

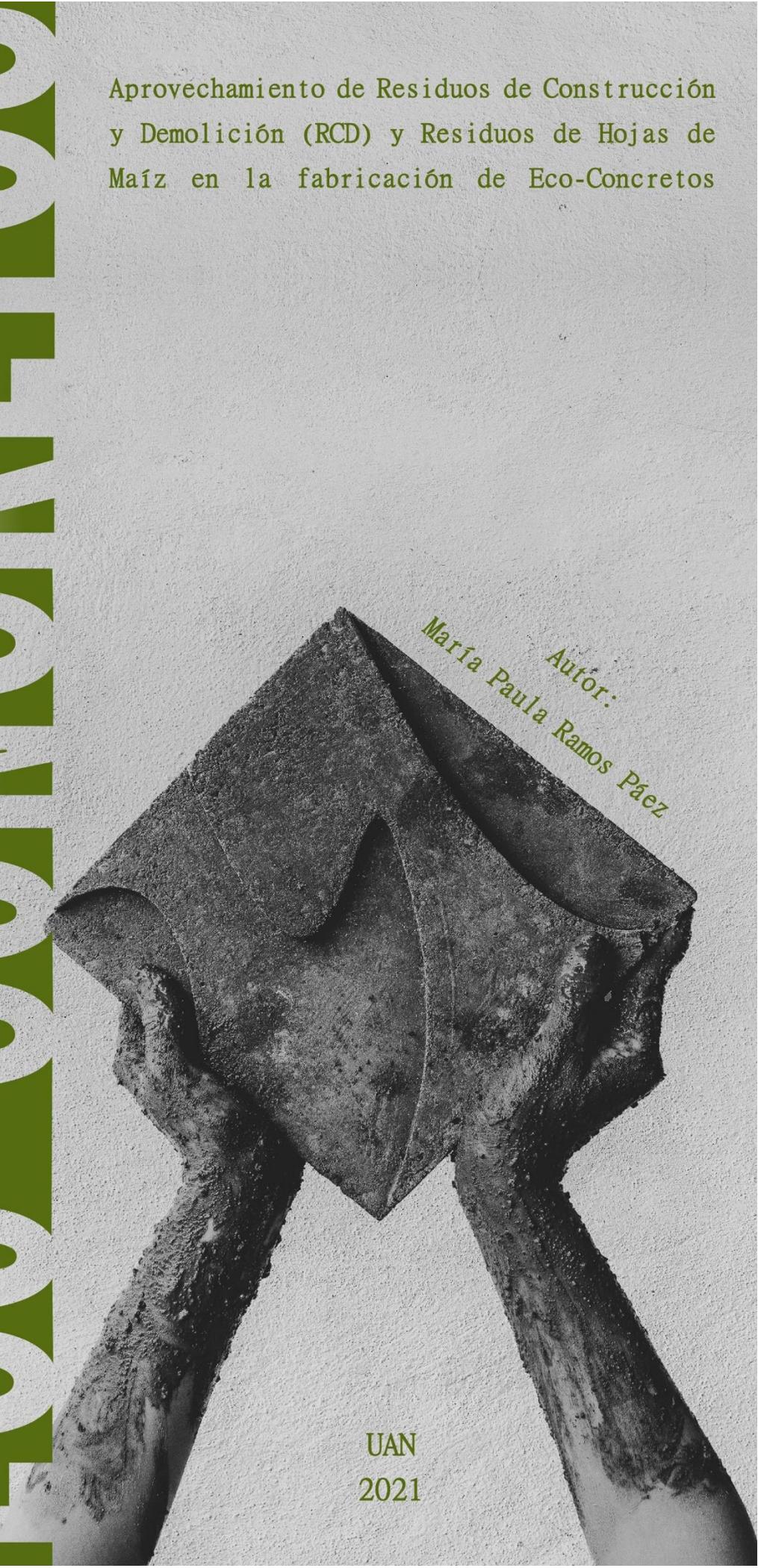
ECO-CONCRETOS



Aprovechamiento de Residuos de Construcción
y Demolición (RCD) y Residuos de Hojas de
Maíz en la fabricación de Eco-Concretos

Autor:
María Paula Ramos Páez

UAN
2021



Aprovechamiento de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) y residuos de hojas de
maíz en la fabricación de Eco-concretos

Caso de Estudio Neiva

Autor:

María Paula Ramos Páez.

Universidad Antonio Nariño

Facultad Artes

Programa de Arquitectura

Neiva, Huila

2021

Aprovechamiento de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) y residuos de hojas de maíz en la fabricación de Eco-concretos ii

Caso de Estudio Neiva

Autor

María Paula Ramos Páez

Código: 20611715273

Monografía de Proyecto de Grado

Para optar por el título de Arquitecto

Director de proyecto

Ingeniera Sindy Sofía Suárez Silgado

Universidad Antonio Nariño

Facultad Artes

Programa de Arquitectura

Neiva, Huila

2021

Dedicatoria

iii

A Dios como principio y fin de todo lo que he sido hasta este punto de mi vida y lo que seré con el favor de su misericordia y de su amor.

Definitivamente todos mis esfuerzos no me hubiesen conllevado al éxito sin la gracia de Dios y la intercesión de la Santísima Virgen María, infinitamente gracias al cielo. También agradezco a mis padres por su apoyo incondicional durante toda mi vida y mi carrera, sin duda soy muy afortunada de tenerlos, a mis abuelas, mi abuelo materno y mi tía Lili por apoyarme durante todo mi proceso formativo personal, espiritual y académico, a mi novio por su paciencia, su compañía y por ser mi hombro a hombro en este proceso, por último, pero no menos importante, agradezco profundamente a la academia por inculcarme la pasión por una arquitectura ligada a la sostenibilidad y a todos los docentes que durante mi carrera y en este proceso creyeron en mí, a quienes me apoyaron con todo su conocimiento y amor y me mostraron que había otra maravillosa forma de ejercer mi profesión y que esta, estaba ligada a la investigación.

Con el propósito de buscar alternativas de aprovechamiento para mitigar impactos negativos generados por la extracción de materias primas en la elaboración de concreto y la disposición final inadecuada de los RCD en la ciudad de Neiva–Colombia, se obtienen los agregados naturales que componen el concreto convencional (cemento-grava-arena), además de materiales reciclados como: residuos de concreto en granulometrías gruesas (3/8”) y finas (8”), además de residuos de arena de excavación y residuos de hojas de maíz, destinados a ser caracterizados granulométrica y físico-químicamente con fines comparativos y posterior a ello, elaborar once eco-concretos y dos eco-morteros con diferentes porcentajes de material reciclado que van desde 10% hasta 75% de reemplazo. Los resultados de las caracterizaciones mostraron que el agregado grueso reciclado presenta diferencias en la gradación, la densidad y el porcentaje de vacíos con respecto al agregado grueso natural, lo que muestra disminución en las resistencias de los eco-concretos con este tipo de reemplazo, sin embargo, las caracterizaciones de los agregados finos reciclados mostraron similitudes con el agregado fino natural, lo que influyó en el aumento de resistencias de los eco-concretos y los eco-morteros. En cuanto a los reemplazos del cemento, se utilizan residuos de hojas de maíz, que son incineradas y caracterizadas, concluyendo que esta puzolana tiene un 21.44% más de contenido de SiO_2 que el material cementante convencional y de igual forma se demuestra que los eco-concretos puzolánicos aumentan sus propias resistencias al someterlos a roturas en edades de curado desde 28 días hasta edades de 112 días con reemplazos de 10% de puzolana. Por último, se fabrica un elemento constructivo no estructural con los diseños de mezcla que obtuvieron mejores resultados de resistencias, sometiéndolo a ensayos mecánicos según exigencias de las normas técnicas colombianas correspondientes.

Palabras claves: Concreto ecológico, RCD, Puzolana, Aprovechamiento, Construcción.

In order to seek alternative utilization to mitigate negative impacts generated by the extraction of raw materials in the preparation of concrete and the inappropriate final disposal of the RCD in the city of Neiva-Colombia, the natural aggregates that make up conventional concrete are obtained. (cement-gravel-sand), in addition to recycled materials such as: concrete waste in coarse (3/8 ") and fine (8") granulometries, as well as excavation sand waste and corn husk waste, destined to be Characterized granulometrically and physico-chemically for comparative purposes and afterwards, elaborate eleven eco-concretes and two eco-mortars with different percentages of recycled material ranging from 10% to 75% replacement. The results of the characterizations showed that the recycled coarse aggregate presents differences in gradation, density and the percentage of voids with respect to the natural coarse aggregate, which shows a decrease in the resistances of the eco-concretes with this type of replacement, without However, the characterizations of the recycled fine aggregates showed similarities with the natural fine aggregate, which influenced the increase in strength of the eco-concretes and eco-mortars. Regarding cement replacements, corn husk residues are used, which are incinerated and characterized, concluding that this pozzolana has 21.44% more SiO₂ content than conventional cementitious material and in the same way it is shown that the eco- Pozzolanic concretes increase their own strength when subjected to breakage at curing ages from 28 days to 112 days with replacements of 10% pozzolan. Finally, a non-structural construction element is manufactured with the mixture designs that obtained the best resistance results, subjecting it to mechanical tests according to the requirements of the corresponding Colombian technical standards.

Keywords: Ecological Concrete, RCD, Pozzolana, Exploitation, Construction, Environmental impacts, Clean Production.

Tabla de Contenido

vii

Agradecimientos	iv
Resumen.....	v
Abstract.....	vi
Tabla de Contenido.....	vii
Introducción	1
Preliminares	3
1.1 Problemáticas de la Investigación.....	3
1.2 Planteamiento del problema.....	3
1.3 Pregunta de Investigación	10
1.4 Justificación de la Investigación	10
1.5 Objetivos de la Investigación.....	15
1.5.1 Objetivo General.....	15
1.5.2 Objetivos Específicos.....	15
1.5.3 Hipótesis	15
2. Marco Teórico.....	16
2.1 Antecedentes	16
2.2 Estado del Arte.....	18
2.3 Referentes Conceptuales	27
3. Marco Contextual.....	30
3.1 Localización	30
3.2 Normativa	32
4. Marco Metodológico.....	36
4.1 Tipo de Estudio	36
4.2 Técnicas de investigación	36
4.3 Fases de la Investigación	37
4.3.1 Fase de búsqueda de información bibliográfica.....	40
4.4 Elección de alternativas de aprovechamiento de RCD en la ciudad de Neiva	41
4.5 Campaña experimental.....	42
4.5.1 Preparación de los materiales a emplear en la elaboración de las pastas.....	42
4.5.2 Caracterización química del material.....	43
4.5.3 Caracterización granulométrica del material	44
4.5.4 Diseño de mezclas.....	44
4.5.5 Elaboración y curado de las probetas de concreto	44
4.5.6 Propiedades mecánicas de los especímenes.....	44
4.6 Elección de material ecológico como alternativa de aprovechamiento	45
4.7 Diseño y elaboración de elemento constructivo ecológico (Prototipo Final)	45
4.8 Ensayos Mecánicos del prototipo final	45
4.9 Conclusiones	45
5. Desarrollo de Objetivos	46
5.1 Objetivo 1.....	46
5.2 Objetivo 2:	59
5.2 Objetivo 3:	85
5.4 Objetivo 4:	90
5.5 Objetivo #5:	97

6.	Discusión de Resultados	115viii
7.	Conclusiones	120
8.	Lista de Referencias	122

Tabla 1. Identificación de los peligros del Clinker.....	6
Tabla 2. Cultivos con mayores áreas sembradas y mayor producción en el departamento del Huila.....	19
Tabla 3. Total cereales a nivel Nacional en el año 2018.....	20
Tabla 4. Producción (ton) de maíz amarillo del Huila en el primer semestre del año 2019.....	21
Tabla 5. Consolidación agrícola para cultivos transitorios semestre A/2019, B/2019.....	22
Tabla 6. Normativa relacionada al servicio público de aseo y gestión de los RCD en Colombia	33
Tabla 7. Normativa relacionada con requerimientos de NTC para la elaboración de elementos constructivos.....	35
Tabla 8. Materiales necesarios para la elaboración de los diseños de mezcla de concreto.....	42
Tabla 9. Clasificación de RCD en la Escombrera la estrella.....	49
Tabla 10. Tipos y cantidades aproximadas de RCD recibidos por mes en Planta trituradora El Pacto.....	50
Tabla 11. Composición de RCD en la ciudad de Neiva desde marzo del 2020 hasta marzo del 2021 – Planta trituradora El Pacto.....	51
Tabla 12. Reemplazo de materiales naturales de concretos convencionales por materiales reciclables para la elaboración de concretos ecológicos.....	59
Tabla 13. Resultados del Ensayo Granulométrico Cemento.....	69
Tabla 14. Porcentaje Humedad Material Cementante.....	71
Tabla 15. Resultados del Ensayo Granulométrico Grava 3/8”.....	71
Tabla 16. Resultados ensayo densidad BULK (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados sueltos.....	73
Tabla 17. Ensayo Granulométrico agregado fino natural: Arena de Río.....	73
Tabla 18. Resultados ensayo densidad BULK (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados sueltos.....	75
Tabla 19. Ensayo Granulométrico RCD Grueso.....	76
Tabla 20. Resultados ensayo densidad BULK (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados sueltos.....	77
Tabla 21. Ensayo Granulométrico RCD Fino.....	78
Tabla 22. Resultados ensayo densidad BULK (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados sueltos.....	79
Tabla 23. Ensayo Granulométrico Arena de Excavación.....	80
Tabla 24. Resultados ensayo densidad BULK (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados sueltos.....	81
Tabla 25. Ensayo Granulométrico Ceniza de Hoja de Maíz.....	82
Tabla 26. Contenido de Humedad Ceniza Hojas de Maíz.....	83
Tabla 27. Composición química cenizas de hojas de maíz.....	84
Tabla 28. Composición química cemento.....	84
Tabla 29. Materiales constructivos ecológicos y los tipos de materiales reciclados implementados.....	85
Tabla 30. Materiales constructivos ecológicos, tipo de diseños de mezclas y resistencias objetivos según edad de rotura.....	86
Tabla 31. Diseños de mezcla en porcentajes.....	87

Tabla 32. Materiales constructivos ecológicos y edades de rotura para ensayos de resistencia a x la compresión	91
Tabla 33. Lineamientos de diseño para la elaboración del Prototipo Final	98
Tabla 34. Ensayos Mecánicos para el Prototipo Final	104

Figura 1. 3R Aprovechamiento RCD.....	2
Figura 2. Variación Porcentual Anual del Índice de Producción Industrial 2019	4
Figura 3. Principal segmento de materiales para la industria de la construcción.	5
Figura 4. Localización del Municipio de Neiva, Huila.....	31
Figura 5. Bibliografía utilizada como aporte a la metodología establecida en la presente investigación	37
Figura 6. Fases de la investigación.	40
Figura 7. Reporte Histórico De Ingresos Por Peso (Tons) Escombros.....	48
Figura 8. Composición de los RCD por Actividad en la ciudad de Neiva Huila. Elaboración Propia. Fuente: Planta de Aprovechamiento El Pacto, 2020-2021	51
Figura 9. Actividades del Sector de la Construcción realizadas en la ciudad de Neiva	52
Figura 10. Materiales Constructivos Empleados en Obras en la ciudad de Neiva	53
Figura 11. Tipos de residuos que se generan en la ciudad de Neiva	53
Figura 12. Tipo de RCD que más se generan en la ciudad de Neiva.....	54
Figura 13. Constructoras en la ciudad de Neiva que emplean elementos constructivos con material reciclado en sus obras civiles.....	54
Figura 14. Clasificación de los RCD emitidos por una empresa considerada grande generadora de RCD	55
Figura 15. Ausencia de separación y clasificación de RCD en obras de la ciudad de Neiva	56
Figura 16. Separación y Clasificación de residuos de excavación y de demolición en obra civil en el barrio La Orquídea, Neiva-Huila	56
Figura 17. Registro fotográfico de visita a campo a la Planta de Aprovechamiento El Pacto	57
Figura 18. Utilización de zarandas o maquinaria pesada para proceso de separación de RCD a una escala mayor.....	57
Figura 19. Variedad de residuos con potencial de aprovechamiento dentro del sector de la construcción o en diferentes industrias.	58
Figura 20. Visita a la Planta de triturados El Pacto en el mes de marzo del 2021.....	58
Figura 21. Muestra de árido fino natural: arena de río	60
Figura 22. Árido Fino reciclado: Arena de excavación	60
Figura 24. Proceso manual de trituración de RCD – concreto	62
Figura 25. Proceso de tamizado de RCD – Concreto	63
Figura 26. Resultado del proceso de tamizado: Separación de agregado grueso y agregado fino reciclado.....	63
Figura 27. Muestra de material cementante para elaboración de eco-concretos	64
Figura 28. Material alternativo para la sustitución del cemento: Hojas de Maíz	65
Figura 29. Proceso de secado de las hojas de maíz.....	66
Figura 30. Horno de barro para la quema de las hojas de maíz.	67
Figura 31. Proceso de almacenamiento en tejas de zinc previo a la quema	67
Figura 32. Quema de las hojas de maíz para la obtención de puzolana.....	68
Figura 33. Cenizas de hojas de maíz, producto de la quema en horno	68
Figura 34. Curva Granulométrica Material Cementante.....	70
Figura 35. Análisis granulométrico agregado grueso natural	72
Figura 36. Curva granulométrica – Análisis agregado fino Natural	74
Figura 37. Curva Granulométrica RCD Grueso	76

Figura 38. Curva granulométrica – Análisis agregado Fino Reciclado	79xii
Figura 39. Curva Granulométrica – Análisis Fino Reciclado: Arena de excavación	81
Figura 40. Curva Granulométrica Ceniza Hojas de Maíz	83
Figura 41. Herramientas necesarias para fundir concretos	88
Figura 42. Elaboración de concretos.....	88
Figura 43. Elaboración de concretos ecológicos.....	89
Figura 44. Concretos ecológicos elaborados	90
Figura 45. Resistencias a Compresión en MPa de los Eco-Concretos Estructurales.....	92
Figura 46. Resistencias a Compresión en MPa de los Eco-Concretos Estructurales puzolánicos a 28 días y a 112 días	92
Figura 47. Resistencias (MPa) Concretos No estructurales.....	93
Figura 48. Resistencias a compresión en MPa de los eco-morteros	93
Figura 49. Diseño de Puzolánico con 30% de reemplazo, con consistencia débil	94
Figura 50. Diseño puzolánico con un 10% de reemplazo.....	94
Figura 51. Eco concretos con 20% de reemplazo	95
Figura 52. Diseño en 3D del prototipo final	100
Figura 53. Elementos y Herramientas necesarias para la fabricación del Molde	100
Figura 54. Pegue de piezas durante la fabricación del molde para la reproducción de las fachaletas.....	102
Figura 55. Vaciado de silicona en molde de madera	102
Figura 56. Molde para la elaboración del prototipo final	103
Figura 57. Prototipo Final: FACHALETAS ECOLÓGICAS.....	103
Figura 58. Espécimen Rotulado del Prototipo Final	105
Figura 59. Pruebas de Corte Fachaletas Ecológicas	105
Figura 60. Ensayo de Densidad – Fachaletas Ecológicas	107
Figura 61. Ensayo de absorción – Fachaletas Ecológicas.....	107
Figura 62. Ensayo de Flexión – Fachaleta Ecológica (M10).....	108
Figura 63. Ensayo de Flexión – Fachaleta Ecológica (M11).....	108
Figura 64. Resistencia a la Flexión – Fachaletas Ecológicas.....	109
Figura 65. Procesos para la obtención de agregados para la elaboración de productos en concreto	111
Figura 66. Reducción de procesos y de impactos a través del aprovechamiento de RCD	112
Figura 67. Materiales Utilizados en una Fachaleta elaborada con concreto convencional.....	113

Introducción

El progreso de la civilización implica la aplicación de mecanismos que además de solventar necesidades deben contemplar el bienestar y la calidad de la vida futura. Un ejemplo de esto es el sector de la construcción, el cual sufre el derecho básico de infraestructuras dignas y confortables para los seres humanos, sin embargo, los elementos, medios y procesos constructivos tienen un alto impacto negativo en el medio ambiente durante sus técnicas de elaboración y desarrollo. Según De Santos, et al. (2011) “los impactos producidos por los RCD se pueden desarrollar en el medio inerte, en el medio biótico y en el medio humano” (pág. 11). De acuerdo al informe Brundtland presentado por Naciones Unidas, la construcción es el responsable del 39% de las emisiones de CO₂ en la atmósfera, de daños e impactos paisajísticos y ambientales en cada territorio del mundo (ONU, 1987).

Si bien las edificaciones son una necesidad imperante, estas pueden reducir sus impactos ambientales durante todo su ciclo de vida. Con el propósito de cambiar el nivel de impacto que estas tienen en el ambiente y en los seres humanos, existen alternativas de aprovechamiento de residuos de industrias o actividades económicas. Un tipo de residuo aprovechable es el material orgánico proveniente de los cultivos de áreas sembradas en zonas agrícolas y otros residuos aprovechables son los que se generan en las obras constructivas, llamados RCD, permitiendo su reincorporación a la economía circular y fomentando la cultura de consumo y disposición final responsable y sostenible. Así que realizando construcciones sostenibles se puede reducir en una edificación un 30% menos de energía, un 35% menos de carbono, de un 30%-50% menos de agua y una reducción de

50%-90% en costos de tratamiento de residuos (CAMACOL, 2019). Esto es posible mediante la aplicación de las 3R: Reducir, Reutilizar y Reciclar, también expuestas en la Figura 1:

Figura 1. 3R Aprovechamiento RCD



Fuente: Conoma.org 2021

Y, por último, a través del aprovechamiento también es posible valorizar los residuos, empleando materiales reciclados en nuevos productos de construcción (eco-productos) y comercializarlos para producir más ingresos.

Esto es lo que se propone en esta investigación, generar nuevas alternativas de aprovechamiento que mitiguen impactos negativos de la construcción que perjudican a los seres humanos y sus ecosistemas. Esto es posible a través de un diagnóstico de la situación actual de los RCD en la ciudad de Neiva, el cual permite conocer las alternativas de aprovechamiento óptimas según las condiciones actuales, generaciones y necesidades de la ciudad, para posteriormente poder aplicarlas en la elaboración de distintos diseños de mezclas que permitan evidenciar la viabilidad o no de aplicar estas alternativas en donde se reemplace de manera gradual materia prima natural por material reciclado. Finalmente, para conocer su aplicabilidad en el sector de la construcción, se evalúan mecánicamente los eco-concretos, se analizan sus resultados y se elige un concreto ecológico como prototipo final para aplicarlo en un elemento constructivo.

Preliminares

1.1 Problemáticas de la Investigación

- Los impactos negativos que produce a los ecosistemas y a la salud de las personas la producción del Clinker como componente principal del cemento.
- Los impactos ambientales, sociales y paisajísticos negativos ocasionados por la inadecuada disposición de los RCD en la ciudad de Neiva.

1.2 Planteamiento del problema

El sector de la construcción suple necesidades de infraestructura básicas como las de vivienda, creación de espacios de recreación, de prestación de servicios, entre otros espacios necesarios para el bienestar y desarrollo saludable del ser humano, sin embargo, este sector ha traído consigo otras necesidades como la adecuada gestión de los materiales utilizados dentro de sus procesos constructivos y de los residuos que se generan durante los mismos.

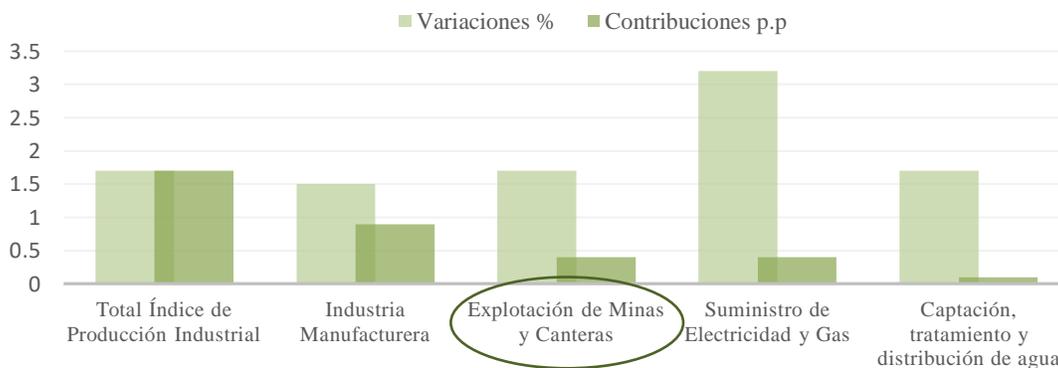
Uno de los materiales utilizados en los procesos constructivos a nivel mundial es el concreto. Particularmente en Colombia la producción de concreto pre mezclado tuvo un volumen de 4.785,6 m³ desde enero hasta noviembre del 2020 según datos registrados por el DANE (2020) de los cuales 2.323,1 m³ fueron destinados para Vivienda, 1.280,1 m³ para Obras civiles, 1.1150,7 m³ para edificaciones y 31,7 m³ para otros usos. Esto evidencia la demanda del material constructivo y por ende la necesidad del uso de los recursos naturales para producirlo.

