregados reciclados en nuestro país no tiene el grado de desarrollo observado en otros países como China, Estados Unidos, España, Portugal y Japón, entre otros, como se muestra en la **Gráfica 1-1** Artículos de Concreto con Agregados Reciclados por país, por lo cual, una investigación a nivel local en el tema ya sugiere un gran avance en la materia y un beneficio para el país, debido a que marca un primer camino para que futuras investigaciones tengan un punto de partida y llegada, el cual se pueda confirmar o desmentir, pero generando un conocimiento más sólido y sobretodo, que sean teorías ajustadas a nuestra realidad.

Gráfica 1-1 Artículos de Concreto con Agregados Reciclados por país

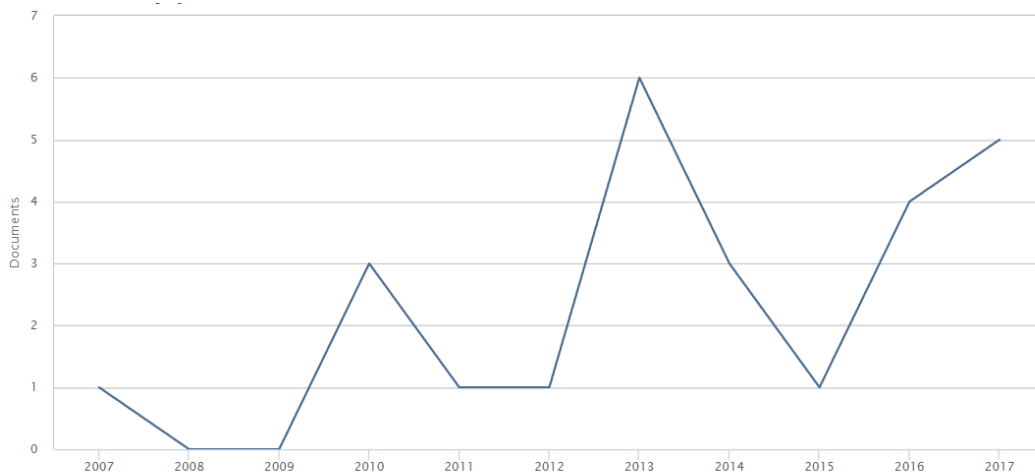


Fuente: Scopus (2017).

Desde los años 70s, a nivel mundial se han desarrollado diferentes investigaciones tendientes a desarrollar formas de aprovechar y entender el comportamiento de los concretos con agregados reciclados, comenzando en segunda instancia, la preocupación por determinar si efectivamente estos concretos aportan una solución verdadera al problema de la sostenibilidad, analizándolos bajo un análisis de ciclo de vida, como se muestra en la **Gráfica 1-2** Bibliografía concerniente a concretos con agregados reciclados por año, y la **Gráfica 1-3** Bibliografía concerniente a Concretos con agregados reciclados y análisis de ciclo de vida por año, de la base de datos Scopus.

Gráfica 1-2 Bibliografía concerniente a concretos con agregados reciclados por año

Fuente: Scopus (2017).

Gráfica 1-3 Bibliografía concerniente a Concretos con agregados reciclados y análisis de ciclo de vida por año

Fuente: Scopus (2017).

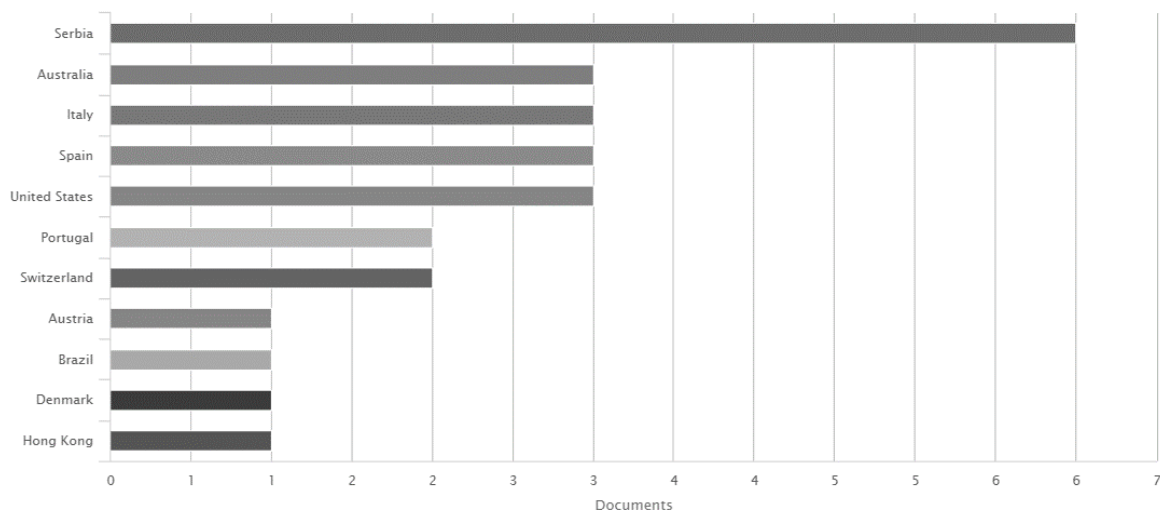
Uno de los problemas que implica el uso de los agregados reciclados en nuestro país, radica en que no se tienen claras las ventajas ambientales, ni cómo generar una mezcla tal, que se generen RAC con un desempeño similar al que se obtendría de una mezcla con agregados naturales y, por otro lado, que dicha mezcla sea sostenible, generando una carga ambiental menor a la originada por un CAN. Esta dificultad de encontrar una

12 Evaluación comparativa de concreto con agregado natural y concreto a partir de agregado reciclado de prefabricados, bajo un análisis de ciclo de vida.

proporción de cementicios, aditivos y agregados que cumpla con las anteriores condiciones, radica en que las características de los agregados: granulometría y resistencia, entre otros, y su producción: lugar de generación del residuo y procesamiento, y método de trituración, pueden variar drásticamente de un material a otro y esto impacta directamente en los otros materiales que componen la matriz de concreto, modificando algunas las proporciones de los elementos que la componen. Por lo tanto, es necesario identificar qué aspectos y características de los agregados reciclados podrían facilitar el cumplimiento de las condiciones mencionadas de funcionalidad y sostenibilidad, de un CAR producido localmente.

El valor teórico de la investigación consiste en aportar las bases locales para la evaluación ambiental de los concretos con agregados reciclados, ya que no se encontraron estudios al respecto que proporcionaran información al respecto o que dieran las pautas para ampliar el conocimiento en el tema, en un contexto local. En el ámbito internacional, la producción al respecto no es tan ampliamente difundida, tomando como indicador de lo mencionado en la **Gráfica 1-4** Bibliografía concerniente a concretos con agregados reciclados y análisis de ciclo de vida por país.

Gráfica 1-4 Bibliografía concerniente a concretos con agregados reciclados y análisis de ciclo de vida por país



Fuente: Scopus (2017).

1.2 Preguntas de investigación.

La metodología aplicada debe dar solución a las preguntas de investigación planteadas, las cuales direccionan el camino que el estudio debe seguir y las respuestas que esperan ser encontradas durante la ejecución, en palabras de Hernández et al. (2010), son las que orientan las respuestas que se buscan con la investigación.

Estas preguntas son:

- ¿Cuáles son las ventajas ambientales de producir RAC a partir de agregados de piezas prefabricadas de concreto en comparación a las mezclas tradicionales de concreto?

Esta pregunta surge de la probabilidad de que para las condiciones locales, los CAR resulten más contaminantes que los CAN.

- ¿Cuáles son las cantidades mínimas y máximas de cemento y aditivos que pueden ser usadas en los concretos con agregados reciclados objeto de estudio, para obtener un desempeño similar al del concreto convencional planteado para esta investigación, sin que esto implique una afectación mayor en el ambiente?

Teniendo en cuenta que los cementicios y aditivos son los componentes que mayor carga ambiental aportan a los CAR, como lo demostró Serres et al. (2015) en sus estudios, es de gran utilidad al pretender producir un concreto de bajo impacto ambiental, plantear los límites de utilización de los mismos, con los que se permitiría alcanzar una afectación menor al Medio. Se busca establecer en esta ventana un rango donde se mantenga el equilibrio entre la funcionalidad del producto y mantener los impactos en niveles admisibles.

- ¿Cómo podría modificarse el proceso y/o las dosificaciones, para que de acuerdo al desempeño o a la Unidad Funcional definida, se puedan reducir los impactos ambientales evaluados con el ACV?

Mediante esta pregunta de investigación se busca identificar las mejoras a las mezclas, en caso de que estas puedan darse, para las particularidades estudiadas.

- 14 Evaluación comparativa de concreto con agregado natural y concreto a partir de agregado reciclado de prefabricados, bajo un análisis de ciclo de vida.

1.3 Objetivos.

Los objetivos de la investigación fueron planteados de manera que pueda seguirse un camino lógico para resolver las preguntas de investigación, basados en los resultados encontrados durante el estudio. Estos objetivos fueron planteados de acuerdo a lo encontrado en la literatura de otros estudios a nivel mundial, pero buscan encaminarse a validar esa información con las condiciones locales de acuerdo a la disponibilidad de materiales y tecnología presentes en nuestro contexto.

De acuerdo a las bases bibliográficas mencionadas anteriormente y basados en la factibilidad de encontrar condiciones y materiales que se asemejan a los contextos de los países donde han sido desarrolladas, se plantea la hipótesis de investigación, la cual será corroborada en la etapa experimental a través de la consecución de los objetivos propuestos, para luego ser discutida en relación a otras investigaciones y finalmente, llegar a las conclusiones y recomendaciones a las que hubiere lugar.

1.3.1 Objetivo general.

Determinar, a partir de un análisis comparativo basado en un análisis de ciclo de vida, si una mezcla a partir de agregados reciclados de prefabricados de concreto, producidos en la ciudad de Bogotá, presenta ventajas ambientales frente a una elaborada con agregados naturales.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Determinar qué aspectos de los AR inciden en el aumento de impactos ambientales negativos, cómo: propiedades físicas, lugar de generación y forma de producción de esos agregados, en la producción de los CAR estudiados.
- Establecer parámetros dentro de la producción de CAR que permitan producir mezclas más sostenibles en comparación con los CAN.

- Determinar una proporción máxima y mínima de cemento y aditivos, que permita producir un concreto con agregados reciclados con menor carga ambiental que uno con agregados naturales, para la unidad funcional establecida para la investigación.

1.4 Hipótesis.

- Los agregados gruesos reciclados de este estudio, obtenidos a partir de la trituración de piezas de concreto prefabricado, producen un menor impacto ambiental negativo al ser utilizados en nuevas mezclas de concreto, en comparación a los generados por mezclas con agregados naturales, manteniendo una UF de metro cúbico de resistencia igual a 280 kgf/cm².

La anterior hipótesis tendrá en cuenta la unidad funcional adoptada para comparar los impactos que se generen bajo la luz de un Análisis de Ciclo de Vida, y se basa en el concepto generalizado de que las características, tanto de los agregados naturales con que se hacen los concretos prefabricados, como la de los agregados reciclados producidos a partir de ellos, y los procesos de producción de las mezclas, se rigen por un estricto programa de calidad, lo que hace que tengan prestaciones similares a la de los agregados naturales pero se minimicen emisiones contaminantes como las producidas por el transporte a largas distancias y por qué no, un menor uso de cemento.

El sustento teórico de esta hipótesis parte de la secuencia lógica de afirmaciones realizada en el punto 1.1.1 Conveniencia estratégica ambiental., construida a partir de los estudios encontrados en la revisión de literatura, las cuales conllevan a pensar que los agregados reciclados a partir de piezas de concreto prefabricado, son una opción viable o al menos posible, en la producción de concretos con menores afectaciones al medio ambiente que con los agregados tradicionales.

2. Marco teórico.

El objetivo de este capítulo es la contextualización teórica de esta investigación, teniendo como base a Creswell (2014), que dice que la teoría es argumento, una discusión o una razón que nos puede ayudar a explicar o predecir un fenómeno, y a Hernandez Sampieri, Fernandez Collado, & Baptista Lucio (2010), quienes definen el desarrollo de la perspectiva teórica como una inmersión en el conocimiento existente y disponible que se relaciona con el problema planteado. Teniendo en cuenta lo anterior, nos concentraremos en los conceptos que explican el proceso de obtención de los agregados reciclados, la producción de mezclas de concreto y su relación con el ambiente, utilizando como herramienta base el Análisis de Ciclo de Vida. Para esto se han buscado en la literatura otras investigaciones y autores que aborden estos temas y de esta forma poder explicar los fenómenos que se dan en la mezcla de estos materiales y que permitan fundamentar esta investigación y corroborar finalmente la tesis planteada.

Para entender los diferentes aspectos que intervienen en esta investigación, es necesario partir de los conceptos que sustentan la producción de concretos, determinando qué aspectos inciden en las propiedades mecánicas esperadas y cómo manipularlas para alcanzar los objetivos planteados del estudio. Esto conlleva a una profundización en el conocimiento existente y disponible, donde se busca sustentar teóricamente el estudio, partiendo del problema previamente establecido (Hernández et al., 2010).

Por otro lado, también es necesario entender la aplicabilidad e importancia de un análisis de ciclo de vida en el estudio y por qué esta herramienta es fundamental para comparar los efectos que tienen en el ambiente los concretos propuestos, bajo las condiciones particulares de cada uno, pero con un punto en común relacionado con los requerimientos de uso y desempeño esperado. Todo lo anterior soportado por normas, programas informáticos y otras investigaciones que serán detalladas más adelante.

Este estudio tiene su origen en investigaciones realizadas a nivel internacional, donde se han tenido diferentes resultados para la hipótesis que plantea este estudio, y constituyen el soporte del planteamiento teórico y metodológico de nuestro estudio, pero como se verá en el desarrollo de este capítulo, a nivel local es necesario profundizar los conocimientos en el tema y aplicar dichas experiencias a condiciones locales, obteniendo resultados que nos permitan aproximarnos a una construcción más sostenible, permitiendo que las materias primas tengan una segunda utilidad después de cumplir con su objetivo primario y dándoles un carácter más cíclico que reduzca su afectación al medio ambiente.

2.1 Generalidades.

Para el desarrollo del estudio es necesario acotar algunos conceptos y teorías que aplican a los concretos y materiales convencionales los cuales son los que se pretenden emular con materiales alternativos. Estas definiciones son importantes porque constituyen el camino teórico previamente trazado, que ha hecho posible el utilizar el concreto en tantas aplicaciones hasta convertirlo en el principal material de construcción a nivel mundial.

Es precisamente a este camino al que se le busca crearle vías alternas, donde a través de materiales distintos se llegue a resultados similares, reduciendo los efectos que la explotación de las materias primas nos ha dejado durante años.

Aunque para el caso de Colombia no se cuenta con una normatividad como tal para agregados reciclados, siendo los agregados gruesos los que nos atañen en este trabajo. Algunas de las normas existentes abordan temas o conceptos que pueden ser aplicados al estudio, por lo cual se tratará de atender sus especificaciones hasta donde no comprometan los objetivos propuestos por el estudio y donde no se contraponga con los estudios que se usan como soporte en materia de concretos y análisis de ciclo de vida.

En estudios comparativos previos, sobre las características de los agregados naturales y reciclados, Matthey, Robayo, Silva, Alvarez, & Arjona (2014), correlacionan muy bien las

propiedades y características determinantes para la utilización de los mismos, y sus correspondientes normas colombianas o internacionales, relacionadas en la Tabla 2-1: Normas utilizadas en la caracterización de los agregados

Tabla 2-1: Normas utilizadas en la caracterización de los agregados

Ensayo	Norma empleada
Tamizado de agregados	NTC 77
Masa unitaria de los agregados	NTC 92
Impurezas orgánicas	NTC 127
Densidad, absorción y porosidad de la grava	NTC 176
Densidad, absorción y porosidad de la arena	NTC 237
Contenido de humedad de los agregados	NTC 1776
Coefficiente de Los Ángeles	ASTM C131
Coefficiente de forma	UNE-EN 933

Fuente: Matthey et al. (2014).

2.1.1 Propiedades de los agregados naturales.

En términos generales, la NSR-10 (2012) define a los agregados como materiales granulares que se emplean en un medio cementante para formar concretos o morteros, los cuales pueden ser arena, grava, piedra triturada o escoria de alto horno. Estos últimos no considerados en este estudio.

Se observarán a continuación las propiedades que presentan los agregados a partir de fuentes naturales o AN.

- **Granulometría.**

Es la división por tamaños que se hace de los agregados y se implementa en el diseño de mezclas para establecer la proporción de cada tamaño en el concreto, con el fin de obtener los resultados esperados. Las partículas de tamaños mayores al pasa tamiz No.4 son considerados como agregados gruesos y los menores a dicho tamiz, agregados finos.

Según la ASTM-33 (2010), los agregados de acuerdo al tamaño nominal, deben presentar las gradaciones presentadas en la Tabla 2-2: Gradación requerida de agregados para concreto según ASTM-33 (2010).

Tabla 2-2: Gradación requerida de agregados para concreto según ASTM-33 (2010).

Tamaño nominal		Porcentaje de masa que pasa por cada tamiz.													
mm	pulg.	100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37.5 mm	25.0 mm	19.0 mm	12.5 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	300- μ m
		4"	3-1/2"	3"	2-1/2"	2"	1-1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16	No. 50
90 - 37.5	3-1/2 - 1-1/2	100	90 - 100	...	25 - 60	...	0 - 15	...	0 - 5	...	...	...	...	...	...
63 - 37.5	2-1/2 - 1-1/2	...	...	100	90 - 100	35 - 70	0 - 15	...	0 - 5	...	...	...	...	...	...
50 - 25	2 - 1	...	...	...	100	90 - 100	35 - 70	0 - 15	...	0 - 5	...	...	...	...	...
50 - 4.75	2 - No.4	...	...	...	100	95 - 100	...	35 - 70	...	10 - 30	...	0 - 5	...	...	...
37.5 - 19.0	1-1/2 - 3/4	...	...	...	...	100	90 - 100	20 - 55	0 - 15	...	0 - 5	...	...	...	...
37.5 - 4.75	1-1/2 - No.4	...	...	...	...	100	95 - 100	...	35 - 70	...	10 - 30	0 - 5	...	...	...
25.0 - 12.5	1 - 1/2	...	...	...	...	...	100	90 - 100	20 - 55	0 - 10	0 - 5	...	...	...	...
25.0 - 9.5	1 - 3/8	...	...	...	...	...	100	90 - 100	40 - 85	10 - 40	0 - 15	0 - 5	...	...	...
25.0 - 4.75	1 - No.4	...	...	...	...	...	100	95 - 100	...	25 - 60	...	0 - 10	0 - 5	...	...
19.0 - 9.5	3/4 - 3/8	...	...	...	...	...	...	100	90 - 100	20 - 55	0 - 15	0 - 5	...	...	...
19.0 - 4.75	3/4 - No.4	...	...	...	...	...	...	...	90 - 100	...	20 - 55	0 - 10	0 - 5	...	...
12.5 - 4.75	1/2 - No.4	...	...	...	...	...	...	...	100	90 - 100	40 - 70	0 - 15	0 - 5	...	...
9.5 - 2.36	3/8 - No.8	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 - 100	10 - 30	0 - 10	0 - 5	...
9.5 - 1.18	3/8 - No.16	...	...	...	...	...	...	...	...	100	90 - 100	20 - 55	5 - 30	0 - 10	0 - 5
4.75 - 1.18	No.4 - No.16	...	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 - 100	10 - 40	0 - 10	0 - 5

Fuente: ASTM-33 (2010).

El porcentaje expresado en la tabla hace referencia a la masa de una porción de finos en particular.

La norma ASTM-33 (2010) advierte sobre las implicaciones que pueden tener las mezclas realizadas con valores cerca del mínimo para los tamices 50 y 100, debido a la pérdida de manejabilidad, debiendo usar aditivos, más cemento en la mezcla u otras adiciones para compensar la falta de finos.

En el ámbito nacional, la norma concordante es la NTC - 174, y se apoya en la NTC - 77 para la realización de las pruebas.

- **Gravedad específica, absorción y porosidad.**

La gravedad específica es definida por la norma del Instituto Nacional de Vías como una relación adimensional entre la masa de un volumen de sólidos y la masa del volumen igual en agua a una temperatura (I.N.V. E - 223 - 07 Instituto Nacional de Vías, 2007).

Por su parte, la misma establece la absorción como:

“la masa del agua que llena los poros permeables de las partículas del agregado sin incluir el agua adherida a la superficie de las mismas, expresada como porcentaje de la masa seca del agregado, después de secado a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.”(I.N.V. E - 223 - 07 Instituto Nacional de Vías, 2007, p.1).

2.1.2 Propiedades de los agregados reciclados.

La definición de agregado reciclado podría llegar a abarcar muchos materiales si se entiende como un producto obtenido de una operación de reaprovechamiento de residuos, y que cumple con los requisitos técnicos para una aplicación determinada (GEAR, 2011, p.15), abriendo un sinnúmero de posibilidades como efectivamente sucede, pero que implicaría una serie de requerimientos técnicos a la hora de hacer el reaprovechamiento de los mismos de manera eficiente. Para esta investigación, se limita el concepto de Agregado Reciclado, RA, a los provenientes de la demolición y trituración en planta de piezas prefabricadas de concreto.

La Unión Internacional de Laboratorios y Expertos En Construcción, Materiales, Sistemas y Estructuras, RILEM, establece en su clasificación para agregados reciclados, que los provenientes de los escombros de concreto pertenecen al Tipo II (RILEM, 1994), y que deben cumplir entre sus características que la densidad seca mínima debe ser superior a 2000 kg/m^3 y que la máxima absorción debe ser del 10%, entre otras.

Para la determinación de la idoneidad de los agregados reciclados, se parte de las características físicas y mecánicas que deben cumplir los agregados naturales, como punto de referencia, validándolos a través de las normas, para poder hacer uso de los mismos en los métodos de diseños de mezclas de concreto. En esta materia, se ha demostrado mediante estudios la viabilidad de la utilización de los agregados reciclados (Mattey et al., 2014), al encontrar similitud con los agregados naturales, como se

presenta en la gruesos. Tabla, la cual fue desarrollada para agregados de la ciudad de Cali, Colombia.

Tabla 2-3: Características físicas y mecánicas de los agregados gruesos.

Característica	Norma	Natural	Reciclado
Densidad aparente (Bulk)	NTC 176	2.54 gr/cm ³	2.26 gr/cm ³
Absorción	NTC 176	2.01%	7.28%
Masa unitaria suelta	NTC 92	1.47 gr/cm ³	1.26 gr/cm ³
Masa unitaria compacta	NTC 92	1.59 gr/cm ³	1.46 gr/cm ³
Módulo de finura	NTC 77	6.38	5.64
Tamaño máximo nominal	NTC 77	12.5 mm (1/2")	12.5 mm (1/2")
Tamaño Máximo	NTC 77	12.5 mm (1/2")	12.5 mm (1/2")
Relación di/Di (morfología)	UNE-EN 933	0.493	0.499
Coefficiente de Los Ángeles	ASTM C131	16.39%	33.65%

Fuente: Matthey et al.(2014).

- **Gravedad específica, absorción y porosidad.**

A diferencia de los agregados naturales, las porosidades o cavidades vacías en los agregados reciclados de concreto, están dadas en mayor medida por la cantidad de mortero adherido a los agregados originales, lo cual reduce la densidad de las partículas y aumenta la absorción y porosidad en las mismas (Pedro, de Brito, & Evangelista, 2015). Al igual que se observó en la Tabla 2-3 de Matthey et al. (2014), otros estudios como los de Sánchez de Juan (2004), demuestran que los NA presentan una absorción entre el 0% y 4%, mientras que para los CAR se presenta entre el 8% y 13%, por causa del mortero adherido, lo que puede causar problemas en las mezclas, si no se tiene en cuenta el agua absorbida y que no participará en la reacción con el cemento (Ferreira, De Brito, & Barra, 2011).

- **Mortero adherido.**

El mortero adherido en los RA es el responsable por la baja adherencia entre el agregado y la nueva matriz de concreto porque crea planos donde ocurre la falla en la estructura del material, debido a que es una zona débil y frágil (Matthey et al., 2014). Es la principal diferencia entre los NA y RA (Kwan et al., 2012) e impacta directamente en las propiedades finales de los CAR.

Algunos estudios y guías extranjeras basadas en investigaciones (GEAR, 2011; Pedro et al., 2015), recomiendan la implementación de varios procesos de triturado, para reducir la porción de mortero adherido, refiriéndose a estudios donde la proporción del mortero presente puede estar entre el 35 al 40% y que podría ser reducido hasta entre un 7 y 10% (GEAR, 2011, p. 30).

En la bibliografía consultada, se encontraron dos posiciones en lo concerniente a las partículas que presentan mayor cantidad de mortero adherido. Por un lado, Pedro et al. (2015), basado en otros autores como Etxeberria, Vázquez, Marí, & Barra (2007, p. 736), determinan que entre mayor sea la partícula, menor será la cantidad de mortero adherido. Por su parte Matthey et al. (2014), igualmente apoyado en otros autores, maneja la tesis contraria afirmando que cuanto mayor es la partícula, mayor es el concreto adherido, pero ambos concuerdan en que de la calidad de ese mortero base depende de la resistencia del concreto a partir del que se produce el agregado, lo que se traduce también en mejores resultados en el CAR.

2.1.3 Fuente de los agregados reciclados.

Para este estudio, se han tomado agregados gruesos provenientes de la trituración – Reciclaje - de elementos prefabricados de concreto por las siguientes razones:

- Tienen un mayor control de calidad en su elaboración.
- Sus materias primas presentan un mejor comportamiento mecánico, ya que son rigurosamente escogidas para fabricar las piezas, por consiguiente, su desempeño y resistencia son más altos.
- Presentan un bajo volumen de material heterogéneo, como cerámicos, materiales orgánicos, etc. Esto permite una menor variación en las dosificaciones de las mezclas finales.
- Los remanentes de piezas defectuosas, que serían triturados y convertidos en agregados, no necesitarían grandes distancias, si la planta de triturado se instala dentro de la misma fábrica.

Todo lo anterior ayuda a limitar las variables de la investigación y en la práctica facilita la aplicación de la investigación al caso particular de las empresas productoras de piezas

prefabricadas. En consecuencia, todos los agregados reciclados o AR, serán producto de la demolición de piezas de concreto prefabricadas y se dejarán por fuera de la definición de AR los residuos que no provengan de dicho origen.

En lo que se refiere a características del concreto, como las mecánicas, Padmini et al. (2009) y Lotfy & Al-Fayez (2015), determinaron en sus investigaciones que una mayor resistencia y control de calidad en los agregados usados para las piezas a reciclar, favorecen el comportamiento del mortero adherido y por consiguiente, le otorga mayores prestaciones en la nueva mezcla.

Según Arriaga et al. (2013,p.21), la demolición selectiva favorece el conocimiento del futuro agregado de concreto reciclado, lo cual es corroborado por otros autores como Pedro, de Brito, & Evangelista (2015) y Poon, Shui, & Lam (2004), en sus respectivos estudios, donde demuestran que las propiedades de los agregados reciclados son directamente proporcionales a la de los concretos de donde provienen.

Otro aspecto importante en la obtención de los agregados reciclados es la trituración, ya que esta influye no solo en la granulometría del material, sino que se ha demostrado que puede variar la cantidad de mortero adherido en los agregados incrementando la resistencia de la mezcla final, si se utiliza una trituración secundaria con molino de impacto. (GEAR, 2011; Pedro et al., 2015), pero a su vez, como lo demuestran algunas investigaciones (López, González, López-Colina, Serrano, & López, 2016), la utilización de más procesos y el uso de maquinarias en la generación de los agregados reciclados, generan mayores impactos negativos al ambiente y repercuten en gran medida en los indicadores de impacto ambiental.

2.2 Mezclas de concreto.

El resultado de la interacción de los materiales en las mezclas de concreto, es el producto de múltiples variables que deben tenerse en cuenta al momento de calcular las proporciones de cada ingrediente de dicha mezcla.

Las características de los materiales y sus proporciones, aportarán diferentes propiedades al concreto tanto en estado fresco como después de fraguado. Estas van desde la manejabilidad hasta la resistencia y durabilidad del concreto en el tiempo. Por lo tanto, es

importante tener en cuenta los conceptos que deben aplicarse al estudio para establecer estrategias que lleven a los resultados deseados.

2.2.1 Mezclas de agregados reciclados.

Las mezclas de concreto a partir de agregados reciclados CAR, dependen de las mismas variables que los concretos de agregados naturales CAN, con la particularidad que las características de la mezcla final estarán determinadas en gran parte por las propiedades de los agregados reciclados, las cuales dependen en gran medida de las características de los concretos de donde son obtenidos.