Esta utilización de los recursos naturales genera impactos ambientales que inicialmente se producen en los lugares en donde se extrae la materia prima para la elaboración de los

materiales constructivos, posteriormente durante el desarrollo de las obras se generan afectaciones en los suelos en donde se desarrollan dichos procesos y se establece la edificación misma y por último, el desarrollo de las actividades constructivas va generando residuos conocidos como RCD, los cuales generan daños ambientales, paisajísticos y sociales debido a su disposición final.

Un estudio que evidencia la utilización de los recursos naturales para la elaboración de materiales constructivos es el Índice de Producción Industrial (IPI) publicado por el DANE (2019) en donde se muestra que la explotación de minas y canteras aporta significativamente a la producción industrial total del país, aportando 0,4 p.p. (puntos porcentuales) a la variación porcentual anual del año 2019, siendo la segunda industria con mayores variaciones y contribuciones porcentuales como se muestra en la Figura 2:

Figura 2. Variación Porcentual Anual del Índice de Producción Industrial 2019



Fuente: DANE 2019

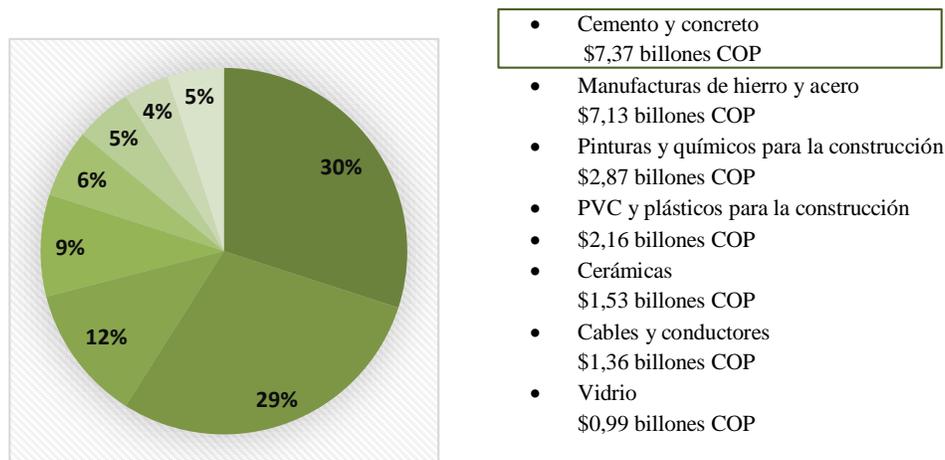
Lo que esto significa es que la explotación de minas y canteras es una actividad constante en Colombia, pues a través de esta actividad se extraen los materiales pétreos, dentro de ellos los áridos que sirven para la elaboración de materiales constructivos. Los áridos

granulares están clasificados en gruesos, finos y limos y los dos primeros cumplen un papel importante a la hora de darle homogeneidad, flexibilidad y resistencia a los materiales constructivos según los requerimientos edificatorios.

Para la utilización de los áridos se debe realizar los procesos anteriormente mencionados de extracción de materia prima en fuentes hídricas que, en el mejor de los casos, cuentan con licencias ambientales expedidas por las corporaciones autónomas regionales, sin embargo, también se presentan casos de ilegalidad, lo que en ambos casos representaría impactos ambientales, generando afectaciones en fuentes de agua, en los seres vivos desarrollados en ellas y en el entorno donde se ejecutan dichos procesos extractivos.

Estas afectaciones a nivel ambiental aumentan con el incremento de demanda de materiales constructivos, de tal forma, se evidencia en la Figura 3. que el concreto, junto con el cemento, son el principal segmento de la industria de materiales de construcción en el país, ya que generan aproximadamente \$7,37 billones COP anuales (Bogotá, 2019).

Figura 3. Principal segmento de materiales para la industria de la construcción.



Fuente: Invest in (Bogotá, 2019)

Este segundo material mencionado: el Cemento, es uno de los materiales que genera grandes impactos a los ecosistemas y a la salud de los seres humanos. Según las Estadísticas de Cemento Gris (ECG) del DANE (2020), existió una producción de 11.848,6 ton de cemento gris a nivel nacional en el año 2020. Además, se encontró que el departamento del Huila sobresalió de los demás departamentos pues tuvo un porcentaje de 26,8% de despacho de cemento gris a nivel nacional con relación al año 2019.

Esto evidencia los altos índices de requerimientos de material y las altas cifras de su producción están relacionadas a los grandes impactos que produce, como los que se generan en el proceso de producción del Clinker. Este material es el más importante en la elaboración del cemento y es el encargado de dar la resistencia al concreto, pero también es el encargado de producir daños al medio ambiente y a las personas. En la Tabla 1. Se exponen las afectaciones causadas a la salud de las personas a raíz de su producción:

Tabla 1. Identificación de los peligros del Clinker.

Clases de Peligro	Categoría de Peligro	Indicación de Peligro
Irritación cutánea	2	H3:15 provoca irritación cutánea
Daño ocular grave / Irritación ocular	1	H3:18 provoca lesiones oculares
Sensibilizante cutáneo	18	H3:17 puede provocar una reacción alérgica en la piel
Toxicidad sistémica específica órgano Diana (Exposición única)	3	H335: puede irritar las vías respiratorias

Fuente: *LafargeHolcim España SAU 2018*

Adicionalmente, también produce daños a los ecosistemas, como por ejemplo la gran erosión que se produce en las canteras por la extracción de la piedra caliza, entre otras materias primas, el material particulado que genera su producción y demás emisiones de contaminantes químicos en el aire, en el suelo y en recursos hídricos como posibles contaminaciones de aguas subterráneas si se depositan los residuos de estos procesos en sitios inadecuados. Posterior a la extracción de materias primas, estas se muelen y se pasan a hornos que deben realizar procesos de combustión a altas temperaturas de aproximadamente 1.450 °C (CEMEX, 2020) para producir debidamente el Clinker, lo que significa un alto consumo energético y, por ende, grandes emisiones de CO₂.

Lo anterior expuesto muestra la problemática de la utilización de recursos naturales para la producción del concreto y se evidencia, no solo los daños ambientales y sociales

que se generan si no también la necesidad de implementar adecuadas y mejores gestiones de la producción de los materiales constructivos.

Adicional a esto, como se menciona en el inicio de la problemática, no solo basta con implementar adecuadas o mejores gestiones en la producción de materiales constructivos para reducir los impactos negativos, del mismo modo es necesario implementar mejores gestiones con los residuos que se emiten durante y después de las obras.

De esta manera otra problemática generada a raíz del sector de la construcción son los RCD. Estos residuos generados a partir de procesos constructivos se establecen en tres principales clasificaciones: Residuos de Excavación, de Construcción y de Demolición. Lastimosamente, estos residuos no siempre terminan en sitios de disposición final autorizados, de esta manera se generan daños paisajísticos, ambientales e incluso sociales, provocando no solo incomodidad a los residentes cercanos a las disposiciones, incluso se puede presentar aumento de inseguridad en la zona. Dentro de dichos impactos se encuentra la utilización de los recursos hídricos. El DANE (2018) explica que en el año 2018 “el volumen de agua utilizado se incrementó en 1,4% con respecto al año 2016, este comportamiento se asocia principalmente al incremento en la producción” (pág. 26). Quien encabeza los mencionados incrementos en la producción del país es precisamente el sector de la construcción (DANE, 2020). Asimismo, el DANE (2018) señala que en comparación con el año 2016, en el 2018 las industrias relacionadas a la producción de minerales no metálicos incrementaron el consumo del agua dentro de sus procesos en un 9,5% y sus vertimientos de agua incrementaron en un 33,1% (págs. 27-28), debido al aumento de

demandas constructivas en Colombia, generando beneficios edificatorios y de empleo, pero también altos costos ambientales.

En este contexto de disposición final se desarrollan dos problemáticas: La falta de control municipal que se evidencia en el vertido incontrolado ilegal de los RCD en lotes baldíos o incluso en áreas concurridas de la ciudad, a pesar de que se han establecido políticas y normativas para evitar estas ilegalidades en cuanto a los RCD y la ausencia de aprovechamiento de los mismos para la creación de nuevos productos que mitiguen daños ambientales.

Las consecuencias que generan las problemáticas de la producción del Clinker y de la disposición final ilegal de los RCD son: contaminación visual generada por los daños paisajísticos en la ciudad debido a la invasión del espacio público, la contaminación del aire, suelo, recursos hídricos e impactos sociales como afectaciones a la salud humana, impedimento del desarrollo saludable de áreas en la ciudad para el disfrute de sus habitantes e inseguridad en entornos inmediatos a estas disposiciones. Incluso en el caso de las disposiciones legales, también se generan daños ambientales como “la pérdida de calidad edáfica en los suelos en los que se han acopiado residuos, aunque se retiren posteriormente” (De Santos, et al., 2011, pág. 23).

Dentro de las razones que provocan estas problemáticas están: la falta de cultura ciudadana, la falta de regularización por entes municipales ambientales y la falta de incentivos económicos para el reciclaje, puesto que “el precio de la gestión de RCD es muy bajo para su correcto tratamiento al existir un mercado ilegal más barato” (Tertre Torán, 2016, pág. 11).

Adicional a esto, el municipio de Neiva sigue creciendo urbanísticamente en zonas como el oriente y el sur de la ciudad, lo que por consecuencia significa más construcción, más materiales constructivos y más RCD que pueden ser gestionados de maneras ambientalmente correctas. Es por esto, que este trabajo investigativo propone soluciones a estas problemáticas ambientales, paisajísticas y sociales por medio de alternativas reales de aprovechamiento de los RCD y de material orgánico en la ciudad de Neiva mediante el diseño y evaluación de prototipos constructivos con material reciclado.

Por lo tanto, el propósito del presente trabajo es evaluar y diseñar técnicamente alternativas de aprovechamiento de RCD y de residuos de hoja de maíz en la fabricación de Eco-concretos en la ciudad de Neiva. Para esto, se pretende reemplazar cada material del concreto convencional por material alternativo en diferentes proporciones. Se busca reemplazar parte de los agregados gruesos y finos naturales por material reciclado en el concreto y sustituir una parte de material cementante del concreto por puzolana que proviene de la quema de material orgánico (hojas de maíz) producido en el municipio de Neiva.

1.3 Pregunta de Investigación

¿Cómo darles un adecuado manejo a los RCD y a los residuos de hojas de maíz a través de su aprovechamiento para la elaboración de Eco-concretos en la ciudad de Neiva?

1.4 Justificación de la Investigación

Partiendo de las dos problemáticas anteriormente mencionadas: La producción del Clinker como uno de los componentes principales del cemento para la elaboración de concretos y sus daños ambientales, sociales y paisajísticos, y la problemática de la

disposición final de los RCD, que genera impactos negativos al medio ambiente, particularmente en los suelos, produciendo daños paisajísticos en la ciudad, malos olores, contaminación de recursos hídricos e inseguridad; hacen que sea pertinente investigar sobre alternativas de aprovechamiento de los materiales utilizados en la elaboración del concreto convencional por materiales reciclados que sean más sostenibles con el medio ambiente y se produzcan a través de procesos no perjudiciales para con los seres humanos evitando sus impactos en el municipio de Neiva. Dichas alternativas se basan en dos tipos de implementaciones:

- La ceniza de hoja de maíz como material cementante
- El aprovechamiento de los RCD como reemplazo de los áridos gruesos y finos del concreto

En el caso del cemento, existen alternativas del material cementante como las cenizas de material orgánico. Dichas cenizas deben tener componentes de silíceos o aluminosilíceos dentro de su composición, para así poderse denominar puzolanas. Las puzolanas cumplen con la función de generarle resistencia al concreto cuando este material se pone en contacto con el agua. El material orgánico propuesto en esta investigación como alternativa de aprovechamiento proviene de las hojas del maíz. Este material se eligió considerando los estudios de evaluaciones agropecuarias municipales de MINAGRICULTURA (2017), la Encuesta Nacional Agropecuaria ENA realizada por el DANE (2018) y las evaluaciones agropecuarias del departamento del Huila publicadas por la Secretaria de Agricultura y Minería (2019), en donde se exponen los principales cultivos por área sembrada en el Huila y en Neiva, indicando que el maíz es el quinto cultivo que

más se produce en el departamento, teniendo en el año 2017 una producción de 24.961 hectáreas (ha) de 15.252 ha de área sembrada; de igual forma se expone que de todos los municipios del Huila, Neiva es quién más produce este cultivo transitorio (MINAGRICULTURA, 2017). Así mismo se indica que el Huila en el año 2018 obtuvo una producción de 46.305 ton de maíz amarillo, mostrándose como el tercer cultivo con mayores áreas cosechadas y mayores producciones en el departamento y como el segundo cereal con mayores áreas sembradas y mayor producción a nivel nacional (DANE, 2018). Convirtiendo al departamento del Huila en el primer semestre del año 2019 en el segundo departamento que más produce maíz amarillo en la región andina y el quinto departamento a nivel nacional con mayor producción (DANE, 2019).

Adicional a esto, para la selección de las hojas de maíz también se tuvo en cuenta la búsqueda y consulta de referentes investigativos relacionados a la implementación de puzolanas en concretos, en donde se identifica que las principales alternativas de aprovechamiento del cemento son la ceniza de cascarilla de arroz (CCA) y ceniza de la cascarilla de café (CCC), los cuales se ubican en los dos primeros puestos de los cultivos producidos por el departamento del Huila, sin embargo, en esta investigación se pretende experimentar con alternativas no tan conocidas pero con grandes producciones agrícolas en el departamento y en el municipio, para lograr obtener resultados diferentes y novedosos.

Otra razón para la elección de las hojas de maíz como material orgánico para la elaboración de concretos en reemplazo del material cementante, es que dichas hojas son de

fácil acceso. Estas pueden encontrarse en zonas o fincas agrícolas o en plazas de mercado a un precio muy asequible.

En cuanto al aprovechamiento de RCD, se proponen alternativas ecológicas debido a dos problemáticas importantes:

- La alta cantidad de generación en obras constructivas
- Los impactos ambientales, sociales y paisajísticos que se producen debido a su disposición final sin ningún tipo de aprovechamiento

Según la Resolución 0472 expedida por el mismo ente en el año 2017, se plantea que en los años posteriores a la expedición de esta resolución se deberá alcanzar como mínimo un 30% de RCD aprovechables, sin embargo CAMACOL (2019) señala que el aprovechamiento de materiales constructivos en el país como el cemento y el concreto solo se aprovechan en un 2%, demostrando que aún falta trabajar en alternativas de aprovechamiento de los RCD en Colombia.

Así que, como aporte al acatamiento de los dictámenes emitidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017), este trabajo investigativo pretende contribuir al cumplimiento de sus metas establecidas en la resolución 0472 con el fin de incrementar el aprovechamiento de los RCD, particularmente en la ciudad de Neiva.

Otro aporte adicional, es la viabilidad económica que hay en el aprovechamiento de los RCD, pues existen investigaciones que concluyen que para la elaboración de concretos “la diferencia económica entre la gestión tradicional y la gestión de aprovechamiento dio un 63% de ahorro” (Escandon Mejía, 2011, pág. 83), permitiendo disminuciones económicas y ambientales a quienes desarrollan obras constructivas. De forma semejante las

alternativas de aprovechamiento de los RCD también reducirían los gastos que se realizan para remediar o mitigar los daños ambientales efectuados en el país a raíz de las actividades industriales, como por ejemplo los gastos que se realizan para la protección y conservación del ambiente, que en el año 2018 se hicieron por un valor de \$ 572.036 millones de pesos, de los cuales, \$ 157.402 millones le correspondieron a la gestión de residuos en el país (DANE, 2018). Además, que, de forma similar, esta alternativa de aprovechamiento se puede considerar como una oportunidad económica en el aumento de empleo en el departamento del Huila el cual se encuentra dentro de los departamentos con los más altos índices de desempleo (DANE, 2020) ya que se ha demostrado que existió un aumento de un 10,2% de los pagos relacionados a personal que desarrolla actividades relacionadas a la protección medio ambiental en el año 2018 con respecto al 2016 (DANE, 2018, pág. 25).

Es por esto que es necesario llevar a cabo este proyecto, no solo porque da solución a problemáticas e impactos ambientales, sociales y paisajísticos, mitiga gastos en protección y conservación del medio ambiente pues ya no se efectuará del mismo modo la utilización de recursos naturales, disminuyendo la generación de residuos, sino que también es una oportunidad para generar mayores ingresos en el municipio de Neiva, pues el aprovechamiento de estos residuos a través de su reincorporación en la economía circular permite que exista un mayor flujo de ingresos en la ciudad y a partir de ello se cumple con el objetivo 3, 8, 11, 12, 13 y 15 de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) planteados por Naciones Unidas (ONU, 2015).

1.5 Objetivos de la Investigación

1.5.1 Objetivo General

Evaluar y diseñar técnicamente alternativas de aprovechamiento de RCD y de puzolana proveniente de residuos de hojas de maíz para la elaboración de Eco-concretos en la ciudad de Neiva.

1.5.2 Objetivos Específicos

1. Realizar un diagnóstico de la situación actual de la disposición final de los RCD en la ciudad de Neiva.
2. Caracterizar los materiales empleados en los diseños de mezcla.
3. Realizar distintos diseños de mezclas de concreto en donde se reemplace materia prima original por material reciclado.
4. Evaluar mecánicamente los diferentes diseños de mezclas efectuados.
5. Proponer y realizar un prototipo a partir de las mezclas de concreto ecológico diseñados para el uso adecuado de los RCD en la ciudad de Neiva.

1.5.3 Hipótesis

Los impactos negativos de la elaboración del cemento y de la inadecuada disposición de los RCD se verán reducidos al reemplazar parte del cemento por material puzolánico proveniente de las hojas de maíz y agregados naturales por agregados reciclados en el concreto.

2. Marco Teórico

2.1 Antecedentes

Los siguientes antecedentes están relacionados con investigaciones, libros, artículos, publicaciones, guías y lineamientos de la gestión integral de los RCD. Estas referencias tienen como motivante investigativo “la problemática generada por la escasez de materia prima cerca al núcleo urbano y el agotamiento de los sitios de vertido autorizados” (Castaño O, et al., 2013, pág. 2), además de los impactos ambientales y sociales que genera la producción de los materiales constructivos y posteriormente la falta de aprovechamiento de los residuos generados en obra. Así que es importante destacar que García (2019) señala que los residuos inertes (dentro de ellos los RCD) como restos constructivos, requieren una adecuada gestión que va desde su composición, sus lugares de proveniencia, sus procesos de producción, posteriormente su traslado, clasificación y concluyendo con su transformación mediante el reciclaje y valorización a través de su aprovechamiento, demostrando que es posible obtener beneficios debido a la reducción de impactos negativos ambientales y sociales. De la misma forma Páez Jiménez y Pacheco Bustos (2019) presentan a través de su guía para el manejo integral de los RCD, las actividades más susceptibles a la generación de RCD y su gestión integral mediante una metodología que permite realizar un correcto manejo ambiental de los mismos, enfatizando los puntos críticos dentro de los procesos necesarios de la gestión en la etapa de generación.

De forma semejante Castaño O, et al. (2013), plantean una guía aplicada al contexto ambiental de la capital colombiana con el fin de orientar “un adecuado proceso de manejo y transformación de los RCD, poniendo de manifiesto los problemas que se pueden generar

a fin de evitarlos, pues la segunda problemática relacionada con los RCD es su disposición final y dicha tarea está a cargo de los responsables de su generación y de los entes regulatorios municipales ambientales, lo que va en concordancia y además se complementa con la guía expuesta por la Secretaria Distrital de Ambiente (2014) en donde se proponen “estrategias para minimizar la disposición y maximizar el aprovechamiento de los RCD derivados durante la ejecución de proyectos constructivos” (pág. 9). Lo que amplía los conocimientos relacionados a estas problemáticas y soporta la propuesta de implementar medidas que mitiguen impactos, las cuales deben regirse desde la generación en la fuente y posterior aprovechamiento para elaboración de elementos ecológicos que se vuelvan a reincorporar en el sector de la construcción, para ello, las ciudades de Bogotá y Medellín se destacan como pioneras en estos procesos de reciclaje que se pueden llevar a cabo a través de instalaciones que permitan un adecuado manejo y control de los RCD, es por esto que es importante resaltar que la Alcaldía Mayor de Bogotá (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2020) al evidenciar que los volúmenes de RCD localizados en el distrito capital superan los promedios generados de residuos sólidos, realiza directrices sobre los requerimientos pertinentes para la inscripción y aprobación de un centro de aprovechamiento de RCD con el fin de obtener un mejor manejo ambiental por parte del sector de la construcción hacia estos residuos.

Conviene destacar dentro de un enfoque contextual puntual a Sandoval, et al., (2016) quienes estudiaron los RCD en la ciudad de Neiva y permitieron corroborar la viabilidad de realizar aprovechamientos debido a la evidencia de la gran cuantía de generación de

RCD en la ciudad, exponiendo que “existen aproximadamente 38 toneladas de escombros que tienen potencial reúso” (pág. 8).

De lo que se concluye que el aprovechamiento de los RCD no solo es una alternativa viable demostrada, sino que es necesaria para mitigar daños a causa de la extracción de materia prima de materiales constructivos y la posterior disposición de sus residuos generados en obra, ya que se está excediendo la generación de los volúmenes permitidos por los sitios de disposición final autorizados además de contaminar los territorios y afectar la salud de las personas.

2.2 Estado del Arte

El estado del arte se divide en cuatro segmentos que organizan la información obtenida y necesaria para el desarrollo adecuado de esta investigación, para ello se consultaron tesis, artículos investigativos y publicaciones relacionadas con:

- Cenizas de materiales orgánicos como material puzolánico para la elaboración de eco-cementos que faciliten la producción de eco-concretos.
- El uso de RCD en la elaboración del concreto.
- RCD y material puzolánico para elaboración de eco-concretos.
- **Cenizas de materiales orgánicos como material puzolánico para la elaboración de eco-cementos que faciliten la producción de eco-concretos**

Para este segmento resulta necesario mencionar a Matthey, *et al.* (2015) y a Prada y Cortés (2010) quienes investigaron sobre la aplicación de puzolana y agregado fino obtenida de un proceso agro-industrial para la fabricación de bloques en concreto y encontraron viabilidad en su aprovechamiento como sustitución del cemento. Sus

investigaciones aportan la estructura metodológica realizada para determinar la viabilidad de la aplicación de puzolana en el concreto, la forma en la que estructuran las pruebas y ensayos necesarios para llegar conclusiones verídicas y los diseños de mezcla realizados para obtener un producto final de calidad y que cumpla con las normativas correspondientes. También cabe destacar que aportan conocimientos sobre las temperaturas de combustión idóneas de las cascarillas de arroz, exponiendo que esta temperatura varía si la cascarilla está seca, con algún grado de humedad o está mezclada con combustibles, y da información sobre la humedad y el tiempo ideal para un adecuado proceso de combustión de este material orgánico para su posterior aprovechamiento.

A partir de entonces se ahondan en consultas sobre el material orgánico puntual a implementar en esta investigación, siendo las hojas de maíz la alternativa de aprovechamiento propuesta. Este material se eligió considerando estudios realizados por la Secretaria de Agricultura y Minería y por el DANE, en donde según la Encuesta Nacional Agropecuaria ENA (DANE, 2018) el departamento del Huila tuvo 17.762 ha sembradas de maíz amarillo y en la Tabla 2 se evidencia que de ellas obtuvo una producción de 46.305 ton, mostrándose como el tercer cultivo con mayores áreas cosechadas y mayores producciones:

Tabla 2. Cultivos con mayores áreas sembradas y mayor producción en el departamento del Huila.

Tipo de Cultivo	Cultivo	Área cosechada (ha)	Producción (ton)
Agroindustriales	Café	135.563	152.819
Agroindustriales	Caña Penela	10.447	53.098

Agroindustriales	Cacao	7.278	7.148
Tubérculos y Plátano	Plátano	8.280	83.529
Tubérculos y Plátano	Yuca	897	1.143
Cereales	Arroz Mecanizado	32.677	120.029
Cereales	Maíz amarillo	17.762	46.305
Cereales	Maíz Blanco	3.345	14.391
Hortalizas y legumbres	Frijol	9.834	12.056
Hortalizas y legumbres	Fruto	915	27.578
Hortalizas y legumbres	Tomate	184	1.726
Hortalizas y legumbres	Hoja	11	68.8
Hortalizas y legumbres	Arveja	310	1.104
Hortalizas y legumbres	Cebolla Rama	16	57

Elaboración Propia - Fuente: DANE 2018

Siendo el maíz, el segundo cereal con mayores áreas sembradas y mayor producción en el país en 2018 como se expone en la Tabla 3.

Tabla 3. Total cereales a nivel Nacional en el año 2018.

Cultivo	Área Sembrada (ha)			Producción (t)		
	Hectáreas	Cve	IC95%±	Toneladas	Cve	IC95%±
Total Cereales	929,651	8,4	153,816	4,341,107	10,1	856,617
Arroz Manual	21,961	15,6	6,707	59,761	19,8	23,129
Arroz Mecanizado	504,707	13,9	137,061	2,885,098	13,6	769,436
Cebada	4,412	40,1	3,466	10,004	41,8	8,196
Maíz Amarillo	297,340	9,2	53,568	974,329	14,8	283,050

Maíz blanco	96,608	17,2	32,527	404,039	25,0	197,566
Trigo	3,388	18,4	1,221	6,399	17,4	2,185
Otros Cereales	1,234	28,4	688	1,476	25,8	746

Fuente: Encuesta Nacional Agropecuaria ENA –DANE 2018

Y en la Tabla 4 se observa que en el primer semestre del año 2019 el departamento del Huila tuvo una producción de 30.402 ha siendo el segundo departamento que más produce maíz amarillo en la región andina y el quinto departamento a nivel nacional con mayor producción (DANE, 2019):

Tabla 4. Producción (ton) de maíz amarillo del Huila en el primer semestre del año 2019.

Región	Total Producción	
Departamento	Toneladas (t)	Cve
Total Nacional	448,928	11,2
Total Región Andina	133,565	18,8
Antioquia	2,862	37,4
Boyacá	5,154	17,5
Caldas	202	-
Cundinamarca	22,311	23,4
Huila	30,402	57,9
Norte de Santander	1,710	27,9
Quindío	1,576	83,3
Risaralda	539	18,7
Santander	17,446	30,7
Tolima	51,365	31,4

Fuente: Encuesta Nacional Agropecuaria – DANE 2019

De forma semejante, las evaluaciones agropecuarias realizadas en el año 2019 en el departamento del Huila publicadas por la Secretaria de Agricultura y Minería (2019),

exponen en la Tabla 5. que, dentro de las evaluaciones de cultivos transitorios, el maíz es el segundo cultivo con mayores áreas sembradas y mayor producción, teniendo como antecesor al arroz dentro de los transitorios y al cultivo de café en los cultivos permanentes.

Tabla 5. Consolidación agrícola para cultivos transitorios semestre A/2019, B/2019

Cultivos	Evaluación Definitiva Semestre A/2019				Semestre B/2019		
	Área Sembrada (ha)		Producción (t)		Área		Produc. Esperada (Ton)
	Sembr. (Ha)	Cosech. (Ha)	Produc. (Ton)	Rendim. (T/Ha)	Sembr. (Ha)	Cosech. (Ha)	
Algodón	763	763,0	2,598,5	3,41	0,0	0,0	0,0
Arroz Riego	14,857,0	18,067,0	133,921,9	7,41	17,955,0	14,857,0	114,689,4
Arveja	713,0	680,0	3,604,0	5,30	687,0	676,0	3,683,6
Ahuyama	378,0	366,0	5,364,5	14,66	317,0	317,0	4,476,0
Cebolla Cab.	55,5	55,5	443,5	7,99	52,4	52,4	441,7
Frijol Tecnif.	8,153,0	8,009,0	11,112,3	1,39	7,257,0	7,220,0	10,135,9
Frijol Tradic.	3,279,0	3,233,0	2,115,0	0,65	3,250,0	3,200,0	2,110,7
Habichuela	379,0	376,0	2,075,6	5,52	369,0	351,5	2,095,3
Hortalizas	1,035,0	1,026,0	4,891,4	4,77	735,5	647,0	3,121,7
Maíz							
Tec.Blanco	2,147,0	2,142,0	10,033,3	4,68	2,348,0	2,332,0	10,857,9
Maíz							
Tec.Amarillo	4,903,0	4,792,0	23,559,0	4,92	4,777,0	4,764,0	23,291,0
Maíz,							
Trad.Blanco	3,281,0	3,265,0	5,124,2	1,57	3,421,0	3,410,0	5,395,7
Maíz							
Trad.Amarillo	6,896,0	6,846,8	11,637,1	1,70	7,492,0	7,486,0	12,830,6

Fuente: Secretaria de Agricultura y Minería (2019)

Además de la información consultada anteriormente sobre las hojas de maíz como reemplazo del cemento, se revisa bibliografía en donde se encuentra a Fernández R. (2009), quién demuestra que la aplicación de cenizas de hojas de maíz como puzolana para concretos es viable y además demuestra resultados positivos para la resistencia de concretos estructurales, reemplazando porcentajes graduales del cemento por esta puzolana y orienta esta investigación en cuanto a la metodología y fases de elaboración de los procesos de recolección, secado e incineración. De igual forma la investigación de Shakouri, et al., (2020) resalta la importancia del pretratamiento del rastrojo de las hojas de maíz como sustitución del cemento para obtener mejores resistencias en los eco-concretos, demostrando que el tratamiento previo antes de la combustión “aumenta el contenido de SiO₂ de la ceniza y reduce el contenido de Cl y K₂O, la pérdida por ignición y el tamaño medio de partícula.” (pág. 2). Y por otro lado, D.A. Adesanya, (1996) concluyó a raíz de su investigación sobre la implementación de cenizas de hojas de maíz como puzolana en concretos reciclados que con la sustitución del 20% de cemento por estas puzolanas (CCA) se mejora la absorción de agua y la durabilidad de las probetas, evidenciando que no existe una diferencia significativa entre la resistencia del concreto producido con 0.0 y 20.0% de CCA (pág. 2)

-RCD en la elaboración del concreto

Cruz Veloza y Gómez Rodríguez (2013) investigan, evalúan y demuestran que al incorporar agregado grueso reciclado en la elaboración de concretos se evidencia una disminución de la resistencia a la compresión de un 12% en comparación con concretos

convencionales (pág. 97), también se concluye una disminución de solo un 4% en la resistencia a la flexión en concretos de edades de 28 días, señalando que el proceso de curado juega un papel importante a la hora de los resultados. Y a modo de cierre, indican que para sustituciones de 30% de áridos naturales por áridos reciclados no se ve afectada su resistencia sin embargo no se recomienda su utilización en ambientes marinos (pág. 99). Del mismo modo Mateus Ramírez y Gelves Peña (2020) analizan resultados positivos de referentes adicionales como Restuccia, *et al.* (2016) y Fernández Ledesma (2016), quienes incorporan RCD en morteros, pero a partir de la sustitución de agregado fino, en donde se evidencia que es posible obtener resultados mínimos de reducción en “resistencia a la compresión y a flexión de aproximadamente el 9%, en energía de fractura 6% y al mismo tiempo se presenta aumento en el módulo de elasticidad de aproximadamente 10% con respecto a la muestra estándar de mortero” (pág. 92). Estos autores hacen posible dichas evaluaciones mecánicas a través del análisis de las propiedades de los agregados reciclados, su clasificación según la resistencia a obtener, las propiedades de los concretos reciclados, caracterizaciones mecánicas de las muestras o aplicación de softwares que permiten comparar resultados de ensayos en laboratorio de los agregados naturales por los agregados reciclados, lo que significa un gran aporte en la presente investigación pues señalan los parámetros necesarios como punto de partida teórico y práctico a la hora de la preparación de materiales “para mejorar la calidad del agregado reciclado y sus resultados de resistencia” (pág. 92) y posterior dosificaciones de las muestras definiendo niveles de sustitución apropiados, sugiriendo la posibilidad de sustituir de un 25% a un 50% de agregados reciclados para la elaboración de concretos estructurales (Cruz Veloza & Gómez

Rodríguez, 2013, págs. 44-45) “sin que sus propiedades puedan verse afectadas significativamente” (Mateus Ramírez & Gelves Peña, 2020, pág. 94) en las sustituciones de hasta 35% de agregados reciclados (pág. 101).

A nivel internacional se encuentra que Puente de Andrade, et al., (2020) encontraron una problemática a raíz del aprovechamiento de agregados gruesos de los RCD pues identificaron que durante el proceso de obtención de estas granulometrías gruesas se generaba una gran cantidad de agregado fino reciclado; a partir de ello diseñaron mezclas con diferentes porcentajes de agregado fino de RCD en la preparación de concretos y concluyeron que este tipo de concretos reciclados o eco-concretos con agregados finos “pueden alcanzar valores de resistencia a la compresión iguales al concreto convencional” (pág. 2) con reposiciones de un 25% de agregados reciclados sin presentar diferencias significativas con los concretos convencionales, observando que a pesar de que estos eco-concretos fuesen más porosos a raíz de la alta adherencia que tienen los áridos reciclados, aun así fuese posible la obtención de resultados de resistencia a la compresión positivos para la elaboración de concretos estructurales.

-RCD y material puzolánico para elaboración de eco-concretos

En cuanto a investigaciones similares a la presente en desarrollo, se encontró que E. Anastasiou, et al. en el (2014) investigaron alternativas de aprovechamiento para el cemento y los áridos en la elaboración de concretos. Se realizaron varias mezclas con diferentes combinaciones de materiales alternativos dentro de los cuales se utilizó: aglutinantes de cenizas volantes y agregado fino de RCD como reemplazo del cemento y escoria de acero como reemplazo del agregado grueso del concreto, esto con el fin de

identificar la viabilidad de incorporar el máximo aprovechamiento de materiales alternativos en la producción del concreto. Los resultados demostraron que, al implementar residuos mixtos de construcción y demolición como agregados finos, aumenta la porosidad en el concreto y también reduce la resistencia y durabilidad, pero al incorporar el agregado de escoria de acero se evidencia que se recupera parcialmente la pérdida de resistencia y durabilidad. Y de la misma manera se evidencia un alcance de una resistencia a la compresión de 30 MPa a 28 días dando como resultado un concreto de resistencia adecuada y considerables ganancias ambientales.

Además de incorporar material orgánico como puzolanas, también se han implementado los agregados finos de RCD como material cementante en la elaboración de concretos, y esta implementación surge a raíz de que C.F., Oliveira, et al., (2020) encontraron viable la fabricación de concretos reciclados a partir de la implementación de RCD como puzolanas que sustituyan porcentajes del cemento en un 15% y 25%, tratando previamente los RCD para convertirlos en puzolanas a través de trituraciones, tamizados y caracterizaciones de rayos X y pruebas de actividad puzolánica, utilizando partículas con un diámetro inferior a 0,15 mm; señalando que esta alternativa de aprovechamiento es amigable con el medio ambiente en la producción de cemento eco-eficiente pues tiene características similares con el cemento portland y no presenta grandes cambios en los módulos de elasticidad, resistencia a la tracción y micrografía de los concretos (pág. 2, 6)

2.3 Referentes Conceptuales

- **Aprovechamiento:** Toda actividad que busque la gestión adecuada de los RCD a través de la reutilización, reciclaje y revalorización con el propósito de reducir su disposición final. (Secretaría Distrital de Ambiente, Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2014, pág. 7).

- **Cemento:** Según CEMEX (2020), es el principal ingrediente del concreto premezclado. El cemento es un polvo fino que se obtiene de la calcinación a 1,450°C de una mezcla de piedra caliza, arcilla y mineral de hierro. El producto del proceso de calcinación es el Clinker —principal ingrediente del cemento—, que se muele finamente con yeso y otros aditivos químicos para producir cemento.

- **Concreto:** “Es una mezcla de piedras, arena, agua y cemento que al solidificarse constituye uno de los materiales de construcción más resistente para hacer bases y paredes.” (ConceptoDefinición, 2021, p. 1).

- **Contaminación ambiental:** Es la presencia de agentes o componentes nocivos o peligrosos a corto, mediano o largo plazo que afectan el entorno ecológico y el ambiente, provocando también daños a los seres vivos que hagan parte de dichos entornos.

- **Eco-materiales:** Son materiales de bajo impacto ambiental mitigando daños a los ecosistemas a través de su elaboración con elementos de bajo costo ambiental o reciclados que provengan de procesos sencillos y sostenibles.

- **Eco-concreto / Concreto Verde:** Es un concreto que mitiga los impactos ambientales generados a raíz de su producción a través de la implementación de alternativas de materiales reciclados que aporten a la sostenibilidad generando bajos costos ambientales.

- **Economía circular:** El DANE (2020) indica que es un sistema de producción y consumo que promueve la eficiencia en el uso de los recursos naturales, particularmente en el uso de agua, energía y los materiales utilizados para las demandas y necesidades humanas, siempre y cuando estos usos o extracciones a los ecosistemas no sobrepasen la capacidad

- **Elemento constructivo:** Componente, material o parte física que esta adecuada para ser utilizada dentro de una obra constructiva. Se clasifica en dos tipos: elemento constructivo estructural y elemento constructivo no estructural.

- **Elemento constructivo estructural:** Componente, material o parte física diseñada para soportar cargas altas dentro de la obra de construcción en la que se adecúe.

- **Elemento constructivo no estructural:** Componente, material o parte física diseñada para el embellecimiento de espacios interiores y exteriores de una edificación, funcionando como decoración y acabados de una estructura, estos no soportar cargas altas dentro de la obra de construcción en la que se adecúe.

- **Ensayos mecánicos:** Según SCI (2021) sirven para comprobar cuál es la respuesta que ofrecen ciertos materiales al ser manipulados. Mediante distintos esfuerzos mecánicos se fuerza al límite el material. De esta forma podemos comprobar cuál es la resistencia que presentan.

- **Fachaleta:** Es un ladrillo decorativo que tiene acabado de piedra natural “con una diversidad de texturas y diseños confiere profundidad y dinamismo. Debido a su acabado rústico y volumen transmite naturalidad en los diferentes espacios interiores como exteriores.” (Decorcerámica, 2021, p. 1)

- **Gestión ambiental:** Son estrategias o procesos que incentivan o promueven a resolver, disminuir o prevenir las problemáticas medioambientales con el fin de aplicar la sostenibilidad.

- **Impacto ambiental:** Es la alteración, cambio o modificación que realiza el ser humano a través de sus acciones hacia el medio ambiente, afectándolo de algún modo positiva o negativamente.

- **Prototipo:** Es el modelo piloto de la creación de algo, como, por ejemplo, alguna forma, figura, producto, entre otros. de los mismos para regenerarse y el uso circular de los flujos de materiales a través de nuevas tecnologías mediante mejoras o nuevos modelos de negocio y apoyos entre actores que promuevan la sostenibilidad.

- **Puzolana:** Según ARGOS (2020), es un material silíceo o silico-aluminoso, que por sí solo posee poco o ningún valor cementante, pero que finamente dividido y en medio húmedo a temperatura ordinaria, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio, formando un compuesto con propiedades cementantes. Se emplea en la fabricación de cemento como adición al clínker para obtener cemento con puzolanas o como sustitución del contenido requerido de cemento en algún determinado tipo de concreto.

- **Residuos de construcción y demolición RCD:** Los sobrantes de las actividades de demolición, excavación, construcción y/o reparaciones de las obras civiles, o de otras actividades conexas complementarias o análogas, son conocidos como los RCD. (Secretaría Distrital de Ambiente, Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2014, pág. 12). Los RCD son materiales de desecho, generados en las actividades de construcción, demolición

y reforma, de edificaciones, obra civil y espacio público. (Castaño O, Misle, Lasso, Gómez, & Campo, 2013, pág. 2).

- **Reciclaje:** Proceso realizado por gestores especiales sobre los residuos generados, cuyo objeto es la transformación de éstos en insumos para el sector de la construcción. (Secretaria Distrital de Ambiente, Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2014, pág. 8).

- **Reutilización:** Acción de darle un siguiente uso a los residuos generados de las actividades de demolición, excavación y construcción, para efectos de alargar su ciclo de vida. (Secretaria Distrital de Ambiente, Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2014, pág. 8).

- **Revestimiento:** Son los elementos constructivos que se yuxtaponen sobre una pared como terminación decorativa y protección de los muros contra la intemperie, además de generar uniformidad visual en determinada zona de una edificación, generando estética y ambientes con acabados esbeltos.

3. Marco Contextual

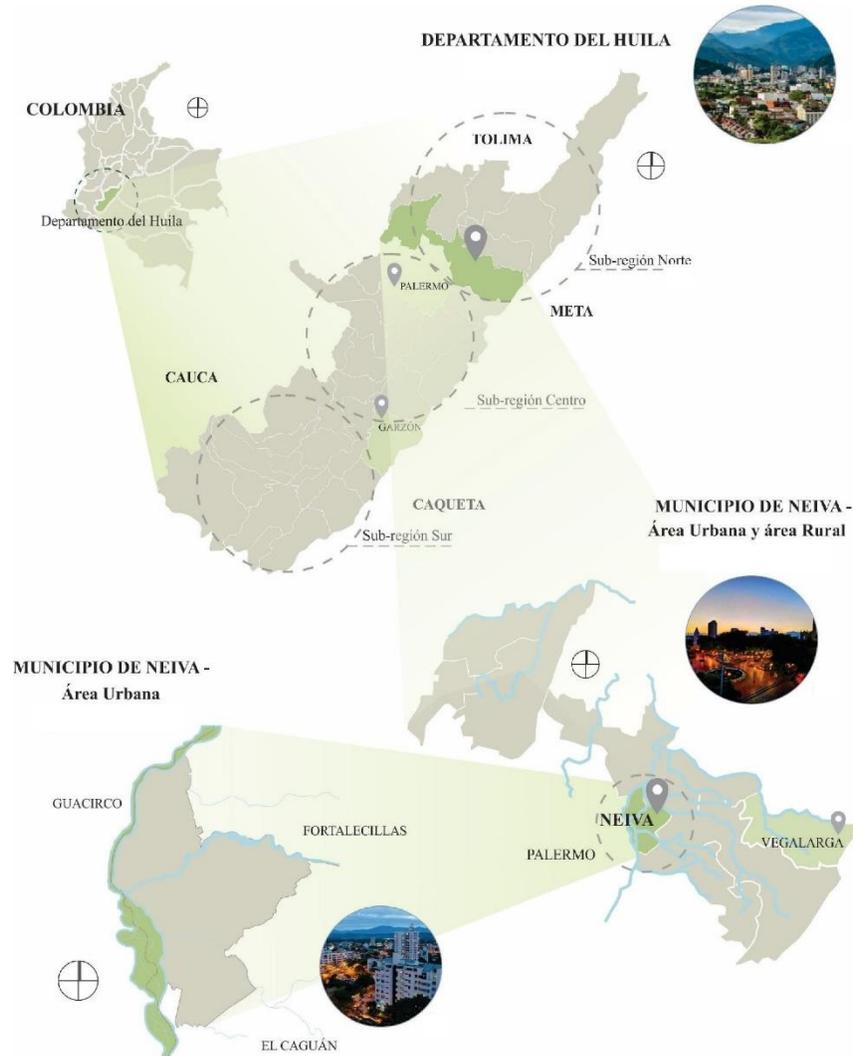
3.1 Localización

La presente investigación se realiza en el Municipio de Neiva, capital del departamento del Huila, Colombia. La superficie del municipio de Neiva es de 146 800 hectáreas / 1468,00 km², está a 442 metros de altitud. En sus coordenadas geográficas se encuentra: latitud: 292504, longitud: -75.2897, Latitud: 2° 55' 30" Norte, longitud: 75° 17' 23' Oeste y dentro de sus municipios vecinos están: Rivera, Campoalegre, Aipe, Santa María, Yaguará, Íquira, Palermo, Teruel, Hobo, Tello, Villavieja, Baraya, Algeciras. (Municipio de Neiva, 2018)

También se involucran en la investigación dos zonas aledañas a la ciudad correspondientes a las zonas perimetrales de Neiva, específicamente: en la vereda La Jagua ubicada cerca a la vía Neiva – Tello en el Municipio de Neiva, donde se localiza el relleno sanitario los Ángeles, al igual que la planta de triturados El Pacto y el Kilómetro 5.3 de la vereda El Centro sobre la vía Neiva - Vegalarga al este del Municipio de Neiva, en el cual se ubica la escombrera La Estrella. La razón de esta relación entre la ciudad y estos tres puntos corresponden a la ubicación de disposición final de RCD autorizados por el municipio, los cuales son: Los Ángeles, El Pacto y La Estrella, quienes cuentan con las pertinentes licencias ambientales emitidas por la Corporación del Alto Magdalena (CAM). La investigación involucra también aquellos emisores de RCD y estos, se desarrollan dentro de la ciudad de Neiva por medio de construcciones que son previamente solicitados sus permisos por medio de la modalidad de actuaciones de licencias urbanísticas aprobadas emitidas por las Curadurías Urbanas las cuales se sitúan en el centro de la ciudad.

En la Figura 4 se localiza el Municipio de Neiva:

Figura 4. Localización del Municipio de Neiva, Huila.



Fuente: Propia 2021

3.2 Normativa

Se realizan dos tabulaciones de normativas. En la Tabla 6. Se muestran las normativas relacionadas al servicio público de aseo y a la gestión de los RCD en Colombia. En la Tabla 7. Se muestran las normativas relacionadas a los requerimientos exigidos por Normas Técnicas Colombianas para la elaboración y ensayo de elementos constructivos.

Tabla 6. Normativa relacionada al servicio público de aseo y gestión de los RCD en Colombia

Normativa	Temática
CONPES 3874	Política Nacional para la Gestión de los Residuos Sólidos
Ley 1259 de 2008	Creación de un comparendo ambiental para incentivar la cultura ciudadana relacionada con el manejo adecuado de los residuos sólidos y escombros; Creación de sanciones pedagógicas y económicas a todos aquellos (personas naturales o jurídicas) que infrinjan las normatividades existentes en las cuales se involucren los residuos sólidos y escombros.
Decreto 586 de 2015	Se busca implementar un modelo sustentable para la gestión de RCD, logrando articular los planes de gestión, la reutilización y/o tratamiento, dando como resultado el desarrollo de nuevos productos y materiales que se re integren a los ciclos productivos y económicos.
Decreto 548 de 2015	Orienta la política para la gestión integral de los Residuos Sólidos PGIRS en Bogotá, con el fin de minimizar los impactos ambientales a causa de los residuos.
Decreto 2981 de 2013	Se establecen las medidas para la prestación del servicio de aseo en Colombia. Presenta la clasificación y el aprovechamiento de los residuos sólidos, incluidos los residuos generados por obras civiles.

Decreto 0951 de 2013	Se adopta la reformulación del Plan de Gestión integral de Residuos Sólidos (PGIRS) del Municipio de Neiva. Dentro de sus objetivos pretender “fomentar emprendimiento verde orientado a la creación de empresas transformadoras de residuos tradicionalmente reciclables (...) involucrando para ello al sector gremial y al sector universitario como dinamizadores del emprendimiento”. (Alcaldía de Neiva, 2013, pág. 4).
Decreto 838 de 2005	Incentivar y facilitar el adecuado diseño, construcción y desarrollo operacional de los sistemas de disposición final de residuos sólidos, mediante el relleno sanitario, estableciendo los procesos, criterios, metodologías, prohibiciones y restricciones para la implementación del equipamiento en los sitios susceptibles para el mismo, teniendo en cuenta las consideraciones técnicas y ambientales pertinentes.
Decreto 620 de 2007	Este Plan define las normas requeridas para las condiciones urbanísticas y arquitectónicas de los equipamientos e infraestructuras en las cuales se desarrolle el sistema general de residuos sólidos.
Resolución 472 de 2017	Reglamenta la gestión integral de los RCD generados por obras civiles. Indica conceptos relacionados con los RCD, al igual que todos los procesos, elementos y materiales que se ven implicados o que son necesarios para para poder comprender y realizar la

gestión adecuada de los residuos. Describe las actividades y procesos necesarios para hacer posible dicha gestión, desde la prevención de la generación de los RCD hasta su aprovechamiento y/o disposición final.

Resolución 715 de 2013	Es publicado por la Alcaldía Mayor de Bogotá y establece cuales son los RCD que no son susceptibles de aprovechamiento.
Resolución 932 de 2015	Expresa las obligaciones de los grandes generadores y poseedores de los RCD y especifica los aspectos que debe tener un adecuado Plan de Gestión de RCD, al igual que define los indicadores que permiten obtener un mejor control y seguimiento de los RCD.

Fuente: Propia 2021

Tabla 7. Normativa relacionada con requerimientos de NTC para la elaboración de elementos constructivos.

Normativa	Temática
NTC 77	Concretos. Métodos de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos
NTC 4076	Unidades de concreto para mampostería no estructural

NTC 4024	Prefabricados de concreto: Muestreo y ensayos
NTC 4026	Unidades de concreto para mampostería estructural
NTC 1377	Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio
NTC 2020	Cementos. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión.

Fuente: Propia 2021

4. Marco Metodológico

La metodología a seguir en este estudio se detalla a continuación:

4.1 Tipo de Estudio

Esta es una investigación tecnológica de tipo descriptiva, exploratoria – experimental y se desarrolla en la línea de investigación de ciudad y medio ambiente.

4.2 Técnicas de investigación

Las técnicas de investigación son documentales, de campo y experimentales, en donde se realizaron procedimientos de: recolección de información y obtención de materiales, análisis de datos, tabulaciones, gráficas granulométricas, físico-químicas y gráficas de resistencias, discusión de información seleccionada, resultados y conclusiones.

4.3 Fases de la Investigación

Se establece la metodología a implementar en la presente investigación, dicha metodología surge a raíz de investigaciones experimentales de la autora en la medida en la que, hacia salidas de campo, visitas a sitios donde estuviesen ubicados puntos de acopio de RCD, legales e ilegales, procesos exploratorios de materiales, además de la experiencia obtenida en procesos investigativos anteriores en relación a experimentaciones con RCD en la elaboración de concretos, lo anterior en conjunto con la búsqueda y consulta de diversas fuentes bibliográficas y de las cuales se exponen en la Figura 5.