Las propiedades de los agregados reciclados han sido ampliamente estudiadas (Martínez-Lage, Martínez-Abella, Vázquez-Herrero, & Pérez-Ordóñez., 2012; Omary, Ghorbel, & Wardeh, 2016; Padmini et al., 2009; Rahal, 2007), llegando a la conclusión que tienen unos niveles de absorción, porosidad y desgaste que afectan la resistencia final, haciendo que tengan menores prestaciones que los CAN, pero que algunas ocasiones el porcentaje no es superior a un dígito.

Por otro lado, dichas particularidades de los agregados y su incidencia en las propiedades finales de la mezcla, plantean para algunos investigadores un tratamiento especial en la relación agua / cemento a/c y la pre-saturación de los agregados. Por un lado, algunos autores como Rahal (2007) y Omary et al., (2016), sugieren la saturación previa como medida efectiva para contrarrestar el efecto de la porosidad de los agregados reciclados en la mezcla, y por otro, autores como Martínez-Lage et al. (2012) y Padmini et al. (2009), sugieren que una corrección de la relación agua/cemento es más conveniente.

En el sentido práctico, la mayor porosidad de los RA en comparación con los NA, afecta a las mezclas CAR en por dos razones: la primera es que, por tener mayores espacios intersticiales, los mismos absorben más agua “robándole” al cemento la necesaria para que reaccione completamente; y la segunda, es que una estructura más porosa de los agregados implica que tendrá una menor área para disipar los esfuerzos que le sean transmitidos dentro de la estructura de la mezcla endurecida. En cualquiera de los dos casos, redundará en una menor resistencia, por lo que se debe tratar de minimizar el efecto de la porosidad, en el primer caso, teniendo en cuenta el agua que realmente

absorbe el agregado, sea presaturada o compensando, y en el segundo, buscando estructuras de agregados reciclado que aunque sean porosas, tengan un buen nivel de resistencia, por lo que se usan agregados provenientes de concretos de prefabricados, los cuales presentan medianas o altas prestaciones.

Estas debilidades, en cuanto a los agregados reciclados se refiere, implican un aumento en el uso de cemento y aditivos para contrarrestar las generalmente bajas prestaciones de los agregados, dando como resultado un resultado desfavorable en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y reduciendo o quitándole todas las ventajas de sostenibilidad que puedan llegar a tener los CAR.

2.3 Análisis de Ciclo de Vida.

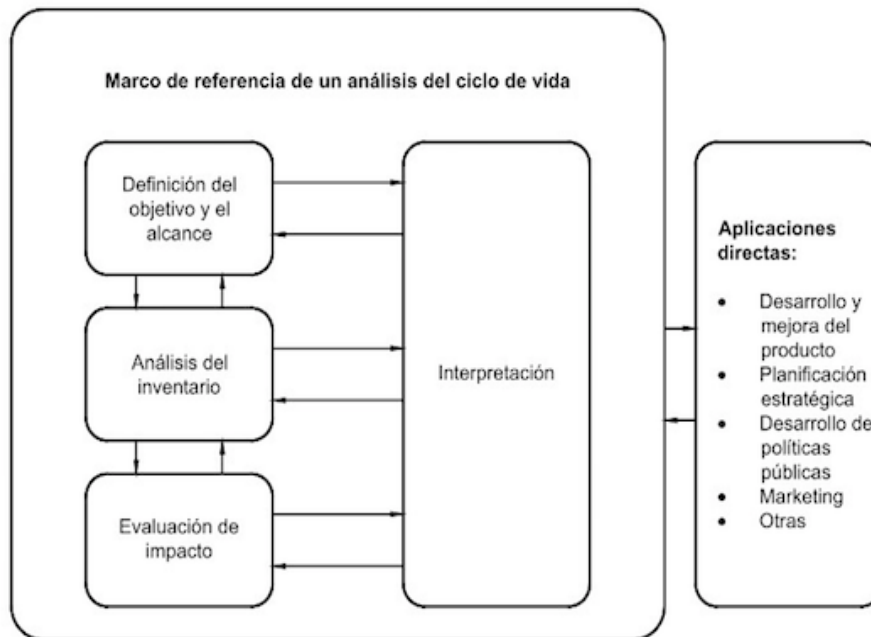
Según la NTC-ISO 14040 (2007), la cual es una adopción idéntica por traducción de la norma ISO 14040 (2007), el Análisis de Ciclo de Vida o ACV, “trata los aspectos ambientales e impactos ambientales potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, utilización, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final”, siendo una herramienta clave en la determinación de los impactos generados en cada una de las fases que tienen que ver con la producción y uso de los CAR y que proporciona los elementos necesarios para alcanzar los objetivos propuestos en esta investigación.

La realización de un ACV demanda una visión holística del problema, producto o proceso a realizar, teniendo en cuenta la evaluación individual de las partes que lo componen (IHOBE, 2009), razón por la cual, para el caso de los CAR, no sólo debe tenerse en cuenta el proceso de obtención de los agregados, sino que debe examinarse qué implicaciones adicionales tiene la producción de las mezclas y si es posible una modificación para reducir los impactos, asegurarse que estas variaciones permiten a los concretos cumplir con los requerimientos técnicos deseados.

Lo anterior implica generar concretos con propiedades mecánicas y ambientales satisfactorias, desde el momento del diseño de las mezclas. Esto ya sugiere la implementación de “alguna forma de análisis de ciclo de vida del producto”, pensando el producto para el medio ambiente, desde el proceso de diseño (Romero, 2016).

Para lograr este cometido, la norma propone la realización del estudio en cuatro fases, las cuales interactúan entre sí y están explicadas en la **Figura 2-1** Fases de un análisis de ciclo de vida.

Figura 2-1 Fases de un análisis de ciclo de vida



Fuente: NTC-ISO 14040, (2007).

2.3.1 Definición del objetivo y alcance.

Esta etapa es el punto de partida del ACV y donde se traza el camino a seguir y las razones que motivan a las empresas, y en este caso al autor, a realizar el Análisis. También, en esta fase se establecen las restricciones que tendrán el o los objetos de evaluación. En otras palabras:

“Define el objetivo y el uso previsto del estudio, así como el alcance de acuerdo con los límites del sistema, la unidad funcional y los flujos dentro del ciclo de vida, la calidad exigida a los datos, y los parámetros tecnológicos y de evaluación” (IHOBE, 2009, p. 5).

En un sentido global y estricto, un ACV debería considerar todos los factores “entradas/salidas” que intervienen en la vida útil de un producto, desde la explotación de

los recursos para su fabricación, pasando por su manufactura, hasta llegar a su disposición final, en lo que se conoce como un enfoque “de la cuna a la tumba”. Si se considera solo hasta que el producto es puesto en el mercado, será “de la cuna a la puerta” y si se limita a la realización del producto dentro del sistema de producción, es llamado “de la puerta a la puerta” (IHOBE, 2009). Adicionalmente, si se expande un poco más el límite, donde se tienen en cuenta la cadena de producción como un ciclo cerrado donde al final de la etapa de uso existe una fuente de materias primas para la creación de nuevos productos, se tendrá un análisis “de la cuna a la cuna” (Braungart et al., 2006).

En la definición del **objetivo** podemos encontrar los siguientes aspectos:

- **Aplicación.**

Como se mencionó anteriormente, la aplicación práctica del resultado del análisis es el aprovechamiento de materias primas alternativas en pro de la reducción de la contaminación en la construcción.

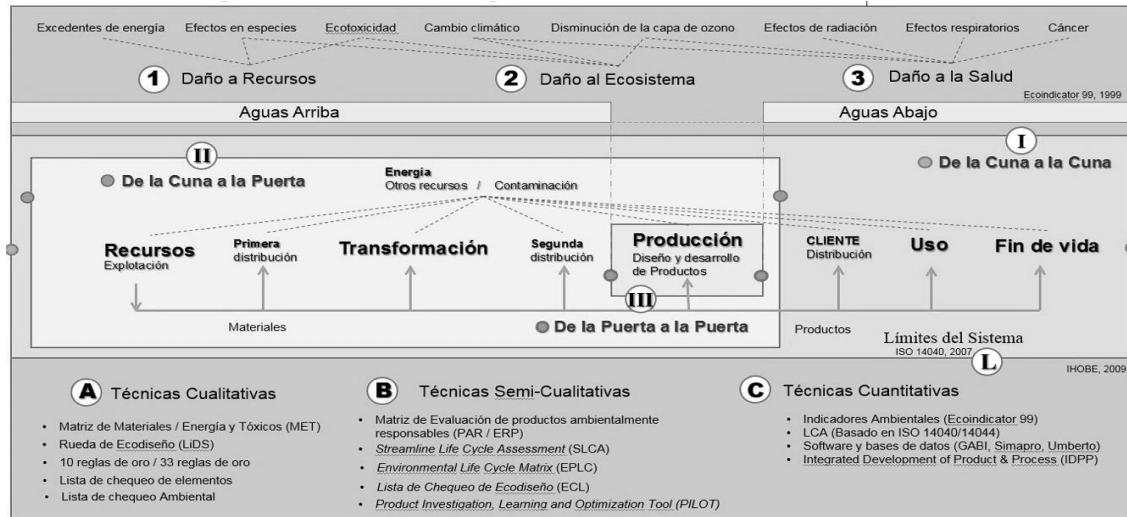
- **Audiencia.**

El público interesado en este ACV es, por un lado, el académico, que puede encontrar material de futuras investigaciones y nuevos planteamientos en el uso del concreto con miras a un concepto más cíclico la producción de los mismos; y por otro lado, es de esperarse el interés de las empresas productoras de concretos y particularmente de prefabricados, que podrían encontrar una ventaja competitiva al reusar las piezas destinadas a desecho.

En la definición del **alcance** la imagen adaptada por Romero Larrahondo (2016), en la **Gráfica 2-1** Formas de análisis de ciclo de vida, ayuda a entender qué tan extensa puede llegar a ser la interacción de una cadena productiva con el medio ambiente y cómo se analizan los impactos para que ser tomados en cuenta en un ACV, ayudándonos a entender la magnitud del alcance de un estudio de este tipo, por lo que se debe delimitar el mismo de acuerdo a la información disponible, los recursos que se tengan y el objetivo previamente planteado. De esta forma, la gráfica explica en su parte superior, las categorías de impactos ambientales que pueden presentarse en los recursos, en el ecosistema o en la salud humana. Tomando la producción en si como un hito dentro de la cadena, se analizan los eventos o subprocesos que ocurren antes de la misma, llamados Aguas Arriba, y los que ocurren después, llamados Aguas Abajo, para

identificar las acciones que interfieren con o modifican al producto y que son las causantes de los impactos comentados. Siendo así, aspectos como la explotación de recursos o la distribución, aportarán afectaciones que se reflejarán en las categorías de la primera línea. La gráfica termina mostrando las técnicas que pueden seguirse para la medición de dichos impactos.

Gráfica 2-1 Formas de análisis de ciclo de vida



Fuente: IHOBE, (2009), modificada por Romero (2016).

▪ Límites del sistema.

Los límites del sistema hacen referencia al "universo" o extensión de la cadena del producto que se va a tener en cuenta para un estudio de ACV. Según la NTC-ISO 14040 (2007), para delimitar el sistema se debe tener en cuenta los siguientes puntos:

- El sistema del producto a estudiar
- Las funciones del sistema de los productos a estudiar.
- La unidad funciona.
- Los procedimientos de asignación.
- Las categorías de impacto y la metodología de evaluación.
- Los requisitos relativos a los datos.
- Las limitaciones.
- Requisitos de calidad de los datos.

- El tipo y formato del informe requerido para el estudio.

Para el caso de esta investigación, se enmarca en un estudio de la “cuna a la puerta”, estableciendo los límites entre la obtención de las materias primas y la producción de los concretos, dejando por fuera la etapa de uso y su disposición al final de la vida útil. Aunque se sabe que unos de los aspectos fundamentales del concreto, cuando cumple su vida útil, es que puede ser usado como material de relleno, esto también puede convertirse en un problema cuando es dispuesto en lugares no adecuados, este estudio no tomará en cuenta el beneficio ambiental que implicaría el aprovechar los residuos que serían vertidos al medio ambiente, sino que se concentrará en la fase de producción.

Lo anterior permitirá establecer entradas y salidas independientes de los sistemas de cada tipo de concreto y enfocarse en los impactos generados por el proceso, aunque en realidad sea uno la consecuencia del otro, ya que los CAR finalmente provienen de los CAN. Los límites del sistema se presentan en capítulo 4.2. Resultados Análisis de Ciclo de Vida ACV.

Este estudio se desarrolló bajo un análisis comparativo con materiales muy similares en su composición, lo que implica que algunos factores, al encontrarse en todos los materiales, son sensibles a las variaciones en magnitud y no se presentan muchas diferencias en los flujos que componen las afectaciones. Es decir, que las ventajas entre unos y otros, se logran en la medida que se reduzcan las magnitudes y no, para este caso en particular, en cambiar los componentes.

Por otro lado, se debe anotar que los puntos en común, o procesos de igual magnitud presentes en las mezclas, no generan un desequilibrio en la balanza que nos permita establecer cuál es más conveniente. Por ejemplo: si en ambas mezclas se usa la misma cantidad de cemento, agua y agregado fino, los niveles de contaminación o indicadores de impacto dependientes de esas emisiones, serán los mismos. En el caso de los agregados gruesos, sí se presenta una diferencia, ya que tienen un origen distinto, notándose en los indicadores. Esta diferencia es la que permite escoger una de las opciones como más conveniente, después de validar que se cumpla la UF.

▪ **Limitaciones.**

De acuerdo a las particularidades del estudio, se hace necesario abordar de manera más detallada las limitaciones que presenta esta investigación, en lo concerniente al ACV. La metodología sugerida por la NTC-ISO 14040 (2007), plantea que deben definirse las limitaciones que se tienen en el estudio para tenerlas en cuenta durante la ejecución del ACV y tratar, de ser posible, de minimizar sus efectos en los resultados.

Como se mencionó anteriormente, para este trabajo de investigación no se contó con la información del origen de los agregados reciclados. Es decir, no se fue posible conocer la caracterización de los agregados utilizados, resistencia del concreto, tipo de cemento y aditivos utilizados, relación a/c, etc., debido a que la empresa que proporcionó este material no revela esta información por protección a sus productos y negocio. Para ambos agregados, naturales y reciclados, se desconoce en detalle cómo son obtenidos o qué medios de trituración fueron usados, pero se tienen nociones sobre su procesamiento por la literatura consultada y por las observaciones realizadas por el autor en la planta de producción, aunque estos no son completos.

Como otra de las limitaciones del ACV se tiene que, en algunos casos es necesario el uso de bases de datos que no pertenecen a nuestro país y que no pertenecen a nuestra realidad local. Por otro lado, el cemento y los otros materiales aún no cuentan con las fichas de Declaración Ambiental de Producto (DAP), lo que definitivamente influye en el estudio, pero se pudo conseguir información generada por el gremio de productores de cemento y concreto, para ser tenido en cuenta en esta investigación, como lo es el reporte, "*Clinker, cement and concrete supply data in Ecoinvent - Peru and Colombia*" (Myers, Gmünder, Laffely, & Silva, 2017), que muestra información de los datos disponibles en la base de datos Ecoinvent para generación de cemento y concreto en nuestro país y Perú. Sin embargo, para el ejercicio académico e investigativo, se debe tener en cuenta que es un primer acercamiento y que en futuros trabajos puede contarse con información levantada directamente en campo.

Teniendo en cuenta lo anterior, y por tratarse de un ejercicio comparativo entre productos, los resultados deben tomarse como indicadores de las ventajas que puede tener un concreto sobre otro que sirven de referencia a estudios más específicos centrados en la medición al interior de la industria. Sin embargo, al tratarse de flujos que están presentes en todos los concretos a comparar, estos se anulan como factores

presentes en lados opuestos de una ecuación, independientemente de las emisiones o daños que presente, como se explicó en la limitación del ACV.

En todo caso, la comparación se valida en la medida que se presentan datos de sistemas con características similares al estudiado, que se encontraron en la literatura. Estos podrán ser ajustados o actualizados a tecnologías diferentes, en futuros estudios.

Dentro de las limitaciones y los modelos de los ACV, también se encuentra que pueden ser de tipo atribucional, cuando los flujos simplemente describen la entrada y salida del sistema y los subsistemas estudiados existentes; y los consecuenciales, que son usados en la toma de decisiones, ya que describen los resultados de las variaciones ocasionadas por cambios en los procesos o escenarios asumidos, con el fin de evaluar la respuesta del sistema y buscando oportunidades de mejora (European Commission, Joint Research Centre, & Institute for Environment and Sustainability, 2010). Teniendo en cuenta lo anterior, esta investigación se enmarca en un modelo atribucional, ya que si bien se hacen modificaciones en los procesos, no es propiamente desde una variación en el ACV que se logran las mejorías, sino desde la búsqueda de la igualación de propiedades mecánicas, que van de la mano de la UF, que se busca una mejoría en el producto.

- **Propósito del estudio.**

Siguiendo la metodología planteada por la normatividad (NTC-ISO 14040, 2007), se debe establecer qué buscamos con el ACV a realizar para tener un ruta clara y un propósito concreto. Este trabajo de investigación pretende con el ACV, hacer un comparativo entre concretos con agregados gruesos de origen natural y reciclado, proveniente de concretos prefabricados, para determinar cuál de los dos es menos perjudicial para el medio ambiente.

- **Unidad funcional.**

Antes de implementar las fases que componen el ACV, es necesario establecer un punto de equivalencia entre los concretos estudiados, que permita evaluar su desempeño y relacionar los requerimientos de materiales y energía, que fueron necesarios para alcanzar el desempeño deseado, conocido como Unidad Funcional o UF (NTC-ISO 14040, 2007). Dicha UF define las características deseadas en el concreto, la cual deberá

atender los requerimientos físicos y mecánicos planteados en la metodología, para concretos no estructurales y de uso local.

Para el establecimiento de unidades funcionales que constituyan una medida de comparación entre los dos tipos de concreto, existen las Reglas de Categoría de Producto o PCR por sus siglas en inglés: *Product Category Rules*, las cuales son usadas para emitir las Declaraciones Ambientales de Producto, EPD's, por como son conocidas internacionalmente: *Environmental Product Declaration*, que son a su vez un documento que proporciona información robusta, consistente y de datos verificados por un órgano independiente, de los impactos ambientales generados por un producto o servicio de una compañía identificados a partir un ACV. Siento así, las PCR condicionan en detalle la forma como debe ser realizado este análisis de ciclo de vida para que el producto del mismo pueda ser usado para comparar dos productos de la misma categoría (UN CPC 375, 2013), es decir dice qué se debe tener en cuenta para analizar una categoría de producto en particular, para el caso del concreto, aunque no es una PCR en sí, la UN CPC 375 es un intento por implementar una futura especificación para ser usada en conjunto con otros documentos para crear las EPDs correspondientes (WBCSD, 2018).

Si bien este documento ayudó a parametrizar y fue tomado como base para la elaboración de este estudio, al no tratarse de la elaboración de una elaboración de declaraciones ambientales de productos, se optó por estructurar la investigación de acuerdo a los trabajos de los autores consultados para buscar que los resultados fuesen comparables.

Particularmente, para la unidad funcional, Dobbelaere, De Brito, & Evangelista (2016), proponen algunos aspectos claves en las propiedades equivalentes entre los CAR y los CAN, aunque para su investigación fueron planteados para fines estructurales, se partió de este punto para determinar la UF de este trabajo. Dobbelaere et al. (2016) enuncian importantes parámetros para determinar las UF entre los concretos y hacen referencia a lo estudiado por Marinković et al. (2010), reconociendo como una falencia el establecer como unidad funcional para ese estudio el volumen, ya que compara 1 m³ de CAR con 1 m³ de CAN, sin considerar las propiedades intrínsecas de los materiales para alcanzar un determinado desempeño estructural. Esto fue encontrado en varios trabajos de pesquisa como el de Estanqueiro, Dinis Silvestre, de Brito, & Duarte Pinheiro (2016), Hossain et al. (2016) y Serres et al.(2015), que sólo tienen en cuenta el peso como UF,

aunque el de Estanqueiro et al. (2016) está más relacionado directamente a los agregados, por lo que podría tener mayor validez.

Lo anterior muestra la importancia de establecer unidades funcionales ajustadas a las propiedades deseables en el producto final, por lo cual deberían tenerse en cuenta también propiedades como la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad, la carbonatación, la penetración de cloruros, la resistencia a la tensión axial y el creep (Dobbelaere et al., 2016), lo que la misma UN CPC 375 (2013) define como Unidad Declarada, estableciendo algunos parámetros para usarla en la elaboración de EPDs. Debido al alcance de este estudio, sólo se toma la resistencia y el volumen para establecer la comparación.

De acuerdo al alcance y los objetivos del presente estudio del estudio, se estableció como Unidad Funcional un (1) metro cúbico (m^3) de concreto con una resistencia a la compresión $f'_c = 28$ MPa o 280 kgf/cm². Esto debido a que se trata de un primer acercamiento en materia de concretos con agregado reciclado de prefabricados de concreto y que sea el punto de partida para futuras investigaciones en el tema.

2.3.2 Desarrollo del Inventario del Ciclo de Vida (ICV).

Es aquí donde se recopilan y cuantifican por medio de procedimientos de cálculo, los datos entrada y salida en función de las descargas ambientales que se generan en cada sistema para la UF propuesta, siendo este un proceso iterativo donde se pueden agregar datos a medida que se alimenta (NTC-ISO 14040, 2007). Esta fase del ACV se realiza a través de la recopilación de datos, cálculo de datos y la asignación de flujos y de emisiones y vertidos.

- **Recopilación de datos.**

La NTC-ISO 14044 (2007) establece que:

“La colección de datos cuantitativos o cualitativos para inclusión en el inventario debe hacerse en cada unidad del proceso establecida en los límites del sistema. Esta será usada para cuantificar las entradas y salidas, ya sea medida, calculada o estimada” (p.11)

- **Cálculo de datos.**

Después de la recopilación se hará la validación, entendida como un chequeo a través de la obtención de los datos y verificación de aspectos como los balances de masa y energía y la congruencia de los mismos; la relación de los datos con los procesos y con el flujo de referencia de la UF (NTC-ISO 14040, 2007), que para este estudio debe coincidir con el volumen de concreto producido.

- **Asignación de flujos y de emisiones de vertido.**

Se tienen en cuenta aquí las salidas que genera el sistema, ya que raramente tienen una única salida, por el contrario, además del producto principal, se generan otros productos resultado del procesamiento de las materias primas en el sistema (NTC-ISO 14040, 2007)

Para este trabajo en particular, en esta fase se tiene en cuenta cómo son producidos los agregados reciclados y naturales, los equipos necesarios para cada proceso, el transporte necesario en cada uno y todos los requerimientos que tenga en particular cada mezcla de concreto estudiada.

Debido a las políticas de confidencialidad de las empresas consultadas para este estudio, no fue posible hacer una toma directa de emisiones o documentación de los procesos de obtención de los agregados naturales o reciclados. Por tal razón, se recurrió a la literatura para determinar, por ejemplo, los equipos utilizados para la extracción y procesamiento de los agregados; a bases de datos incluidas en software utilizado, como Ecoinvent y Gabi, para determinar las emisiones generadas por los procesos, y a información complementaria que pudo ser observada en campo para complementar el modelo, como el tipo de camiones usados para el transporte de los materiales, obteniendo así la modelación completa de los dos sistemas, tanto para los CAN, como los CAR.

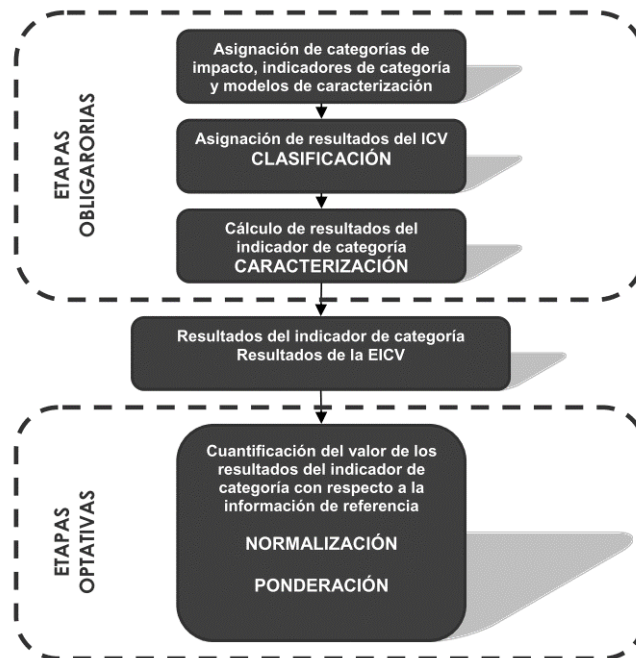
Lo anterior, aunque puede considerarse una debilidad del estudio, ya representa alguna forma de análisis de ciclo de vida, concepto trabajado en la tesis doctoral “La integración de partes interesadas y su relación con el diseño para el ambiente en la implementación o mejora del tutelaje de producto” (Romero, 2016), donde se identifica cierta flexibilidad en la integración del ACV en el proceso de desarrollo de un producto, desde la perspectiva del ecodiseño, constituyendo este estudio en un acercamiento a la producción de concretos con agregados reciclados a partir de prefabricados de concreto,

con un manejo más consciente de sus impactos al medio, teniendo en cuenta que no hay información disponible al respecto para nuestra realidad local. Aquí se investigan las posibles ventajas del uso de estos residuos en nuevos concretos en pro de la sostenibilidad del campo de la construcción.

2.3.3 Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV).

Se busca en esta etapa evaluar qué tan importantes son para el ambiente, la salud humana y los recursos naturales, los datos encontrados en el ICV, al relacionarlos con las categorías de impactos ambientales. En otras palabras, cuál es su potencial de afectación para el ambiente, dependiendo de la magnitud y repetitividad de los mismos (IHOBE, 2009; NTC-ISO 14040, 2007). Como se explicará más adelante, las categorías de impacto utilizadas en este estudio, son las que implican un efecto inmediato sobre el ambiente y se deja de lado las que reflejan afectaciones a la salud humana, en busca de una correspondencia con las investigaciones consultadas.

La implementación de esta evaluación contiene elementos claramente definidos por la ISO 14040, de los cuales algunos son obligatorios y otros optativos para la realización del estudio, la cual puede ser observada en la **Figura 2-2** Esquema de la fase de EICV según la norma ISO 14040.

Figura 2-2 Esquema de la fase de EICV según la norma ISO 14040

Fuente: IHOBE, 2009; NTC-ISO 14040, 2007

- **Clasificación.**

En la clasificación se seleccionan las categorías de impactos ambientales de los que se desean obtener resultados del estudio (IHOBE, 2009), siendo, para el caso de esta investigación se tienen las presentadas.

- **Caracterización.**

La caracterización es la etapa donde las sustancias identificadas en el ICV son asignadas a las categorías de impacto, pudiendo esta pertenecer a varias categorías, contribuyendo en diferente medida para la categoría de impacto especificada, obteniendo unidades equivalentes entre sustancias, que pueden ser sumadas entre sí (IHOBE, 2009).

Esta investigación llega hasta esta etapa, ya que satisface la consecución de los objetivos propuestos y permite la comparación con otros estudios y trabajos similares.

Tabla 2-4 Categorías de impacto tenidas en cuenta para la investigación.

Categoría de impacto	Definición	Unidad de referencia		Factor de caracterización
Calentamiento global	Fenómeno observado en las medidas de la temperatura que muestra en promedio un aumento en la temperatura de la atmósfera terrestre y de los océanos en las últimas décadas	Kg. Eq CO ₂	Kilogramos equivalentes de dióxido de carbono	Potencial de Calentamiento Gobal (PCG)
Acidificación	Pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua, como consecuencia del retorno a la superficie de la tierra, en forma de ácidos, de los óxidos de azufre y nitrógeno descargados a la atmósfera.	Kg. Eq SO ₂	Kilogramos equivalentes de dióxido de azufre	Potencial de Acidificación (PA)
Eutrofización	Crecimiento excesivo de la población de algas originado por el enriquecimiento artificial de las aguas de ríos y embalses como consecuencia del empleo masivo de fertilizantes y detergentes que provoca un alto consumo del oxígeno del agua.	Kg. Eq NO ₃	Kilogramos equivalentes de trióxidonitrato	Potencial de Etofización (PE)
Consumo de materias primas	Consumo de material extraído de la naturaleza.	T/m ³	Tonelada metro cúbico	Cantidad consumida.
Formación de oxidantes fotoquímicos	Formación de los precursores que dan lugar a la contaminación fotoquímica. La luz solar incide sobre dichos precursores, provocando la formación de una serie de compuestos conocidos como oxidantes fotoquímicos (el ozono-O ₃ es el más importante por su abundancia y toxicidad)	Kg. Eq C ₂ H ₄	Kilogramos equivalentes de etileno	Potencial de Formación de Oxidantes Fotoquímicos (PFOF)
Consumo de recursos energéticos	Energía consumida en la obtención de las materias primas, fabricación, distribución, uso y fin de vida del elemento analizado.	MJ	Mega Joules	Cantidad consumida.