Figura 5. Bibliografía utilizada como aporte a la metodología establecida en la presente investigación

Fuentes Bibliográficas	Aportes en la Presente Investigación
1. Suárez Silgado, et al., (2018)	Guía para la realización de la fase 1 y 2 de la metodología utilizada en la presente investigación (Búsqueda de información Bibliográfica y aplicación de encuestas para poder realizar un diagnóstico de la gestión de los RCD en Neiva)
2. Suárez Silgado, et al., (2019)	Guía para la realización de la fase 1 y 2 de la metodología utilizada en la presente investigación (Búsqueda de información Bibliográfica y aplicación de encuestas para poder realizar un diagnóstico de la gestión de los RCD en Neiva)
3. C.F., et al., (2020)	Aplicación de la fracción fina de los residuos de hormigón (concreto) (CW) en nuevos eco-concretos. Exploración a cerca de las puzolanas. Guía para la realización de la fase 3 de la metodología utilizada en la presente investigación, lo que se refiere a la Campaña Experimental (Obtención de materiales, caracterización

	granulométrica y química de los mismos, diseños de mezcla de concretos y morteros y evaluación mecánica de los mismos)
4. Puente de Andrade, et al., (2020)	Guía para la realización de la fase 3 de la metodología utilizada en la presente investigación, lo que se refiere a la Campaña Experimental (Diseños de mezcla con agregado fino reciclado producto de la trituración de los RCD)
5. Apaza Lazo & Salcedo Tejeda, (2019)	Guía para la realización de la fase 3 de la metodología utilizada en la presente investigación, lo que se refiere a la Campaña Experimental (tiempo de secado de las hojas de maíz, calcinación de las mismas y aplicación de la puzolana en eco-concretos)
6. Fernández R, (2009), Matthey, <i>et al.</i> (2015) y Prada y Cortés (2010)	Guía para la realización de la fase 3 de la metodología utilizada en la presente investigación, lo que se refiere a la Campaña Experimental (Obtención de las hojas de maíz, secado e incineración de las hojas de maíz)
7. Mateus Ramírez & Gelves Peña (2020)	Guía para la realización de la fase 3 de la metodología utilizada en la presente investigación, lo que se refiere a la Campaña Experimental (Caracterización física de los agregados: gradación, módulo de finura, porcentaje de humedad, densidad)
8. S.A Memon, et al., (2019)	Guía para la realización de la fase 3 de la metodología utilizada en la presente investigación, lo que se refiere a la Campaña Experimental (Caracterización de las cenizas de las mazorcas de maíz o rastrojos del maíz para obtener propiedades física y químicas de la puzolana)
9. Shakouri, et al., (2020)	Guía para la realización de la fase 3 de la metodología utilizada en la presente investigación, lo que se refiere a la Campaña Experimental (Temperaturas de combustión para las hojas de maíz: 600° a 700° C, Edades de curado

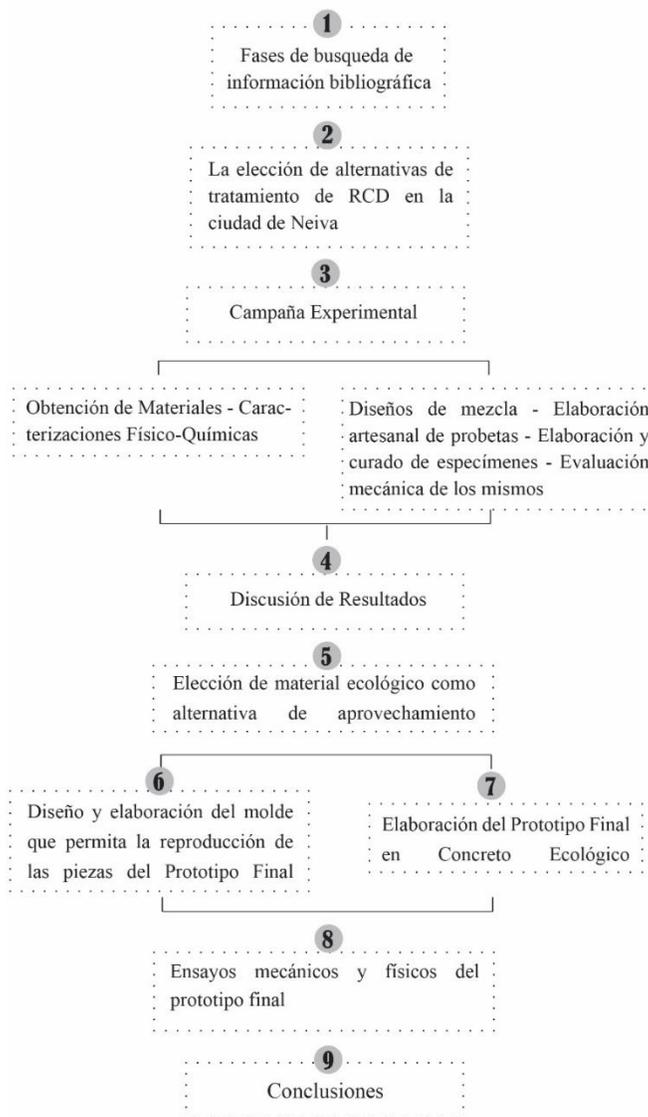
	de los especímenes para mejorar las resistencias de los eco-concretos: 112 días)
10. Proyecto presentado en la convocatoria interna de la UAN en el 2020-1, denominado "Evaluación bajo un enfoque multicriterio del uso de residuos en la producción de concreto" liderado por la Dra. Sindy Suárez Silgado.	Guía para la realización de la fase 1, 2, 3, 4 Y 5 de la metodología utilizada en la presente investigación, lo que se refiere a búsqueda de información bibliográfica y campaña experimental en relación a elaborar especímenes de concreto con diseños de mezcla estructurales y no estructurales, uso de puzolanas a partir de residuos agroindustriales como reemplazo del cemento dentro del concreto y su respectiva evaluación mecánica y físico-química.
11. Proyecto Investigativo realizado en convenio interinstitucional entre el SENA Tecnoparque Neiva y Cali, y la UAN sede Neiva, titulado: “Diseño y Construcción de Fachaleta Arquitectónica con material de residuos de construcción y demolición (RCD)” realizado por estudiantes y docente de la UAN e ingenieros del SENA (Ordoñez D, et al., 2020)	Guía para la realización de la fase 3, 4, 5, 6, 7 y 8 de la metodología utilizada en la presente investigación, lo que se refiere a la campaña experimental en relación a la obtención de materiales, procesos de trituración manual y tamizado, elaboración de diseños de mezcla, elaboración de probetas artesanales en PVC, la elección de material ecológico como alternativa de aprovechamiento, diseño y elaboración de un molde que permita la reproducción de piezas en concreto, elaboración de un elemento constructivo no estructural en concreto ecológico: Fachaleta, realización de ensayos mecánicos, cualitativos al prototipo final y discusión de resultados.

Fuente: Propia, a raíz de las fuentes guía que se mencionan en la tabla

Adicionalmente a los anteriores autores mencionados, se complementa la información expuesta en la metodología con los autores previamente mencionados en los antecedentes y en el Marco Teórico del presente proyecto investigativo (Pag.16-26). A partir de lo

anterior se establece en su totalidad las fases de investigación definitivas, las cuales se detallan en la Figura 6:

Figura 6. Fases de la investigación.



Fuente: Propia 2021

4.3.1 Fase de búsqueda de información bibliográfica

Es indispensable la búsqueda de información acerca de la problemática de la generación de los RCD y de la producción del Cemento Portland. Para esto será necesario acudir a fuentes secundarias como investigaciones, artículos y libros, además, de la situación actual de las gestiones existentes sobre aprovechamiento a nivel regional y nacional. También efectuar consultas en bases de datos como Elsevier, Google Scholar, e-libro y lectura de documentación relacionada sobre gestión de RCD y la implementación de materiales reciclados en el concreto.

4.4 Elección de alternativas de aprovechamiento de RCD en la ciudad de Neiva

Para llevar a cabo la elección de alternativas de tratamiento de RCD en la ciudad de Neiva es necesario realizar un diagnóstico de la gestión de los RCD en la ciudad de Neiva, donde se expongan las estadísticas de ingreso de RCD durante el año 2019 y 2020 en el Relleno Sanitario los Ángeles, la Escombrera La Estrella y la planta trituradora El Pacto, con el fin de conocer la cantidad de RCD que ingresan a estas empresas, su tipología, el residuo predominante, su frecuencia de ingreso y el tipo de gestión dado. Para esto es necesario realizar encuestas a empresas constructoras de la ciudad.

La elección de las empresas se hizo teniendo en cuenta la base de datos de Empresas consultadas en la Curaduría 1 y 2 de la ciudad de Neiva y de empresas afiliadas a CAMACOL Huila, resultando alrededor de 40 empresas existentes.

Este diagnóstico se apoya en visitas de campo a sitios autorizados y clandestinos de disposición final de RCD en la ciudad de Neiva.

Para la fase de análisis de la información obtenida de las Empresas se grafican los resultados de las estadísticas de ingreso de RCD y de las encuestas enviadas a las empresas desarrolladoras de proyectos constructivos en la ciudad de Neiva para evidenciar el estado actual de los RCD.

Lo anterior, con el fin de realizar un adecuado diagnóstico mediante análisis comparativos, identificación de gestiones relacionadas a los RCD en la ciudad, tipos de RCD encontrados y por ende las demandas de materiales constructivos en el municipio.

A partir de la información obtenida descrita anteriormente, se plantean diferentes alternativas de aprovechamiento de estos residuos y la incorporación de materia prima secundaria para la producción de nuevos prototipos de concreto. Se eligen como posibles aplicaciones las que más se adecuen a las necesidades constructivas del municipio.

4.5 Campaña experimental

En la campaña experimental se realiza la obtención de los materiales necesarios para los diseños de mezcla y para la elaboración de las probetas en donde se vaciarán los eco-concretos, se caracterizan los materiales obtenidos, se elaboran los especímenes ecológicos y se evalúan las propiedades mecánicas de los prototipos elaborados. Para ello, se realizan los siguientes procedimientos:

4.5.1 Preparación de los materiales a emplear en la elaboración de las pastas

Los materiales a emplear en la elaboración de las probetas se presentan en la Tabla 8:
Tabla 8. Materiales necesarios para la elaboración de los diseños de mezcla de concreto

Materiales

Cemento

Arena de Río

Arena de excavación

Gravilla

RCD (Residuos de demolición)

Agua

Material Orgánico (Hojas de Maíz)

Aditivo

Fuente: Propia 2021

El Cemento Portland utilizado es de uso general tipo I, las hojas de maíz se recolectaron de una plaza de mercado de la ciudad de Neiva, se secaron previamente e incineraron para la elaboración de los diseños de mezcla de concreto ecológico puzolánico.

Los áridos naturales como la grava de 3/8" y la arena de río se obtuvieron del río Páez. El material reciclado (RCD) se obtuvo de una construcción de viviendas en el oriente de la ciudad. Los áridos se prepararon, mediante la trituración y filtrado de impurezas.

4.5.2 Caracterización química del material

Las caracterizaciones químicas se realizaron para la ceniza de la hoja de maíz y para el cemento. El ensayo realizado para ambos materiales fue el de Fluorescencia de Rayos X (FRX).

4.5.3 Caracterización granulométrica del material

Estos ensayos se realizaron para los áridos finos, áridos gruesos naturales y áridos reciclados y para el cemento a emplear en las mezclas de concreto.

4.5.4 Diseño de mezclas

En esta fase se diseñaron los diferentes diseños de mezclas en los que se busca reemplazar porcentajes de árido fino y árido grueso natural por áridos reciclados y porcentajes de cemento por ceniza de hoja de maíz.

4.5.5 Elaboración y curado de las probetas de concreto

Se elaboraron 24 probetas artesanales con tubos de PVC, de las cuales se fabricaron 48 especímenes de concreto según los diseños de mezcla efectuados, reutilizando las probetas artesanales que no habían perdido su forma después de los respectivos desmoldes, y posteriormente, los especímenes de concreto ecológico se sometieron a un proceso de curado en laboratorio durante 28 días donde se controló su temperatura entre 22 y 24°C y finalmente se ejecutaron los ensayos de compresión.

4.5.6 Propiedades mecánicas de los especímenes

Los eco-concretos se sometieron a ensayos de compresión con la finalidad de observar y comparar su comportamiento mecánico. Estos ensayos se realizaron mediante una máquina Universal de ensayos y siguiendo los lineamientos sugeridos en las normas ASTM C39.

Los resultados obtenidos en el estudio mecánico fueron analizados y contrastados con estudios efectuados en otras regiones o países y por otros autores en esta misma temática.

4.6 Elección de material ecológico como alternativa de aprovechamiento

Con base en los resultados mecánicos obtenidos se eligió el mejor diseño de mezcla con respecto al producto final a elaborar, con el cual, se realizó un prototipo acorde con la resistencia obtenida. Finalmente se realizaron ensayos mecánicos del producto final.

4.7 Diseño y elaboración de elemento constructivo ecológico (Prototipo Final)

Se elaboró un molde que permita la reproducción de las piezas del prototipo final. Este molde se fabricó de forma artesanal y a partir de él se creó el eco-producto elegido.

4.8 Ensayos Mecánicos del prototipo final

Obtenido el prototipo final, se le realizan los ensayos de pre fabricados de concreto no reforzados exigidos por la NTC 4024, con el fin de evaluar su viabilidad mecánica para que sea posible su incorporación en edificaciones colombianas. Los ensayos realizados fueron: absorción, densidad, flexión y ensayos cualitativos adicionales de corte.

4.9 Conclusiones

Los resultados de las fases anteriores fueron analizados, discutidos y contrastados con otros estudios efectuados dentro relacionados a la misma temática.

5. Desarrollo de Objetivos

5.1 Objetivo 1

El diagnóstico de los RCD en la ciudad de Neiva realizado en este trabajo investigativo, se dividió en dos etapas:

1. El estudio de las estadísticas de ingreso de RCD durante el año 2019 y 2020 en el Relleno Sanitario los Ángeles, la Escombrera La Estrella y la Planta trituradora El Pacto. Con el fin de conocer la cantidad de RCD que ingresaban a estas empresas, su tipología, el residuo predominante y su frecuencia de generación y recibimiento en dichas empresas.
2. La elaboración de un cuestionario destinado a las principales empresas desarrolladoras de proyectos constructivos en la ciudad durante el año 2020 quienes fueron los principales generadores de RCD, con el fin de conocer el manejo que le daban a los RCD dentro de sus procesos constructivos.

Este cuestionario fue elaborado través de los formularios de Google y enviado por medios electrónicos a dichas empresas, además de realizar visitas de campo a las mismas y contactar con ellas por vías telefónicas para solicitarles el desarrollo del mismo. Para la selección de las empresas a la cuales se les hizo el envío, se estudió información facilitada por la Curaduría Urbana de la ciudad de Neiva, sobre las empresas que solicitaron licencias urbanísticas relacionadas a actividades constructivas en el 2020 en la ciudad, de las cuales se seleccionaron 31 empresas. También se seleccionaron las empresas afiliadas a CAMACOL Huila. El cuestionario está constituido por 20 preguntas: 15 cerradas y 5

abiertas, todas relacionadas a la generación de RCD en obra, su clasificación, separación y reciclaje in-situ y posterior disposición final.

Selección de información

La información relacionada a las estadísticas de ingreso se obtuvo a través de entrevistas personales y por vía telefónica con los ingenieros encargados, directores o jefes de las tres principales empresas que reciben RCD en el Huila:

- Relleno Sanitario los Ángeles
- La Escombrera La Estrella
- La Planta trituradora El Pacto

Las cuales facilitaron datos porcentuales y cuantitativos sobre el tipo de RCD que recibían y los residuos predominantes, de los cuales se seleccionaron los más relevantes para esta investigación.

Las respuestas por parte de las empresas sobre el manejo de los RCD en sus procesos constructivos se recolectó durante un periodo de siete meses. Posteriormente se reciben las respuestas y se analizan a través de gráficas.

Estudio y análisis de la información

La información fue analizada y graficada. Se tuvo en cuenta datos correspondientes, la forma como almacenaban los RCD dentro de sus obras, cantidad de obras constructivas que realizaron las constructoras en el año 2020, los tipos de residuos que empleaban y generaban sus obras, el tipo de residuo que más se generaban y sus volúmenes

correspondientes, la forma cómo almacenaban sus RCD, su clasificación in situ, su reciclaje en obra, el tipo de disposición final que le daban a sus a sus residuos y si han incorporado eco-materiales en sus proyectos. Este diagnóstico también se llevó a cabo por medio de revisión bibliográfica, visitas a campo de sitios autorizados y clandestinos de disposición final.

Resultados

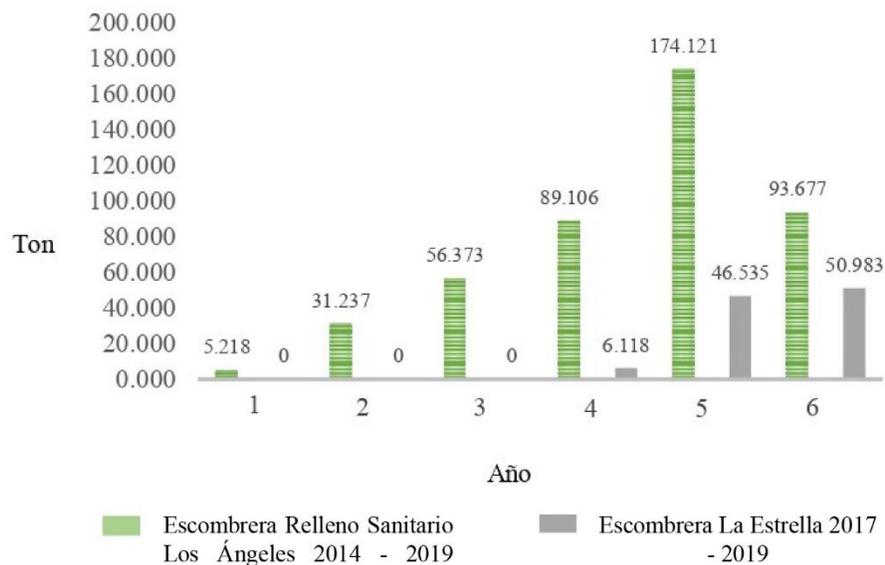
1. Estadísticas de Ingreso de RCD en sitios de disposición final autorizados:

Se encuentra que la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sostenible del Municipio de Neiva emitió un reporte historico de ingresos por peso en toneladas de RCD en las empresas:

- Relleno Sanitario Los Ángeles
- Escombrera la Estrella

En donde se identifica que la escombrera del relleno sanitario Los Ángeles y de La Estrella durante el año 2014 y 2019, existió un total de 553.371 toneladas, como se muestra en la Figura 7:

Figura 7. Reporte Histórico De Ingresos Por Peso (Tons) Escombros



Fuente: Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sostenible del Municipio de Neiva

Y que particularmente en el relleno sanitario Los Ángeles desde septiembre del 2019 hasta diciembre del 2020 existió 55.824 ton de RCD generados por la ciudad. Indicando también, que en años anteriores se registraron 18.000 ton dispuestas por ciudad limpia.

Según información facilitada por la escombrera La Estrella, se realizan tres tipos de clasificación de RCD para el control, seguimiento y distribución dentro de la escombrera.

A continuación, en la Tabla 9 se exponen los tipos de residuos y el volumen por cada tipo de residuo aproximado en el año 2019.

Tabla 9. Clasificación de RCD en la Escombrera la estrella

Tipo de Residuo	Volumen/tipo de residuo	%
	(m3) año 2019	
Excavación	36.611,67	49,81

Demolición	30.044.46	40,87
Otros residuos	6.850,32	9,32

Fuente: Datos obtenidos a partir de entrevista gerente escombrera La Estrella 2021

Planta trituradora el Pacto

Se realizó una entrevista al gerente de la Planta trituradora El Pacto, quién indica datos de los RCD que reciben en la planta. En la Tabla 10 se muestra los tipos y cantidades que se reciben por mes en la planta aproximadamente

Tabla 10. Tipos y cantidades aproximadas de RCD recibidos por mes en Planta trituradora El Pacto

Tipo de Residuo	m³	Ton	Porcentaje de RCD / Mes
Excavación	10.764.00	13.993.20	71.79
Demolición	4.339.25	4.773.18	24.49
Otros residuos	806.00	725.40	3.72

Fuente: Datos obtenidos a partir de entrevista con el Director Planta de trituración El Pacto 2021.

Además del RCD, a la planta ingresan otro tipo de materiales en proporciones mínimas, pero que pueden ser potencialmente aprovechables (PET, la madera, el hierro, el icopor, el plástico, el PVC). En la Tabla 11 se exponen los tipos de residuos que ingresan a la planta en m³, ton y de manera porcentual durante el periodo de marzo de 2020 hasta marzo de 2021

Tabla 11. Composición de RCD en la ciudad de Neiva desde marzo del 2020 hasta marzo del 2021 – Planta trituradora El Pacto

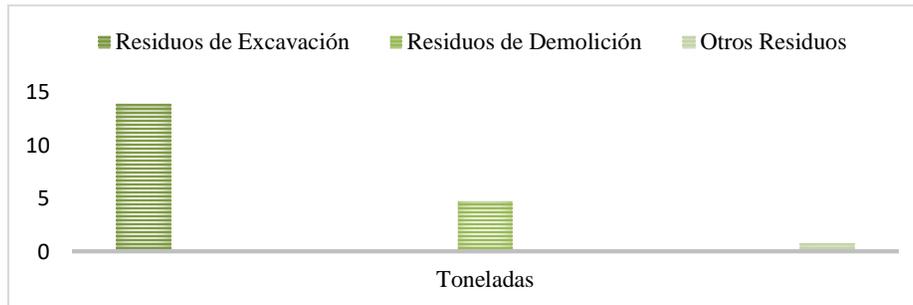
Tipo de Residuo	m³	Ton	% de RCD Mes
Recebos	6.498.50	8.448.05	87.98
Afirmados			
(Sub base y base granular)	847.00	931.70	9.70
Gravas, Arenas y Piedras	566.00	622.60	5.29
Otros residuos	247.50	222.75	2.32

Fuente: Datos obtenidos a partir de entrevista con el Director Planta trituradora El Pacto 2021.

Con base a la información expuesta anteriormente se establece en la Figura 7 los residuos que se generan y aprovechan en Neiva durante el periodo de septiembre de 2020 y marzo de 2021, en donde se destacan los residuos de excavación. Con base a la información anteriormente expuesta se establece un aproximado de los RCD en la ciudad de Neiva según su actividad:

Figura 8. Composición de los RCD por Actividad en la ciudad de Neiva Huila.

Elaboración Propia. Fuente: Planta de Aprovechamiento El Pacto, 2020-2021

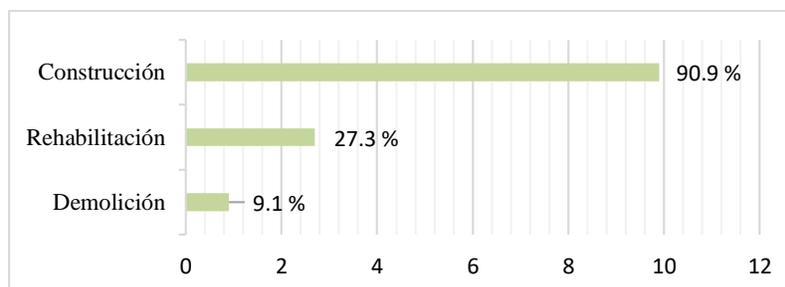


Fuente: Propia 2021

2. Cuestionario destinado a las principales empresas desarrolladoras de proyectos constructivos en la ciudad durante el año 2020

Para el envío del cuestionario y posterior análisis de los tipos de RCD que más generan las empresas constructoras en la ciudad de Neiva, se hace un estudio de las empresas que más generaron obras durante el año 2020 en la ciudad, según información facilitada por la Curaduría Urbana de Neiva. Se recopiló información de 31 empresas, pequeñas, medianas y grandes constructoras para posteriormente enviarles la encuesta por vías electrónicas y debido a que algunas de estas, no contestaron por ninguno de los anteriores medios, se procedió a realizar visitas presenciales a sus oficinas. En la Figura 9. Se evidencia que el 90% de las empresas encuestadas realizan procesos de construcción, el 27.3% también realiza procesos de rehabilitación y el 9.1% procesos de demolición:

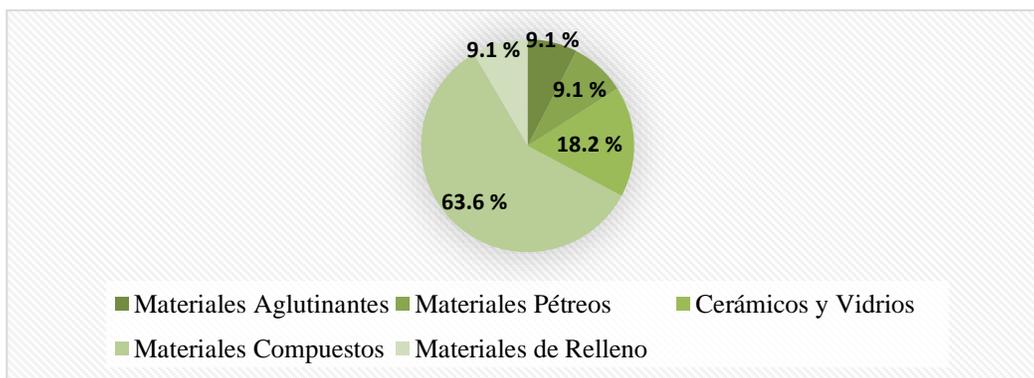
Figura 9. Actividades del Sector de la Construcción realizadas en la ciudad de Neiva



Fuente: Propia 2021

Adicionalmente como se evidencia en la Figura 10. se encontró que los materiales compuestos como mortero, concreto y las mezclas asfálticas son los materiales más empleados por el 60% de las empresas encuestadas en sus procesos constructivos.

Figura 10. Materiales Constructivos Empleados en Obras en la ciudad de Neiva



Fuente: Propia 2021

De la misma manera se identifica en la Figura 11. que el 81,9% genera residuos de excavación durante sus procesos constructivos, seguidos del concreto y de residuos cerámicos, los cuales se generan en su mayoría en medianos volúmenes que van desde 1 ton hasta 30.000 m³, dependiendo del tipo de generador de RCD.

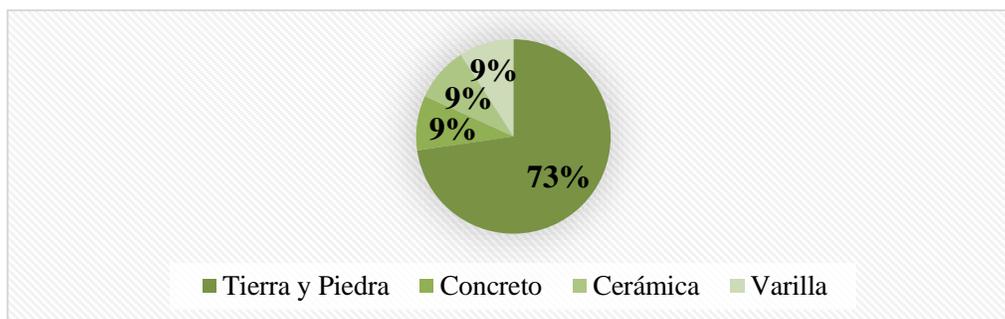
Figura 11. Tipos de residuos que se generan en la ciudad de Neiva



Fuente: Propia 2021

Así mismo, en la Figura 12. se muestra que de este tipo de residuo se genera en su gran mayoría tierra y piedra. El residuo que menos generan las obras es poda y madera con volúmenes desde 25 kg hasta 50 m³.

Figura 12. Tipo de RCD que más se generan en la ciudad de Neiva



Fuente: Propia 2021

El 90% de las empresas encuestadas respondió que realiza procesos de clasificación y separación de RCD in-situ y el 63,6% de estos, indica que reciclan y reincorpan los RCD en etapas posteriores dentro de sus procesos constructivos antes de trasladarlos a los sitios de disposición final, señalando que el 72,7% de estas empresas llevaban sus residuos directamente a las escombreras y el 27,3% restante los traslada a empresas de aprovechamiento.

En la Figura 13 se muestra que el 81,8% de las empresas ha implementado dentro de sus obras elementos constructivos con material reciclado, de los cuales el 63,6% ha implementado de uso no estructural, el 18,2% de uso estructural y el 18,2% restante nunca ha implementado productos a partir de material reciclado.

Figura 13. Constructoras en la ciudad de Neiva que emplean elementos constructivos con material reciclado en sus obras civiles



Fuente: Propia 2021

El 81,8% de las empresas encuestadas conoce la temática relacionada a los RCD pero el 18,2% restante indica que desconoce este termino y los impactos que produce.

Adicionalmente se realizaron visitas a campo en donde se evidencia que hay obras constructivas en la ciudad que realizan la previa caracterización y separación en la fuente, lo que les permite aplicar un adecuado aprovechamiento y otras obras constructivas que no aplican estos debidos procesos previos al envío a sitios de disposición final.

Visitas de Campo

Se realizaron visitas a tres obras constructivas, particularmente al oriente de la ciudad. Allí se evidencia que hay empresas que separan y clasifican los RCD en obra, sin embargo, existen constructoras que no cumplen requerimientos de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos establecidos por la CAM para el Municipio de Neiva. En las Figuras 14, 15 y 16 se evidencia la situación.

Figura 14. Clasificación de los RCD emitidos por una empresa considerada grande generadora de RCD



a) Proceso de separación y clasificación residuos de Excavación; b) Separación y clasificación residuos de construcción. Fuente: Propia 2021

Figura 15. Ausencia de separación y clasificación de RCD en obras de la ciudad de Neiva



a) Falta de separación y clasificación de RCD en construcción residencial de la ciudad de Neiva; b) Residuos de material contaminado en obra. Fuente: Propia

Figura 16. Separación y Clasificación de residuos de excavación y de demolición en obra civil en el barrio La Orquídea, Neiva-Huila



- a) Separación de residuos de excavación y de demolición in-situ b) Tierra y Piedra como residuo de excavación para obra civil en el barrio La Orquídea. Fuente: Propia 2021

Así mismo en las figuras 17, 18, 19 y 20 se presenta un registro fotográfico de una visita a campo de la Planta de triturados El Pacto que está operando actualmente para la ciudad de Neiva y para el Huila:

Figura 17. Registro fotográfico de visita a campo a la Planta de Aprovechamiento El Pacto



- a) Visita de campo a la Planta de triturados El Pacto. b) Proceso de separación de residuos de excavación en Planta de triturados El Pacto. Fuente: Propia 2021

Figura 18. Utilización de zarandas o maquinaria pesada para proceso de separación de RCD a una escala mayor



- a) Zaranda casera para separación de RCD b) Separación de material a mayor escala utilizando retroexcavadora, Planta de triturados El Pacto. Fuente: Propia 2021

Figura 19. Variedad de residuos con potencial de aprovechamiento dentro del sector de la construcción o en diferentes industrias.



a) Residuos de Demolición Planta de triturados El Pacto b) Residuos de tala Planta de triturados el Pacto. Fuente: Propia 2021

Figura 20. Visita a la Planta de triturados El Pacto en el mes de marzo del 2021



a) Visita a la Planta de triturados El Pacto b) Entrevista al dueño y director de la Planta de triturados El Pacto. Fuente: Propia 2021

Del anterior diagnóstico se concluye que los residuos que más se generan en la ciudad de Neiva son los de excavación seguidos por los de demolición. Las empresas que incorporar elementos constructivos reciclados son muy pocas, impidiendo el cumplimiento de normativas que promueven el aprovechamiento.

5.2 Objetivo 2:

Se plantean inicialmente las alternativas de aprovechamiento de RCD pertinentes para la ciudad de Neiva según la cantidad de los RCD generados y dispuestos en los sitios de disposición final autorizados investigados. Posterior a ello, se caracterizan física y químicamente los materiales para el desarrollo de la campaña experimental que permitirá la creación de los especímenes de eco-concretos y la posterior evaluación de sus propiedades mecánicas.

- Elección de alternativas de aprovechamiento de RCD en la ciudad de Neiva

En la Tabla 12. Se identifican los reemplazos de material natural de concretos convencionales por material reciclado:

Tabla 12. Reemplazo de materiales naturales de concretos convencionales por materiales reciclables para la elaboración de concretos ecológicos.

Materiales Naturales	Materiales Reciclados
Áridos Finos	RCD (Arena proveniente de excavación / árido fino reciclado)
Áridos Gruesos	RCD (Residuos de concreto/Agregado grueso reciclado)

Cemento

Cenizas de material orgánico

Fuente: Propia 2021

- **Campaña Experimental**

✓ **Preparación de los materiales a emplear en la elaboración de las mezclas**

Áridos Finos: Se obtiene árido fino natural: Arena del río Páez.

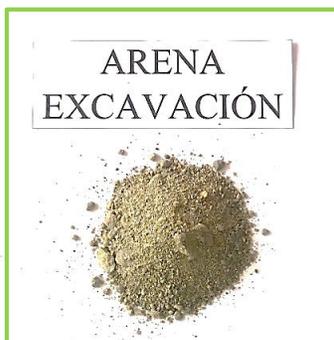
Figura 21. Muestra de árido fino natural: arena de río



Fuente: Propia 2021

Adicionalmente como se evidenció en el diagnóstico anterior de los RCD en la ciudad de Neiva, los residuos de excavación son los que más se generan en el municipio, evidenciando que particularmente la arena es el material que más se dispone en los sitios de disposición final autorizados, por ende, esta arena es un material potencial de aprovechamiento. De esta manera se incorpora dicha arena reciclada en los prototipos de eco-concretos realizados en esta investigación. Se obtienen 12.7 kg de arena reciclada producto de excavación.

Figura 22. Árido Fino reciclado: Arena de excavación



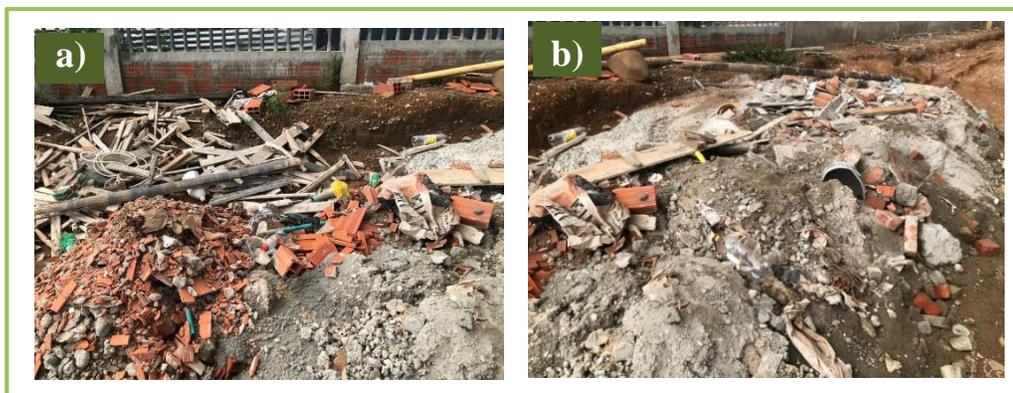
a) Propia 2021

Áridos Gruesos: Como segundo RCD más generado en el municipio de Neiva se encuentran los Residuos de Demolición, por ello se eligen los residuos de materiales compuestos (concreto), como reemplazo de los áridos gruesos del concreto convencional.

Para el proceso de recolección de este material reciclado, se realiza una visita a una obra constructiva de viviendas unifamiliares en el oriente de la ciudad, en donde se evidencia la falta de regulación del PGIRS en los procesos de selección y clasificación de los RCD. Se procura elegir residuos de concreto y se evitan los residuos mixtos.

Figura 23. Falta de separación y clasificación de RCD en construcción residencial, Neiva

– Huila



- a) RCD dispuesto de forma inadecuada, b) Residuos de construcción mezclados.
Fuente: Propia 2021

Posteriormente se realiza el proceso de trituración del RCD grueso recolectado con una herramienta manual, de tal forma que la granulometría del material se obtenga en su mayoría con un diámetro de 9 -10 mm, para posteriormente seleccionarse como agregado grueso:

Figura 24. Proceso manual de trituración de RCD – concreto



- a) Proceso de trituración manual de los RCD, b) trituración manual de concreto reciclado Fuente: Propia 2021

En este procedimiento de trituración manual se generan grandes cantidades de agregados finos debido a los golpes constantes ocasionados a los RCD con el fin de reducir sus volúmenes a granulometrías de inferior tamaño, de esta manera se recolecta tanto el agregado grueso como el fino provenientes de la trituración manual con el fin de incorporar todo el residuo en sus diferentes granulometrías, teniendo en cuenta el trabajo realizado por Puentes de Andrade, *et al.* (2020).

Adicionalmente se realiza un proceso de tamizado previo al envío del material al laboratorio para el proceso de caracterización como se muestra en la Figura 25.

Figura 25. Proceso de tamizado de RCD – Concreto



- a) Herramientas necesarias para el proceso de tamizado, b) Tamizado de RCD.
Fuente: Propia 2021

Este proceso de tamizado se realiza con una malla que tiene 5 mm de diámetro entre aberturas con el fin de que en la parte superior se retenga una granulometría de 3/8", lo que correspondería al agregado grueso reciclado para la elaboración de los concretos y el agregado pasante de la malla, se considere como agregado fino de RCD. Se separa el material en dos recipientes para diferenciarlos y posteriormente caracterizarlos.

Figura 26. Resultado del proceso de tamizado: Separación de agregado grueso y agregado fino reciclado



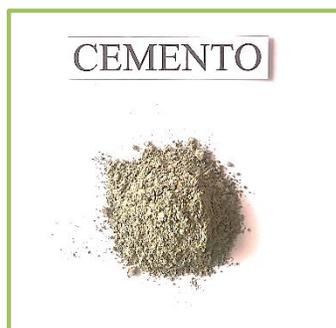


a) Selección y separación de RCD grueso, b) RCD grueso, c) Selección y separación de RCD fino, d) RCD fino. Fuente: Propia 2021

Se obtuvo 11.2 kg de agregado grueso reciclado triturado y 7.6 kg de agregado fino de RCD. Los materiales se clasificaron y organizaron para la posterior realización de los diseños de mezcla.

Cemento: Para la elaboración de las mezclas se utilizó cemento Portland de uso general Tipo I.

Figura 27. Muestra de material cementante para elaboración de eco-concretos



Fuente: Propia 2021

Material Orgánico: Se seleccionan las hojas de maíz como material orgánico que reemplace porcentajes del cemento en la elaboración de Eco-concretos. Para ello se obtienen residuos de hojas de maíz en la central de mercado de Neiva: Surabastos. Se obtuvo aproximadamente 156 kg de residuos de rastrojos de maíz. Posteriormente se

procede a realizar el proceso de deshoje en donde se separan los tallos de las hojas del maíz.

Figura 28. Material alternativo para la sustitución del cemento: Hojas de Maíz



- a) Obtención de residuos de rastrojos de maíz, b) Deshoje del maíz para la selección de las hojas. Fuente: Propia 2021

Este proceso de selección y separación se realiza para obtener un mejor secado de las hojas debido a que según anteriores investigaciones, se recomienda que las hojas de maíz que se utilizarán como puzolanas se encuentren lo más secas posibles para que el proceso de combustión y obtención de sílice dentro de las mismas sea óptimo (Apaza Lazo & Salcedo Tejeda, 2019, pág. 13).

Inicialmente para el proceso de secado de las hojas de maíz, se deshojan completamente y se exponen en suelos en donde la ventilación y la exposición al sol sea constante. En esta investigación dicho material orgánico y la mayoría de procesos experimentales realizados

durante este trabajo investigativo (a excepción de los ensayos mecánicos y químicos) se realizaron en una vivienda en altura, así que las hojas de maíz se expusieron en el balcón de la vivienda.

Según Fernández R (2009), al exponer las hojas de maíz durante 10 días es un buen periodo de tiempo de secado pues para entonces las hojas se tornaban secas y sin humedad aparente al manipularlas. Esto, siempre y cuando el proceso de deshoje se haga con minuciosidad pues las hojas por su naturaleza morfológica tienden a tener varias capas que, de no ser separadas correctamente, tienden a demorar el secado de las mismas. Sin embargo, en esta investigación se siguió el tiempo de secado expuesto por Apaza Lazo, et al. (2019), el cual indicaba que 14 días era un tiempo óptimo. Se recomienda que para procesos industriales el proceso de secado se prolongue pues el deshoje de la cascara del maíz puede ser dispendioso y demorado.

Figura 29. Proceso de secado de las hojas de maíz



a) Día 1 de secado de las hojas de maíz. b) Día 14 secado de las hojas de maíz. Fuente: Propia 2021

De aproximadamente 156 kg de rastrojo de maíz, se obtuvo 96 kg de hojas de maíz, y 60 kg de los tallos. Después del proceso de secado las hojas obtuvieron un peso de 29.30 kg, lo que indica que la pérdida de peso por humedad en las hojas fue de 66.7 kg aproximadamente.

Posteriormente se realiza la quema del material orgánico en un horno de barro.

Figura 30. Horno de barro para la quema de las hojas de maíz.



Fuente: Propia 2021

En la figura 31 se muestra como se extienden las hojas en una teja de zinc y posteriormente se amarra en forma de embudo para proteger el material orgánico de posibles contaminaciones en el interior del horno

Figura 31. Proceso de almacenamiento en tejas de zinc previo a la quema



- a) Hojas de maíz expuestas en teja de zinc, b) embudo hecho a partir de las tejas de zinc, c) amarre con alambre para proteger las hojas de maíz de otros materiales dentro del horno. Fuente: Propia 2021

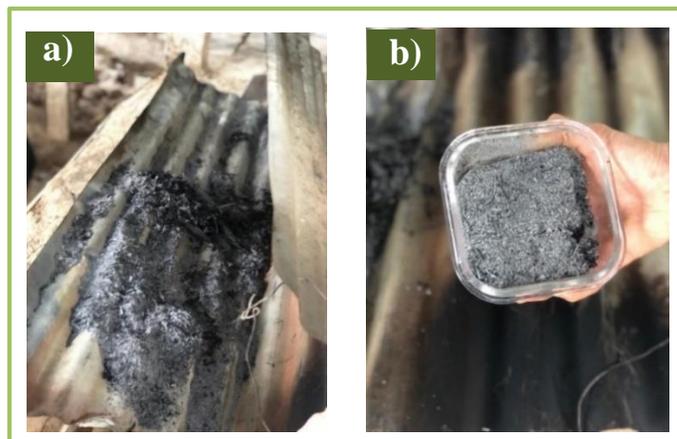
Como se muestra en la figura 32, se introducen las hojas de maíz en el horno, usando como combustible leña, cartón y guadua y a los veinte minutos ya se vuelven cenizas, sin embargo, se dejan dentro del horno cincuenta y siete minutos más para reducir el carbono en las hojas y así procurar obtener más porcentaje de sílice dentro de las mismas. La quema fue continua, utilizando una temperatura que oscilaba entre los 500 y 650° C aproximadamente.

Figura 32. Quema de las hojas de maíz para la obtención de puzolana



- a) Ingreso de las hojas de maíz al horno de barro en un tubo de zinc, b) proceso de quema de las hojas de maíz. Fuente: Propia 2021

Figura 33. Cenizas de hojas de maíz, producto de la quema en horno



a) Hoja de maíz incinerada, b) recolección de las cenizas de hoja de maíz. Fuente: Propia 2021

De esta forma se obtiene la totalidad de materiales necesarios para la elaboración de los eco-concretos

Caracterización de los materiales

Esta caracterización se realiza para la validación de los materiales, revisión de sus características físicas y químicas y verificación de la calidad de los mismos para su posterior aplicabilidad en los eco-concretos.

- Caracterización granulométrica de los materiales

Cemento Gris de Uso General

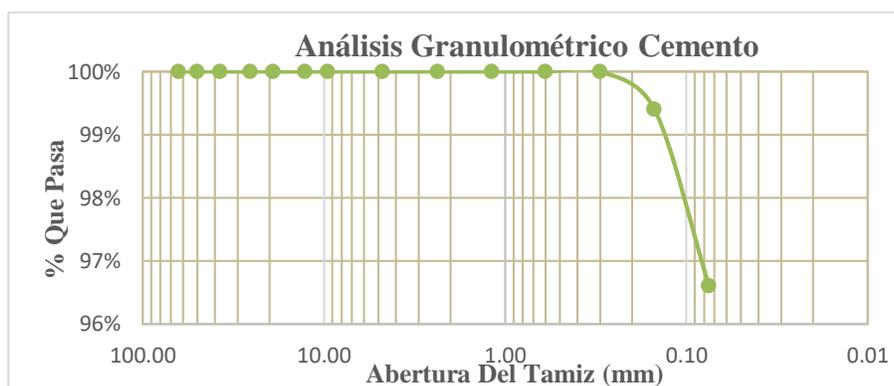
Para la caracterización física del material cementante de uso general Tipo I se realizan ensayos granulométricos y de contenido (%) de humedad. En el ensayo granulométrico se observa que se obtiene porcentaje retenido a partir del tamiz 100, evidenciando un material con una finura de un 97,2%.

Tabla 13. Resultados del Ensayo Granulométrico Cemento

PESO INICIAL		50,00	PESO FINAL		1,70	
Tamiz		Peso	Especificación para agregado fino	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa Peso
Alternativo	mm	Retenido				
2 1/2"	63,500	0,0		0,0	0,0	100,0
2"	50,000	0,0		0,0	0,0	100,0
1 1/2"	37,500	0,0		0,0	0,0	100,0
1"	25,000	0,0		0,0	0,0	100,0
3/4"	19,050	0,0		0,0	0,0	100,0
1/2"	12,500	0,0		0,0	0,0	100,0
3/8"	9,500	0,0		0,0	0,0	100,0
4	4,750	0,0		0,0	0,0	100,0
8	2,360	0,0		0,0	0,0	100,0
16	1,180	0,0		0,0	0,0	100,0
30	0,500	0,0		0,0	0,0	100,0
50	0,300	0,0		0,0	0,0	100,0
100	0,150	0,3		0,6	0,6	99,4
200	0,075	1,4		2,8	3,4	96,6
< 200		48,30		96,6	100,0%	
Totales		50,00		100,00%		

Fuente: Propia a raíz de los resultados de laboratorio

Figura 34. Curva Granulométrica Material Cementante



Fuente: Propia a raíz de los resultados de laboratorio

En la Tabla 14 se evidencia el porcentaje de humedad del cemento, el cual servirá como antecedente para posteriormente validar el contenido de humedad de la ceniza de hoja de maíz y los resultados obtenidos

Tabla 14. Porcentaje Humedad Material Cementante

Humedad Natural	
% de humedad	0.4

Fuente: Propia a raíz de los resultados de laboratorio

Agregado Grueso Natural: Grava de Río

Se caracteriza físicamente la grava de río obteniendo las especificaciones físicas del material:

Tabla 15. Resultados del Ensayo Granulométrico Grava 3/8"

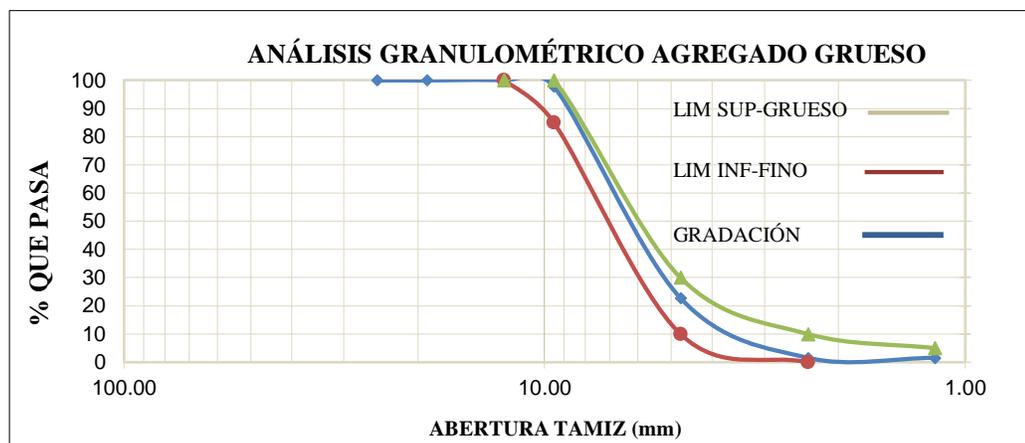
PESO INICIAL		2637,9	PESO FINAL		2599,3		
Tamiz		Peso	Especificación para agregado grueso según tabla 630-4 Concreto Estructural		% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa Peso
Alternativo	mm	Retenido					
2 1/2"	63,500	0,0	Tamaño de Agregado No. 8		0,0	0,0	100,0
2"	50,000	0,0			0,0	0,0	100,0
1 1/2"	37,500	0,0			0,0	0,0	100,0
1"	25,000	0,0			0,0	0,0	100,0
3/4"	19,050	0,0			0,0	0,0	100,0
1/2"	12,500	0,0	100	100	0,0	0,0	100,0
3/8"	9,500	58,8	100	85	2,2	2,2	97,8
4	4,750	1981,3	30	10	75,1	77,3	22,7
8	2,360	559,2	10	0	21,2	98,5	1,5
16	1,180	0,0	5	0	0,0	98,5	1,5
30	0,500	0,0			0,0	98,5	1,5
50	0,300	0,0			0,0	98,5	1,5
100	0,150	0,0			0,0	98,5	1,5
200	0,075	0,0			0,0	98,5	1,5
< 200		38,6			1,5	100,0%	

Totales	2637,9	100,00%
---------	--------	---------

Fuente: Propia a raíz de los resultados de laboratorio

Como se observa en la Tabla 15, la grava natural empezó a retener a partir del tamiz 3/8" así que la granulometría del agregado grueso natural se encuentra con dimensiones entre 9 y 10 milímetros. Según la Figura 35 el agregado grueso se encuentra entre el límite inferior fino y el límite superior grueso, lo que significa que es un material que se ajusta a la normativa.

Figura 35. Análisis granulométrico agregado grueso natural



Fuente: Propia a raíz de los resultados de laboratorio

En la Tabla 16 se muestra el ensayo de densidad BULK en donde se analiza que el material tiene una densidad de 1.403 g/cm^3 mostrándose poco poroso. Estos análisis de densidad y porcentaje de vacíos permiten la discusión de los resultados a la compresión ya que según su densidad y porosidad influenciará al aumento o disminución de resistencias.