Fuente: IHOBE, 2009.

Lo anterior va de la mano con el estudio realizado por López et al. (2016), excepto porque en dicho estudio no se tiene en cuenta el consumo de materias primas, lo que para el autor del presente trabajo es de suma importancia porque aporta nociones sobre las ventajas que podría tener un CAR en la reducción en la disposición final de residuos y la explotación canteras, sobre todo para el caso de Bogotá, donde podría significar una ventaja en transporte y aprovechamiento de nuevos materiales con bajas afectaciones al ambiente. Marinković et al. (2010), por su lado, sí tiene en cuenta esta clasificación en su estudio. Estas categorías de impacto fueron acogidas por López et al. (2016), en función del estudio realizado por Marinković et al. (2010), bajo la metodología CML 2001. Lo anterior facilita la discusión de los resultados, en la medida que existen parámetros equivalentes en los resultados y que, al contrario de la tesis planteada en el presente estudio, las anteriores investigaciones no mostraron mayores ventajas ambientales de los CAR sobre los CAN.

- **Caracterización.**

Corresponde a la contribución de las sustancias en cada una de las categorías con respecto a un valor de referencia definido por la metodología escogida para la EICV, la cual, para este trabajo se toma como guía la del Centro de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden en Países Bajos, denominada CML 2001, ya que trabaja con las causas inmediatas de las sustancias emitidas y no con los efectos finales como la afectación a la salud humana. Por otro lado, es el mismo método utilizado por los autores consultados para esta investigación, lo que, como se mencionó antes, facilita la comparación de datos y la discusión de los resultados.

2.3.4 Interpretación del Análisis de Ciclo de Vida ACV.

Es la etapa final del análisis donde se presentan los resultados, que deben ir acorde con los objetivos y alcances definidos en la primera etapa y se hacen las correlaciones pertinentes entre los estudios planteados para los procesos, según las limitantes y unidades funcionales definidas.

Bajo las indicaciones de la NTC-ISO 14044, (2007), esta fase del ACV compromete algunos elementos para la interpretación del ACV, los cuales se explican seguidamente:

- **Identificación de problemas importantes basados en los resultados del ICV y EICV.**

Este elemento ayuda a determinar problemas relevantes en la concordancia entre los resultados y lo propuesto en la fase de objetivos y alcance del ACV, mediante la estructuración de estos resultados mediante la interacción o revisión de los métodos y consideraciones o asunciones hechas para llevar a cabo el ICV y la EICV.

- **Evaluación de los controles de integridad, sensibilidad y consistencia.**

El propósito de este elemento es establecer la confiabilidad del ACV realizado, presentando los resultados de tal manera que la parte interesada tenga un punto de vista claro sobre los resultados del estudio.

Esto se logra a través de los controles de integridad, que busca identificar los elementos faltantes o información relevante para la interpretación esté disponible y completa, marcando pautas para proceder en caso de que esto suceda; los controles de sensibilidad, que buscan determinar la confiabilidad de los datos tomados en el ACV, los que pueden realizarse por determinaciones previas de problemas presentados en la definición de objetivos y alcances, y la comparación con experiencias previas; y los controles de consistencia, que se hacen a partir de la congruencia entre las suposiciones realizadas, los métodos adoptados y los datos, con los objetivos y alcances.

- **Conclusiones, limitaciones y recomendaciones**

Es la parte de la Interpretación del ACV donde se generan las apreciaciones a las que dio lugar el estudio, se identifican limitaciones de los resultados y se hacen las recomendaciones del caso.

La interpretación también debe tomar en consideración qué tan apropiado fueron las unidades funcionales y los límites al sistema considerados para el ACV, así como identificar por medio de evaluaciones de calidad y análisis de sensibilidad, las limitaciones en los datos (NTC-ISO 14044, 2007).

Para el caso que atañe este documento, en esta fase se comparan los resultados obtenidos del ACV para cada uno de los concretos estudiados, aplicando los elementos antes vistos, pudiendo confirmar o no la tesis planteada mediante el cumplimiento de los objetivos propuestos.

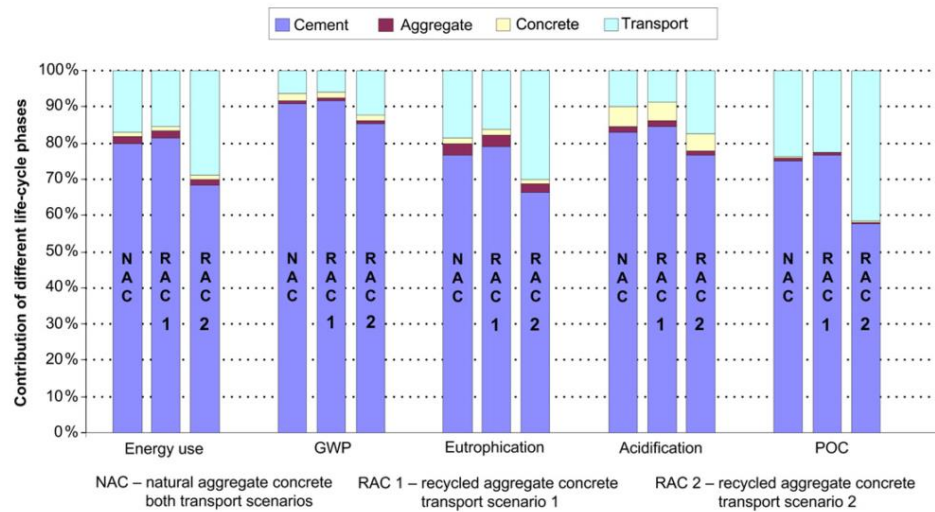
2.3.5 Relación del ACV con las mezclas de concreto.

El problema fundamental, desde el punto de vista ambiental, con la producción de mezclas de concreto, radica en que la utilización de cemento y aditivos causa un gran impacto negativo en el medio ambiente, debido a la emisión de múltiples sustancias afectan las condiciones del entorno. En su investigación, Serres et al., (2016), analiza contribución de los componentes del concreto, para diferentes tipos de muestras, entre ellas concretos CAN y CAR, como puede verse en la

Tabla 2-5 Contribución (%) para cada componente del concreto según la mezcla.

Existen otros estudios que aportan a lo planteado anteriormente, mostrando la gran incidencia que tienen el cemento y el transporte dentro de los concretos tanto reciclados, como naturales (Marinković et al., 2010), como puede observarse en la **Gráfica 2-2** Contribución a los indicadores de impacto ambiental en ACV's para concretos CAR y CAN.

Gráfica 2-2 Contribución a los indicadores de impacto ambiental en ACV's para concretos CAR y CAN.



Fuente: Marinković et al. (2010)

Tabla 2-5 Contribución (%) para cada componente del concreto según la mezcla

Environmental impact indicator	Unit	Sample	Aggregate production	Cement production	Concrete production	Transport
Consumption of energetic resources	MJ	MC	8.9	79.6	1.0	10.5
		RC	6.3	86.3	0.8	6.6
		TC	5.9	77.5	1.1	15.3
		BAC	1.3	92.8	0.5	5.3
		NAC	4.8	79.4	0.9	14.8
Abiotic depletion	kg Sb eq	RAC	6.6	83.8	0.8	9.6
		MC	7.1	79.5	1.1	12.3
		RC	6.0	83.9	1.0	9.1
		TC	4.2	78.1	1.1	16.5
		BAC	2.2	88.6	0.7	8.5
Water consumption	L	NAC	3.5	79.5	0.9	16.1
		RAC	5.5	82.8	0.9	11.7
		MC	3.4	91.9	1.9	2.6
		RC	3.5	92.4	1.9	2.1
		TC	7.7	87.0	1.8	3.2
Global warming	kg CO ₂ eq	BAC	0.2	95.9	1.6	2.2
		NAC	6.3	89.0	1.5	3.1
		RAC	3.8	92.2	1.5	2.3
		MC	1.5	92.9	1.4	4.1
		RC	1.4	93.9	1.4	3.2
Acidification	kg SO ₂ eq	TC	1.4	91.8	1.3	5.3
		BAC	0.9	94.8	1.0	3.2
		NAC	1.2	92.4	1.1	5.2
		RAC	1.3	93.5	1.2	4.0
		MC	6.2	81.3	5.1	7.3
Eutrophication	kg PO ₄ ³⁻ eq	RC	5.0	84.9	4.8	5.1
		TC	5.6	79.3	5.0	9.9
		BAC	3.1	88.6	3.6	4.5
		NAC	4.6	81.4	4.2	9.7
		RAC	5.1	79.6	4.2	11.1
Air pollution	m ³	MC	6.4	83.6	1.7	8.3
		RC	5.7	86.5	1.4	6.3
		TC	7.1	80.4	1.7	10.7
		BAC	3.7	89.2	1.0	6.1
		NAC	5.9	82.1	1.4	10.6
Water pollution	m ³	RAC	5.7	80.4	1.3	12.6
		MC	2.6	90.8	1.5	5.0
		RC	2.4	92.2	1.5	3.9
		TC	2.8	89.1	1.5	6.5
		BAC	1.9	93.1	1.2	3.9
Ozone layer depletion	kg CFC-11 eq	NAC	2.3	90.0	1.3	6.4
		RAC	2.3	90.5	1.3	6.1
		MC	9.5	71.2	3.2	16.0
		RC	9.3	74.0	3.3	13.3
		TC	9.6	67.3	3.0	19.7
Photochemical oxidation	kg C ₂ H ₄ eq	BAC	2.3	80.6	2.8	14.2
		NAC	7.8	70.5	2.5	19.1
		RAC	8.4	74.9	2.6	14.5
		MC	1.6	81.9	0.7	15.7
		RC	1.0	90.3	0.5	8.2
		TC	4.4	71.3	0.8	23.3
		BAC	1.2	92.8	0.3	5.7
		NAC	3.6	73.3	0.7	22.4
		RAC	1.7	85.4	0.5	12.6
		MC	3.6	80.4	0.4	15.5
		RC	3.5	83.9	0.4	12.1
		TC	6.5	74.0	0.4	19.0
		BAC	5.4	82.9	0.3	11.3
		NAC	5.3	75.8	0.3	18.4
		RAC	3.8	80.2	0.3	15.6

MC: 20-mm mixed concrete; RC: 20-mm recycled concrete; TC: 20-mm traditional concrete; BAC: 8-mm recycled brick aggregate concrete; NAC: 8-mm natural aggregate concrete; RAC: 8-mm recycled concrete aggregate concrete.

Fuente: Serres et al. (2016).

Por otro lado, el uso de aditivos, empleado para imprimirle ciertas propiedades al concreto como la manejabilidad, el tiempo de fraguado y la porosidad, entre otros, también tiene un gran aporte en el aumento de indicadores del ACV, por lo que se deben crear estrategias para su limitación dentro del uso o buscar por otros medios la obtención de las características finales de la mezcla tanto en estado fresco, como endurecido. A través de su investigación, Serres et al. (2016), también ilustra su investigación con el

eco perfil de un plastificante, analizado bajo estándares franceses y mostrando su potencial contaminante en la

Tabla 2-6 Eco-perfil para 1 kg de súper plastificante de acuerdo con la NF P 01-010.

Tabla 2-6 Eco-perfil para 1 kg de súper plastificante de acuerdo con la NF P 01-010

Raw material	Unit	Value
Consumed		
Coal, brown (lignite)	g	82
Coal, hard	g	51
Oil, crude	kg	0.16
Gas, natural	m ³	0.22
Released to air		
CO ₂	kg	0.72
CO	g	0.55
NO _x	g	1.8
SO _x	g	3.6
N ₂ O	mg	67
Methane	g	1.2
Butane	mg	11
Pentane	mg	14
Methanol	mg	60
Ethane	mg	8.9
Benzene	mg	7.4
NM VOC, non-methane volatile organic compounds	g	0.29
Hydrocarbons, aromatic, polycyclic	µg	39
Acetic acid	mg	63
Ammonia	g	2.1
Arsenic	µg	58
Chromium VI	µg	16
Mercury	µg	94
Nickel	mg	0.46
Vanadium	mg	1.2
Dioxins	ng	43
Methane, tetrachloro-, CFC-10	µg	2
Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	µg	1.8
Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	µg	4.1
Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	µg	5
Released to water		
COD, chemical oxygen demand	g	2.6
Hydrocarbons, aromatic, polycyclic	µg	67
Oils	g	0.63
Barite	mg	51
Nickel	mg	3.9
Released to ground		
Chromium VI	mg	0.22
Oils	g	0.66
Solid waste		
Waste, inert	g	21
Waste, toxic	g	0.45
Total energy		
Total energy	MJ	18.3

Fuente: Serres et al. (2016).

Como puede verse, la contribución del cemento en cada uno de los indicadores de impacto, es sustancialmente mayor que el de la producción de los agregados, o que el de producción de la mezcla misma. De igual forma, el transporte es un aspecto que también impacta de manera importante en la cuantificación final de los impactos. Es por ello que debe prestarse especial cuidado a estos aspectos y buscar la manera de controlarlos, de tal manera que se puedan establecer unos factores que favorezcan el uso de los CAR, con menores impactos que los de concretos convencionales. La cuestión está en que, en teoría, para tornar un CAR, tan competente como un CAN, es decir, manteniendo la Unidad Funcional o UF, se deben aumentar las cantidades de cemento y, según otros aspectos deseables de la mezcla, también los aditivos, lo que implica una relación directa o exponencialmente proporcional, de la variación de los indicadores de impacto. Esto sin contar con las implicaciones logísticas del transporte y producción de los agregados, que dependerá de las condiciones locales de dónde y cómo se generen los mismos.

2.4 Herramientas para análisis del ciclo de vida.

Actualmente existen muchas herramientas informáticas convenientes para el desarrollo de los ACV, con las que se pueden obtener resultados apoyados en diferentes bases de datos durante el Inventario del Ciclo de Vida ICV, y con los cuales se pueden aplicar diferentes metodologías durante la Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida EICV.

Para este estudio, se analizaron tres programas especializados en ACV, los cuales son los más difundidos en el mercado y en términos generales, se ejecutan mediante la parametrización de modelos con información disponible en las bases de datos previamente cargadas en la herramienta o con información propia del lugar o productos a manejar.

Los programas tenidos en cuenta para este estudio fueron preliminarmente SimaPro, Umberto y GaBi. Los tres programas cuentan con una interfaz gráfica que permite al usuario organizar esquemáticamente el estudio, estableciendo datos de entrada y límites del sistema. Allí se establecen los flujos de energía y materia, desde y hacia cada uno de los procesos buscando representar fielmente la interacción entre ellos, los recursos naturales empleados para la producción y las emisiones que se generan a lo largo del

sistema. También se encuentra en el mercado el programa OpenLCA, de la casa Greendelta, el cual, si bien es abierto o de libre acceso y permite realizar estudios detallados de ACV, trabaja con bases de datos que deben ser compradas o realizar desde cero todos los entradas y salidas de los procesos para realizar los estudios (Greendelta, 2019), lo que para esta investigación resultaba limitante.

Estos programas guardan ciertas similitudes en aplicación, uso y metodologías, por lo que no habría, para este estudio, un aspecto en particular que haga inclinar la elección por alguno en particular. La escogencia final se hizo por el programa GaBi, de la compañía Thinkstep, debido a que se obtuvo una respuesta rápida y positiva en la solicitud del licenciamiento en versión educacional para el uso del programa. La **Tabla 2-7: Características generales de las herramientas para el ACV.**, permite observar los principales aspectos presentes en cada programa, siendo válidos cualquiera de ellos para esta investigación. De hecho, como se ver más adelante, el programa más usado por los autores consultados de estudios similares, es SimaPro, de la empresa PRé Consultants.

Tabla 2-7: Características generales de las herramientas para el ACV.

Nombre	Fabricante	Características	Principales bases de datos	Metodologías de análisis de impacto
SimaPro	PRé Consultants (creadores de la metodología ReCiPe y Ecoindicador 99)	<ul style="list-style-type: none"> - Modelo y análisis de ciclos de vida de manera sistemática y transparente. - Medición de impactos ambientales y costos de los servicios y productos en diferentes etapas del proceso. - Posibilidad de exportar a Excel u otras aplicaciones externas los resultados. - Uso de parámetros para el análisis de diferentes escenarios. - Evaluación de incertidumbre de datos mediante análisis Monte Carlo - 25 años en el mercado. - Programa más usado a nivel mundial. - Programa usado por la empresa cementera Argos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ecoinvent - Franklin US LCI 98 library - European Life Cycle Data - US Input Output library - EU and Danish Input Output library - Swiss Input Output - LCA Food - Industry data 	<ul style="list-style-type: none"> - Ecoindicador 99 - ReCiPe - Impact 2002+ - APS 2002+ - USEtox - IPCC 2007 - CML 2001 - Traci 2 - BEES - EDIP 2003 - Ecological Scarcity 2006 - Protocolo de gas de efecto invernadero.
Umberto	Ifu hamburg GmbH	<ul style="list-style-type: none"> - Modelación y representación gráfica de los procesos por medio de diagramas Sankey, que permiten ver flujos de energía, materiales y costos. - Análisis y evaluación de balances de masa y energía de todo un sistema de producción, cadena de suministro para uno o todos los productos o cualquier parte del sistema. - Posibilidad de guardar modelos para futuros proyectos. - Considera el material, el flujo de energía y el costo relacionado a la producción. - Posibilidad de exportar resultados a MS Excel. - Programa usado por empresas como GE y OSRAM 	<ul style="list-style-type: none"> - Ecoinvent - GaBi database 	<ul style="list-style-type: none"> - Ecoindicador 99 - ReCiPe - Impact 2002+ - CML 2001 - Traci - IPCC

Nombre	Fabricante	Características	Principales bases de datos	Metodologías de análisis de impacto
Gabi	Thinkstep	<ul style="list-style-type: none"> - Modelación por medio de interfaz gráfica e intuitiva para montaje de procesos y flujos. - Fácil e intuitivo uso para no expertos. - 25 años en el mercado. - Posibilidad de guardar modelos para futuros proyectos. - Posibilidad de realizar estudios de costos en el ciclo de vida. - Permite realizar análisis de flujos de energía y materiales. - Soporte en estudios de conteo de gases de efecto invernadero. - Programa usado por empresas como BASF, Eternit, Hilti AG y Husqvarna. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ecoinvent - GaBi database - United Stated LCI 	<ul style="list-style-type: none"> - AADP - CML 2001 - EDIP - Impact 2002+ - ReCiPe - Traci - UBP - USETtox - Ecoindicador 99 - <i>Environmental Priority Strategies (EPS)</i>

Fuente: Recopilación del autor a partir de las páginas de los programas: Ifu Hamburg GmbH (2019), PRé Consultants (2019) y Thinkstep (2019).

2.5 Estudios relacionados de mezclas de concreto con agregados reciclados y ACV.

A partir de la revisión de la literatura, no se encontraron en Colombia, estudios que traten sobre utilización de agregados reciclados provenientes de prefabricados de concreto, evaluando sus ventajas ambientales frente a los concretos convencionales, utilizando como herramienta un Análisis de Ciclo de Vida. Se hicieron consultas directas con las principales cementeras del país, Argos, Cemex, Ultracem y Holcim, para constatar los avances que han tenido en esta materia pero no se obtuvo información alguna. Cabe resaltar que ninguna de las antes mencionadas cuenta con fichas de declaraciones de producto, por lo que la simple producción de concretos con agregados reciclados no sería de interés para este estudio, ya que no puede relacionarse o compararse con los resultados de esta investigación.

A nivel internacional se tiene un espectro más amplio en el tema, teniendo autores como Marinković, Radonjanin, Malešev, & Ignjatović, (2010), Serres et al. (2016) y Hossain et al. (2016), entre otros, que han investigado específicamente el tema que atañe esta investigación, encontrando resultados positivos en el uso de los agregados reciclados como respuesta ecológica al problema de la industria de la construcción en el uso de concretos. En algunos casos se ha encontrado que el uso de agregados reciclados de concreto tiene varias limitaciones según el uso, los resultados esperados y la calidad del concreto del que provengan, lo que puede impactar en los indicadores de impacto. Por esto es necesario tener en cuenta la fuente, cantidad y distancia de los agregados porque son factores que pueden incidir fuertemente en la carga ambiental de los CAR al punto de presentar impactos similares o superiores a los que presentan los CAN.

Algunos de los estudios tenidos en cuenta para esta investigación, encontrados en la revisión de literatura, pueden observarse en la **Tabla 2-10** Revisión de literatura - Estudios similares de mezclas de concreto con agregados reciclados y ACV. Se relacionan en esta tabla las investigaciones tendientes a comparar los impactos generados por la utilización de estos dos tipos de agregados, naturales y reciclados, en las mezclas de concreto.

Otros estudios complementarios, como el de Dobbelaere et al. (2016), proporcionaban información adicional al tema central, ya que si bien no realiza una comparación directa entre los concretos mediante un ACV, sí toca elementos claves como la UF, que permitieron dar un mejor planteamiento a la investigación.

Entre los aspectos destacables de la bibliografía consultada se encuentra que mientras que muchos estudios demuestran las ventajas del uso de los agregados reciclados, estudios como el de Marinković et al. (2010), encuentra que para los escenarios establecidos en su investigación, el aprovechamiento de residuos de demolición de concretos y la producción de CAR, no son favorables ambientalmente, ya que contribuyen en mayor medida a la afectación del medio ambiente, debido a que las distancias de transporte de los materiales afectan en gran medida los resultados del ACV, como se puede observar en las **Tabla 2-8** Impactos ambientales para 1 kg de CAN y CAR, escenario de transporte 1 y **Tabla 2-9** Impactos ambientales para 1 kg de CAN y CAR, escenario de transporte 2.

Tabla 2-8 Impactos ambientales para 1 kg de CAN y CAR, escenario de transporte 1

Impact category	Energy use (MJ)		Global warming (g CO ₂ -eq.)		Eutrophication (g PO ₄ ³⁻ -eq.)		Acidification (g SO ₂ -eq.)		POC (g C ₂ H ₄ -eq.)	
	NAC	RAC	NAC	RAC	NAC	RAC	NAC	RAC	NAC	RAC
Cement	1255.39	1315.17	279251.73	292549.43	93.33	97.77	1670.12	1749.65	49.05	51.39
Aggregate	27.77	29.15	2683.07	2816.37	3.81	3.99	30.73	32.25	0.53	0.55
Concrete	20.07	20.07	5718.35	5718.35	1.72	1.72	110.37	110.37	0.06	0.06
Transport	267.19	248.63	19958.41	18541.99	22.78	20.20	198.24	178.77	15.59	14.99
Total	1570.42	1613.02	307611.56	319626.14	121.63	123.68	2009.45	2071.04	65.23	66.99
RAC over NAC impact increase (%)	2.71		3.91		1.69		3.07		2.71	

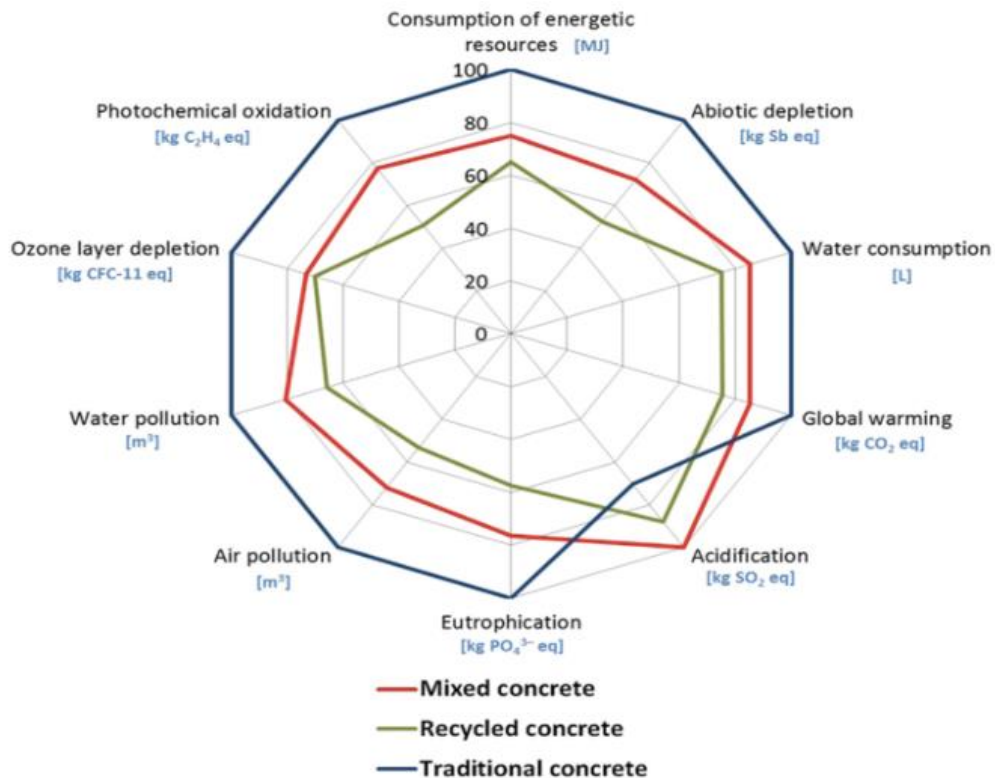
Tabla 2-9 Impactos ambientales para 1 kg de CAN y CAR, escenario de transporte 2

Impact category	Energy use (MJ)		Global warming (g CO ₂ -eq.)		Eutrophication (g PO ₄ ³⁻ -eq.)		Acidification (g SO ₂ -eq.)		POC (g C ₂ H ₄ -eq.)	
	NAC	RAC	NAC	RAC	NAC	RAC	NAC	RAC	NAC	RAC
Cement	1255.39	1315.17	279251.73	292549.43	93.33	97.77	1670.12	1749.65	49.05	51.39
Aggregate	27.77	29.15	2683.07	2816.37	3.81	3.99	30.73	32.25	0.53	0.55
Concrete	20.07	20.07	5718.35	5718.35	1.72	1.72	110.37	110.37	0.06	0.06
Transport	267.19	558.23	19958.41	41612.23	22.78	44.11	198.24	394.71	15.59	37.12
Total	1570.42	1922.62	307611.56	342696.38	121.63	147.59	2009.45	2286.98	65.23	89.11
RAC over NAC impact increase (%)	22.43		11.41		21.35		13.81		36.63	

Fuente: Marinković et al. (2010)

Por otro lado en la investigación de Serres et al. (2016) también se toma como UF el metro cúbico de producto, y se encuentran aspectos ambientales positivos que muestran los CAR como una buena opción para el uso sostenible de los concretos. Este estudio revisa características de desempeño mecánico, que si bien no fueron parte de la UF, si hicieron parte importante del estudio. Finalmente, se muestran las comparaciones entre los impactos que generan los concretos estudiados utilizando la herramienta del ACV. Algunas de estas comparaciones pueden observarse a continuación.

Gráfica 2-3 Medición ambiental de muestras de concreto de 20 mm de tamaño de agregado



Fuente: Serres et al. (2016).

Tabla 2-10 Revisión de literatura - Estudios similares de mezclas de concreto con agregados reciclados y ACV.