Tabla 16. Resultados ensayo densidad BULK (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados sueltos

MUESTRAS N°.		1	2	3
Peso Muestra Suelta + Molde	gr	9636	9651	9664
Peso Del Molde	gr	6679	6679	6679
Peso Muestra Suelta	gr	2957	2972	2985
Volumen Del Molde	Cm ³	2118	2118	2118
Densidad Bulk Suelta	g/cm ³	1,396	1,403	1,409
Densidad Bulk Suelta Promedio	g/cm ³		1,403	
% Vacios	%	34,67	34,33	34,05
% Vacios Promedio	%		34,3	

Fuente: Propia a raíz de los resultados de laboratorio

- **Agregado Fino Natural: Arena de Río**

Se caracteriza físicamente la arena de río natural como se muestra en la Tabla 17 la cual empieza a retener a partir del tamiz 4, encontrándose con un módulo de finura ligeramente grueso: 2.9, lo que permite tener un agregado fino establecido dentro de la normatividad ya que, según esta, la arena de trituración no debe ser menor de 2.3 ni mayores de 3.1.

Tabla 17. Ensayo Granulométrico agregado fino natural: Arena de Río

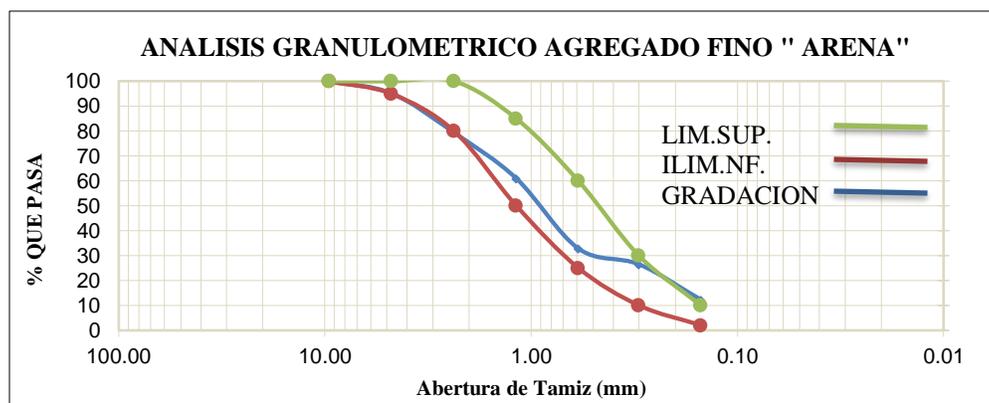
PESO INICIAL		2701,2	PESO FINAL		2484,6		
Tamiz		Peso	Especificación para agregado grueso según tabla 630-4 Concreto Estructural	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa Peso	
Alternativo	mm	Retenido					
2 1/2"	63,500	0,0	Tamaño de Agregado No. 8	0,0%	0,0%	100,0%	

2"	50,000	0,0			0,0%	0,0%	100,0%
1 1/2"	37,500	0,0			0,0%	0,0%	100,0%
1"	25,000	0,0			0,0%	0,0%	100,0%
3/4"	19,050	0,0			0,0%	0,0%	100,0%
1/2"	12,500	0,0	100	100	0,0%	0,0%	100,0%
3/8"	9,500	0,0	95	100	0,0%	0,0%	100,0%
4	4,750	129,6	80	100	4,8%	4,8%	95,2%
8	2,360	428,4	50	85	15,9%	20,7%	79,3%
16	1,180	496,2	25	60	18,4%	39,0%	61,0%
30	0,500	761,0	10	30	28,2%	67,2%	32,8%
50	0,300	170,6	2	10	6,3%	73,5%	26,5%
100	0,150	386,0			14,3%	87,8%	12,2%
200	0,075	112,8			4,2%	92,0%	8,0%
< 200		216,6			8,0%	100,0%	
Totales		2701,2					100,00%

Fuente: Propia a raíz de los resultados de laboratorio

En la Figura 36 se expone la curva granulométrica del agregado fino natural: Arena de río en donde se muestra que se encuentra muy cerca de ambos límites: superior e inferior, estando condicionada a resultados con diferentes variables a la hora de obtener resistencias.

Figura 36. Curva granulométrica – Análisis agregado fino Natural



Fuente: Propia a raíz de los resultados de laboratorio

En la Tabla 18 se muestra el ensayo de densidad BULK del agregado fino natural en donde se analiza que el material tiene una densidad de 1.523 g/cm³ mostrándose denso y poco poroso.

Tabla 18. Resultados ensayo densidad BULK (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados sueltos

MUESTRAS No.		1	2	3
Peso Muestra Suelta + Molde	gr	9883	9923	9907
Peso Del Molde	gr	6679	6679	6679
Peso Muestra Suelta	gr	3204	3244	3228
Volumen Del Molde	Cm3	2118	2118	2118
Densidad Bulk Suelta	g/cm3	1,513	1,532	1,524
Densidad Bulk Suelta Promedio	g/cm3		1,523	
% Vacios	%	39,89	39,14	39,44
% Vacios Promedio	%		39,5	

Fuente: Propia a raíz de los resultados de laboratorio

Agregado Grueso Reciclado: RCD Grueso

Se caracteriza físicamente el RCD Grueso como se muestra en la Tabla 19 el cual empieza a retener a partir del tamiz ¾” reteniendo la mayoría del material entre el tamiz 3/8” y 4, encontrando que la curva granulométrica que se muestra en la Figura 36 difiere del agregado grueso natural. Para la realización de las mezclas se escoge el material retenido a partir del tamiz 3/8” para procurar obtener las mayores similitudes posibles entre agregados naturales y reciclados.

Tabla 19. Ensayo Granulométrico RCD Grueso

PESO INICIAL		2783,9	PESO FINAL		2599,3		
Tamiz		Peso	Especificación para agregado grueso según tabla 630-4 Concreto Estructural		% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa Peso
Alternativo	mm	Retenido					
2 1/2"	63,500	0,0	Tamaño de Agregado No. 8		0,0%	0,0%	100,0%
2"	50,000	0,0			0,0%	0,0%	100,0%
1 1/2"	37,500	0,0			0,0%	0,0%	100,0%
1"	25,000	0,0			0,0%	0,0%	100,0%
3/4"	19,050	67,1			2,4%	2,4%	97,6%
1/2"	12,500	248,9	100	100	8,9%	11,4%	88,6%
3/8"	9,500	602,5	100	85	21,6%	33,0%	67,0%
4	4,750	1650,6	30	10	59,3%	92,3%	7,7%
8	2,360	194,8	10	0	7,0%	99,3%	0,7%
16	1,180	5,5	5	0	0,2%	99,5%	0,5%
30	0,500	0,0			0,0%	99,5%	0,5%
50	0,300	0,0			0,0%	99,5%	0,5%
100	0,150	0,0			0,0%	99,5%	0,5%
200	0,075	0,0			0,0%	99,5%	0,5%
< 200		14,5			0,5%	100,0%	
Totales		2783,9			100,00%		

Fuente: Propia a raíz de los resultados de laboratorio

Figura 37. Curva Granulométrica RCD Grueso

% Vacios Promedio	%	47,8
-------------------	---	-------------

Fuente: Propia a raíz de los resultados de laboratorio

- Agregado Fino Reciclado: RCD Fino

Se caracteriza físicamente el RCD Fino como se muestra en la Tabla 21 el cual empieza a retener a partir del tamiz 8. El mayor porcentaje de RCD Fino retenido se localiza entre los tamices 8 y 16. El módulo de finura de este material es ligeramente grueso: 2.94 como se muestra en la Figura 38, encontrando similitudes en la curva granulométrica del agregado fino natural: Arena de río y encontrándose de igual forma dentro de las especificaciones de la normativa.

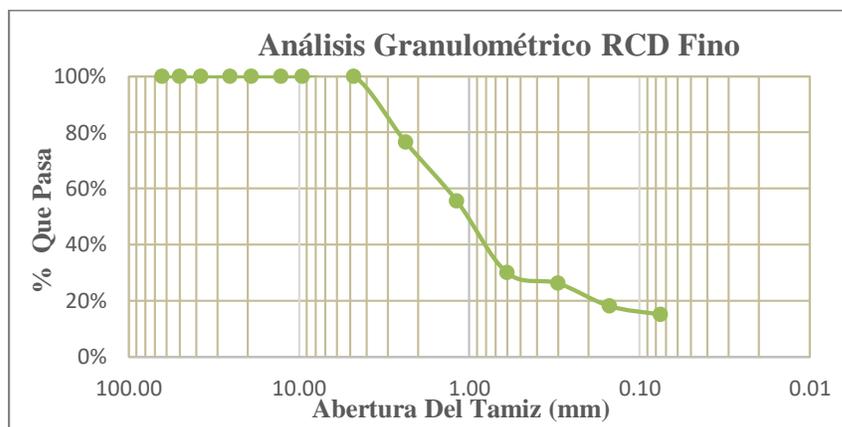
Tabla 21. Ensayo Granulométrico RCD Fino

PESO INICIAL		2637,9	PESO FINAL		2599,3		
Tamiz		Peso	Especificación para agregado grueso según tabla 630-4 Concreto Estructural		% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa Peso
Alterno	mm	Retenido					
2 1/2"	63,5	0,0	Tamaño de Agregado No. 8		0,0%	0,0%	100,0%
2"	50	0,0			0,0%	0,0%	100,0%
1 1/2"	37,5	0,0			0,0%	0,0%	100,0%
1"	25,4	0,0			0,0%	0,0%	100,0%
3/4"	19,05	0,0			0,0%	0,0%	100,0%
1/2"	12,5	0,0	100	100	0,0%	0,0%	100,0%
3/8"	9,52	0,0	100	85	0,0%	0,0%	100,0%
4	4,75	0,0	30	10	0,0%	0,0%	100,0%
8	2,36	538,9	10	0	23,5%	23,5%	76,5%
16	1,18	481,2	5	0	21,0%	44,5%	55,5%
30	0,50	584,7			25,5%	70,0%	30,0%
50	0,30	87,8			3,8%	73,8%	26,2%
100	0,15	185,8			8,1%	81,9%	18,1%
200	0,075	69,4			3,0%	85,0%	15,0%

< 200	344,6	15,0%	100,0%
Totales	2292,4	100,00%	

Fuente: Propia a raíz de los resultados de laboratorio

Figura 38. Curva granulométrica – Análisis agregado Fino Reciclado



Fuente: Propia a raíz de los resultados de laboratorio

Como se expresa en la Tabla 22, la densidad BULK del RCD Fino es de 1.239 g/cm^3 mostrando también similitudes en la densidad de la arena de río permitiendo evidenciar semejanzas entre materiales lo que podría conllevar a óptimas resistencias.

Tabla 22. Resultados ensayo densidad BULK (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados sueltos

MUESTRAS No.		1	2	3
Peso Muestra Suelta + Molde	gr	9322	9269	9295
Peso Del Molde	gr	6679	6679	6679
Peso Muestra Suelta	gr	2651	2598	2624
Volumen Del Molde	Cm3	2118	2118	2118
Densidad Bulk Suelta	g/cm3	1,252	1,227	1,239

Densidad Bulk Suelta Promedio	g/cm ³		1,239	
% Vacios	%	37,31	38,56	37,95
% Vacios Promedio	%		37,9	

Fuente: Propia a raíz de los resultados de laboratorio

- **Agregado fino reciclado: Arena de excavación**

La arena de excavación como alternativa de aprovechamiento es arena de un depósito de coluvión obtenida de la Planta trituradora El Pacto. La caracterización granulométrica evidencia que este agregado fino reciclado empieza a retener a partir del tamiz ½” debido a que contenía residuos de materiales pétreos y su mayor peso de material retenido se encuentra entre el tamiz 16 y 30. Se encuentran similitudes en la curva granulométrica de la arena de excavación y la arena de río.

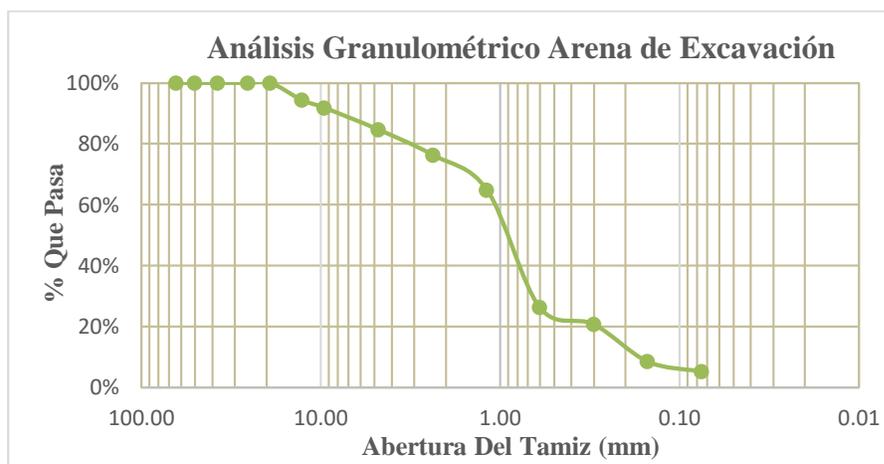
Tabla 23. Ensayo Granulométrico Arena de Excavación

PESO INICIAL		PESO FINAL					
2637,9		2599,3					
Tamiz		Peso	Especificación para agregado grueso según tabla 630-4 Concreto Estructural		% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa Peso
Alternativo	mm	Retenido					
2 1/2"	63,500	0,0	Tamaño de Agregado No. 8		0,0%	0,0%	100,0%
2"	50,000	0,0			0,0%	0,0%	100,0%
1 1/2"	37,500	0,0			0,0%	0,0%	100,0%
1"	25,000	0,0			0,0%	0,0%	100,0%
3/4"	19,050	0,0			0,0%	0,0%	100,0%
1/2"	12,500	140,8	100	100	5,7%	5,7%	94,3%
3/8"	9,500	62,2	100	85	2,5%	8,2%	91,8%
4	4,750	178,6	30	10	7,2%	15,4%	84,6%
8	2,360	207,0	10	0	8,3%	23,7%	76,3%
16	1,180	285,2	5	0	11,5%	35,2%	64,8%
30	0,500	957,6			38,6%	73,8%	26,2%
50	0,300	137,8			5,6%	79,3%	20,7%
100	0,150	304,2			12,3%	91,6%	8,4%

200	0,075	81,6	3,3%	94,9%	5,1%
< 200		127,2	5,1%	100,0%	
Totales		2482,2	100,00%		

Fuente: Propia a raíz de los resultados de laboratorio

Figura 39. Curva Granulométrica – Análisis Fino Reciclado: Arena de excavación



Volumen Del Molde	Cm3	2118	2118	2118
Densidad Bulk Suelta	g/cm3	1,274	1,281	1,276
Densidad Bulk Suelta Promedio	g/cm3		1,277	
% Vacios	%	48,43	48,16	48,37
% Vacios Promedio	%		48,3	

Fuente: Propia a raíz de los resultados de laboratorio

- **Material Puzolánico: Ceniza de Hoja de Maíz**

Una vez obtenida la ceniza de la hoja de maíz, se realizan ensayos físicos y químicos, en donde se obtienen resultados granulométricos, de contenido de humedad y de fluorescencia de rayos X.

En la Tabla 25 se observa que el porcentaje de material de ceniza retenido se da a partir del tamiz 30. En este ensayo granulométrico a diferencia de los anteriores se utilizan tamices adicionales como el 40, 70 y 140, omitiendo el tamiz 16.

Tabla 25. Ensayo Granulométrico Ceniza de Hoja de Maíz

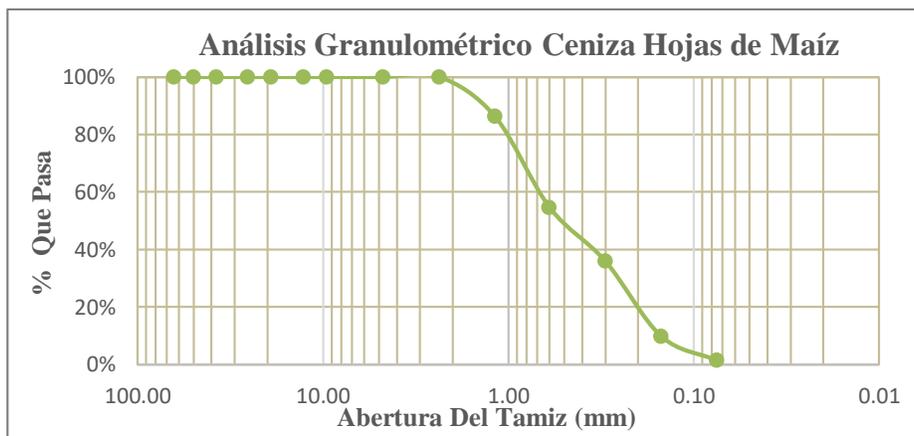
PESO INICIAL		10,30	PESO FINAL		10,45		
Alternativo	Tamiz	Peso	Especificación para agregado fino	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa	Peso
	mm	Retenido					
	2 1/2"	63,500	0,0	0,0	0,0	100,0	
	2"	50,000	0,0	0,0	0,0	100,0	
	1 1/2"	37,500	0,0	0,0	0,0	100,0	
	1"	25,000	0,0	0,0	0,0	100,0	
	3/4"	19,050	0,0	0,0	0,0	100,0	
	1/2"	12,500	0,0	0,0	0,0	100,0	
	3/8"	9,500	0,0	0,0	0,0	100,0	
	4	4,750	0,0	0,0	0,0	100,0	
	8	2,360	0,0	0,0	0,0	100,0	
	30	0,595	1,5	13,8	13,8	86,2	
	40	0,420	3,4	31,6	45,4	54,6	
	70	0,210	2,0	18,7	64,1	35,9	
	100	0,150	2,8	26,1	90,2	9,8	

140	0,105	0,9	8,4	98,6	1,4
< 140		0,15	1,4	100,0%	
Totales		10,60	100,00%		

Fuente: Propia a raíz de los resultados de laboratorio

En la Figura 40 se observa el análisis granulométrico de la ceniza, el cual tiene similitudes con la curva granulométrica del material cementante, mostrándose de igual forma una curva descendente, encontrando un material “fino” en la ceniza un módulo de finura de: 2.1, a diferencia del cemento que tiene un módulo de finura de 0.01, encontrando un material fino, en el caso de la ceniza y muy fino o extra fino en el caso del cemento.

Figura 40. Curva Granulométrica Ceniza Hojas de Maíz



% de Humedad 6.4

- Caracterización Química del Material

Se sometieron a ensayos químicos de Fluorescencia de RX la ceniza de hojas de maíz y el cemento, en donde el cemento se calcinó por 2 horas a 1000°C.

Para la realización de estos se ensayos quicios se utilizaron los siguientes equipos:

- Prensa hidráulica
- Bruker S4 Explorer WDS-XRF
- CLAISSE

La composición química de las cenizas de hojas de maíz y del cemento se presentan en la Tabla 27 y 28, en donde se muestra que la ceniza cuenta con gran porcentaje de óxido de silicio, responsable de dar resistencia al concreto, superando incluso los porcentajes del ensayo químico del cemento. Esto presenta la posibilidad de obtener optimas resistencias a la hora de encontrar altas resistencias en la elaboración de los eco-concretos.

Tabla 27. Composición química cenizas de hojas de maíz

Fórmula	% (p/p)										Partes por Millón (ppm)								LOI(%)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Mn	Ba	Cr	Cu	Ni	Sr	Zn	Zr	
Concentración	40,43	1,38	0,856	0,91	4,65	2,28	28,63	0,1	16,9	2,05	1219	563	22	176	39	309	15368	-	-

Tabla 28. Composición química cemento

Fórmula	% (p/p)										Partes por Millón (ppm)								LOI(%)
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Mn	Ba	Cr	Cu	Ni	Sr	Zn	Zr	
Concentración	18,99	4,69	3,35	3,55	58,75	-	0,38	0,36	0,13	2,99	533	1216	57	140	56	589	310	166	6,48

Fuente: Propia a raíz de los resultados de laboratorio

Se encuentra que el cemento es un material con un módulo de finura de 0.01 o extra fino a diferencia del material puzolánico, el cual tiene un módulo de finura de 2.1, además hay una diferencia de 6% de humedad entre ambos materiales, mostrándose la ceniza con más contenido de humedad. Las diferencias entre los anteriores a pesar de no ser grande, puede influir en los resultados de resistencia a la compresión de los concretos.

En esta investigación no se usaron procesos adicionales para asemejar materiales naturales con materiales reciclados, de este modo la ceniza que se obtuvo a partir de la quema de las hojas de maíz, se utilizó directamente en los diseños de mezcla puzolánicos y los RCD obtenidos desde distintas fuentes solo se tamizaron para eliminar impurezas y partículas con dimensiones mayores a las necesarias y posteriormente este RCD se utilizó de igual forma en sus respectivos diseños de mezcla.

5.2 Objetivo 3:

Diseño de Mezclas

Obteniendo los materiales y caracterizándolos previamente, se procede a elegir los diseños de mezcla más oportunos para la elaboración de concretos estructurales, no estructurales y morteros. Se implementaron distintos tipos de reemplazo según el eco-concreto y mortero realizado, los cuales se muestran en la Tabla 29.

Tabla 29. Materiales constructivos ecológicos y los tipos de materiales reciclados implementados

Materiales constructivos ecológicos	Tipo de reemplazo
Concretos Estructurales	Árido Fino Reciclado (RCD y Arena de Excavación). Árido grueso reciclado (RCD). Ceniza de Hoja de Maíz.
Concretos No Estructurales	Árido Grueso Reciclado (RCD)
Morteros	Árido Fino Reciclado (RCD)

Fuente: Propia 2021

Para cada material constructivo ecológico realizado se diseña un concreto o mortero testigo o convencional para utilizarlos como referencias en la medición de las resistencias obtenidas de todos los materiales ecológicos realizados. Las resistencias objetivo se muestran en la Tabla 30.

Tabla 30. Materiales constructivos ecológicos, tipo de diseños de mezclas y resistencias objetivos según edad de rotura

Materiales constructivos ecológicos	Diseño de Mezcla	Edad de rotura - Resistencia a la compresión
Concretos Estructurales	1:2:2	28 días – 112 días
Concretos No Estructurales	1:3:3	28 días
Morteros	1:2	28 días

Fuente: Propia 2021

El máximo porcentaje de reemplazo de material reciclado planteado en los concretos estructurales es de 30%, en los no estructurales y en los morteros es de 75%.

Como se muestra en la Tabla 31, se establece una relación agua / cemento de 0.50 para el concreto testigo estructural. Para los concretos estructurales donde se reemplace árido grueso reciclado se establece una relación a/c de 0.52. Para el concreto testigo no estructural se establece una relación a/c de 0.70% y se incrementa a 0.75% cuando se implementa el reemplazo máximo de material reciclado. Para el mortero testigo se establece una relación a/c de 0.45, incrementándose a 0.50 con reemplazos de material reciclado. Se establece un porcentaje de aditivo de 1% para los concretos y de un 4% para los morteros debido a que en estos se implementa RCD fino, el cual hace que el material muestre pérdida de trabajabilidad al presentar mayor absorción de agua y el aditivo permite mejorar la mezcla para obtener un mejor manejo y vaciado del concreto.

Tabla 31. Diseños de mezcla en porcentajes

Diseño de Mezcla	Probetas	Cemento Portland (%)	Árido Fino Natural (%)	Árido Grueso Natural (%)	Árido Fino Reciclado (%)	Árido Grueso Reciclado (%)	Ceniza de Hoja de Maíz (%)	a/c (%)	Aditivo (%)	
Concreto E	1	3	100	100	0	0	0	0,50	1	
	2	3	100	80	100	20	0	0,50	1	
	3	3	100	100	80	0	20	0,52	1	
	4	3	100	80	100	20	0	0,50	1	
	5	3	90	80	100	20	0	10	0,50	1
	6	3	90	100	80	0	20	10	0,52	1
	7	3	70	80	100	20	0	30	0,50	1
	8	3	70	100	80	0	20	30	0,52	1
Concreto NE	9	3	100	100	100	0	0	0,70	1	
	10	3	100	100	50	0	50	0,70	1	
	11	3	100	100	25	0	75	0,75	1	
	12	3	100	100	0	0	0	0,45	10	
Mortero	13	3	100	50	0	50	0	0,50	10	
	14	3	100	25	0	75	0	0,50	10	

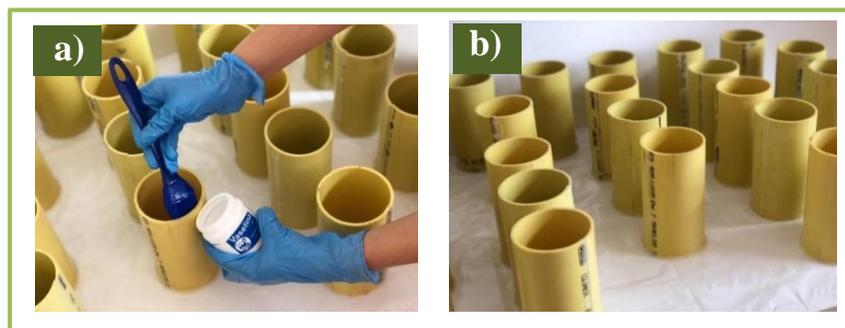
Fuente: Propia 2021

En la Tabla 31 se observan las cantidades en gramos de los concretos ecológicos elaborados para las probetas artesanales realizadas en PVC de 75 mm x 150 mm y para los morteros ecológicos realizados en probetas de PVC de 25 mm x 50 mm; lo anterior según requerimientos de la NTC 4024.