Título (Inglés)	Author	Año	Delimitación	UF	Tipo de concreto	Cantidad de cemento (kg)	Fuente datos del ICV	Metodología AICV	Software	Resultados
<i>Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete</i>	- Marinković, S. - Radonjanin, V. - Malešev, M. - Ignjatović, I.	2010	Cuna a la puerta	- m3 de mezcla - C25/30	- Natural - Reciclado AG 100% R	- 315 - 330	- Información local. - Base de datos GEMIS (Öko-Institute, Alemania).	- CML 2001	No mencionado	- Impactos generados por los CAR, son ligeramente más altos que los producidos por los CAN.
<i>Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications</i>	- Knoeri, Christof - Sanyé-Mengual, Esther - Althaus, Hans-Joerg	2013	Cuna a la puerta	- m3 de mezcla - Equivalencia entre resistencias f'c	- Natural - Reciclado AG 28% R AG 45% R AG 30% R AG 50% R AG 100% R	- De 150 a 360	- Información particular del estudio - Ecoinvent.	- Ecoindicator 99 - Ecological Scarcity 2006	No mencionado	- Se puede llegar a reducir los impactos alrededor del 70% si los co-productos del reciclaje del concreto son tenidos en cuenta. - Limitando el incremento del cemento en la mezcla de concreto reciclado en un 10%, se mantienen en un rango comparable los impactos ambientales.
<i>Life cycle assessment of the use of recycled aggregates in the production of concrete</i>	- Estanqueiro, Bruno	2014	Cuna a la cuna	- 1 Tonelada de agregado reciclado = 2.82 ton de concreto	- Natural - Reciclado 850 kg/m3	No mencionado	- Información específica del lugar aportada por empresas	- Ecoindicator 99 - CML 2000 - Demanda Acumulada de Energía	- SimaPro	- Este estudio encontró que los agregados reciclados tienen grandes ventajas ambientales sobre los agregados naturales durante el ciclo de vida del concreto.
<i>Environmental evaluation of concrete made from recycled concrete aggregate implementing life cycle assessment</i>	- Serres, Nicolas - Braymand, Sandrine - Feugeas, Françoise	2015	Cuna a la puerta	- m3 de mezcla	- Natural - Mixto AF 100% N AG 13% R - Reciclado AG 100% R AF 100% R	- 350 - 315 - 330	- Información local. - Base de datos Ecoinvent. - RILEM. - Asociación Francesa de Agregados (UNPG). - Otros.	- CML 2001 - EDP - EDIP - BEES	- SimaPro	- Muestra una menor cantidad de impactos de los concretos con agregados reciclados vs naturales, en parte porque no le asigna impactos en la categoría de transporte a estos agregados porque los toma como algo intrínseco a la disposición final, es decir a la tumba, ya que, será necesario transportarlos a un botadero o a un lugar de reciclaje.

Evaluación comparativa de concreto con agregado natural y concreto a partir de agregado reciclado de prefabricados, bajo un análisis de ciclo de vida.

Título (Inglés)	Author	Año	Delimitación	UF	Tipo de concreto	Cantidad de cemento (kg)	Fuente datos del ICV	Metodología AICV	Software	Resultados
<i>Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA</i>	- Hossain, Md. Uzzal - Poon, Chi Sun - Lo, Irene M.C. - Cheng, Jack C.P.	2016	Cuna al "sitio"	- 1 Tonelada de agregado	N/A	No indicado	- Base de datos del "China Light and Power" (CLP). - Base de datos del Ciclo de Vida de China (CLCD). - Base de datos de referencia de Ciclo de Vida de Europa (ELCD).	- IMPACT 2002+	- SimaPro	- Este estudio trata sobre la producción de los agregados y no sobre el concreto y muestra que es posible una reducción del 49 al 51% de los impactos si se usan agregados reciclados en vez de los naturales. - Un incremento en el 20% del transporte de los agregados, genera una variación del 12% en los impactos.
<i>Environmental life cycle assessment of coarse natural and recycled aggregates for concrete</i>	- Estanqueiro, Bruno - Silvestre, José - De Brito, Jorge - Pinheiro, Manuel	2016	Cuna a la puerta	- 1 Tonelada de agregado reciclado	- Natural - Reciclado	No indicado	- Información específica del lugar aportada por empresas. - Ecoinvent.	- Ecoindicador 99 - CML 2000 - Demanda Acumulada de Energía	- SimaPro	- El proceso de reciclaje de agregados puede optimizarse siguiendo una demolición selectiva que maximise la recuperación de los desechos. - El uso de los AR es más favorable solo en términos de uso del suelo y respiración de inorgánicos pero estos agregados pueden tener un mejor comportamiento ambiental si los AF son usados en la mezcla y enviados como rellenos en el suelo, aunque esto depende mucho de las distancias tenidas a donde sean enviadas.
<i>Life cycle assessment for concrete kerbs manufactured with recycled aggregates</i>	- López, Fernando - González, José - López-Colina, Carlos - Serrano, Miguel - López, Alfonso	2016	Cuna a la puerta	- 1 m ³ de mezcla	- Natural 0% - Reciclado 50%	No indicado	- Toma de información de los procesos	- CML 2001	No indicado	- Bordillos prefabricados de similares propiedades mecánicas son posibles con 50% o menos de AR. - Si se trata de minimizar las categorías de impacto estudiadas, es mejor la utilización de agregados naturales. Además, la utilización de agregados reciclados implica un incremento del 6% en el consumo de agua en todo el proceso. - El uso de plantas móviles implica un 30% más de consumo energético que en las plantas fijas.

Fuente: Autor

2.6 Conceptualización del estudio.

Para tener un planteamiento general de las bases teóricas y resultados encontrados en otras investigaciones que soportan esta investigación, se desarrolló un esquema lógico donde se abordaron transversalmente el planteamiento del problema, la justificación y el alcance de los objetivos.

Cada uno de los conceptos que se relacionan en el esquema de la **Figura 2-3** Mapa conceptual del estudio, están soportados por autores de la **Tabla 2-11** Investigadores que aportan conceptualmente al planteamiento de la investigación, que con sus trabajos sirvieron de base para determinar los pasos a seguir en el desarrollo del trabajo y cómo este podría ser una respuesta a la problemática planteada en la justificación. En algunos casos, estos conceptos ya daban un indicio de los resultados a obtener en la etapa de experimentación, lo cual fue de gran valor teórico, ya que sirvieron para ser corroborados con los efectivamente obtenidos y robustecer la discusión.

Este esquema explica la relación existente entre cada uno de los aspectos contaminantes del concreto en general y cómo se han manejado los inconvenientes del uso de los AR en mezclas de concreto desde cada uno de los estudios relacionados, mostrando en una secuencia lógica cómo los agregados a partir de reciclado de piezas prefabricadas de concreto pueden ser la respuesta a los problemas de transporte, separación en la fuente y la calidad de los agregados a usar en la mezcla.

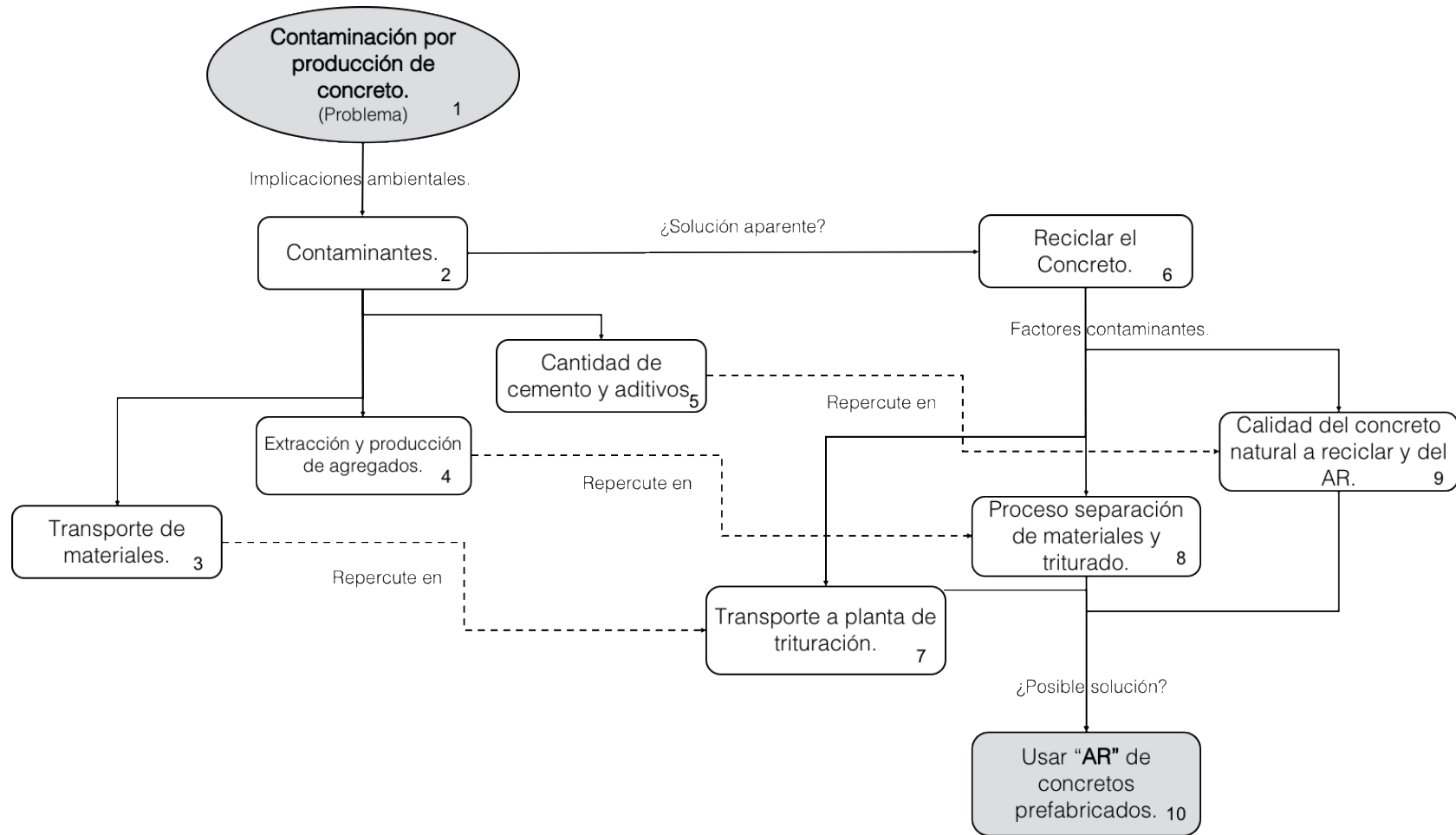
Tabla 2-11 Investigadores que aportan conceptualmente al planteamiento de la investigación

Número en mapa	Autores
1	Pacheco-Torgal & Jalali (2012).
2	Pacheco-Torgal & Jalali (2012).
3	Hossain et al. (2016); López et al. (2016)
4	GEAR (2011); Matthey et al. (2014); Serres et al. (2015)
5	Marinković et al. (2010).
6	Hossain et al. (2016); López et al. (2016)
7	Arriaga et al. (2013); Matthey et al. (2014); Pedro et al. (2015); Sánchez de Juan (2004).

8	Pedro et al. (2015).
9	Arriaga et al. (2013); Pedro et al. (2015) Lotfy & Al-Fayez (2015)
10	Pedro et al. (2015).

Fuente: Autor.

Figura 2-3 Mapa conceptual del estudio



Fuente: Autor.

3. Metodología.

La investigación propuesta se desarrollará desde un enfoque cuantitativo basado en la cuasi-experimentación, donde se identificarán las variables independientes que serán manipuladas con el fin de ver su impacto en el resultado experimental y midiendo las diferencias en el comportamiento de las variables dependientes (Creswell, 2014; Hernández et al., 2010).

Se proyecta como un estudio cuasi-experimental debido a que los agregados no serán escogidos aleatoriamente, sino que vendrían de un proceso establecido para ser usados dentro de una mezcla con características deseables claramente identificadas y con resultados teóricos previamente definidos (unidad funcional). Es decir, basados en la literatura y procedimientos técnicos establecidos, se manipularán los materiales y sus cantidades, para igualar las propiedades de las muestras de control que se escojan para la investigación.

Aunque el desarrollo del estudio tiene una contextualización local, no se descarta la importancia que pueda llegar a tener a nivel internacional por tratarse de modelos de pruebas replicables y desarrollados bajo estándares de igual naturaleza, sobretodo, para los del continente americano, y por ser el Análisis de Ciclo de Vida una herramienta que, utilizada en este tipo de proyectos, puede considerarse bajo esta metodología, reproducible en otros casos con iguales resultados. De ahí que la implementación de algunos procedimientos y metodologías de análisis de este trabajo de investigación, sean similares a los que se encontraron en la bibliografía, con el fin de establecer comparaciones y tener elementos comunes para dar la discusión final.

Para llevar a cabo el programa experimental, tendiente a cumplir con los objetivos propuestos de la investigación, se establece el modelo bajo el cual se analizan y modifican las variables, determinando los criterios de agrupación, los grupos a estudiar,

las variables y la validez que tendría la aplicación del modelo propuesto, como se explica a continuación.

3.1 Criterios de agrupación o “*matching*”.

Los grupos están dados por la cantidad de agregado reciclado grueso ARG y agregado natural grueso ANG, que contiene cada uno¹. Además, se establecieron diferentes tratamientos del agua de amasado y métodos de curado, buscando obtener los mejores resultados en cuanto a resistencia. Esto permitió analizar el comportamiento de las variables dependientes en cada uno de los grupos y generar posteriormente una mezcla tal que permitiera comprobar o negar la hipótesis, buscando un grupo de una proporción tal de AR, que presentara unos índices de impactos menores al compararlos con la mezcla de control, pero teniendo similares propiedades mecánicas.

Este último grupo fue planteado de acuerdo a los resultados encontrados en la primera etapa o pre-experimentación, donde se observó cómo la manipulación de ciertas variables favorecía los resultados esperados y determinando los valores aconsejables de dichas variables.

3.2 Grupos.

Los grupos están divididos en mezclas de concreto con agregados naturales (CAN) y mezclas de concreto con agregados reciclados (CAR), siendo estos últimos el grupo de estudio y los primeros el grupo de control.

Para el grupo de los CAR se propuso una experimentación inicial con porcentajes del 25%, 50%, 75% y 100% de porción de agregados gruesos reciclados en la mezcla, con el fin de conocer la franja que mejor se aproxima a la unidad funcional propuesta. Una vez identificada, se realiza un análisis para determinar los impactos de ACV y se

¹ Esta investigación fue limitada al reemplazo de AN por AR, por lo que los agregados finos siempre fueron naturales (ANF).

propone una proporción de agregado reciclado (AR) satisfactoria, funcional y sostenible ambientalmente, constituyendo así los grupos a investigar.

3.3 Variables.

Una vez establecidos los grupos, se determinaron las variables que direccionarían el estudio.

Independientes:

- **Unidad Funcional:** es el punto comparativo entre los grupos, el cual está definido por un metro cúbico de mezcla de concreto, con resistencia de 28 MPa o 280 kgf/cm². La forma de medir esta variable fue a través del ensayo de compresión de cilindros de concreto NTC 673, la cual está supeditada a la norma ASTM C39-2009, siendo esta un estándar internacional.
- **Proceso de demolición y separación de agregados:** en el cual se mide la energía necesaria para producir un determinado tipo y tamaño de agregado y los impactos que genera la obtención de los agregados con estas características. Esta variable ya viene dada proceso que sufrieron los AR para ser producidos, por lo que no puede modificarse para este estudio.
- **Relación agua / cemento (a/c):** se mide por unidades de peso, en función de la cantidad de agua y cemento utilizados, relacionados al desempeño que se quiere en la mezcla final. Fue fijado este valor para que aplicase a todas las mezclas.
- **Cantidad de cemento 1:** en primera instancia, se fija la cantidad de cemento en las muestras para observar el comportamiento inherente a las características de los agregados y no a la cantidad de cemento presente en la mezcla.

Dependientes:

- **Indicadores del ACV:** es una medición de impactos ambientales derivada de los procesos aplicados a la extracción de materias primas, entre ellos

el transporte, producción de las mezclas y la cantidad de materiales usados en las mismas. Es la variable más importante del estudio, ya que permitirá establecer la comprobación de la hipótesis. Esta variable está compuesta por varios indicadores, los cuales se miden durante todo el proceso de establecido en el límite del estudio (de la cuna a la puerta).

- Desempeño de los CAR: constituye el punto de llegada de la cuasi-experimentación, ya que permite igualarlos con el grupo de control CAN, y comprobar que se cumple o se alcanza la UF para generar la equivalencia entre las mezclas, pudiendo comparar entre sí cantidad de material, procesos y recursos que fueron necesarios para la producción de cada uno. Su medición se hace a través de ensayos estandarizados por normas nacionales e internacionales.
- Cantidad de cemento 2: en una fase más avanzada de la experimentación, se varió la cantidad de cemento en la mezcla con el fin de obtener un concreto con una carga contaminante menor, pero que cumpliera con la UF establecida para el estudio.

3.4 Validez.

Hernández et al. (2010) define la validez como el grado en que un instrumento realmente mide la variable que pretende medir, estableciendo el concepto de validez total, al cual se compone de la validez de contenido, de criterio y de constructo.

La validez de contenido es el grado en que el instrumento que usamos para medir la variable representa el concepto que quisimos medir (Hernández et al., 2010). Para nuestro caso, qué tan pertinentes son las pruebas que hicimos para evaluar la resistencia del concreto, y si el procedimiento empleado para el ACV efectivamente nos permite identificar, cuantificar y categorizar los impactos para después compararlos entre dos materiales.

La validez de criterio hace referencia a la validación de un instrumento de medición comparándolo con algún criterio que pretende medir lo mismo (Hernández et al., 2010). Esto se aprecia cuando se usan dos métodos para medir una variable similar, encontrando congruencia con los resultados. Por ejemplo, cuando la absorción de los

agregados, que es función de la porosidad, es contrastada con la densidad de los mismos; o cuando vemos reducidos significativamente los impactos ambientales cuando se reduce la cantidad de los materiales más contaminantes.

La validez de constructo se refiere a si el instrumento, este estudio, efectivamente sirve para medir lo que se pretende, es decir, que cumple con el objetivo de representar y medir lo que pretende (Hernández et al., 2010). Esto se refiere a cómo los conceptos aplicados y consultados para el desarrollo de la investigación, se relacionan y comprobadamente constituyen un sustento sólido para la misma.

El manejo de la información que alimenta esta investigación, puede considerarse válida y confiable para el modelo en general, por los siguientes factores:

- Si bien existen limitaciones en el análisis, la validación de los datos es posible, ya que en primera instancia se cumple la Unidad Funcional. Esto es, que se comprueba una equivalencia entre los productos comparados, bajo la rigurosidad de las normas NTC-ISO, usadas en tanto la caracterización de los agregados, como la ejecución de las mezclas y las pruebas al concreto fresco y endurecido, permitiendo ser replicados futuramente por otros estudios y estableciendo claramente unos parámetros a cumplir por todas las mezclas, lo que genera una equivalencia entre ellos. Por otro lado, el modelo empleado en el software atiende las leyes de la conservación de la energía y de masa, y las modificaciones en las variables dependientes concuerdan con los resultados obtenidos por otros estudios, por ejemplo: la incidencia de la distancia de transporte de los agregados en los impactos ambientales.
- Las bases de datos disponibles, cuentan con información actualizada y confiable, que permite tener un acercamiento a los datos que podrían encontrarse para la realidad local. Además, algunas características críticas, como las características de los camiones que transportan los materiales, son aplicables para Colombia, variando las distancias, las cuales sí son las encontradas para el estudio.
- Información crucial, como consumos energéticos de maquinaria y emisiones para la generación de agregados reciclados, son obtenidos de investigaciones recientes y de la industria del prefabricado de concreto (López et al., 2016).

- Se cuenta con un software especializado para el desarrollo del ACV, permitiendo modelar los procesos que intervienen en cada tipo de concreto y la forma como se dan los flujos entre los mismos. Dicho software es Gabi Life Cycle Engineering Suite, versión 6, de la empresa Thinkstep.

Como se explicó anteriormente, la validez de los datos encontrados está dada por el uso de las normas vigentes para las pruebas de los materiales y mezclas, tales como: ASTM, NTC, NSR-10 y las recomendaciones de entidades como la ACI, que se usaron durante el estudio. Por su parte, los análisis de ciclo de vida estarán regidos por las normas NTC-ISO 14040 (2007) y NTC-ISO 14044 (2007).

Los ensayos practicados a las mezclas se mencionan en el Programa Experimental.

La validez de la comparación entre CAR y CAN se da por medio de la Unidad Funcional establecida en para la investigación. Esta es la que permite que ambos concretos puedan ser materiales sustitutos en una utilización teórica de la vida real, donde las propiedades que deben alcanzar ambos concretos, determinan los recursos necesarios para fabricarlos, ya que cada uno está compuesto por materiales y proporciones distintas, resultando en, por ejemplo, que la cantidad de cemento que ambos concretos necesiten para alcanzar la resistencia planteada sea diferente, reflejándose en el ACV.

Las amenazas externas a la validez podrían haberse presentado por un comportamiento anormal de los agregados debido a la contaminación de otros materiales, características no típicas y variaciones por defectos en los equipos de medición. Esto, de haberse dado, se habría notado en los resultados de los ensayos, ya que la investigación no es de carácter exploratorio, sino correlacional, teniendo nociones o antecedentes de los resultados esperados o tendencias que los ensayos deberían seguir. Por otro lado, se minimizaron estas amenazas con la revisión y calibración previa de los equipos de medición por parte de los fabricantes.

Por otro lado, las amenazas internas estarían en la mala interpretación o ejecución de las muestras y un mal procedimiento de toma de datos, para lo cual se contó con la experiencia de los laboratoristas asistentes y la revisión constante de los coordinadores y asesores del estudio.

3.5 Alcance.

El alcance del estudio es, como se dejó ver anteriormente, de tipo correlacional, por lo cual se buscó predecir comportamientos al manipular las variables, a la vez que se midieron las mismas y se buscó dar explicación a dichos comportamientos derivados de su relación entre sí (Hernández et al., 2010). Debe diferenciarse este título de la definición del Alcance del ACV, puesto que aquí se mencionan las pautas que fueron establecidas para la realización del estudio y hasta qué punto irá el mismo de manera globalizada, mientras que en el alcance de ACV se demarcan las condiciones bajo las cuales ese análisis se realizará, como los requisitos iniciales, los límites del sistema, la selección de categorías de impacto y las suposiciones, entre otros

En el ACV, como se mencionó en la delimitación del estudio que propone la NTC-ISO 14040 (ICONTEC, 2015), se realizó un estudio de la cuna a la puerta. Una de las razones por la que se realizó de esta forma, es que se asume por la UF que van a tener el mismo comportamiento y vida útil, pero teniendo en cuenta que para los CAR, la cuna es la demolición, donde se estudiaron los procesos de trituración y cribado de las partes sobrantes o residuos de concreto prefabricado. Por otro lado, para los CAN la cuna sería la extracción de los agregados en las canteras, donde se tuvieron en cuenta todos los impactos generados, no solo por la trituración como tal, sino aspectos como la deforestación.

3.6 Diagrama lógico experimental.

Para la implementación del diseño metodológico se desarrolló un diagrama que sintetizara la secuencia seguida para la investigación. Este diagrama se compone de cuatro partes donde se toman en cuenta los procesos e insumos que intervienen en la experimentación. Como puede verse en la Figura 3-1 Diagrama lógico experimental de la investigación., cada fase está ligada a la normatividad que le imprime validez al estudio. La primera parte comprende las normas para garantizar la equivalencia entre las mezclas y la segunda se rige por la estandarización para aplicar el ACV.

En la parte de Materiales, se analizan las fuentes y características de estos, los cuales representan variables tanto dependientes como independientes, dándose la primera

interacción entre ellas, pero sin poder observarse o medirse, hasta la realización de las mezclas.

En el Procesamiento se analizan los materiales y actividades que permiten producir los concretos CAR y CAN cumpliendo la Unidad Funcional planteada. Para esto se adoptaron las metodologías encontradas en la bibliografía, que determinaron las dosificaciones necesarias para llegar a este resultado y se tienen en cuenta los equipos, gastos energéticos y recursos, siendo estos los datos de entrada para realizar posteriormente el Análisis de Ciclo de Vida.

Una vez generados los CAN y CAR en el Procesamiento, y constatado el cumplimiento de la UF, se realiza el ACV para determinar los impactos que cada uno genera y se interpretan para determinar sus similitudes y diferencias.

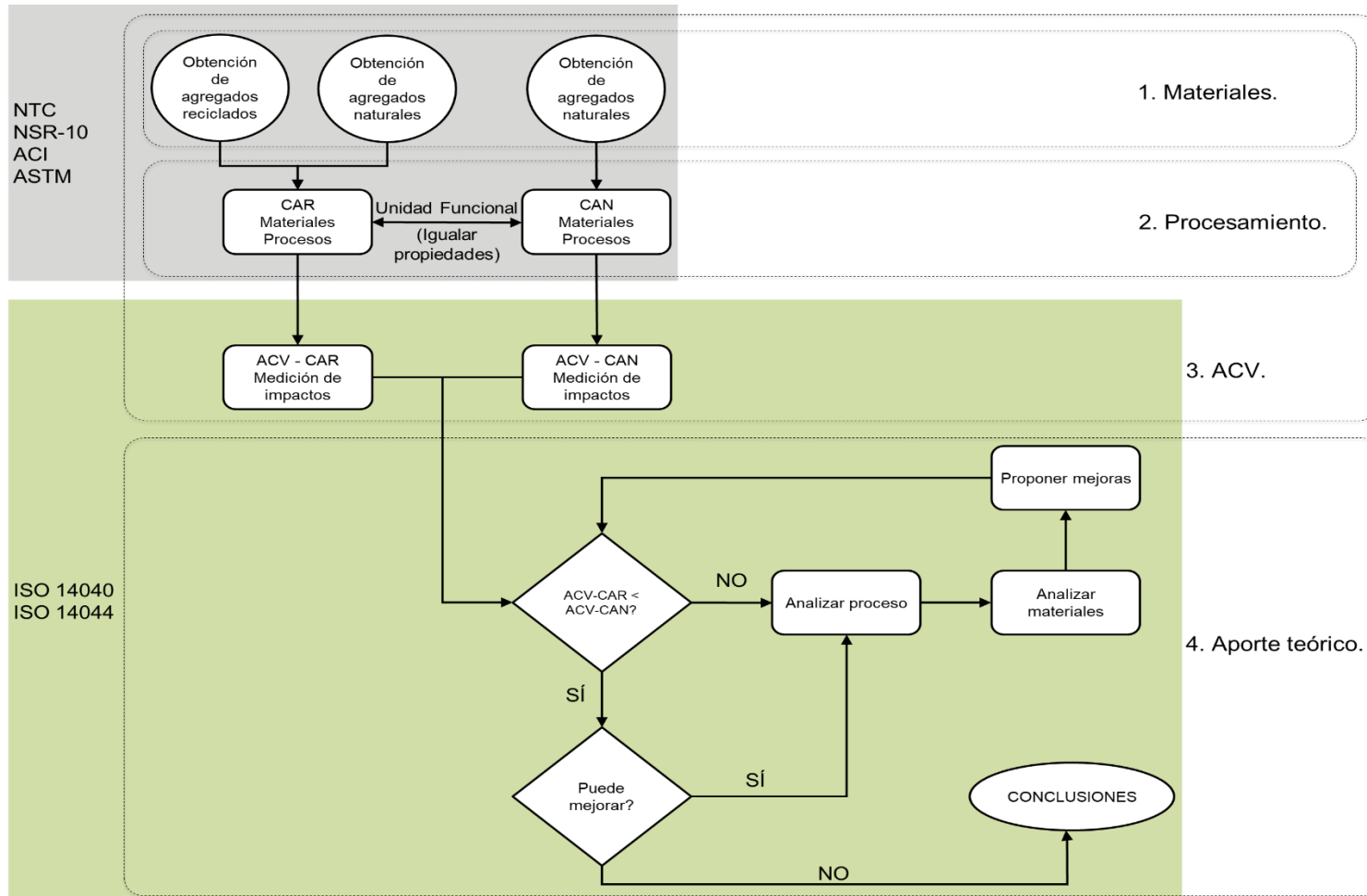
Cabe anotar que la etapa del ACV representa propiamente una secuencia de actividades tenidas cuenta en todas las fases de la experimentación, pero que no se amplía en esta parte del trabajo por encontrarse previamente discutida en el Marco Teórico. En realidad, la injerencia e interacción del ACV en el estudio se encuentra de forma matricial en todas las fases y componentes de la investigación.

El aporte teórico del estudio se da en la etapa final, donde se comparan los impactos y se busca una condición ideal donde se cumple que, $ACV-RAC < ACV-NAC$. Es decir, que se hace la comprobación lógica de que los impactos generados por los CAR, después del ACV, son menores que los generados por los CAN.

El diagrama sugiere que en caso de que la prueba lógica diera negativa, se analizarían los procesos y materiales para encontrar los puntos que generan mayor carga ambiental y se propondrían las mejoras en el proceso que permitirían cumplirla o mejorar la condición en caso de que sí se cumpliera.

Finalmente, se procede a las conclusiones de la experimentación, las cuales en la materialización teórica cuenta con una discusión de los resultados.

Figura 3-1 Diagrama lógico experimental de la investigación.



Fuente: Autor.

3.7 Programa experimental.

El anterior diagrama dio como resultado la elaboración de una serie de pruebas estandarizadas que buscaban atender lo encontrado en la revisión de la literatura, lo cual fue plasmado en el marco teórico, y alcanzar los objetivos propuestos del estudio. Para esto, se planteó que el programa experimental permitiera en primera instancia identificar las características físicas de los agregados, y posteriormente determinar la proporción adecuada de los materiales para realizar las mezclas. Para esto se optó por el método del Instituto Americano del Concreto, ACI, por sus siglas en inglés de American Concrete Institute, del Comité 211.1 (ACI Committee 211, 2002).

Una vez determinadas las dosificaciones y realizadas las mezclas, se realizan los ensayos a compresión de los concretos para observar su comportamiento y la efectividad de la dosificación, verificando que el comportamiento de los concretos está dentro de los parámetros esperados, lo que ratifica la posibilidad o no de usar ARG como sustituto del ANG en las mezclas de concreto. Los resultados de estas pruebas son los que sustentan en parte las conclusiones de la investigación.

Teniendo en cuenta lo anterior, se realizaron una serie de cuasi-experimentos divididos en 3 fases, explicadas a continuación:

3.7.1 Fase I

Busca conocer los materiales que serían usados en las mezclas. Para esto se hizo una caracterización de los agregados para definir sus propiedades y establecer la dosificación a emplear en las mezclas. La Tabla 3-1 Ensayos de Fase , lista los ensayos realizados y las normas bajo las cuales se ejecutaron.

Tabla 3-1 Ensayos de Fase I

FASE I		
Tipo de agregado	Ensayo	Norma
AR, AN, AF	Reducción de tamaño de muestra	NTC 3674
AR, AN, AF	Masas unitarias	NTC 92
AR, AN, AF	Tamizado	NTC 77
AR, AN, AF	Contenido de humedad	NTC 1776
AF	Densidad y absorción de arenas	NTC 237
AR, AN	Densidad y absorción de grava	NTC 176

AR: Agregado Reciclado Grueso

AN: Agregado Natural Grueso

AF: Agregado Natural Fino

Fuente: Autor

Una vez realizadas las pruebas de la Fase I, se procedió a cumplir un programa de ensayos de compresión que permitiría conocer el comportamiento de los agregados dentro de las mezclas, para lo cual se siguió la metodología del ACI (ACI Committee 211, 2002), comentada anteriormente.

Es importante anotar que todas las proporciones de reemplazo a las que hace referencia esta investigación, se refieren solamente al agregado grueso y que para esta fase la cantidad de cemento fue la misma para todas las mezclas con el objetivo de tratarla como una variable independiente. Esto sirvió, entre otras cosas, para igualar los impactos ambientales negativos atribuibles al cemento en cada una de las mezclas, dejando como variable dependiente las implicaciones ambientales de usar en mayor o menor cantidad un tipo de agregado u otro, natural o reciclado.

3.7.2 Fase II

Comprendió la realización de los ensayos de compresión de cilindros para determinar la resistencia de cada una de las mezclas. Esto permitió conocer el comportamiento de los agregados dentro de la mezcla y si la utilización de los mismos era viable para producir concretos con resistencias de 280 kgf/cm², teniendo en cuenta que esta es la Unidad Funcional del estudio y evaluando las cantidades equivalentes para producir un

metro cúbico de mezcla. Los tipos de concretos a realizados pueden verse en la **Tabla 3-2** Ensayos de Fase II.

Tabla 3-2 Ensayos de Fase II.

FASE II					
Código	Concreto	% AR	Manejo agua mezclado	Curado	Compresión NTC 673
					Cilindros
CAN-CS	Natural	0%	Compensado	Sumergido	3
CAN-CE	Natural	0%	Compensado	Envuelto	3
CAN-PS	Natural	0%	Presaturado	Sumergido	3
CAN-PE	Natural	0%	Presaturado	Envuelto	3
25-CS	Reciclado	25%	Compensado	Sumergido	3
25-CE	Reciclado	25%	Compensado	Envuelto	3
25-PS	Reciclado	25%	Presaturado	Sumergido	3
25-PE	Reciclado	25%	Presaturado	Envuelto	3
50-CS	Reciclado	50%	Compensado	Sumergido	3
50-CE	Reciclado	50%	Compensado	Envuelto	3
50-PS	Reciclado	50%	Presaturado	Sumergido	3
50-PE	Reciclado	50%	Presaturado	Envuelto	3
75-CS	Reciclado	75%	Compensado	Sumergido	3
75-CE	Reciclado	75%	Compensado	Envuelto	3
75-PS	Reciclado	75%	Presaturado	Sumergido	3
75-PE	Reciclado	75%	Presaturado	Envuelto	3
100-CS	Reciclado	100%	Compensado	Sumergido	3
100-CE	Reciclado	100%	Compensado	Envuelto	3
100-PS	Reciclado	100%	Presaturado	Sumergido	3
100-PE	Reciclado	100%	Presaturado	Envuelto	3
TOTAL					60

C_: Tratamiento de porosidad de los AG por compensación del agua de mezclado.

P_: Tratamiento de la porosidad de los AG por presaturación.

_S: Curado por sumergimiento en agua.

_E: Curado por envolvimiento plástico.

Fuente: Autor

De acuerdo a la bibliografía revisada, se encontró que algunos autores discrepan sobre el manejo que se le debe dar al agua de mezclado de los concretos en referencia a la porosidad de los agregados gruesos.

Para algunos autores (Behera, Bhattacharyya, Minocha, Deoliya, & Maiti, 2014; Ferreira et al., 2011; Marinković et al., 2010; Pedro et al., 2015; Silva, De Brito, & Dhir, 2015), es preferible realizar una compensación en el agua de amasado, teniendo en cuenta la absorción de los agregados, ya que esta será una porción que no estará disponible para reaccionar con el cemento porque queda atrapada intersticialmente, por lo que se debe que aumentar la cantidad de agua para permitir al cemento desarrollar toda la resistencia y cumplir su función en la mezcla.

En contraposición a lo anterior, otros autores (GEAR, 2011; Sánchez de Juan, 2004), optan por realizar un presaturado de los agregados para impedir que estos tomen del agua destinada a la reacción del cemento, partiendo del principio de que los agregados tendrán los espacios intersticiales saturados y no tomarán ninguna parte del agua de mezclado. Esto permite implica que no hay necesidad de hacer modificaciones o compensaciones a la cantidad de agua arrojada por el método de dosificación.

Con el fin de determinar el método más efectivo para el manejo de la absorción de los agregados y el agua de mezclado de concretos con agregados reciclados, se decidió aplicar la presaturación de los agregados y la compensación en la cantidad de agua para cada una de las mezclas y ver su efecto en la resistencia. Cabe anotar que no se encontraron estudios locales relacionados al manejo del agua de mezclado en concretos con agregados reciclados, por lo que se consideró pertinente incluirlo en la investigación.

De igual forma, se quiso analizar la incidencia del método de curado de las muestras en su resistencia a la compresión. Por esto, para cada mezcla se establecieron dos métodos de curado: sumergiendo en agua y envolviendo en plástico los cilindros, observando la incidencia en los resultados.

3.7.3 Fase III.

En esta etapa se planteó una mezcla tal que utilizara una menor cantidad cemento, manteniendo la resistencia de la UF, con el fin de reducir los impactos del ciclo de vida.

Para esto se tomaron en cuenta los mejores resultados de la combinación entre método de curado y la compensación en el agua de mezclado o la presaturación de los agregados para contrarrestar el efecto de la absorción en la mezcla, buscando también la mayor cantidad de reemplazo de agregado reciclado en la mezcla.

Como se verá más adelante en los resultados las mezclas de CAR, presaturadas sumergidas, fueron las que presentaron un comportamiento más idóneo, describiendo una clara tendencia a aumentar su resistencia con la cantidad de reemplazo. Por esta razón se tomó este tratamiento para realizar una nueva mezcla, con menor contenido de cemento, pero manteniendo la relación agua/cemento y curado a 28 días, representado en la

Tabla 3-3 Ensayos de Fase III.

Tabla 3-3 Ensayos de Fase III

Código	Concreto	% AR	Manejo agua mezclado	Curado	Resistencia f'c (kgf/cm ²)
100-PS (-16%)	Reciclado con 16% menos de cemento	100%	Presaturado	Sumergido	271.26

Fuente: Autor

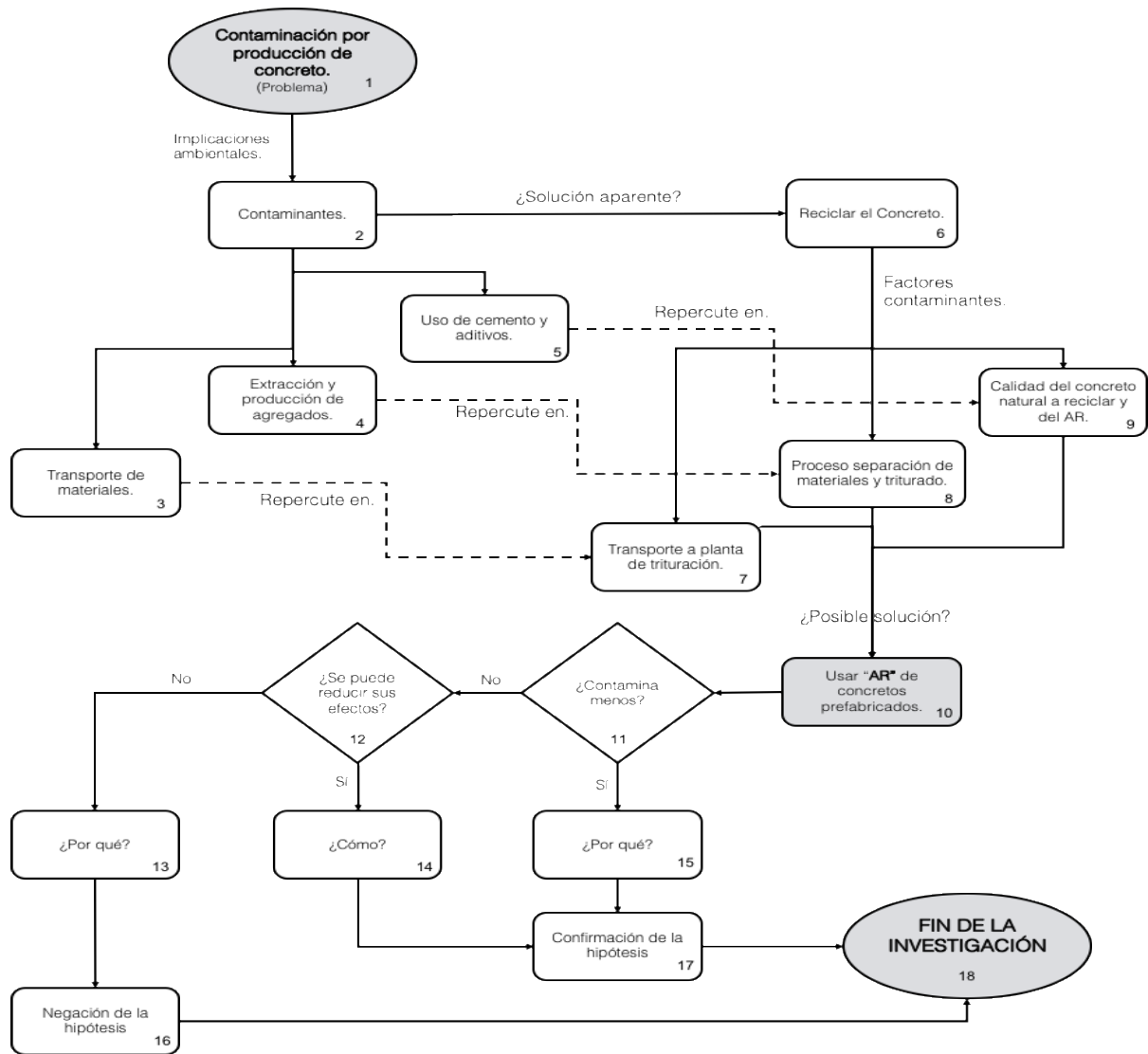
La búsqueda de la reducción de la cantidad de cemento en la mezcla, se fundamenta en que algunos estudios (Marinković et al., 2010; Serres et al., 2015), han demostrado que este factor es uno de los factores que más impactos negativos aporta al inventario.

3.8 Mapa conceptual del estudio completo.

Como se expresó en el marco teórico, las bases conceptuales y los planteamientos de las investigaciones encontradas relacionadas al tema demarcan el camino y la relación entre las etapas de este trabajo. Con la integración de la parte metodológica, el entendimiento del manejo de las variables y la forma como se dan los procesos de fabricación de los concretos estudiados, es posible complementar la Figura 2-3 Mapa conceptual del estudio, mostrando la ruta hasta el punto de culminación de la tesis. Con la Figura 3-2 Mapa conceptual del estudio completo., se complementa el esquema

conceptual, pudiéndose tener una visión general de las etapas del trabajo aquí presentado.

Figura 3-2 Mapa conceptual del estudio completo.



Fuente: Autor.

4.Resultados.

La materialización de los conceptos revisados en la literatura y el planteamiento metodológico adoptado para la investigación, generaron los datos que se consignan en este capítulo, generando la sustentación empírica necesaria para llegar a alcanzar los objetivos propuestos y comprobar con argumentos cuantitativos la tesis del estudio.

4.1 Resultados pruebas mecánicas.

A continuación, se comentarán los resultados obtenidos en las tres fases de experimentación, los cuales fueron cruciales para sustentar la discusión y determinar el cumplimiento de los objetivos y la confirmación de la tesis.

4.1.1 Fase I

Mediante los ensayos planteados en esta fase, se pudo realizar la caracterización de los agregados finos, gruesos naturales y gruesos reciclados, obteniendo los valores presentados en la **Tabla 4-1** Caracterización de agregados finos, la **Tabla 4-2** Caracterización del agregado natural grueso AN y la **Tabla 4-3** Caracterización del agregado reciclado grueso AR, las cuales son complementadas en el Anexo 7.1 Resultados de caracterización de agregados.. Estos datos constituyen la información de entrada para para definir la dosificación de la mezcla según el ACI Committee 211 (2002).

Tabla 4-1 Caracterización de agregados finos

CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO FINO		
Característica	Valor	Representación (Und)
Masa unitaria suelta del agregado	1.39	Ms (gr/cm ³)
Masa unitaria compactada del agregado	1.61	Mc (gr/cm ³)
Absorción	2.04	%A (%)
Densidad	2.51	D _{sBulk} (gr/cm ³)
Masa de la muestra en estado natural	420.00	H (gr)
Masa de la muestra en estado seco	410.00	S (gr)
Humedad Natural	2.44	W (%)
Módulo de finura	3.14	M.F.

Fuente: Autor.

Tabla 4-2 Caracterización del agregado natural grueso AN

CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO NATURAL GRUESO		
Característica	Valor	Representación (Und)
Masa unitaria suelta del agregado	1.34	Ms (gr/cm ³)
Masa unitaria compactada del agregado	1.48	Mc (gr/cm ³)
Absorción	4.23	%A (%)
Densidad aparente	2.29	D _{sBulk} (gr/cm ³)
Masa de la muestra en estado natural	2360.00	H (gr)
Masa de la muestra en estado seco	2293.00	S (gr)
Humedad Natural	2.92	W (%)
Tamaño máximo nominal	19.00	T.M.N. (mm)

Fuente: Autor.

Tabla 4-3 Caracterización del agregado reciclado grueso AR

CARACTERIZACIÓN DEL AGREGADO RECICLADO GRUESO		
Característica	Valor	Representación (Und)
Masa unitaria suelta del agregado	1.24	Ms (gr/cm ³)
Masa unitaria compactada del agregado	1.34	Mc (gr/cm ³)
Absorción	7.60	%A (%)
Densidad aparente	2.14	D _{sBulk} (gr/cm ³)
Masa de la muestra en estado natural	2360.00	H (gr)
Masa de la muestra en estado seco	2266.00	S (gr)
Humedad Natural	4.15	W (%)
Tamaño máximo nominal	12.70	T.M.N. (mm)

Fuente: Autor.

Los valores de la humedad en los agregados dependen de las condiciones del ambiente en el momento de la toma de la muestra o realización del ensayo, por lo cual, estos valores fueron variando al momento de hacer las dosificaciones para las mezclas. Se realizaron ensayos de humedad previos a la realización de las mezclas para poder hacer los ajustes pertinentes.

4.1.2 Dosificación de mezclas.

Una vez analizados los datos de las caracterizaciones, y aplicando el método ACI para dosificaciones de concreto, se obtuvieron las mezclas para cada uno de los porcentajes de reemplazo de AR, como puede verse en la **Tabla 4-4** Diseño de mezcla Concreto con Agregados Naturales CAN, **Tabla 4-5** Diseño de mezcla Concreto con Agregados Reciclados CAR-25 y CAR-50 y **Tabla 4-6** Diseño de mezcla Concreto con Agregados Reciclados CAR-75 y CAR-100.

Tabla 4-4 Diseño de mezcla Concreto con Agregados Naturales CAN

Tipo	CAN		
	Diseño	C	P
Manejo agua	Cantidad Teórica (kg)	Cantidad Ajustada (kg)	Cant. Ajustada (kg)
Relación a/c	0.50	0.55	0.48
Cemento	380.00	380.00	380.00
AGR			
AGN	889.93	863.49	927.57
AFN	730.54	737.25	737.25
Agua	190.00	209.73	183.29
TOTAL	2190.47	2190.47	2228.11

C= Compensado

P= Presaturado

Fuente: Autor.

Tabla 4-5 Diseño de mezcla Concreto con Agregados Reciclados CAR-25 y CAR-50

Tipo	CAR-25			CAR-50		
	Diseño	C	P	Diseño	C	P
Manejo agua	Cantidad Teórica (kg)	Cantidad Ajustada (kg)	Cant. Ajustada (kg)	Cantidad Teórica (kg)	Cantidad Ajustada (kg)	Cant. Ajustada (kg)
Relación a/c	0.50	0.55	0.48	0.50	0.55	0.48
Cemento	380.00	380.00	380.00	380.00	380.00	380.00
AGR	667.45	647.61	695.68	444.96	431.74	463.79
AGN	201.29	194.42	216.51	402.59	388.85	433.03
AFN	738.78	745.57	745.57	747.03	753.89	753.89
Agua	190.00	209.91	183.21	190.00	210.10	183.13
TOTAL	2177.52	2177.52	2220.98	2164.58	2164.58	2213.84

C= Compensado

P= Presaturado

Fuente: Autor.**Tabla 4-6** Diseño de mezcla Concreto con Agregados Reciclados CAR-75 y CAR-100

Tipo	CAR-75			CAR-100		
	Diseño	C	P	Diseño	C	P
Manejo agua	Cantidad Teórica (kg)	Cantidad Ajustada (kg)	Cant. Ajustada (kg)	Cantidad Teórica (kg)	Cantidad Ajustada (kg)	Cant. Ajustada (kg)
Relación a/c	0.50	0.55	0.48	0.50	0.57	0.48
Cemento	380.00	380.00	380.00	380.00	380.00	380.00
AGR	222.48	215.87	231.89	805.17	773.28	866.05
AGN	603.88	583.27	649.54			
AFN	755.27	762.22	762.22	763.52	770.54	770.54
Agua	190.00	210.28	183.06	190.00	214.88	182.98
TOTAL	2151.64	2151.64	2206.71	2138.69	2138.69	2199.56

C= Compensado

P= Presaturado

Fuente: Autor.

4.1.3 Fase II

Después de realizar las mezclas en las proporciones antes mencionadas, se hizo el curado de las mismas durante 28 de acuerdo a lo establecido en el programa experimental, se procedieron a realizar las pruebas de compresión de los cilindros de 10 x 20 cm, bajo las

indicaciones de la NTC 673 (ICONTEC & ASTM C39:2005, 2010), obteniendo los resultados presentados en la **Tabla 4-7** Resultados de ensayos a compresión de cilindros.

Una vez obtenidos los datos, se representaron gráficamente para analizar los resultados, encontrando un mejor comportamiento en las mezclas presaturadas de curado sumergido en agua, lo cual permite ver que hay una proporcionalidad directa de la cantidad de agregados reciclados presente en la mezcla, con la resistencia. Esto puede observarse en la **Gráfica 4-2** Resultados de ensayos de compresión de cilindros de Fase II, donde se representaron todos los datos y en la **Gráfica 4-3** Resultados de compresión de cilindros para condición presaturada y curado sumergido, donde se representan sólo estos datos. Las líneas horizontales de color rojo en las gráficas, demarcan los 280 kgf/cm², lo que representa la UF.

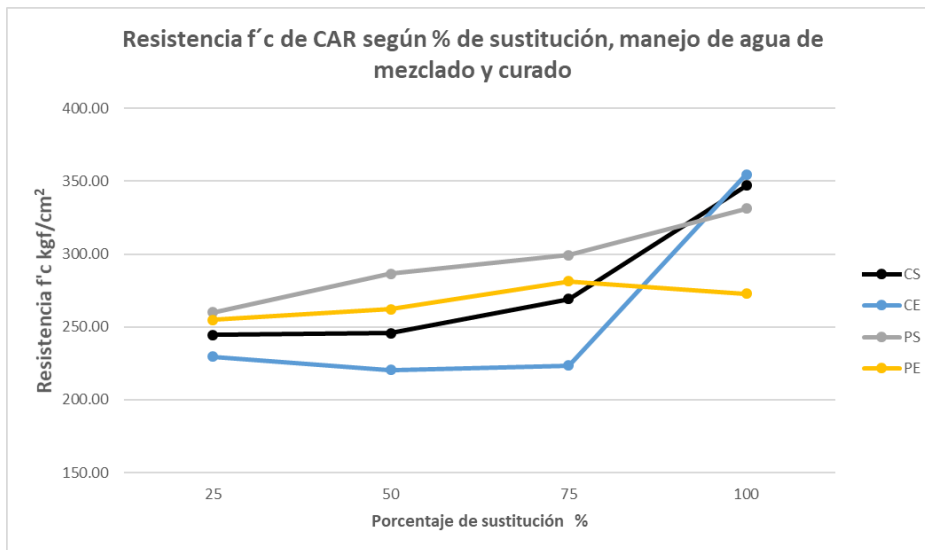
Tabla 4-7 Resultados de ensayos a compresión de cilindros

Código	Concreto	% AR	Manejo agua mezclado	Curado	Resistencia f'c (kgf/cm ²)
CAN-CS	Natural	0%	Compensado	Sumergido	266.49
CAN-CE	Natural	0%	Compensado	Envuelto	273.53
CAN-PS	Natural	0%	Presaturado	Sumergido	283.34
CAN-PE	Natural	0%	Presaturado	Envuelto	291.84
25-CS	Reciclado	25%	Compensado	Sumergido	244.50
25-CE	Reciclado	25%	Compensado	Envuelto	229.59
25-PS	Reciclado	25%	Presaturado	Sumergido	259.92
25-PE	Reciclado	25%	Presaturado	Envuelto	254.86
50-CS	Reciclado	50%	Compensado	Sumergido	245.58
50-CE	Reciclado	50%	Compensado	Envuelto	220.51
50-PS	Reciclado	50%	Presaturado	Sumergido	286.55
50-PE	Reciclado	50%	Presaturado	Envuelto	262.17
75-CS	Reciclado	75%	Compensado	Sumergido	269.28
75-CE	Reciclado	75%	Compensado	Envuelto	223.41
75-PS	Reciclado	75%	Presaturado	Sumergido	299.24
75-PE	Reciclado	75%	Presaturado	Envuelto	281.37
100-CS	Reciclado	100%	Compensado	Sumergido	347.09
100-CE	Reciclado	100%	Compensado	Envuelto	354.57
100-PS	Reciclado	100%	Presaturado	Sumergido	331.37
100-PE	Reciclado	100%	Presaturado	Envuelto	272.88

Fuente: Autor.

Para determinar el tipo de mezcla a realizar en la Fase III, se analizaron las resistencias de los CAR para todos los porcentajes reemplazos, encontrando una tendencia más predecible o constante en la serie Presaturado – Compensado o PS, como se muestra en la **Gráfica 4-1** Resistencias de mezclas CAR según manejo de agua de mezclado y curado. Por esta razón, se optó por realizar una nueva mezcla con un reemplazo 100% con estas condiciones de agua de mezclado y curado.

Gráfica 4-1 Resistencias de mezclas CAR según manejo de agua de mezclado y curado



Fuente: Autor.

Como se observa en la **Gráfica 4-3** Resultados de compresión de cilindros para condición presaturada y curado sumergido, el concreto 100-PS presenta una resistencia a la compresión muy por encima de la UF, por lo cual se supuso que reduciendo la cantidad de cemento podría tratarse de igualar los valores de resistencia con la muestra de control CAN-PS. Se redujo la cantidad de cemento proporcionalmente a la resistencia sobrepasada por el concreto con agregado reciclado, la cual es de 17% aproximadamente y redondeada a 60 kg. Es decir, se redujo en 60 kilos la cantidad de cemento de la mezcla, quedando en 330 kilogramos por metro cúbico de concreto. La dosificación resultante fue la representada en la **Tabla 4-8** Dosificación de mezcla óptima Fase III

Tabla 4-8 Dosificación de mezcla óptima Fase III

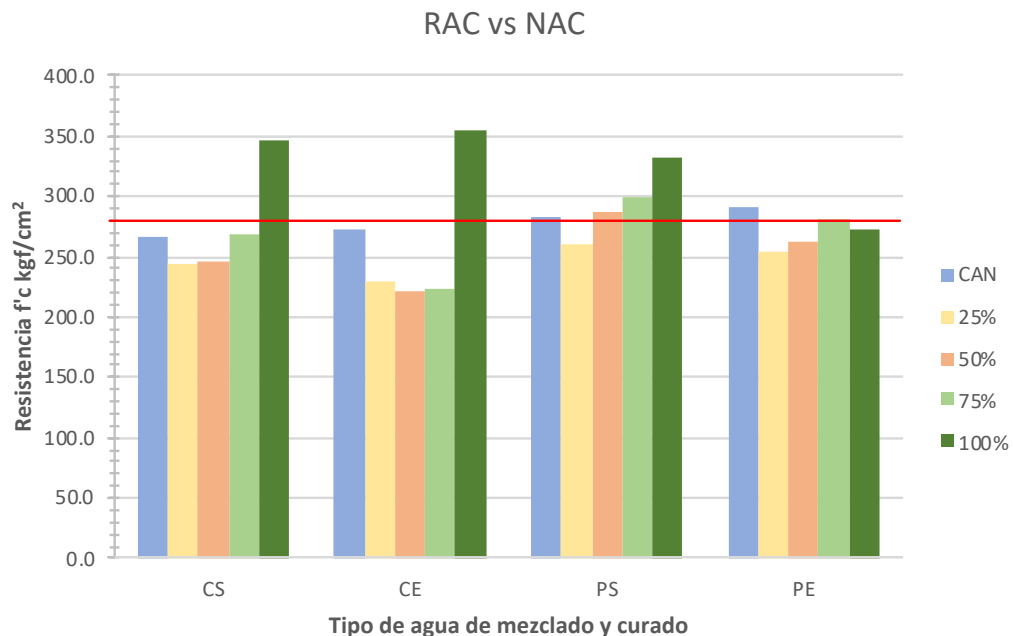
Tipo	100-PS (-16%)	
	Diseño	P
	Cantidad Teórica (kg)	Cant. Ajustada (kg)
Relación a/c	0.50	0.54
Cemento	320.00	320.00
AGR	805.17	866.05
AGN		
AFN	889.84	877.46
Agua	160.00	172.38
TOTAL	2175.01	2235.89

C= Compensado

P= Presaturado

Fuente: Autor.

En tesis, esta reducción de cemento favorece los indicadores de impacto porque, como se mencionó anteriormente, es uno de los factores que incide mayormente en los impactos del ACV. Esto se ha visto en algunas investigaciones (Marinković et al., 2010; Serres et al., 2015), donde se ha evidenciado que es el factor que mayor aporta contaminantes al análisis. Esta mezcla fue denominada 100-PS (-16%).