Elaboración y curado de las probetas

Se elaboran probetas artesanales a partir de tubos de PVC, se fijan al suelo encima de una bolsa plástica con sellador de silicona y se engrasan con vaselina, posteriormente se funden los concretos. Se realizan 48 cilindros de concreto.

Figura 41. Herramientas necesarias para fundir concretos



a) Probetas artesanales engrasadas, b) Probetas listas para vaciar concreto. Fuente: Propia 2021

Elaboración de concretos

Se realizan las mezclas de los concretos y morteros. Se evidencia que al aumentar el porcentaje de material fino reciclado (áridos y ceniza) la mezcla pierde trabajabilidad, por ende, el aditivo es un componente necesario para mejorar el comportamiento del material ecológico.

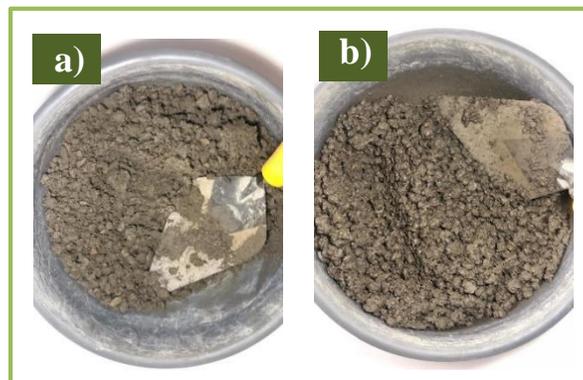
Figura 42. Elaboración de concretos



Fuente: Propia 2021

Para los concretos no estructurales y morteros no hubo necesidad de adicionar agua a la mezcla a pesar de que su trabajabilidad se reducía a medida que aumentaba el reemplazo de material reciclado, sin embargo, para los concretos estructurales que estaban establecidos con una relación de a/c de 0.50 y que incorporaban ceniza de hoja de maíz fue necesario aplicar una relación de a/c de 0.58, debido a que no era posible vaciar el concreto de forma adecuada ya que la mezcla se mostraba arenosa y heterogénea.

Figura 43. Elaboración de concretos ecológicos

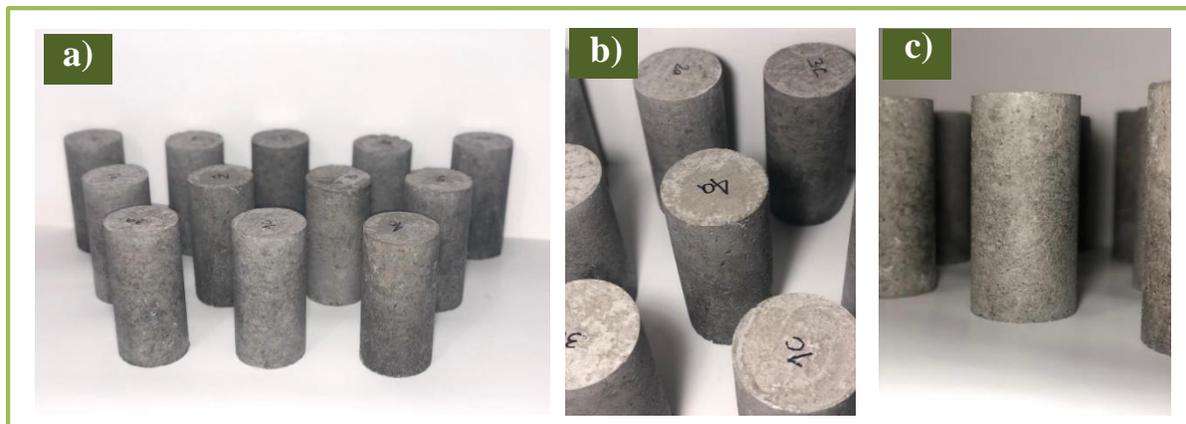


a) Diseño de mezcla #5 con ceniza de hojas de maíz y con una relación a/c de 0.50, b) Diseño de mezcla #5 con una relación a/c de 0.58. Fuente: Propia 2021

Como se observa en la Figura 43, después de adicionarle agua al diseño de mezcla #5, aún no se observa del todo homogénea, sin embargo, se procuró obtener una mezcla que fuese manejable sin incorporarle demasiada agua para evitar la disminución de la resistencia en los eco-concretos estructurales puzolánicos.

Después de desmoldar los concretos y morteros a $24 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$ se trasladaron al laboratorio en un tiempo menor de 1 hora donde se realizaron los ensayos a compresión. Allí se mantuvo controlada la temperatura de curado oscilada entre 22 y 24° C .

Figura 44. Concretos ecológicos elaborados



a) Concretos ecológicos elaborados, b) Perspectiva concretos ecológicos realizados, c) vista frontal concretos ecológicos Fuente: Propia 2021

5.4 Objetivo 4:

- **Propiedades Mecánicas de los Eco-concretos**

Los concretos y morteros ecológicos se someten a ensayos de resistencia a la compresión a diferentes edades como se muestra en la Tabla 32. Todos los eco-concretos y eco-morteros se someten a ensayos de resistencia a la compresión a una edad de 28 días para comprobar y comparar las resistencias en MPa de cada diseño de mezcla según el

porcentaje de material reciclado contenido en cada eco-concreto. Adicional a las roturas a 28 días, en esta investigación se propone realizar roturas a 112 días en los eco-concretos estructurales puzolánicos, de tal forma que se pueda evidenciar que si al aumentar las edades de curado de estos especímenes puzolánicos, se pueda obtener resistencias mayores. Lo anterior se determinó en base a las investigaciones realizadas por Shakouri, et al., (2020) quienes indican que el aumento del tiempo de curado está relacionado al incremento de las resistencias en concretos puzolánicos.

Tabla 32. Materiales constructivos ecológicos y edades de rotura para ensayos de resistencia a la compresión

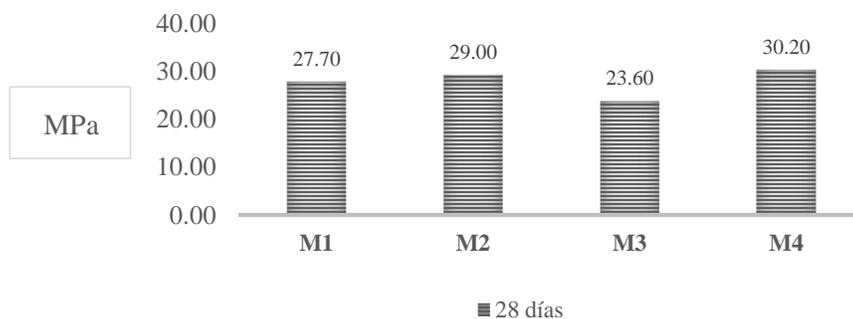
	Materiales Constructivos Ecológicos	Edad de rotura
Concretos	con reemplazo de áridos (gruesos y finos)	28 días
Estructurales	con reemplazo de cemento (cenizas de hojas de maíz)	28 días - 112 días
Concretos No Estructurales	con reemplazo de áridos gruesos	28 días
Morteros	con reemplazo de áridos finos	28 días

Fuente: Propia 2021

Se obtienen los resultados de la resistencia a la compresión de los eco-concretos y eco-morteros propuestos en esta investigación. En la Figura 45 se muestran los resultados de los primeros cuatro eco-concretos estructurales a una edad de 28 días, el Diseño de Mezcla

1 (M1) es un concreto convencional (sin contenido de material reciclado) y los M2, M3 y M4s son eco-concretos con reemplazo de agregados gruesos y finos.

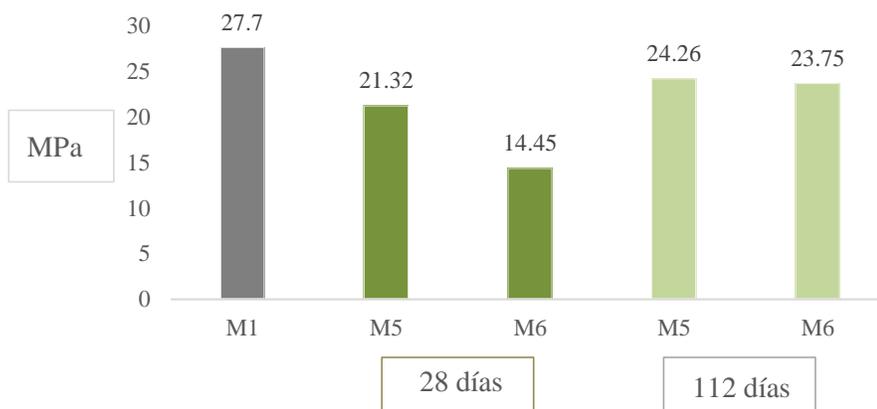
Figura 45. Resistencias a Compresión en MPa de los Eco-Concretos Estructurales



Fuente: Propia 2021

En la Figura 45 se muestran los resultados de las roturas de los eco-concretos estructurales restantes a edades de 28 días y de 112 días, los cuales contienen porcentajes de reemplazo puzolánico.

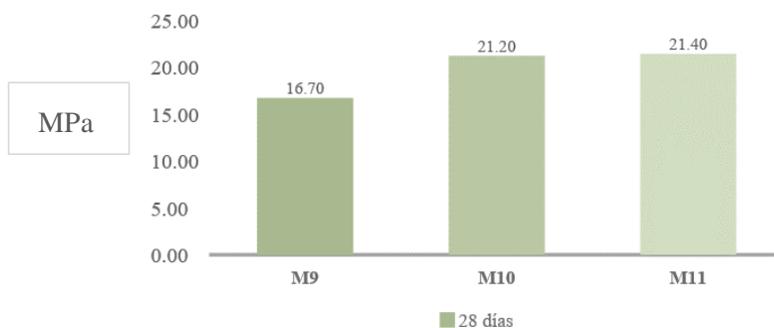
Figura 46. Resistencias a Compresión en MPa de los Eco-Concretos Estructurales puzolánicos a 28 días y a 112 días



Fuente: Propia 2021

Además de someter los eco-concretos puzolánicos a roturas de 28 días, se comprueba que existe un aumento de resistencias al cuadruplicar la edad de rotura de este tipo de eco-concretos (112 días). En la Figura 47 se muestran los resultados de los eco-concretos no estructurales, en donde M9 es el concreto convencional y los M10 y M11 son concretos ecológicos

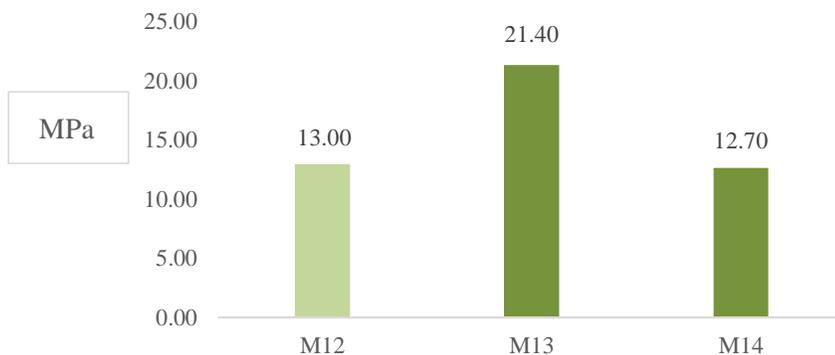
Figura 47. Resistencias (MPa) Concretos No estructurales



Fuente: Propia 2021

En la Figura 48 se muestran los resultados de los eco-morteros, en donde el M12 es la resistencia de un mortero convencional y los M13 y M14 son las resistencias de morteros ecológicos.

Figura 48. Resistencias a compresión en MPa de los eco-morteros



Fuente: Propia 2021

Dentro de los diseños de mezcla planteados inicialmente se proponen cuatro eco-concretos estructurales puzolánicos (M5, M6, M7 Y M8), de los cuales solo se muestran resultados de resistencias de dos eco-concretos puzolánicos (M5, M6) puesto que como se observa en la Figura 49, al realizar los eco-concretos con 30% de reemplazo puzolánico (M7, M8), se observa que estos se derrumban inmediatamente ocurre el desmolde, demostrando no poseer la consistencia ni resistencia mínima necesaria para un proceso de curado adecuado.

Figura 49. Diseño de Puzolánico con 30% de reemplazo, con consistencia débil



Fuente: Propia 2021

Mientras que los eco-concretos puzolánicos con un 10% de ceniza, poseen una resistencia perfecta para proceder a un adecuado proceso de curado.

Figura 50. Diseño puzolánico con un 10% de reemplazo



Fuente: Propia 2021

Tras encontrar los resultados de baja resistencia de los concretos puzolanicos con 30% de reemplazo se decide crear un nuevo diseño de mezcla con un 20% de cenizas de hojas de maíz, para evidenciar la viabilidad ecológica en eco-concretos con porcentajes mayores al 10% de puzolanas debido a que se encontraron óptimos resultados con este nivel de reemplazo.

Los resultados obtenidos, demostraron que con un 20% de sustitución de puzolanas, los eco concretos muestran mejoras en la consistencia que los que contienen un 30% de reemplazo, pero no el suficiente para el proceso de curado. Demostrando que de 16 diseños de mezcla realizados y 48 cilindros de concreto elaborados en total, 14 diseños de mezcla obtuvieron resultados excelentes y 42 especímenes se fallaron a compresión sin ningún problema.

Figura 51. Eco concretos con 20% de reemplazo



Fuente: Propia 2021

Es por ende que para los diseños 7 y 8 se concluyen características físicas mas no mecánicas, debido a su falta de consistencia para su curado y posterior ensayo a compresión ya que no resisten dichos procesos.

De tal manera, se puede concluir que existen 14 diseños de mezclas con resultados positivos a la compresión ya que cinco de ellos, superaron las resistencias de los concretos y morteros convencionales o testigos y los diseños restantes están por encima de las exigencias mínimas de normativas colombianas vigentes.

Como se muestra en la Figura 44, las mejores resistencias a la compresión de eco-concretos estructurales con reemplazos de agregados gruesos y finos fueron los diseños de mezcla 2 y 4. En la Figura 45 se observa que los eco-concretos estructurales puzolánicos obtuvieron resistencias inferiores a las alcanzadas por el concreto estructural convencional, sin embargo, se encuentran dentro de las resistencias exigidas por la NTC 4026 para concretos estructurales. En la Figura 46 se muestra que existe un aumento de resistencias en los eco-cocnetros puzolánicos al incrementar la edad de rotura de los mismos. En la Figura 47 se evidencia que los eco-concretos no estructurales superaron las resistencias del

concreto no estructural testigo y en cuanto a los dos eco-morteros realizados, solo uno de ellos (M13) superó la resistencia del testigo, el cual estaba compuesto por un 50% de agregado fino reciclado mientras que el eco-mortero con un 75% de reemplazo demostró resistencias inferiores a las del eco-mortero convencional.

5.5 Objetivo #5:

Para el diseño del prototipo final se elige un elemento constructivo no estructural, en relación a los revestimientos de las edificaciones, que además de ejercer una función estética, también sirva como incentivos de un espacio multifuncional, armonioso y sostenible para el usuario. De esta manera, en coherencia con el prototipo final no estructural, se seleccionan los concretos no estructurales elaborados en esta investigación, en donde se identifica nuevamente que el diseño de mezcla nueve (M9), el cual fue el concreto convencional no estructural, alcanzó una resistencia de 16.70 MPa y los diseños de mezcla número diez (M10) y número once (M11), superaron esta resistencia convencional con 21.20 MPa y 21.40 MPa respectivamente.

Debido a que tanto el M10 como el M11 obtuvieron resistencias similares, se procede a elaborar fachaletas con ambos diseños de mezcla para evaluar su comportamiento según los ensayos mecánicos dictaminados por la NTC 4024, la cual corresponde a prefabricados de concreto no reforzados.

En la Figura 47, se muestran las resistencias de los concretos no estructurales, de los cuales el eco-concreto M10 tiene un 50% de reemplazo de agregado grueso reciclado y el

M11 contiene un 75% de agregado grueso reciclado. Los eco-concretos no estructurales M10 y M11 no contienen agregado fino reciclado.

Con la elección de los eco-concretos a utilizar en el elemento constructivo no estructural, se elige el prototipo final, el cual será un producto arquitectónico denominado: Fachaleta. El diseño de este prototipo final se elabora teniendo en cuenta los lineamientos de diseño expuestos por Frank Ching (1979), los requisitos exigidos por la Norma Técnica Colombiana 4024 y teniendo en cuenta las tendencias en revestimientos para los años 2021-2022 según Decoraideas (2021). En la Tabla 33 se exponen los lineamientos de diseño del prototipo final:

Tabla 33. Lineamientos de diseño para la elaboración del Prototipo Final

		SI	NO
1. Elemento	1.1 Bloques macizos	x	
	1.2 Bloques Aserrados		x
2. Acabados	2.1 Naturales	x	
	2.2 Artificiales		x
3. Texturas	3.1 Rústica	x	
	3.2 Lisa		x
4. Materialidad	4.1 Concreto a la Vista	x	
5. Sostenibilidad	5.1 Ecológico	x	
6. Forma	6.1 Formas regulares		x
	6.2 Formas irregulares	x	
	6.3 Transformaciones	x	
	6.4 Formas aditivas	x	
	6.5 Formas Centralizadas		x
	6.6 Formas Lineales	x	
	6.7 Formas Radiales		x
	6.8 Formas Agrupadas		x
	6.9 Formas en Trama		x
	6.10 Formas aditivas	x	
	6.11 Formas sustractivas	x	
7. Espacio	7.1 Plano Base	x	
	7.2 Plano Elevado		x
	7.3 Plano Deprimido	x	
8. Principios Ordenadores de Diseño	8.1 Eje		x
	8.2 Simetría		x
	8.3 Ritmo	x	
	8.4 Repetición		x
	8.5 Pauta	x	

Fuente: Adaptado de Ching F (Ching F, 1979), Decoraideas (2021), NTC 4024

Determinando los patrones y lineamientos de diseño para la fachaleta ecológica se procede a realizar un diseño en 2D Y 3D como se observa en la Figura 52, para visualizar la representación gráfica del producto y poder proceder con la fabricación del molde según el diseño y las dimensiones establecidas.

Figura 52. Diseño en 3D del prototipo final



Fuente: Propia 2021

Posteriormente se inicia con la fabricación del molde artesanal que permita la reproducción de las piezas del prototipo final. Este proceso de fabricación se divide en 4 fases:

- **Obtención de herramientas**

Para ello se obtienen las herramientas necesarias para la fabricación del molde, las cuales son: madera, prensas de diferentes tamaños, reglas, sierra eléctrica, pegante de madera, vaselina, brochas, barras de silicona, pistola de silicona, silicona para molde, envases, mezclador. Teniendo las dimensiones del prototipo final, se procede a cortar a laser las formas que darán el diseño de la fachaleta y posteriormente proceder con el pegue.

Figura 53. Elementos y Herramientas necesarias para la fabricación del Molde



a) Cortes en madera del plano base y las dos formas aditivas de la fachaleta, b) herramientas para el pegue de las formas aditivas o caras de la fachaleta. *Fuente:* Propia 2021

- **Pegue de piezas**

Como se muestra en la Figura 54, se procede con el pegue de las caras o formas aditivas. Se pega una cara por día y se ajusta con las prensas por más de 20 horas para que no queden aberturas entre planos y se afecte el aspecto estético de las piezas a reproducir en el prototipo final. Posteriormente se levanta un volumen en piezas de madera de 0.23 m x 0.23 m para la reproducción de un molde que contenga 0.03 m de espesor.

Las piezas a reproducir tendrán dimensiones de 0.20 m x 0.20 m, sin embargo, el molde debe tener un espesor de más de 0.02 m para que durante el desencofre de las piezas en concreto, el molde no se vea afectado en su forma, más bien, sea resistente con el tiempo y tenga más durabilidad en relación al uso que se le dé con respecto al número de piezas reproducidas.

Una vez levantado el volumen donde se funde el molde, este se sella con vaselina para un adecuado desencofre de la madera y un terminado de calidad en las piezas de concreto

Figura 54. Pegue de piezas durante la fabricación del molde para la reproducción de las fachaletas

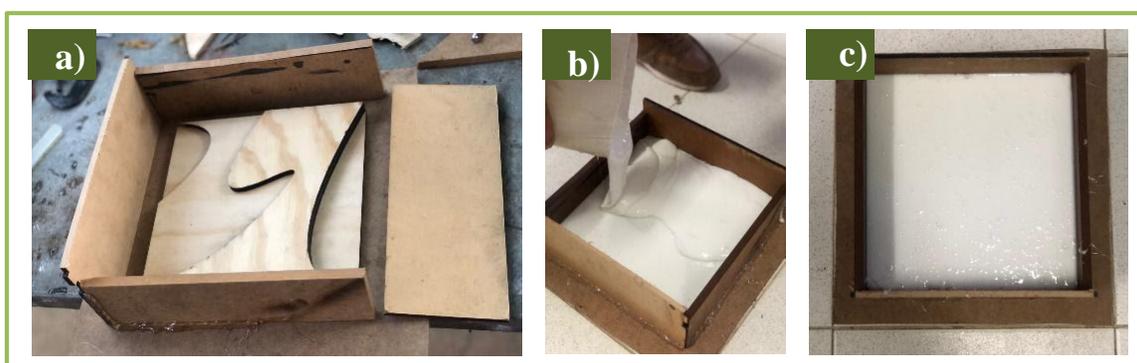


a. Pegue de caras o formas aditivas en madera para la fabricación del molde, b) - c) ajuste con prensas de cada cara para evitar aberturas e imperfectos en los pegues, d) sellamiento con vaselina para el adecuado desencofre del molde de silicona.

- **Vaciado del Molde**

Una vez elaborado el molde, se procede a vaciar la silicona en el volumen de madera de manera uniforme y se deja secar por 24 horas.

Figura 55. Vaciado de silicona en molde de madera

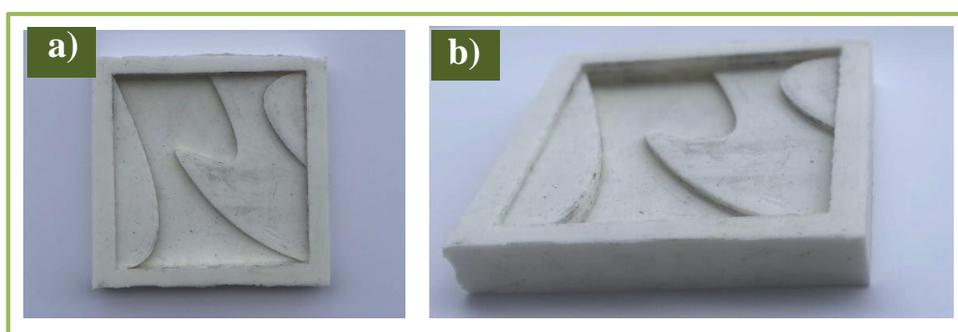


a. Elaboración del molde, b) Vaciado del molde, c) Molde finalizado con la silicona completamente seca después de 24 horas. *Fuente:* Propia 2021

- **Desenfofre del Molde**

Pasadas las 24 horas, se desenfocra el molde final y se observa en la Figura 56 que la terminación fue perfecta sin ningún tipo de afectación en las superficies del molde, lo que asegurará reproducciones de piezas de concreto con alta calidad.

Figura 56. Molde para la elaboración del prototipo final



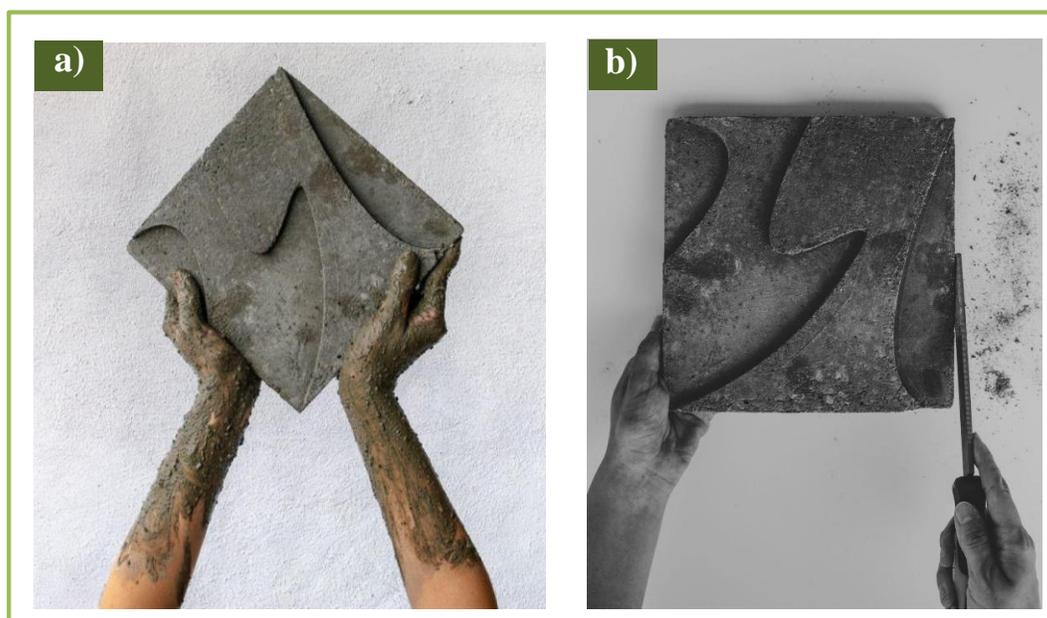
b) Molde Final, elaborado en silicona para la reproducción de piezas en concreto.