Gráfica 4-2 Resultados de ensayos de compresión de cilindros de Fase II

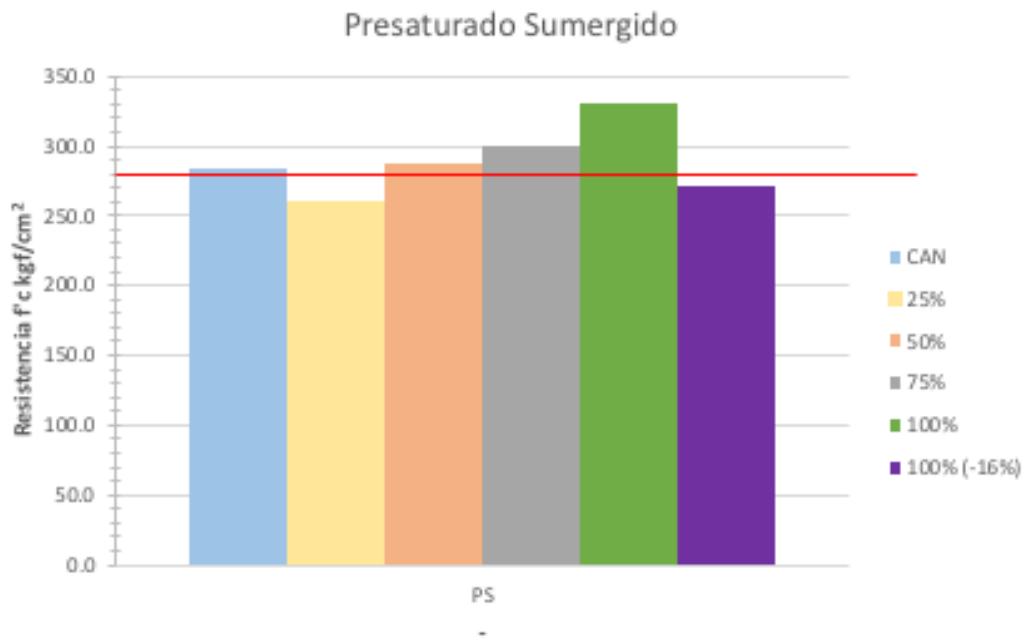
Fuente: Autor.

La mezcla resultante de la dosificación óptima 100-PS (-16%), fue sometida a pruebas de compresión de cilindros, obtenido un promedio favorable de 27.1 MPa, como puede verse en la **Tabla 4-9** Resultados de compresión f'_c para mezcla 100-PS (-16%). Esto implica una desviación del 3% de la UF, lo cual fue considerado como un valor aceptable para hacer la compración. En la **Gráfica 4-3** Resultados de compresión de cilindros para condición presaturada y curado sumergido, se muestran comparativamente los resultados de compresión por tipo de mezcla, de los cuales, se sometieron a ACV: el CAN, por ser la muestra de control; el 100% por ser una mezcla que sobrepasa la UF y tienen la mayor cantidad de reemplazo; y la óptima 100% (-16), por ser un concreto con una resistencia que se aproxima a los 280 kgf/cm², que podía presentar grandes ventajas en relación a los otros.

Tabla 4-9 Resultados de compresión f'_c para mezcla 100-PS (-16%)

Código	Concreto	% AR	Manejo agua mezclada	Curado	Resistencia f'_c (kgf/cm ²)
100-PS (-16%)	Reciclado con 16% menos de cemento	100%	Presaturado	Sumergido	271.26

Gráfica 4-3 Resultados de compresión de cilindros para condición presaturada y curado sumergido



Fuente: Autor.

4.2 Resultados Análisis de Ciclo de Vida ACV.

Como fue explicado en la sección 2.3 Análisis de Ciclo de Vida., la ejecución de un ACV está normalizada en Colombia por la NTC-ISO 14040, (2007). En este capítulo se mostrarán las consideraciones tomadas en cuenta para el desarrollo de dicho ACV, con el fin de atender la norma en cada una de sus etapas y llevarlo a cabo para cada una de las mezclas que fueron estudiadas, apoyados en la información encontrada en la literatura, las bases de datos y las propias pruebas practicadas a los concretos.

Después de la fase de pruebas de resistencias de los concretos, se consideró pertinente la realización del ACV a tres tipos de concretos: uno que es la muestra de control, con 0% de agregado reciclado, denominado CAN-PS; un segundo concreto con 100% de reemplazo de agregado natural por agregado reciclado de concreto AR, e igual cantidad de cemento que el primero, denominado 100-PS; y por último, una mezcla de concreto con igual contenido de 100% de AR que la anterior, pero con una reducción de aproximadamente 16% de la cantidad de cemento.

Como se vio en la gráfica **Gráfica 4-3** Resultados de compresión de cilindros para condición presaturada y curado sumergido, todas estas mezclas pueden soportar un esfuerzo f_c de 28 MPa, por lo que cumplen la Unidad Funcional del estudio y en el caso de las mezclas con AR, se buscó la mayor cantidad posible de AR en la mezcla, siendo para el caso, el 100%.

Finalmente, este capítulo mostrará algunos apartes de los resultados del ACV de las mezclas, los cuales servirán de base para la corroboración de la tesis y la discusión. Información más amplia será presentada en los anexos.

4.2.1 Parámetros del ACV.

Para la realización del modelo del ACV de los concretos a estudiar, fue necesario el establecer los parámetros, procesos y flujos que debían darse dentro del sistema, para garantizar que fuesen congruentes con la realidad.

De acuerdo con lo establecido por la ISO 14040, y como ya se vio en la sección 2.3.1 Definición del objetivo y alcance., el análisis propuesto presenta limitaciones en la medida que una parte de la información empleada en la etapa de ICV, es tomada de bases de datos y de otras investigaciones. Si bien esta condición puede alejar un poco el modelo de la realidad local, permite tener un punto de partida que muestra el camino a seguir para crear modelos más aterrizados.

En la elaboración del diagrama de flujo o Sankey, se usaron procesos preexistentes en las bases de datos, que ya cuentan con un ACV particular y permite tener emisiones o información más completa acerca del proceso en cuestión. En la **Tabla 4-10** Origen de información para diagrama, se muestra de dónde fueron obtenidos los insumos para el esquema.

La utilización de dichas fuentes de información, para este estudio, tiene los siguientes condicionantes:

- a. Por no tenerse información detallada de campo, los procesos creados para este diagrama, no presentes en las bases de datos del programa, sólo trabajan con flujos de materiales y energía con cuantías provenientes de otros estudios similares. Esto quiere decir que se asume que no hay emisiones en los procesos

que no provengan de las bases de datos ya cargados en el programa. La implicación de esta condición es que no se mostrarán mayores emisiones en los diagramas provenientes de dichos procesos. Sin embargo, los procesos de diésel y electricidad sí tienen en cuenta las emisiones generadas por sí mismos para producir las cantidades de producto que requieren los otros procesos para generar cada uno de los concretos, por lo que se tendría una variación en los impactos acorde con cada tipo mezcla.

- b. No es posible tomar como referencia estudios o modelos locales, en vez de estudios de otros países, porque hasta la elaboración de este documento, no fueron encontradas investigaciones similares para la ciudad de Bogotá.
- c. Los procesos tomados del programa, contienen flujos que no se presentan para las condiciones locales, pero al tratarse de un estudio comparativo, proporcionan una noción de cuál material presenta ventajas frente a los otros.
- d. Si bien algunos flujos no pertenecen a mediciones del sistema, principalmente los residuos o emisiones, los materiales que componen las mezclas, sí fueron calculados o determinados cuantitativamente.

Tabla 4-10 Origen de información para diagrama

Proceso	Tipo de datos	Origen de datos
Agua	ACV	Base de datos
Cemento portland	ACV	Base de datos
Diesel	ACV	Base de datos
Electricidad	ACV	Base de datos
Fase de uso	N/A	N/A
Generación concreto prefabricado	N/A	N/A
Producción AF	ACV	Base de datos
Producción AN	Energía	Literatura
Producción AR	Energía	Literatura
Producción de Concreto	Energía	Literatura
Transp. AF, Camión Euro 3, Cap. 22t.	ACV	Base de datos
Transp. AN, Camión Euro 3, Cap. 22t.	ACV	Base de datos
Transp. AR, Camión Euro 3, Cap. 22t.	ACV	Base de datos
Transp. CEM, Camión Euro 4, Cap. 22t.	ACV	Base de datos
Transp. piezas, Camión Euro 3, Cap. 27t.	ACV	Base de datos

Fuente: Autor.

Para definir dichos alcances y límites del sistema, se presentan las **Figura 4-1** Alcance y límites CAN y la **Figura 4-2** Alcance y límites CAR, las cuales sirvieron de base para la construcción del diagrama de flujos.

Aunque son tres tipos de mezclas, sólo se presentan dos tablas, porque para el caso del concreto 100%-PS (-16%), se presentarían los mismos alcances y límites que para el 100%-PS. Donde sea necesario, este documento especificará a cuál de los dos concretos se hará referencia.

Figura 4-1 Alcance y límites CAN

DATOS DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA	
Unidad Funcional:	- Metro cúbico (1 m ³) de concreto. - Resistencia f'c: 28 MPa o 280 kgf/cm ² .
Descripción del material:	- Denominación para el estudio: CAN-PS. - Concreto hidráulico a fabricado con agregados pétreos naturales , cemento y agua, sin adiciones o aditivos. El tratamiento para contrarrestar la absorción por porosidad de los agregados gruesos fue por medio del presaturado de los mismos. - Proceso de curado: Sumergido.
MATERIALES	
Cemento:	- Cemento portlan de Uso General - UG, proveniente de Sogamoso - Boyacá. - Distancia de transporte: 220 km
Agua:	- Agua potable común. - Distancia de transporte: N/A
Agregado fino AF:	- Arena de triturada natural proveniente del Guamo - Tolima. - Distancia de transporte: 180 km.
Agregado grueso AG:	- Agregado grueso natural de piedra triturada proveniente del Guamo - Tolima. - Distancia de transporte: 180 km.
LÍMITES DEL SISTEMA	
<pre> graph LR subgraph "Cuna" direction TB A[EXTRACCIÓN Y PRODUCCIÓN] --> B[TRANSPORTE] B --> C[PRODUCCIÓN] end subgraph "Planta" direction TB D[Agregado Fino Natural - AFN] --> E[CONCRETO DE AGREGADOS NATURALES - CAN] F[Agregado Grueso Natural - AGN] --> E G[Cemento] --> E end C --> E E --> H[CURADO] H --> I[PUERTA] </pre>	
Este ACV considera como la cuna del proceso la extracción de las materias primas de los agregados. Para la modelación, se tomó el cemento como un proceso con un inventario de ciclo de vida propio, con flujos y emisiones aportado por las bases de datos propias del programa.	

Fuente: Autor.

Figura 4-2 Alcance y límites CAR

DATOS DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA	
Unidad Funcional:	- Metro cúbico (1 m ³) de concreto. - Resistencia f'c: 28 MPa o 280 kgf/cm ² .
Descripción del material:	- Denominación para el estudio: 100%-PS. - Concreto hidráulico fabricado con agregados reciclados de piezas de concreto prefabricado , cemento y agua, sin adiciones o aditivos. El tratamiento para contrarrestar la absorción por porosidad de los agregados gruesos fue por medio del presaturado de los mismos. - Proceso de curado: Sumergido.
MATERIALES	
Cemento:	- Cemento portlan de Uso General - UG, proveniente de Sogamoso - Boyacá. - Distancia de transporte: 220 km
Agua:	- Agua potable común. - Distancia de transporte: N/A
Agregado fino AF:	- Arena de triturada natural, proveniente del Guamo - Tolima. - Distancia de transporte: 180 km.
Agregado grueso reciclado AR:	- Agregado grueso reciclado de piezas de concreto prefabricado triturado, proveniente de la misma planta donde es producido. - Distancia de transporte: 2 km.
LÍMITES DEL SISTEMA	
<pre> graph LR subgraph Cuna A[EXTRACCIÓN Y PRODUCCIÓN] B[Agregado Fino Natural - AFN] C[Agregado Grueso Reciclados - AGR] D[Cemento] end subgraph Transporte E[TRANSPORTE] end subgraph Producción F[CONCRETO DE AGREGADOS RECICLADOS - CAR] end B --> F C --> F D --> F </pre>	
Este ACV considera como la cuna del proceso la extracción de las materias primas del agregado final y la trituración de los residuos de concreto prefabricado. Para la modelación, se tomó el cemento como un proceso con un inventario de ciclo de vida propio, con flujos y emisiones aportado por las bases de datos propias del programa.	

Fuente: Autor.

4.2.2 Diagrama Sankey.

El programa para ACV, Gabi 6, trabaja por medio de diagramas de flujos denominados Sankey, los cuales representa la migración entre procesos de los diferentes flujos que se dan como entradas y salidas de cada uno de ellos y que pueden llegar a constituir un material, un desecho o una emisión al medio. En otras palabras, en los procesos se dan las emisiones, los desechos y la generación de productos. Los productos o materiales, serán usados en el siguiente proceso del diagrama y los desechos y emisiones serán tenidos en cuenta para la valoración de las categorías de impacto, según la metodología requerida o seleccionada.

De acuerdo a la secuencia de procesos en la fabricación de los concretos estudiados, y con la información obtenida de las dosificaciones y resultados de resistencia a la compresión, se establecieron tres escenarios para la evaluación de impactos e interpretación, con el fin de establecer las ventajas de los unos sobre los otros, en cuanto a afectaciones al medio se refiere. En la **Figura 4-3 Diagrama Sankey general ACV**, puede observarse la trayectoria que siguen los flujos entre los procesos desde donde se obtienen los materiales, “la cuna”, hasta donde se combinan para conformar las mezclas, “la puerta”.

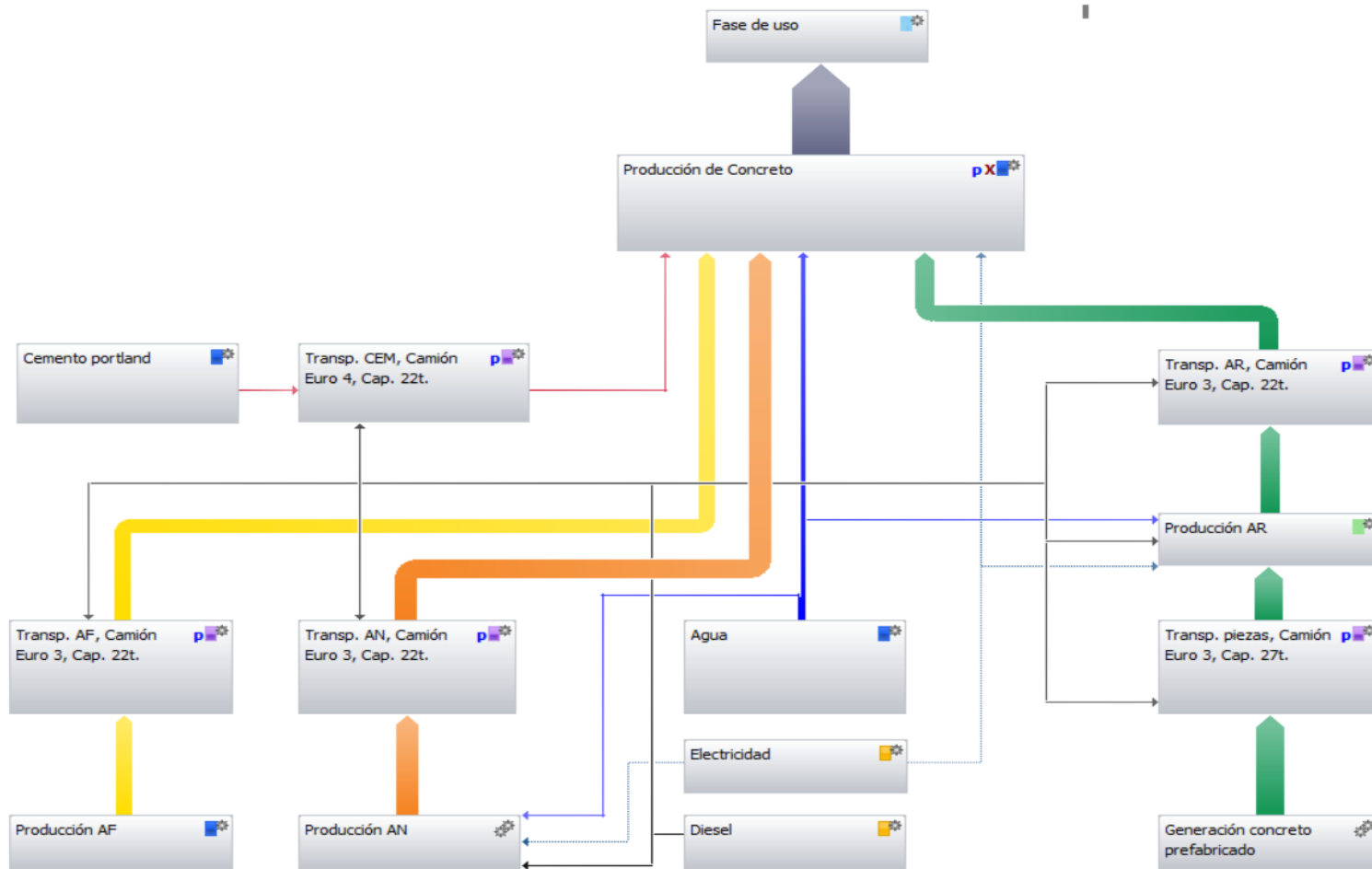
En este esquema interactúan los tres tipos de concreto: CAN-PS, 100%-PS y 100%-PS (-16%), y se diferencian por medio de variaciones en los parámetros de transporte, cantidad y tipo de materiales para generar cada mezcla. Dicha variación en los parámetros, se realiza con el fin de diferenciar los impactos generados por cada tipo de concreto, lo que da lugar a la modelación de tres escenarios, donde para cada uno se tienen valores que emulan las dosificaciones probadas y escogidas para el ACV, permitiendo hacer tablas comparativas y diagramas que se mostrarán más adelante.

En la

Figura 4-4 Diagrama Sankey CAN-PS, puede observarse que el valor de los flujos que provienen de la línea de producción de los AR, están en cero (0), mientras que los otros, grava, arena, cemento, etc., tienen alguna magnitud en el diagrama. Esto se debe a que según este tipo de mezcla, no se necesitan los AR. Esto permite delimitar los impactos que genera sólo este tipo de mezcla y no verse afectada por los procesos que no intervienen en el mismo.

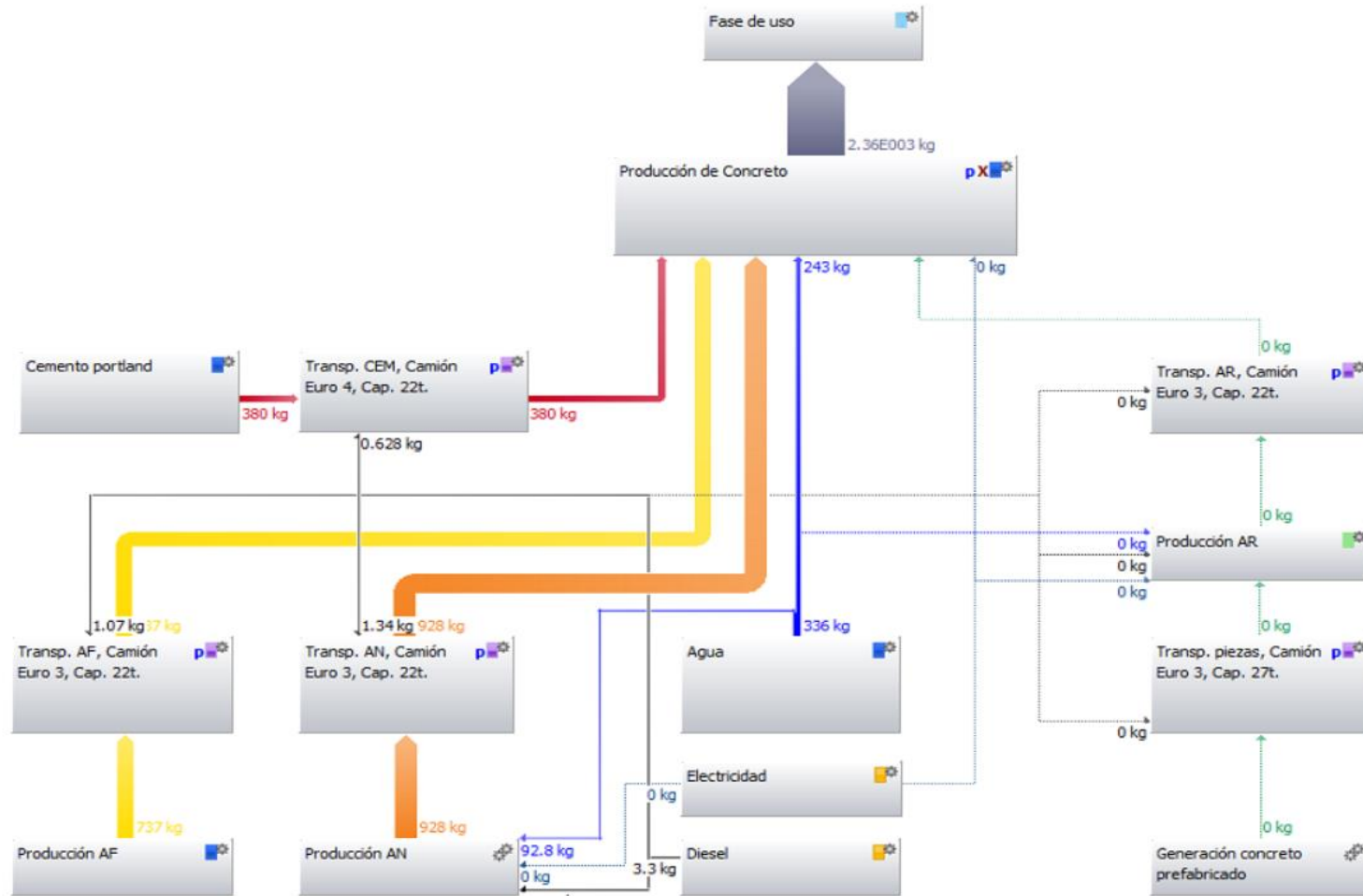
Ya en los la **Figura 4-5** Diagrama Sankey 100%-PS y **Figura 4-6** Diagrama Sankey 100%-PS (-16%), se observa que no hay flujo para la grava porque se representa en ellas concretos con reemplazo total de agregado grueso natural por reciclado. La diferencia entre estos dos diagramas radica en la cantidad de cemento, la cual es un 60 kg menos en la última, de acuerdo a la dosificación de la Fase III.

Figura 4-3 Diagrama Sankey general ACV



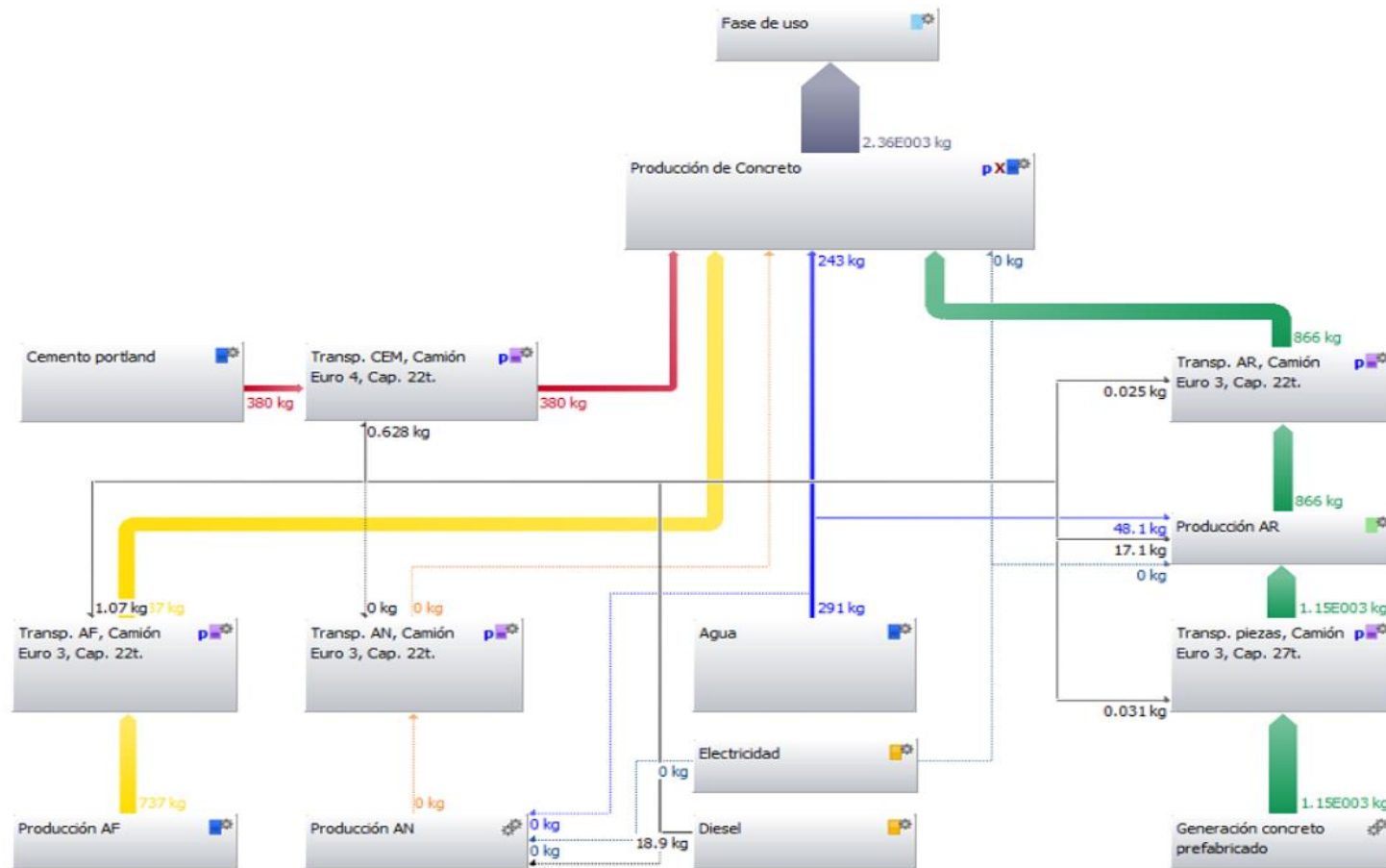
Fuente: Autor

Figura 4-4 Diagrama Sankey CAN-PS



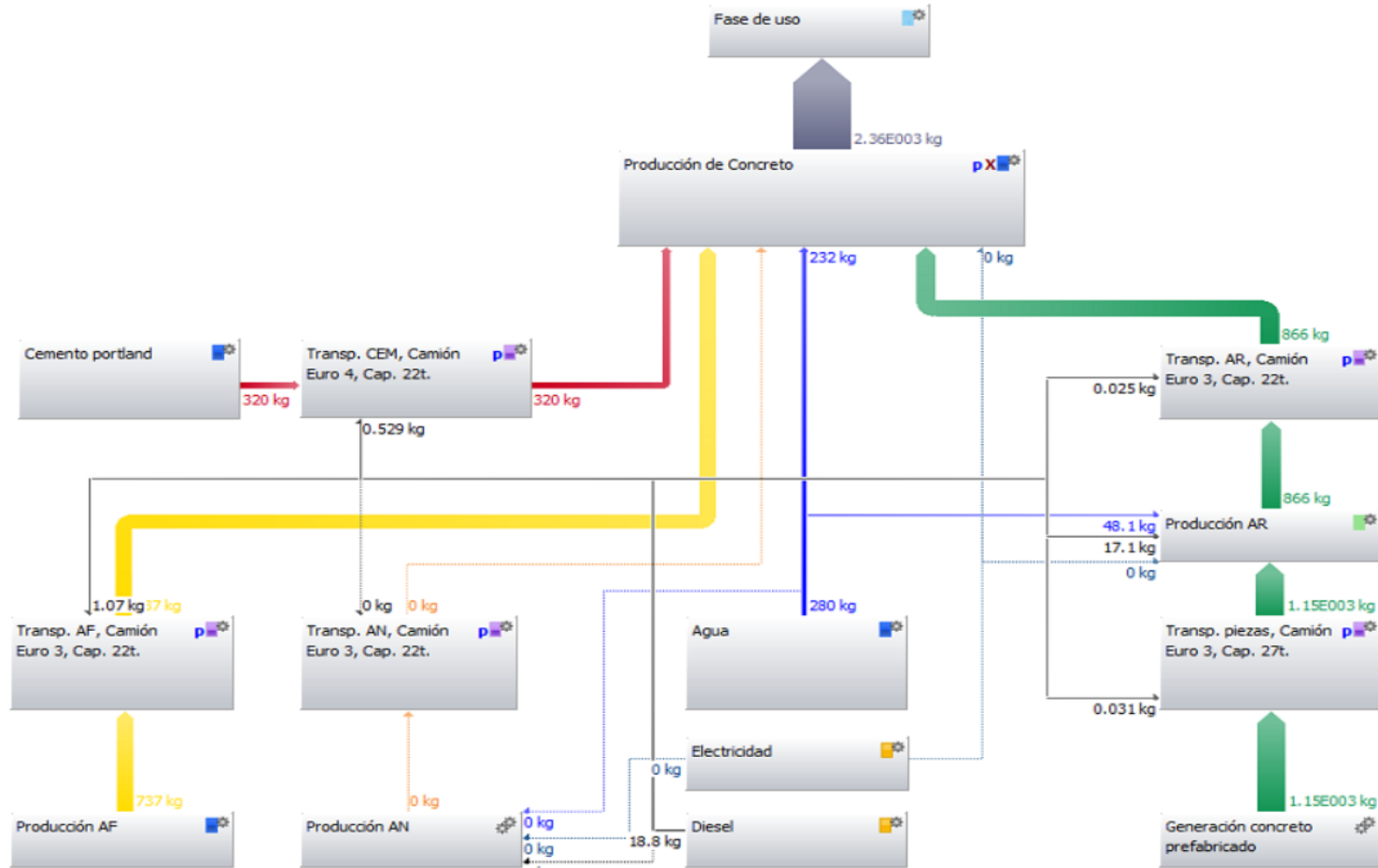
Fuente: Autor

Figura 4-5 Diagrama Sankey 100%-PS



Fuente: Autor

Figura 4-6 Diagrama Sankey 100%-PS (-16%)



Fuente: Autor.

4.2.3 Inventario de ACV

La información necesaria para alimentar los diagramas parte de los datos encontrados en la literatura, los obtenidos al realizar las mezclas de concreto y de algunas determinaciones tomadas por el autor.

Al contarse con información limitada del tipo de máquina, emisiones y requerimientos energéticos, se tomaron los datos provenientes de López et al., (2016), donde se aprecian claramente los consumos de energía y combustible por tonelada producida para agregado los agregados tanto naturales como reciclados. La **Tabla 4-11** Consumo de energía según literatura, muestra el resumen de los valores de electricidad y combustible para los procesos de producción de agregado grueso natural, agregado reciclado y en la producción del concreto.

Tabla 4-11 Consumo de energía según literatura

Proceso	Requerimiento para 1 tonelada	
	Electricidad (MJ/t)	Diesel (MJ/t)
Producción AN	9.40	13.30
Producción AR	10.59	14.84
Producción de Concreto	10.76	0.00

Fuente: Autor.

Como se notó en varias investigaciones, la distancia es uno de los factores más importantes en el ACV de los concretos con agregados reciclados. Por otro lado, se considera que, por características propias de la industria del cemento, contará con camiones con tecnología Euro 4, mientras que transportan agregados, se determinaron como camiones Euro 3.

La **Tabla 4-12** Distancia de recorrido de camiones, además de resumir el tipo de camiones usados, muestra las distancias consideradas para el transporte de cada material. Dichas distancias son valores asumidos, considerando la proveniencia de los agregados desde el Tolima, el cemento desde empresas que están en la zona, y los agregados reciclados que por encontrarse dentro de la misma planta, presentan valores bajos.

Tabla 4-12 Distancia de recorrido de camiones

Proceso	Distancia (km)
Transp. AF, Camión Euro 3, Cap. 22t.	180
Transp. AN, Camión Euro 3, Cap. 22t.	180
Transp. AR, Camión Euro 3, Cap. 22t.	2
Transp. CEM, Camión Euro 4, Cap. 22t.	100
Transp. piezas, Camión Euro 3, Cap. 27t.	2

Fuente: Autor.

Tabla 4-13 Emisiones al aire por tipo de concreto

Emisiones al aire		CAN-PS [kg]	100%-PS [kg]	100-PS (-16%) [kg]
Monóxido de carbono	CO	0.83	0.83	0.70
Óxidos de nitrógeno	NO _x	0.69	0.69	0.59
Óxido de azufre	SO _x	0.41	0.41	0.34
Metano	CH ₄	0.24	0.24	0.20
Dióxido de carbono	CO ₂	349.10	345.23	291.79
Óxido nitroso	N ₂ O	0.00	0.00	0.00
Cloruro de hidrógeno	HCl	0.01	0.01	0.01
Cianuro de hidrógeno	HC	0.00	0.00	0.00
Compuestos orgánicos volátiles	NMVOG	0.10	0.10	0.08
Polvo	PM 2.5	0.01	0.01	0.01

Fuente: Autor.

4.2.4 Evaluación de impactos de ciclo de vida.

Después de alimentado el programa con la información aportada por las diversas fuentes, este aportó los resultados de impacto, resultado de la interacción de los flujos en cada una de las mezclas de concreto.

Como fue mencionado en el Marco Teórico, se optó por la metodología CML 2001, para caracterización de los impactos encontrados en el ACV. Puede verse en la **Tabla 4-14** Resultados de categoría de impacto, que los impactos en todas las categorías presentan un menor valor en los concretos con agregados reciclados.

4. Resultados

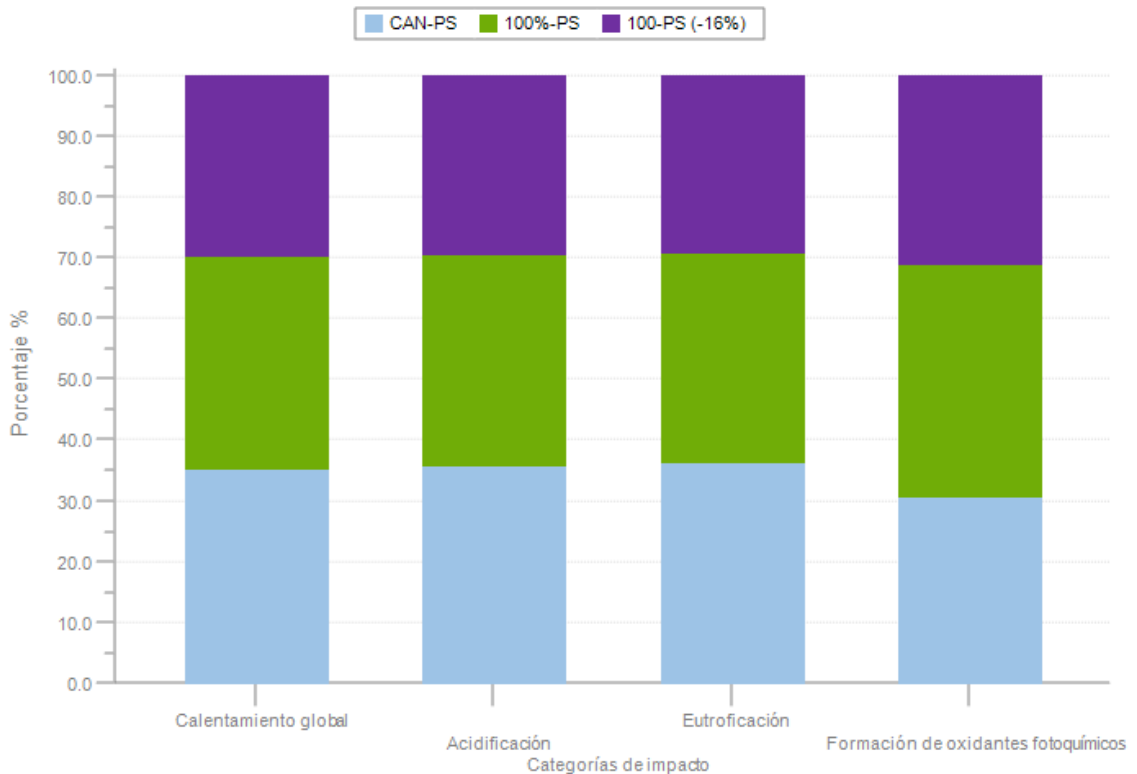
Tabla 4-14 Resultados de categoría de impacto.

Tipo de concreto	Calentamiento global (Kg. Eq CO2)	Acidificación (Kg. Eq SO2)	Eutrofización (Kg. Eq NO3)	Formación de oxidantes fotoquímicos (Kg. Eq C2H4)	Consumo de materias primas (t)
CAN-PS	355.56	0.92	0.11	0.05	2264.21
CAR-PS	351.47	0.90	0.10	0.06	1348.95
CAR-PS (-16%)	296.08	0.76	0.09	0.05	1348.95

Fuente: Autor.

La **Gráfica 4-4** Diagrama de barras por categoría de impacto CML-2001, representa un esquema apilado de barras al 100% de los resultados del ACV, donde se muestra la participación por tipo de mezcla en las categorías de impacto, y evidenciando que el concreto 100%-PS (-16%), es el que presenta mayores ventajas frente a los otros.

Gráfica 4-4 Diagrama de barras por categoría de impacto CML-2001



Fuente: Autor..

5. Discusión.

El estudio realizado fue concebido para hacer un aporte al conocimiento y estado del arte en el reaprovechamiento de los residuos de la construcción, viendo como una oportunidad el uso de agregados reciclados a partir de los prefabricados de concreto, debido a que son materiales que por su calidad, resuelven gran parte de los problemas que presenta el reciclaje: tienen una resistencia y calidad conocida para el fabricante, no se mezclan con otros materiales de demolición, presentan altas prestaciones, su transporte es bajo por proponerse como un material para reuso dentro de la misma planta de producción, entre otros. Esto concuerda con los resultados de las investigaciones de Pedro et al. (2015) y Soares, De Brito, Ferreira, & Pacheco, (2014), a quienes los resultados de sus investigaciones mostraron que los concretos a partir de los agregados de prefabricados, son una solución posible y equivalente para la generación de nuevos concretos. Para el primer estudio se encontró que la resistencia a la compresión iba de un 3 a un 17%, dependiendo del tipo de concreto y los métodos de trituración de los agregados, mientras que para la investigación de Soares et al. (2014), la variación fue del 2.3 a un poco más del 6% y comenta sobre la diferencia entre los resultados obtenidos en su trabajo, en comparación con otros donde ha habido una mayor brecha entre la prueba de referencia y la que arrojan los CAR.

Por otro lado, al tenerse en cuenta los resultados obtenidos López et al., (2016), los cuales serán discutidos más adelante, se observa la incidencia negativa que tiene el transporte en los indicadores de impactos ambientales del ACV, por lo que minimizar el transporte de materiales o equipos en el proceso que plantea esta investigación, ayuda a minimizar dichos impactos.

Esas ventajas logísticas y mecánicas, no tenían gran valor ambiental o no aportarían nada a la sostenibilidad, si se comprueba que los impactos negativos son mayores al usar los agregados reciclados, como ha pasado en otros estudios, sino se hace un ACV para determinar de qué manera y en qué cantidad se dan las emisiones al ambiente y cuánto

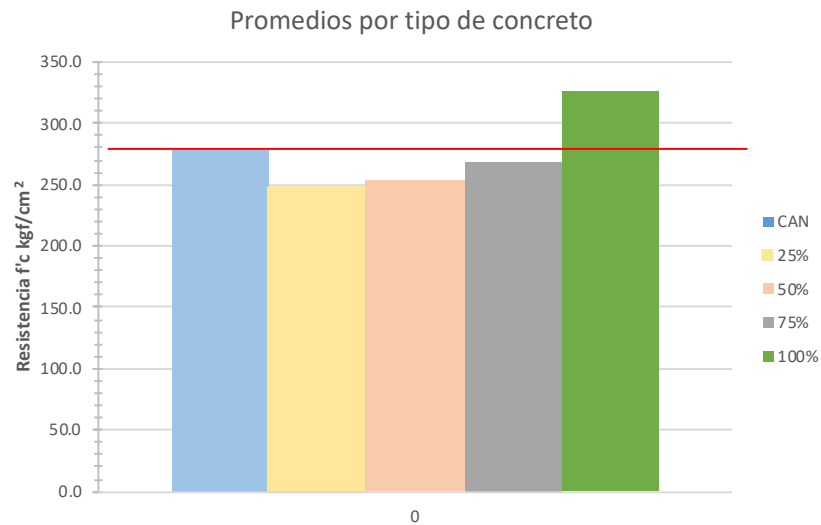
recurso se están usando, para determinar comparativamente cuál aporta menos contaminantes.

En ese mismo sentido, el aprovechamiento de los residuos de prefabricados de concreto, no tendría ningún objeto si no se pudiera implementar en nuevos materiales, como mezclas de concreto que cumplieran las mismas funciones y con similares prestaciones que los materiales ordinarios. Por tal motivo se adoptó para la investigación, una UF que, además de permitir cuantificar los materiales que se usaran para una porción equivalente, garantizara que se pudieran emplear en tareas con solicitudes similares, determinando para ellos la resistencia de 280 kgf/cm^2 , la cual fue corroborada por los ensayos de compresión.

5.1 Resultados de pruebas mecánicas.

A pesar de que varios estudios demuestran que el uso de agregados reciclado disminuye la resistencia y las propiedades mecánicas de los concretos, la experiencia en esta investigación nos muestra que para el caso de donde se contrarrestó el efecto de la absorción los agregados con el presaturamiento de estos, y se hizo con curado sumergido en agua, la resistencia mejoraba con el incremento de AR en la mezcla, siendo esto no tan claro en los otros concretos propuestos, como lo muestra la **Gráfica 4-2** Resultados de ensayos de compresión de cilindros de Fase II. En el promedio general de las mezclas, como se muestra en la **Gráfica 5-1** Promedios de resistencia a la compresión f'_c por tipo de mezcla, esta tendencia no es tan notable si se observa el promedio de todas las modalidades de tratamiento de la absorción y el curado, iniciando con una pérdida de resistencia de alrededor del 10%, pero aumentando a medida que se incrementa la porción de AR en las mezclas. Marinković et al., (2010), basado en otros autores, sugiere que el uso de estos agregados reduce alrededor de un 25% las propiedades de resistencia mecánicas del concreto, mientras que López et al., (2016), encontró en su estudio que para la realización de bordillos, las características mecánicas no presentan efectos negativos, si el reemplazo es del 50% o menos.

Gráfica 5-1 Promedios de resistencia a la compresión f'_c por tipo de mezcla



Fuente: Autor.

Este comportamiento mostrado por los AR, se atribuye a la procedencia y tipo de concreto de donde provienen los agregados. Se considera que las piezas de prefabricado demolidas y luego transformadas en agregado, fueron hechas con concretos de resistencias superiores a los 350 kgf/cm², lo cual genera agregados con un buen comportamiento mecánico, al menos para esta UF, debido a que el mortero adherido cuenta con una mayor resistencia y dificulta la generación de planos de falla entre este y el agregado original de la pieza. Esta condición proporciona un mejor comportamiento ante solicitaciones mecánicas en la nueva matriz de concreto y concuerda con lo encontrado por Matthey et al. (2014) en su estudio sobre la caracterización física de agregados reciclados a partir de escombros. Padmini et al. (2009), ya algunos años había demostrado esta condición, evaluando los resultados de trabajar agregados reciclados provenientes de tres concretos de diferentes resistencias. Su investigación arrojó que entre más alta fuese la resistencia del “concreto madre”, mejores serían las propiedades del CAR resultante.

Otra de las razones que posiblemente favorezca la resistencia de los CAR, es que los agregados utilizados en los concretos reciclados tengan mejores prestaciones que los usados para la mezcla de control. Si bien los resultados de resistencia de 280 kgf/cm² a los 28 días, se alcanzaron con los AN disponibles, hubiese sido un buen ejercicio haber usado los mismos agregados de los concretos prefabricados, en estado natural, para hacer la mezcla de control. De cualquier modo, las dosificaciones y procedimientos fueron suficientes para cumplir el cometido de alcanzar para ambos tipos la UF.

5.2 Análisis de los resultados del ACV.

La interpretación de los resultados obtenidos, además de ser una de las fases del ACV (NTC-ISO 14040, 2007), se hace necesaria para establecer las potencialidades de los materiales estudiados y cómo se están comportando los unos ante los otros.

5.2.1 Identificación de problemas significativos.

Al realizar el ACV para esta investigación, es conveniente mencionar algunas implicaciones de la realización de la misma, bajo los parámetros que se establecieron para llevarlo a cabo. Como se mencionó en el alcance, la información del ICV fue tomada a partir de las bases de datos incluidas en el programa GABI y en la literatura, y no de mediciones realizadas directamente en los procesos de fabricación del concreto por lo que al hacer una medición más rigurosa, podrían encontrarse diferencia con los datos arrojados por el ACV. Sin embargo, parte de los datos usados fueron extraídos de un reporte generado por la base de datos Ecoinvent, a partir de mediciones realizadas directamente para Perú y Colombia (Myers et al., 2017), por lo que aumenta la confiabilidad en los datos obtenidos para este ACV como un primer acercamiento al tema de los concretos con agregados reciclados para nuestro entorno local, donde no se disponen de muchos datos actualmente, como por ejemplo: EPD's de los cementos, agregados o concretos, creadas por los fabricantes, lo que hace más compleja la búsqueda de información ya sea para fines comparativos o constitutivos del ACV.

En cuanto a los límites del sistema, se consideró apropiado el modelo establecido, ya que permite evaluar adecuadamente las fases o procesos que intervienen en la fabricación de los concretos estudiados. A esto se le suma que son equivalentes comparables entre sí, ya que por un lado, los CAN empiezan desde la extracción del agregado grueso, y el los CAR desde el triturado de las piezas de concreto prefabricadas de la planta. Los agregados finos, como no fueron reemplazados en los CAR, son los mismos. No fue necesario incluir la fase creación de las piezas de prefabricado porque se entiende esta como parte de otro producto o sistema, tomando en cuenta solo desde que la pieza es desechada, iniciando con el transporte de las mismas. Aunque se representa en el diagrama sankey, los impactos de este proceso no fueron tenidos en cuenta para el ACV.

Límites del sistema similares han sido planteados en múltiples investigaciones como las de Hossain et al. (2016), Knoeri et al. (2013), López et al. (2016) y Marinković et al. (2010), las cuales trabajan también concretos a partir de agregados reciclados en diferentes partes del mundo, por lo que se considera válida también la utilización para este estudio.

5.2.2 Evaluación de integridad, sensibilidad y consistencia.

La información obtenida en las etapas de ICV y EICV, para los alcances y objetivos definidos del ACV, son suficientes y completos, por lo que no se advierte la necesidad de complementarlos o redefinir los alcances u objetivos del estudio.

En cuanto a la sensibilidad de los resultados, se observa que de acuerdo a las condiciones en que fueron planteados, son susceptibles de mejora, en la medida que datos de emisiones o vertimientos sean tomados directamente en una producción local y no de la bibliografía o de una base de datos. Esto reduciría la incertidumbre que existe en el proceso real de trituración de todos los agregados, ya que el usado en este trabajo de investigación se planteó con base en la otros estudios como el de López et al. (2016). Para la investigación realizada, era necesario hacer este planteamiento por medio de referencias a otros estudios, ya que no era posible extraer los datos de la compañía que aportó los agregados reciclados, debido a cuestiones de confidencialidad.

En cuanto a la consistencia, los datos obtenidos a través de la metodología y límites del sistema planteados, corresponden con los resultados de otras investigaciones consultadas, donde, por ejemplo, las variaciones en el transporte, repercuten en los indicadores de impacto, como lo muestran Knoeri et al. (2013) López et al. (2016) y Marinković et al. (2010), en sus trabajos, donde el transporte de los residuos de concreto para ser procesados, repercute notoriamente en los resultados del ACV, ya que generalmente no se encuentran cerca a la fuente de donde se procesan. López et al. (2016), en su investigación de bloques de concreto a partir de agregados reciclados, plantea dos escenarios donde usa una planta móvil y una planta fija de trituración de agregados reciclados. Al realizar un ACV, encuentra que las plantas fijas tienen mejores resultados para las categorías de impacto evaluadas, lo que para el caso de este estudio es la condición establecida de producir los agregados reciclados en el mismo lugar donde se producen los prefabricados, por lo que es consecuente que esto se muestre como una

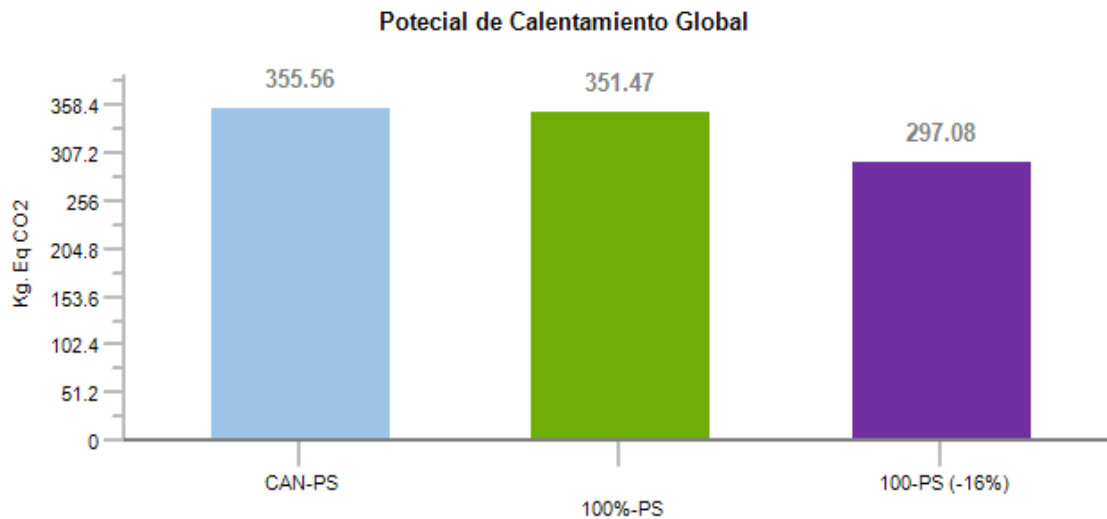
ventaja en los indicadores. Las categorías encontradas en la investigación antes mencionada, son las mismas aplicadas para este estudio.

Por otro lado, es consecuente que al ser el cemento el que presente una carga ambiental mayor, las variaciones en las cantidades presentes de este en la UF, modifiquen notablemente los indicadores de impacto evaluados. La **Tabla 4-14** Resultados de categoría de impacto, nos muestra una diferencia en todos los valores de las categorías, tendiendo presentar valores más favorables para la mezcla 100%-PS (-16%), sobretodo en la categoría de Potencial de Calentamiento Global, esto se presenta principalmente porque la reducción en el cemento le disminuye notablemente todos los valores en las categorías de impacto y en una menor medida, la disminución en el transporte ayuda a que se reduzcan los impactos generados por esos procesos.

La **Tabla 5-1** Calentamiento Global Equivalente por proceso, muestra el aporte que cada proceso hace a los totales, representados en la **Gráfica 5-2** Potencial de Calentamiento Global, los procesos no expresados aquí, no aportaron a la categoría. Esto sucede porque, como se comentó anteriormente, fueron montados para este ejercicio y sólo cuentan con flujos de entrada y salida de materiales, mas no de emisiones, siendo válido para el análisis porque son procesos que, si bien la información de las emisiones robustecería la investigación, con los datos obtenidos se puede concluir cuál de los concretos se comporta ambientalmente de una mejor manera.

Como puede observarse, los niveles CO₂ equivalente para el transporte del agregado grueso natural, Trasn. AN Camión Euro 3, Cap. 22t., es superior que los niveles del transporte de los agregados reciclados Trasn. AR Camión Euro 3, Cap. 22t., debido a que estos últimos, por encontrarse dentro de la misma planta no requieren desplazarse grandes distancias, reduciendo los impactos en esos procesos.

Gráfica 5-2 Potencial de Calentamiento Global



Fuente: Autor.

Adicionalmente, al igual que pasa con el transporte, el consumo de diésel es similar entre las tres mezclas, debido a los requerimientos de los equipos que procesan la roca o piezas de concreto hasta convertirlas en agregados para la mezcla. Esto explicaría por qué en las investigaciones de López et al., (2016) y Marinković et al., (2010), el transporte de los materiales y el consumo de combustibles arrojaron que los concretos con AR tenían menores ventajas ambientales, ya que en sus modelos, el transporte de los agregados marcaba una gran diferencia para el ACV, registrando distancias de 40 y 100 km adicionales para el transporte de AR, entre otros factores.

Como puede notarse en esta categoría y en las demás, el cemento constituye un proceso con mucha influencia en el inventario de impactos debido a los contaminantes y recursos necesarios para su fabricación. Esto se refleja en los resultados del ACV de este estudio, y como previamente lo anota Serres et al., (2015). En la **Tabla 2-5** Contribución (%) para cada componente del concreto según la mezcla, desarrollada por él e incluida en este documento.

Tabla 5-1 Calentamiento Global Equivalente por proceso

Tipo mezcla	LCA Concreto CAN vs CAR 3	Agua	Cemento portland	Diesel	Electricidad	Producción AF	Transp. AF, Camión Euro 3, Cap. 22t.	Transp. AN, Camión Euro 3, Cap. 22t.	Transp. AR, Camión Euro 3, Cap. 22t.	Transp. CEM, Camión Euro 4, Cap. 22t.	Transp. piezas, Camión Euro 3, Cap. 27t.
CAN-PS	355.56	0.14	342.31	0.88	0.9	1.66	3.4	4.28		2	
100%-PS	351.47	0.12	342.31	0.86	0.93	1.66	3.4		0.08	2	0.1
100-PS (-16%)	297.08	0.12	288.26	0.84	0.93	1.66	3.4		0.08	1.68	0.1

Fuente: Autor.

Para efectos comparativos, se analizó el comportamiento de los resultados de las categorías de impacto de las mezclas 100%-PS y 100%-PS (-16%), con la mezcla de control CAN, arrojados por la **Tabla 4-14** Resultados de categoría de impacto, generando la **Tabla 5-2** Comparación de indicadores por categoría de impacto, donde los porcentajes positivos indican una reducción del indicador y los negativos un aumento en el indicador por categoría. Lo anterior muestra que notablemente son mejores ambientalmente hablando, los concretos con agregados reciclados.

Tabla 5-2 Comparación de indicadores por categoría de impacto

Tipo de concreto	Calentamiento global (Kg. Eq CO2)	Acidificación (Kg. Eq SO2)	Eutrofización (Kg. Eq NO3)	Formación de oxidantes fotoquímicos (Kg. Eq C2H4)	Consumo de materias primas (t)
CAN-PS	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
100%-PS	1.15%	2.17%	9.09%	-20.00%	40.42%
100-PS (-16%)	16.73%	17.39%	18.18%	0.00%	40.42%

Fuente: Autor.

6. Conclusiones, recomendaciones y futuras investigaciones.

Después de haber realizado este trabajo de investigación en la comparación entre concretos con agregados naturales y los concretos con agregados reciclados a partir de prefabricados de concreto se puede concluir que:

- Aunque no fue el tema principal abordado en este documento, se ha estudiado por varios autores la incidencia que tiene la resistencia del concreto base de donde se obtienen los AR, en sus propiedades (Kwan et al., 2012; Matthey et al., 2014). Es esto se atribuye las mayores resistencias a la compresión que presentaron los CAR, como se puede observar en la **Tabla 4-7** Resultados de ensayos a compresión de cilindros, y en la **Gráfica 4-2** Resultados de ensayos de compresión de cilindros de Fase II. Esto permitió plantear la posibilidad de reducir la cantidad de cemento en la mezcla, reduciendo un poco la resistencia, pero manteniendo la UF, lo cual se reflejó en una reducción de los impactos en las categorías del ACV, presentadas en la **Tabla 4-14** Resultados de categoría de impacto.
- Al observar la **Tabla 5-1** Calentamiento Global Equivalente por proceso, se nota que factores como la distancia de transporte de los materiales y la cantidad de cemento usado en las mezclas, inciden directamente en las emisiones y en el inventario de ciclo de vida del material. De igual forma, como se vio en la **Tabla 4-7** Resultados de ensayos a compresión de cilindros, que el método de curado y el manejo del agua de mezclado, influyen en la resistencia final de las mezclas, por lo cual, deben tenerse en cuenta estos factores a la hora de realizar las dosificaciones, ya que cualquier pérdida en la resistencia podría traducirse en una compensación de la cantidad de cemento de la mezcla, lo que, como ya se vio, aumenta los indicadores del ACV.

- La localización cercana de la producción de piezas destinadas a reciclaje, de la planta de triturado o producción de los AR, constituye una ventaja estratégica para la reducción de impactos, ya que como puede verse, por ejemplo, en la **Tabla 5-1** Calentamiento Global Equivalente por proceso, el potencial equivalente de kg de CO₂ por concepto de transporte de agregado natural grueso es de 4.28, mientras que para los agregados reciclados es de 0.18, lo que marca una diferencia considerable para esta categoría.
- Bajo la condición Presaturado-sumergido o PS, se observa que a partir de la sustitución del 50% es posible alcanzar la UF. Sin embargo, es preferible un reemplazo del 100% de AR y disminuir la cantidad de cemento en la mezcla, logrando aun así la resistencia deseada para este estudio y un comportamiento que permita al uno ser sustituto del otro bajo las condiciones planteadas.

En términos generales, se puede afirmar que el uso de los agregados reciclados a partir de piezas prefabricadas de concreto escogidos para este estudio en la ciudad de Bogotá, representan una ventaja ambiental en la elaboración de nuevas mezclas, si se le compara con un concreto convencional de agregados naturales. Esto debido a que el ACV demostró que los impactos se veían reducidos por la disminución en materiales altamente contaminantes y el acortamiento de las distancias de transporte de materiales.

Por tal motivo, se comprueba que la hipótesis planteada:

“Los agregados gruesos reciclados de este estudio, obtenidos a partir de la trituración de piezas de concreto prefabricado, producen un menor impacto ambiental negativo al ser utilizados en nuevas mezclas de concreto, en comparación a los generados por mezclas con agregados naturales, manteniendo una UF de metro cúbico de resistencia igual a 280 kgf/cm².”

Es verdadera.

6.1 Recomendaciones y futuras investigaciones.

Para los investigadores interesados en ampliar los temas tratados por este estudio, se recomienda lo siguiente:

- De ser posible, realizar pruebas de control tomando como agregados naturales los mismos que se usen en la fabricación de los concretos de origen del AR. Esto sería útil para determinar cuánto decrece la resistencia eliminando la variable del uso de otros agregados diferentes a los presentes en los AR. De igual forma, se puede realizar una comparación tomando como muestra de control el mismo concreto que se use para producir los AR del CAR a estudio, lo que dejaría ver claramente cuánto decrece la calidad del concreto al usarlo como agregado e investigar qué métodos habría que utilizar para llevarlos a la misma resistencia, evaluando si aun así siguen siendo más sostenibles que los CAN.
- Sería de gran valor que una o varias investigaciones pudiesen documentar de cerca las emisiones que generan todos los equipos involucrados en la producción tanto de AR, como de AN. Esto contribuiría enormemente a la generación de bases de datos locales y corroborar con datos más completos, los resultados de este estudio.
- Se debe tener en cuenta al realizar investigaciones similares, que impliquen la realización de probetas, que el número de las mismas permitan hacer un tratamiento estadístico de los datos, donde puedan descartar datos atípicos y verificaciones posteriores a las pruebas principales.

Esta investigación tiene un gran potencial de desarrollo y ampliación, ya que nuestro país está en el inicio de la implementación de las normas ISO 14040 y 14044, y por otro lado, la generación de conciencia ambiental y la necesidad de como constructores, avanzar hacia obras, materiales y métodos constructivos más amigables con el medio ambiente, deben inclinarnos por investigaciones que nos permitan documentar, diseñar y crear nuevos productos y métodos, con una mentalidad sostenible y proactiva frente al problema de la contaminación que generamos al construir.

Se recomienda a los estudiantes que deseen profundizar estos temas, que dirijan sus esfuerzos a crear y/o ampliar las bases de datos y modelos con información local, basada en muestreo de campo, más que apoyados en los que se encuentren en la literatura, que

si bien sirven de punto de inicio, como lo han sido par este documento, pueden alejarse de nuestra realidad.

Por otro lado, existe la posibilidad de ampliar el límite o el alcance del sistema presentado, analizando la influencia de incluir más fases dentro del estudio o por qué no, un estudio de la tumba a la tumba, donde genere un círculo que tome en cuenta aspectos como la funcionalidad a través de los años, pudiendo ver la incidencia de la durabilidad en la las categorías de impacto, a definir como complemento de UF, una característica de uso a través del tiempo.

Uno de los temas que podrían llegar a tratarse, es el análisis de costo en el ciclo de vida, lo que se relacionaría a lo expresado en el párrafo anterior, estableciendo la proyección en el tiempo del valor que tendría usar una alternativa de concretos convencionales o CAR.

Finalmente, esta investigación abre las puertas a un sinnúmero de posibilidades y potencialidades, que pueden ser explotadas desde la academia y la ciencia aplicada a la construcción, donde se pueden empezar a concebir proyectos enteros desde una visión más amplia que las sugeridas por certificaciones actuales de construcción sostenible, que a juicio del autor, tienen en cuenta muchos aspectos favorables para contrarrestar el cambio climático, el desperdicio o mal aprovechamiento de recursos, y promueve el bienestar de los usuarios, pero que puede ir un poco más allá, abordando el problema desde un pensamiento cíclico que no sólo tenga en cuenta la etapa de uso, sino que incluya en la ecuación la variable del reuso de los materiales y la inclusión de estos en la creación nuevas formar de reaprovechamiento, las cuales inviten a las generaciones venideras a gozar del entorno con una filosofía de aprovechamiento de los recursos que tienda a la austeridad sin carencia y que esté lleno de abundancia sin desperdicio.

Bibliografía

- Acevedo Agudelo, H., Vásquez Hernández, A., & Ramírez Cardona, D. A. (2012). Sostenibilidad: Actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia. *Gestión y Ambiente*, *Febrero*-, 105–117.
- ACI Committee 211. (2002). ACI 211.1-91 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. American Concrete Institute. Retrieved from [http://imcyc.com/biblioteca/ArchivosPDF/Concreto de alta densidad/Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete \(ACI 211.1-91\).pdf](http://imcyc.com/biblioteca/ArchivosPDF/Concreto de alta densidad/Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91).pdf)
- Arriaga, L., Torres, N., & Quiroga, P. N. (2013). *Utilización de agregado grueso de concreto reciclado en elementos estructurales de concreto reforzado*. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- ASTM-33. (2010). ASTM C 33 Standard Specification for Concrete Aggregates. *Change*. <https://doi.org/10.1520/C0033>
- Behera, M., Bhattacharyya, S. K., Minocha, A. K., Deoliya, R., & Maiti, S. (2014). Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Construction and Building Materials*, *68*, 501–516. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.003>
- Braungart, M., McDonough, W., & Bollinger, A. (2006). Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions e a strategy for eco-effective product and system design. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.08.003>
- Ceia, F., Raposo, J., Guerra, M., Júlio, E., & de Brito, J. (2016). Shear strength of recycled aggregate concrete to natural aggregate concrete interfaces. *Construction and Building Materials*, *109*, 139–145. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.002>
- Creswell, J. W. (2014). *Research Desing Qualitative, Qunatitative and Mixed Methods Approaches*. California, USA: Sage Publications Inc.
- Dixit, M. K., Fernández-Solís, J. L., Lavy, S., & Culp, C. H. (2010). Identification of parameters for embodied energy measurement: A literature review. *Energy and Buildings*, *42*(8), 1238–1247. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.016>
- Dobbelaere, G., De Brito, J., & Evangelista, L. (2016). Definition of an equivalent functional unit for structural concrete incorporating recycled aggregates. *Engineering Structures*, *122*, 196–208. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.04.055>
- Duarte, P., & Brito, E. (2011). Factors Affecting Bond between New and Old Concrete. *ACI Materials Journal*, (108), 449–456. <https://doi.org/10.14359/51683118>
- Estanqueiro, B., Dinis Silvestre, J., de Brito, J., & Duarte Pinheiro, M. (2016). Environmental life

- cycle assessment of coarse natural and recycled aggregates for concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 22(4), 429–449. <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1197161>
- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 735–742. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>
- European Commission, Joint Research Centre, & Institute for Environment and Sustainability. (2010). *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance* (Primera Ed). Luxemburgo: Oficina de Publicaciones de la Unión Europea. <https://doi.org/10.2788/38479>
- Ferreira, L., De Brito, J., & Barra, M. (2011). Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. *Magazine of Concrete Research*, 63(8), 617–627. <https://doi.org/10.1680/macrc.2011.63.8.617>
- GEAR. (2011). *Guía Española de Áridos Reciclados Procedentes de Residuos de Construcción y Demolición (RDC)*. Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición.
- Greendelta. (2019). openLCA features | openLCA.org. Retrieved January 27, 2019, from <http://www.openlca.org/openlca/openlca-features/#>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2010). *Metodología de la Investigación* (5th ed.). México D.F., México.: Mc Graw Hill.
- Hernandez Sampieri, R., Fernandez Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2010). *Metodología de la investigación. Metodología de la investigación*. <https://doi.org/10.1016/978-92-75-32913-9>
- Hossain, M. U., Poon, C. S., Lo, I. M. C., & Cheng, J. C. P. (2016). Comparative environmental evaluation of aggregate production from recycled waste materials and virgin sources by LCA. *Resources, Conservation and Recycling*, 109, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.02.009>
- I.N.V. E - 223 - 07 Instituto Nacional de Vías. (2007). I.N.V. E - 223 - 07 Gravedad específica y absorción de agregados gruesos. Retrieved from ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma INV E-223-07.pdf
- ICONTEC. (2015). Ntc - Iso 14001. *SISTEMAS DE GESTION AMBIENTAL. Requisitos Con Orientación Para Su Uso*, 39.
- ICONTEC, & ASTM-33. (2000). NTC 174 Especificaciones de los agregados para concreto, (Concretos), 22.
- ICONTEC, & ASTM C136:2005. (2007). NTC 77 Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos, 1–10. Retrieved from <https://tienda.icontec.org/wp-content/uploads/pdfs/NTC77.pdf>
- ICONTEC, & ASTM C39:2005. (2010). NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 673

Bibliografía.

- CONCRETOS. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECIMENES CILÍNDRICOS DE CONCRETO. Retrieved from <http://www.emcali.com.co/documents/10157/4985846/NTC++673+de++2010>
- Ifu Hamburg GmbH. (2019). Sustainable engineering with Umberto | ifu Hamburg. Retrieved January 21, 2019, from <https://www.ifu.com/en/umberto/>
- IHOBE. (2009). *Análisis de ciclo de vida y huella de carbono. Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto.* (No. 1-2009). Bilbao, España. Retrieved from <http://www.euresp-plus.net/sites/default/files/resource/Análisis de Ciclo de Vida y Huella de Carbono.pdf>
- Knoeri, C., Sanyé-Mengual, E., & Althaus, H.-J. (2013). Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications. *The International Journal of Life Cycle Assessment, 18*(5), 909–918. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0544-2>
- Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K. J., & Sulieman, M. Z. (2012). Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Construction and Building Materials, 26*(1), 565–573. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.059>
- López, F., González, J., López-Colina, C., Serrano, M., & López, A. (2016). Life cycle assessment for concrete kerbs manufactured with recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production, 113*, 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.093>
- Lotfy, A., & Al-Fayez, M. (2015). Performance evaluation of structural concrete using controlled quality coarse and fine recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Composites, 61*, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.02.009>
- Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., & Ignjatović, I. (2010). Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Management, 30*(11), 2255–2264. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>
- Martínez-Lage, I., Martínez-Abella, F., Vázquez-Herrero, C., & Pérez-Ordóñez, J. L. (2012). Properties of plain concrete made with mixed recycled coarse aggregate. *Construction and Building Materials, 37*, 171–176. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.045>
- Mattey, P., Robayo, R., Silva, Y., Alvarez, N., & Arjona, S. (2014). Caracterización física y mecánica de agregados reciclados obtenidos a partir de escombros de la construcción, 121–127.
- Myers, N., Gmünder, S., Laffely, J., & Silva, F. B. (2017). *Clinker, cement and concrete supply data in Ecoinvest - Peru and Colombia.*
- NSR-10. (2012). Título C - Concreto Estructural. In *Norma Colombiana Sismo Resistente NSR-10* (pp. 1–578). Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS.
- NTC-ISO 14040. (2007). NTC-ISO 14040 Gestión Ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia. *Icontec, (571)*, 1–24.
- NTC-ISO 14044. (2007). NTC-ISO 14044 Gestión Ambiental Análisis de Ciclo de Vida. Requisitos y Directrices. Requisitos del Ciclo de Vida. *Icontec, (571)*, 16. Retrieved from <http://tienda.icontec.org/brief/NTC-ISO14044.pdf>
- Observatorio Ambiental de Bogotá. (2017). Escombros generados por obras de construcción en

- Bogotá Gestionados - PEGOC. Retrieved April 17, 2017, from <http://oab2.ambientebogota.gov.co/es/indicadores?&id=780&v=1>
- OCDE, & EUROSTAT. (2006). *Manual de Oslo. Guía para la recogida e interpretación de datos sobre innovación*. (Grupo Tragsa, Ed.). Madrid, España.
- Omary, S., Ghorbel, E., & Wardeh, G. (2016). Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. *Construction and Building Materials*, 108, 163–174. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.042>
- Pacheco-Torgal, F., & Jalali, S. (2012). Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials*, 29, 512–519. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>
- Padmini, A. K., Ramamurthy, K., & Mathews, M. S. (2009). Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(2), 829–836. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.03.006>
- Pedro, D., de Brito, J., & Evangelista, L. (2015). Performance of concrete made with aggregates recycled from precasting industry waste: influence of the crushing process. *Materials and Structures*, 48(12), 3965–3978. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0456-7>
- Poon, C. ., Shui, Z. ., & Lam, L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 18(6), 461–468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.005>
- PRé Consultants. (2019). SimaPro | The World's Leading LCA Software. Retrieved January 21, 2019, from <https://simapro.com/>
- Rahal, K. (2007). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment*, 42(1), 407–415. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.033>
- Ricardo Rozo Bobadilla Asesor, N., & Vargas, H. (2012). *ESTADO DEL ARTE DEL APROVECHAMIENTO DEL CONCRETO RECICLADO*. Universidad de los Andes. Retrieved from https://documentodegrado.uniandes.edu.co/documentos/200523721_fecha_2013_11_05_hora_18_39_37_parte_1.pdf
- RILEM. (1994). Specifications for concrete with recycled aggregates. *Materials and Structures*, 27(9), 557–559. <https://doi.org/10.1007/BF02473217>
- Romero, P. (2016). *La integración de partes interesadas y su relación con el diseño para el ambiente en la implementación o mejora del tutelaje de producto*. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/55552/7/9528940.2016.pdf>
- Sánchez de Juan, M. (2004). *Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Schumpeter, J. A. (1964). *Business Cycles*. New York: McGraw Hill.
- Serres, N., Braymand, S., & Feugeas, F. (2015). Environmental evaluation of concrete made from recycled concrete aggregate implementing life cycle assessment. *Journal of Building*

Bibliografia.

- Engineering*, 5, 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2015.11.004>
- Silva, R. V., De Brito, J., & Dhir, R. K. (2015). Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 77, 327–339. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.102>
- Soares, D., De Brito, J., Ferreira, J., & Pacheco, J. (2014). Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects : Mechanical and durability performance. *Construction and Building Materials*, 71, 263–272. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.034>
- Thinkstep. (2019). Product Sustainability Performance: GaBi Software. Retrieved January 21, 2019, from <http://www.gabi-software.com/international/overview/product-sustainability-performance/>
- UN CPC 375, C. (2013). UN CPC 375 Product Category Rules - Concrete. *The International EPD System*, (Environmental Product Declaration).
- WBCSD. (2018). CSI Product Category Rules (PCR) for concrete. Retrieved January 20, 2019, from <https://www.wbcd.org/Sector-Projects/Cement-Sustainability-Initiative/Resources/CSI-Product-Category-Rules-PCR-for-concrete>

7.Anexos

7.1 Resultados de caracterización de agregados.

7.1.1 Agregado natural fino.

NTC:	92	MASA UNITARIA	
------	----	---------------	--

G suelta (gr)		G compactada (gr)	
A	6726.0	A	7242.0
B	6534.0	B	7298.0
C	6708.0	C	7306.0

Variable	Nombre	Valor
Gs prom. (gr)	Masa promedio agregado suelto + molde	6656.0
Gc prom. (gr)	Masa promedio agregado compacto + molde	7282.0
T (gr)	Masa del molde	2716.0
V (cm ³)	Capacidad del molde	2831.7
Ms (gr/cm ³)	Masa unitaria suelta del agregado	1.391
Mc (gr/cm ³)	Masa unitaria compactada del agregado	1.612
Fórmula	$M = (G - T) / V$	

NTC:	176	DENSIDAD Y ABSORCIÓN	
------	-----	----------------------	--

Variable	Nombre	Vlr. Inicial	Vlr. Final
A (gr)	Masa en el aire seca al horno	200	196
B (gr)	Masa en el aire superficialmente seca		200
C (ml)	Volumen sumergido	80	158

Parámetro	Fórmula	Valor	Unidades
Absorción	$\%A = ((B-A)/A)*100$	2.041	%
Densidad	$D_{sBulk} = A(B/A)/(Cf-Ci)$	2.513	gr/cm ³

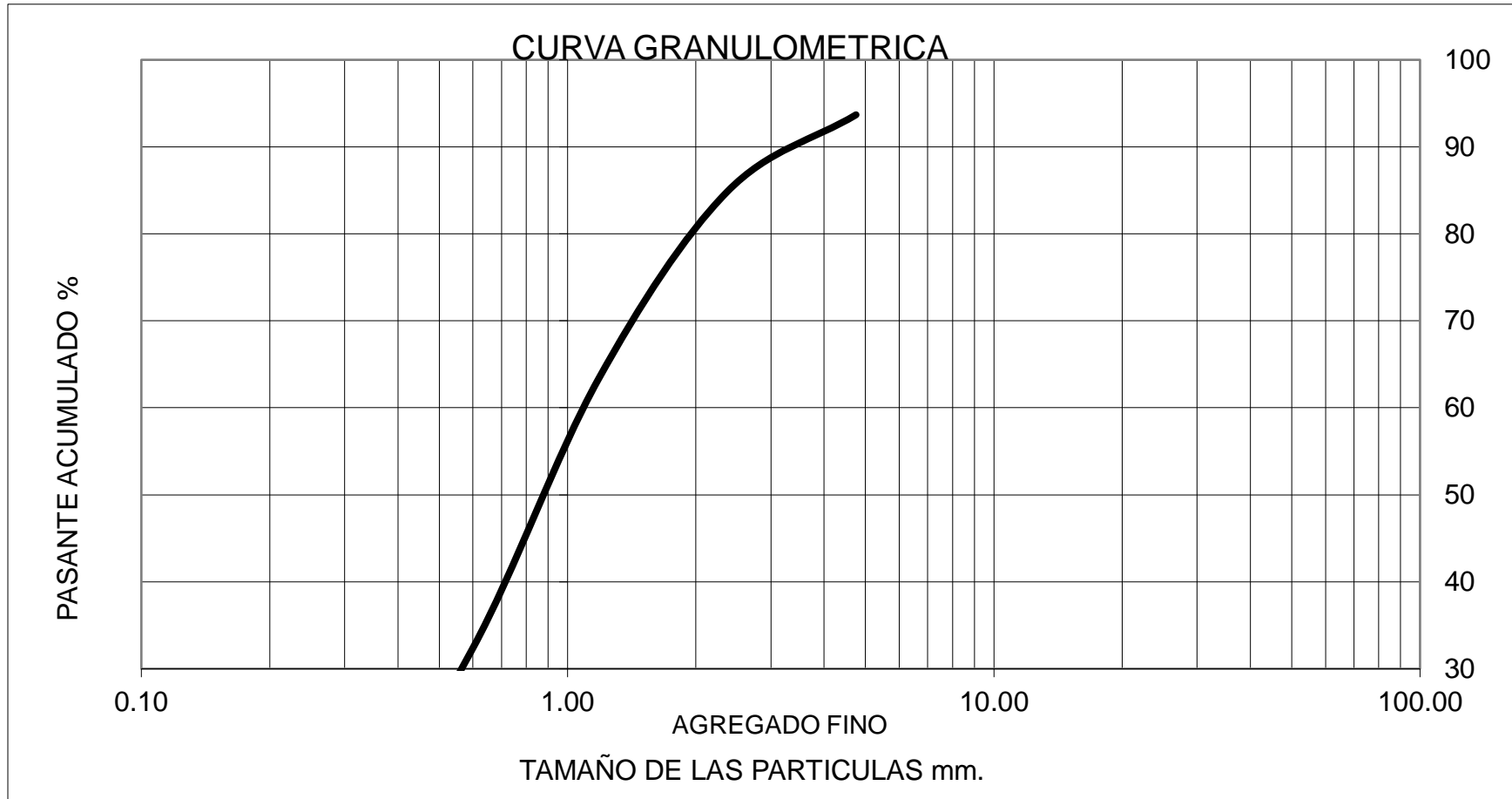
NTC:	1776	HUMEDAD DE AGREGADOS	
------	------	----------------------	--

H (gr)	Masa de la muestra en estado natural	420
S (gr)	Masa de la muestra en estado seco	410
Humedad Natural	$W = ((H-S)/S)*100$	2.439

N TAMIZ"	FAC MALLA "mm"	PESO PARCIAL	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA ACUMULADO
4	4.75	242.0	6.32	6.32	93.68
8	2.36	342.0	8.92	15.24	84.76
16	1.18	824.0	21.50	36.74	63.26
30	0.60	1182.0	30.85	67.59	32.41
50	0.30	874.0	22.81	90.40	9.60
100	0.15	284.0	7.41	97.81	2.19
FONDO		84.0	2.19	100.00	0.00
TOTAL		3832.0	100.00		

LAVADO TAMIZ 200	
Muestra inicial (gr)	4000
Muestra final (gr)	3832

M.F. 3.14



7.1.2 Agregado natural grueso.

NTC:	92	MASA UNITARIA	
-------------	-----------	----------------------	--

G suelta (gr)		G compactada (gr)	
A	30500.0	A	32500.0
B	30500.0	B	32500.0
C	30500.0	C	32500.0

Variable	Nombre	Valor
Gs prom. (gr)	Masa promedio agregado suelto + molde	30500.0
Gc prom. (gr)	Masa promedio agregado compacto + molde	32500.0
T (gr)	Masa del molde	11500.0
V (cm ³)	Capacidad del molde	14158.4
Ms (gr/cm ³)	Masa unitaria suelta del agregado	1.342
Mc (gr/cm ³)	Masa unitaria compactada del agregado	1.483
Fórmula	M = (G - T) / V	

NTC:	176	DENSIDAD Y ABSORCIÓN	
-------------	------------	-----------------------------	--

Variable	Nombre	Vlr. Inicial	Vlr. Final
A (gr)	Masa en el aire seca al horno	3350	3214
B (gr)	Masa en el aire superficialmente seca	3500	3350
C (gr)	Masa en el agua saturada	3350	1949

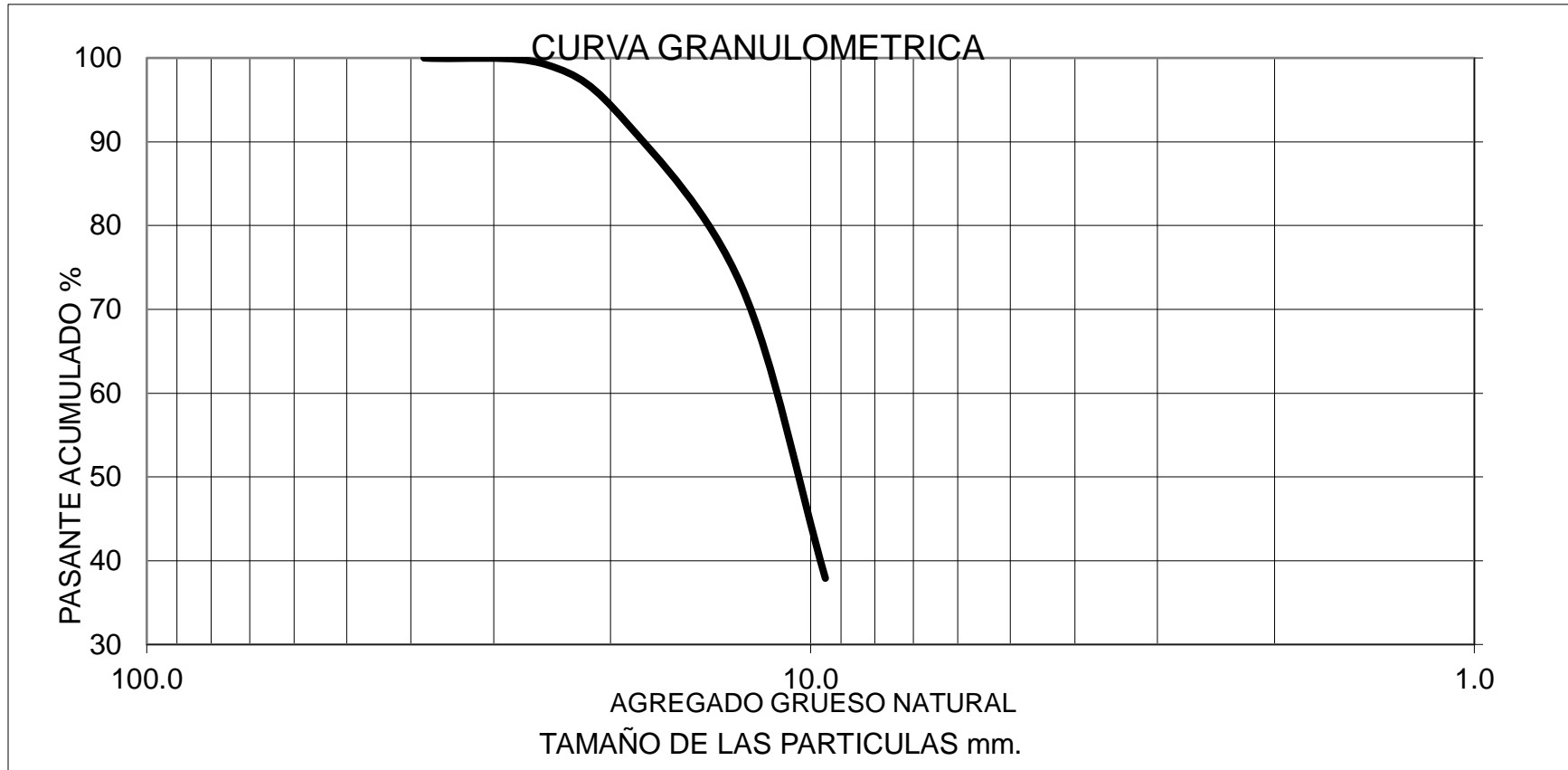
Parámetro	Fórmula	Valor	Unidades
Absorción	%A = ((B-A)/A)*100	4.231	%
Densidad aparente	D _{sBulik} = 0.9975*(A/(B-C))	2.288	gr/cm ³
Densidad nominal	D _{sNominal} = 0.9975*(A/(A-C))	2.534	gr/cm ³

NTC:	1776	HUMEDAD DE AGREGADOS	
-------------	-------------	-----------------------------	--

H (gr)	Masa de la muestra en estado natural	2360
S (gr)	Masa de la muestra en estado seco	2293
Humedad Natural	W = ((H-S)/S)*100	2.922

N TAMIZ"	MALLA (mm)	PESO PARCIAL	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA ACUMULADO
1-1/2"	38.2	0.0	0.00	0.00	100.00
1"	25.0	30.0	0.80	0.80	99.20
3/4	19.0	256.0	6.80	7.60	92.40
1/2	12.7	740.0	19.67	27.27	72.73
3/8	9.5	1310.0	34.82	62.09	37.91
FONDO		1426.0	37.91	100.00	0.00
TOTAL		3762.0	100.00		

T.M.N.



7.1.3 Agregado reciclado grueso.

NTC:	92	MASA UNITARIA	
-------------	-----------	----------------------	--

G suelta (gr)		G compactada (gr)	
A	29000.0	A	30500.0
B	29000.0	B	30500.0
C	29000.0	C	30500.0

Variable	Nombre	Valor
Gs prom. (gr)	Masa promedio agregado suelto + molde	29000.0
Gc prom. (gr)	Masa promedio agregado compacto + molde	30500.0
T (gr)	Masa del molde	11500.0
V (cm ³)	Capacidad del molde	14158.4
Ms (gr/cm ³)	Masa unitaria suelta del agregado	1.236
Mc (gr/cm ³)	Masa unitaria compactada del agregado	1.342
Fórmula	$M = (G - T) / V$	

NTC:	176	DENSIDAD Y ABSORCIÓN	
-------------	------------	-----------------------------	--

Variable	Nombre	Vlr. Inicial	Vlr. Final
A (gr)	Masa en el aire seca al horno	2902	2698
B (gr)	Masa en el aire superficialmente seca	3000	2903
C (gr)	Masa en el agua saturada	2902	1646

Parámetro	Fórmula	Valor	Unidades
Absorción	$\%A = ((B-A)/A)*100$	7.598	%
Densidad aparente	$D_{sBulk} = 0.9975*(A/(B-C))$	2.141	gr/cm3
Densidad nominal	$D_{sNominal} = 0.9975*(A/(A-C))$	2.558	gr/cm3

NTC:	1776	HUMEDAD DE AGREGADOS	
-------------	-------------	-----------------------------	--

H (gr)	Masa de la muestra en estado natural	2360
S (gr)	Masa de la muestra en estado seco	2266
Humedad Natural	$W = ((H-S)/S)*100$	4.148

MASA INICIAL		4766			
N TAMIZ"	FAC MALLA "mm"	PESO PARCIAL	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASA ACUMULADO
1-1/2"	38.2	0.0	0.00	0.00	100.00
1"	25.0	22.0	0.46	0.46	99.54
3/4"	19.0	1084.0	22.74	23.21	76.79
1/2"	12.7	1418.0	29.75	52.96	47.04
3/8"	9.5	1162.0	24.38	77.34	22.66
FONDO		1080.0	22.66	100.00	0.00
TOTAL		4766.0	100.00		