Fuente: Propia 2021

Una vez elaborado el molde se funden tres fachaletas por cada diseño de mezcla, en donde se evidencia un acabado más pulido en las fachaletas con el M10, el cual contenía menor porcentaje de material reciclado: 50%, sin embargo, se observa una buena estética en los acabados del M11 con 75% de reemplazo.

Se observa en la Figura 57, que las piezas se reproducen sin problema, encontrando acabados de calidad.

Figura 57. Prototipo Final: FACHALETAS ECOLÓGICAS



a) – b) Fachaletas ecológicas, producto final. *Fuente:* Propia 2021

De esta manera, se elaboran cuatro fachaletas con dos tipos de diseños de mezcla de concretos ecológicos.

Para evaluar la aplicabilidad y viabilidad de la incorporación de las fachaletas en las edificaciones colombianas, se realizan cuatro tipos de ensayos mecánicos según normativas colombianas relacionadas a productos constructivos no estructurales, como se muestra en la Tabla 34.

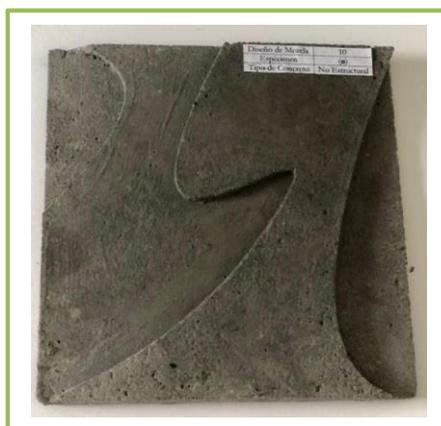
Tabla 34. Ensayos Mecánicos para el Prototipo Final

ENSAYOS	DESCRIPCIÓN	NTC
Ensayos sobre Unidades de Mampostería y Elementos Pre Fabricados	Absorción	NTC 4024
	Densidad	NTC 1667
Ensayos al Concreto	Flexión	NTC 4024
Ensayos Cualitativos	Corte	

Fuente: Propia 2021

Para elaborar las respectivas pruebas mencionadas en la Tabla 34, se envían al laboratorio unidades enteras de muestras de fachaletas ecológicas. Estas fachaletas se rotularon según exigencias de la NTC 4024 para realizarles ensayos de compresión y flexión. En la Figura 58 se muestra los especímenes rotulados.

Figura 58. Especímen Rotulado del Prototipo Final



Fuente: Propia 2021

Se realizan pruebas de corte a las fachaletas para evaluar su viabilidad mecánica y rapidez a la hora de su instalación en los muros de las edificaciones como se muestra en la Figura 59. Se toma la fachaleta por la parte trasera y se divide proporcionalmente en tres partes, de tal forma que se obtienen tres bloques aserrados de concreto ecológico.

Figura 59. Pruebas de Corte Fachaletas Ecológicas



Fuente: Propia 2021

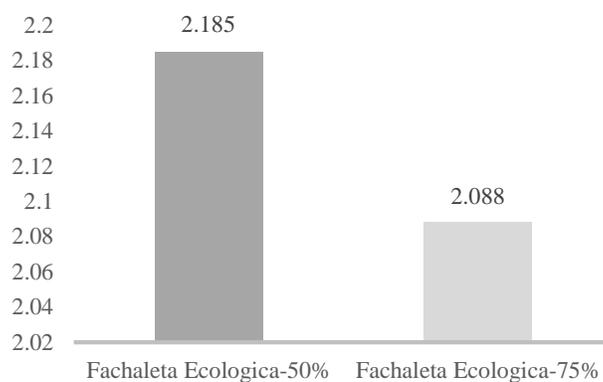
Estos tres bloques aserrados son nuevamente rotulados y enviados al laboratorio para obtener resultados de ensayos de absorción y densidad.

En las pruebas de corte se evidencian tres aspectos importantes: 1) el corte en las fachaletas con el diseño de mezcla 10 (M10), el cual contenía un 50% de reemplazo de agregado grueso reciclado, se demoró más tiempo que el corte del M11, el cual contenía un 75% de reemplazo, además de exigir más presión y aplicación de fuerza con la pulidora. El material particulado generado en los cortes del M11 fue mayor que en los cortes del M10, generando mayor polución. Tanto las fachaletas con diseños de mezcla M10 y M11 mostraron cortes estéticos y completamente viables en la incorporación y pegue de estos productos en una edificación.

Después de obtener bloques aserrados de los prototipos finales con diseños de mezcla de concretos ecológicos (M10, M11), se procede a enviar dichos bloques al laboratorio

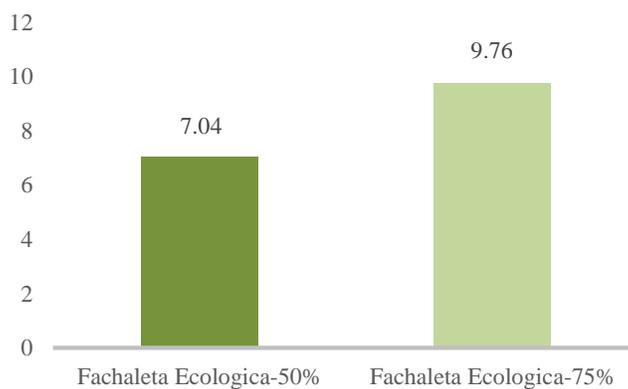
para la realización de los ensayos sobre unidades de mampostería y elementos pre fabricados (Tabla 34). A continuación, se presentan los resultados.

Figura 60. Ensayo de Densidad – Fachaletas Ecológicas



Fuente: Propia

Figura 61. Ensayo de absorción – Fachaletas Ecológicas

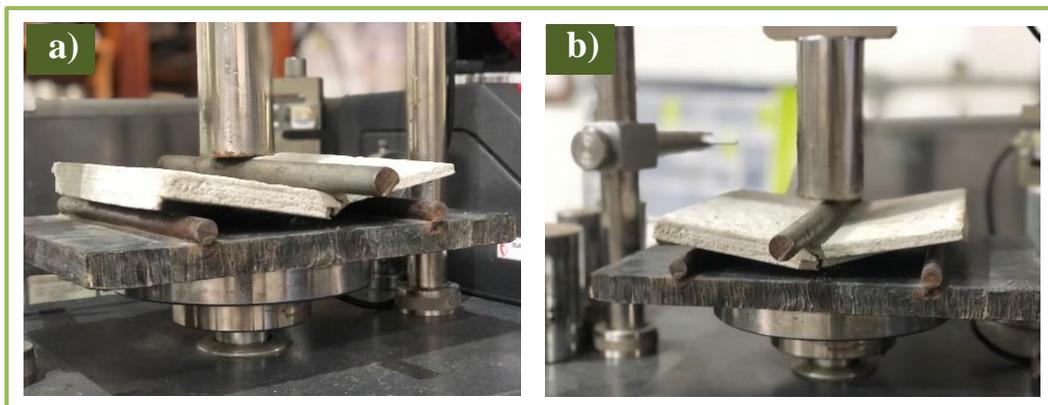


Fuente: Propia

Para finalizar los ensayos requeridos para bloques de concreto no estructurales, se realizan ensayos de flexión a las fachaletas con diseños ecológicos como se muestran en la

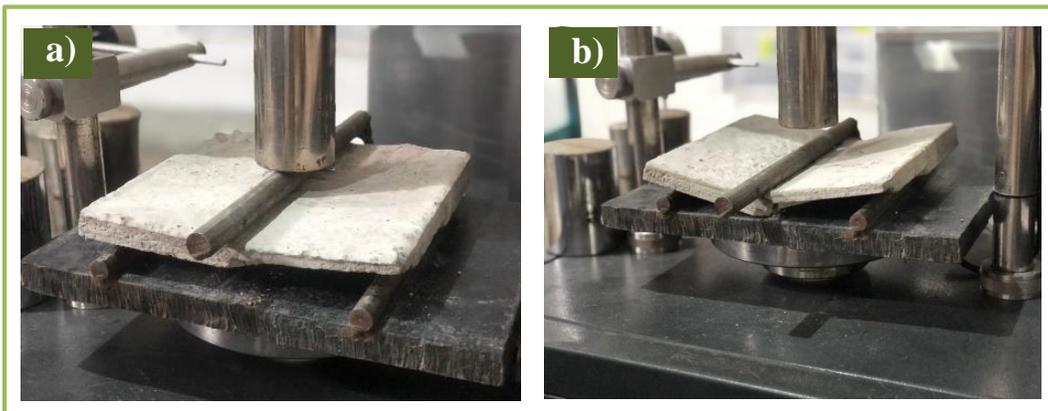
Figura 62 y 63. Estos ensayos se realizaron por medio del método de la viga simple cargada en el punto central.

Figura 62. Ensayo de Flexión – Fachaleta Ecológica (M10)



a)-b) Resistencia a la Flexión – Prototipo con Diseño de Mezcla 10 (M10). Fuente: Propia 2021

Figura 63. Ensayo de Flexión – Fachaleta Ecológica (M11)

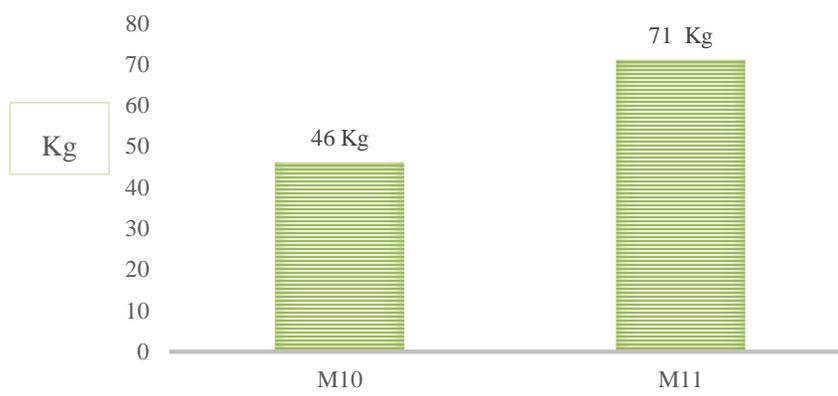


a)-b) Resistencia a la Flexión – Prototipo con Diseño de Mezcla 11 (M11). Fuente: Propia 2021

Los resultados de los ensayos a flexión se muestran en la Figura 64, en donde se muestra que el prototipo con el diseño de mezcla 10, el cual contenía un 50% de agregado grueso

reciclado, presentó una mejor resistencia a la flexión, demostrando 46 kg de carga en el instante de rotura, tomando un tiempo de 2 minutos (120 segundos) para la deformación y rotura de la fachaleta, implementando el ensayo con una velocidad de 5.00 kg/seg. De esta manera se concluye que el prototipo ecológico M10 con un 50% de material reciclado es muy estable a la flexión, evidenciando que, al implementarle cargas a la fachaleta, esta se puede deformar bastante y no colapsa rápidamente. El prototipo con el diseño de mezcla M11 con un 75% de agregado grueso reciclado, se sometió al ensayo de flexión con la misma velocidad que el prototipo con M10 y demostró una mayor carga en el instante de rotura con 71 kg, lo cual demuestra que es un prototipo con mayor resistencia a la compresión, en comparación al prototipo con M10, sin embargo, este prototipo colapsa rápidamente, tomando 15 segundos en fracturarse, siendo poco resistente a la deformación. La fachaleta con M10 resistió 25 kg menos que la fachaleta con M11 y tomó un tiempo de deformación de 87.5 segundos más que el prototipo con M11, antes de colapsar. El módulo de rotura (MR) de la fachaleta con M10 fue de $0,0129 \text{ kg/cm}^2$ y el MR de la fachaleta con M11 fue de $0,0200 \text{ kg/cm}^2$.

Figura 64. Resistencia a la Flexión – Fachaletas Ecológicas



Fuente: Propia

Se evidencia que el prototipo final con M10 es muy flexible y totalmente viable en la implementación de revestimientos en edificaciones. El prototipo con M11 es de igual forma viable en la implementación de revestimientos en edificaciones, sin embargo, al demostrar mejores resultados de cargas, es un prototipo que puede considerarse en la implementación de otro tipo de elementos constructivos no estructurales como los adoquines o las baldosas, ya que es posible ejercerle mayores fuerzas al producto antes de que este se fracture. El hecho de que la fachaleta con M10 haya obtenido una resistencia en kg menor que la fachaleta con M11 no significa que sea menos eficiente, ya que esto se define según el uso que se le dé al prototipo dentro de la edificación; la fachaleta con M10 presentaría mejores resultados como revestimiento ya que funciona mejor a la flexión, resistiendo cargas sin deformarse fácilmente, como puede suceder en los casos de movimientos telúricos en donde las edificaciones suelen estremecerse sometándose a esfuerzos horizontales y verticales, sin embargo la fachaleta con M11 presentaría mejores resultados como adoquín o baldosa, ya que puede resistir mayores cargas ejercidas de manera vertical.

Como complemento de esta investigación se responde a la hipótesis planteada en el inicio de la investigación en donde se plasma que:

Los impactos negativos de la elaboración del cemento y de la inadecuada disposición de los RCD se verán reducidos al reemplazar parte del cemento por material puzolánico proveniente de las hojas de maíz y agregados naturales por agregados reciclados en el concreto.

De esta manera se enumeran en la Figura 65 los procesos en la producción de materiales granulares para la elaboración de productos en concreto y sus impactos ambientales

Figura 65. Procesos para la obtención de agregados para la elaboración de productos en concreto



Fuente: Propia

A través de estos cuatro procesos principales se generan distintos impactos ambientales, los cuales se verían reducidos al incorporar residuos dentro de los procesos de trituración, puesto que se reducirían las disposiciones finales tanto adecuadas como inadecuadas ya que procederían directamente a trituradoras que los convertirían nuevamente en agregados para la construcción, de esta manera se disminuyen los procesos y por ende los impactos de los dos principales ítems de la Figura 65, tal y como se muestran en la Figura 66

Figura 66. Reducción de procesos y de impactos a través del aprovechamiento de RCD



Fuente: Propia

De igual manera también es posible la reducción de impactos ambientales a través de la utilización de puzolanas pues la emisión de CO₂ se reduce en un 48% al implementar cenizas de hojas de maíz como material cementante, evitando los altos consumos energéticos del Clinker.

Adicionalmente a las reducciones en los impactos ambientales, existen impactos económicos, ya que según Escandón Mejía (2011) es posible obtener reducciones económicas al implementar materiales ecológicos en la producción de concreto. Es por esto que se usa como referente el análisis de costos de Escandón Mejía para realizar una comparación de costos en relación al prototipo final ecológico versus una fachaleta convencional y posteriormente evaluar la viabilidad económica de este elemento constructivo no estructural.

Para realizar la evaluación económica se describen los materiales utilizados en una fachaleta convencional (sin material ecológico) con sus respectivas cantidades, tal y como se muestra en la Figura 67

Figura 67. Materiales Utilizados en una Fachaleta elaborada con concreto convencional

Cemento Portland bulto	\$77.76
Arena Natural m³	\$0.714
Grava Natural m³	\$1.090
Agua ml	\$0.753
Aditivo ml	\$0.007
TOTAL	\$80.32

Fuente: Propia

Adicionalmente se describen los materiales utilizados en una fachaleta elaborada con concreto ecológico con sus respectivas cantidades

Figura 68. Materiales Utilizados en una Fachaleta elaborada con concreto ecológico

Cemento Portland bulto	\$54.48
Arena Excavación m³	\$0.255
RCD m³	\$0.274
Agua ml	\$1.049
Aditivo ml	\$0.013
TOTAL	\$56.07

Fuente: Propia

Se evidencia que el total de los costos de la fachaleta elaborada con concreto ecológico es menor que el total de los costos de la fachaleta con concreto convencional, evidenciando una reducción económica de \$24.25 pesos lo que representaría un 69.80% de ahorro. De esta manera se muestra que el prototipo final elaborado en esta investigación muestra reducción de impactos ambientales y económicos.

6. Discusión de Resultados

Los resultados del diagnóstico de los RCD en la ciudad de Neiva concluyen que es posible realizar aprovechamientos de los principales residuos que generan las obras constructivas en la ciudad, los cuales son: Residuos de Excavación y Residuos de Demolición. Se coincide con Sandoval, et al. (2016) quienes investigaron de manera local en el municipio de Neiva, la viabilidad de procesos de aprovechamiento de RCD, evidenciando la gran cuantía de generación de estos residuos en la ciudad, permitiendo su reciclaje y posterior valorización. El diagnóstico muestra que a nivel nacional, Neiva es la décima ciudad productora de RCD con 2.900 ton en 2011; que durante el 2014 y 2019 existió un total de 553.371 toneladas de RCD recibidas en las dos escombreras autorizadas del municipio, que entre el 2019 y 2020 existió 55.824 ton generadas por la ciudad; que se reciben en puntos autorizados hasta 19.492 ton de RCD por mes, en donde el 75% de las empresas encuestadas genera principalmente residuos de excavación, seguidos por los de demolición y residuos cerámicos; identificando también que los materiales compuestos como mortero, concreto y las mezclas asfálticas son los materiales más empleados por el 50% de las empresas encuestadas; que el 58% de estas empresas ha implementado elementos constructivos no estructurales reciclados dentro de sus obras, el 16% ha implementado elementos reciclados de uso estructural y el 25% restante nunca ha implementado procesos de reciclaje in situ y desconoce las problemáticas de las disposiciones inadecuadas de los RCD.

De esta manera, el RCD que más se genera en la ciudad de Neiva son los residuos de excavación, seguidos de los residuos de demolición.

En la implementación de contenido puzolánico en eco-concretos se obtienen resultados que coinciden con las evidencias encontradas en la investigación de Shakouri, et al. (2020), ya que se demuestra la importancia del pretratamiento del rastrojo de las hojas de maíz como sustitución del cemento para obtener mejores resistencias en los eco-concretos, mostrando que el tratamiento previo antes de la combustión aumenta el contenido de SiO₂ de la ceniza. De igual forma se concluyen resultados similares con Matthey, et al. (2015), al demostrar viabilidad en la elaboración de eco-concretos con material puzolánico, encontrando mejores procesos en la combustión del material orgánico dependiendo su grado de humedad, evidenciando una quema más rápida cuando las hojas de maíz se encuentran totalmente secas con 14 días de curado, como lo expresa en su investigación Apaza Lazo y Salcedo Tejeda (2019).

En cuanto a las caracterizaciones mecánicas y físico-químicas de los materiales naturales y reciclados para la elaboración de los concretos propuestos en esta investigación se encuentran similitudes en las caracterizaciones químicas y granulométricas del cemento y de la ceniza de hoja de maíz ya que la puzolana muestra una curva granulométrica descendente al igual que la gradación del cemento, encontrando en la ceniza un material “fino” con un módulo de finura de: 2.1, y un material “extra fino” en el material cementante con un módulo de finura de 0.01. Se muestran diferencias de un 6% en el porcentaje de contenido de humedad de estos materiales, mostrándose la ceniza con más contenido de humedad, puesto que existe un 0.4% de contenido de humedad en el cemento y un 6.4% en la puzolana.

También, se muestra que la ceniza de hojas de maíz cuenta con un porcentaje superior de óxido de silicio, con respecto al cemento por un 21.44 %.

En relación a los agregados gruesos se concluye que la grava de río tiene una densidad de 1.403 g/cm^3 mostrándose poco poroso en comparación con el RCD grueso, el cual obtuvo una densidad de 1.150 g/cm^3 presentando una disminución en comparación con el agregado grueso natural, mostrándose más poroso, lo que significó una disminución en las resistencias con mayores porcentajes de reemplazo de RCD grueso en los eco-concretos estructurales ya que además de la sustitución de RCD grueso, se implementó también una sustitución de RCD fino en estos especímenes, sin embargo, el reemplazo de RCD grueso de mayores porcentajes en los eco-concretos no estructurales significó un aumento de resistencias en comparación con sustituciones menores.

Se obtuvo resistencias superiores tanto de eco-concretos como de eco-morteros en relación a los concretos y morteros convencionales, demostrando la viabilidad mecánica de las sustituciones de material reciclado. Todos los resultados de resistencias superaron las exigencias mínimas de las NTC 4076, NTC 4026 y NTC 4024.

Los resultados de las caracterizaciones de los agregados finos mostraron que el agregado fino natural contiene un módulo de finura ligeramente fino: 2.9, lo que permite tener un agregado fino establecido dentro de la normatividad ya que, según esta, la arena de trituración no debe ser menor de 2.3 ni mayores de 3.1. Este agregado fino natural tiene una densidad de 1.523 g/cm^3 mostrándose denso y poco poroso. Se encuentran similitudes de densidad con la arena de excavación ya que obtuvo 1.277 g/cm^3 , presentándose más poroso que la arena de río, pero no muy alejado de la densidad convencional. El RCD fino

presenta similitudes en el módulo de finura en relación al agregado fino natural ya que el módulo de finura de este material es ligeramente fino: 2.94, encontrando una curva granulométrica descendente al igual que la gradación del agregado fino natural; su densidad es de 1.239 g/cm^3 y tiene un porcentaje de vacíos de 37.9, mostrando una menor porosidad incluso que el agregado fino natural, lo que se relaciona directamente al aumento de resistencias de los eco-concretos y eco-morteros que obtuvieron sustituciones de este material.

Los resultados de resistencias a compresión concluyeron similitudes a las investigaciones de Fernández R (2009) y Matthey, et al. (2015), ya que demostraron que la aplicación de cenizas de hojas de maíz como puzolana para concretos es viable y además demuestra resultados positivos para la resistencia de concretos estructurales, sin embargo se concluyen discrepancias con los resultados de D.A. Adesanya (1996), quien encontró viable la elaboración de eco-concretos puzolánicos con reemplazo de 20% de material cementante, demostrando resistencias a compresión positivas, mientras que en la presente investigación, los eco-concretos puzolánicos con 20 y 30% de reemplazo no mostraron la consistencia suficiente para un adecuado procesos de curado y por ende no fue posible someterlos a ensayos mecánicos debido a su debilidad.

En cuanto las resistencias de eco-concretos estructurales, se coincide con Cruz Veloza & Gómez Rodríguez (2013), quienes evidencian disminuciones en las resistencias de eco-concretos estructurales al incorporar agregado grueso reciclado al igual que en la presente investigación. De la misma forma, se coincide con Shakouri et al. (2020) quienes demostraron un aumento de resistencias en concretos puzolánicos al incrementar su tiempo

de curado de 28 días a 112 días al igual que las resistencias obtenidas en los eco-concretos puzolánicos elaborados en este trabajo; las resistencias de estos especímenes puzolánicos aumentaron en un 12.11% para el M5 y un 39.15% para el M6 en resistencias a la compresión (MPa) a 112 días en comparación con las roturas a 28 días , sin embargo no superaron las resistencias del concreto convencional.

Los resultados de las resistencias a compresión en eco-concretos con sustitución de RCD en granulometrías finas mostraron similitudes con los resultados de Puente de Andrade, et al. (2020) quienes identificaron que con este tipo de reemplazos en eco-concretos se “pueden alcanzar valores de resistencia a la compresión iguales al concreto convencional” (pág. 2). De hecho, en la presente investigación el eco-concreto estructural (M4) elaborado con reemplazo de RCD, superó las resistencias del concreto convencional. Este aumento de resistencias se relaciona directamente al bajo porcentaje de vacíos que se obtuvo en la caracterización del material (Tabla 22).

Se demostraron resistencias a la compresión superiores en eco-morteros con sustitución de agregado fino de RCD con respecto al mortero convencional, al igual que se demostró en investigaciones anteriores de Mateus Ramírez y Gelves Peña (2020) y Restucia, et al. (2016).

Se evidencia resultados positivos para las fachaletas elaboradas en esta investigación con concreto ecológico, obteniendo entre 46 kg y 71 kg de carga en el instante de rotura para ensayos a flexión, aumentando la resistencia de la carga en el instante de rotura en la medida en que aumenta el porcentaje de agregado reciclado en el elemento constructivo no estructural.

7. Conclusiones

Los RCD que más se generan en la ciudad de Neiva y quienes son susceptibles de aprovechamiento y posterior valorización son los residuos de excavación y residuos de demolición.

Se encuentran diferencias en las caracterizaciones físicas de los agregados gruesos naturales con respecto a los agregados gruesos reciclados, lo que influye en los resultados de resistencias a la compresión. Se encuentran similitudes en la caracterización física de los agregados finos naturales con respecto a los agregados finos reciclados, evidenciando un aumento de resistencias en los eco-concretos con este tipo de reemplazo (M2, M4). Las hojas de maíz con un debido pre tratamiento antes de los procesos de combustión (Figuras 27 y 28) evidencian resultados positivos de contenido de SiO_2 en la caracterización físico-química, aumentando el contenido en un 21.44%.

Los eco-concretos estructurales con sustituciones de agregados finos reciclados (M2, M4) mostraron resistencias superiores al concreto convencional y disminución de las resistencias con sustitución de agregado grueso reciclado (M3). Los eco-concretos puzolánicos con más de 10% de sustitución (M7, M8), muestran consistencias débiles e imposibilitan un adecuado curado y posterior rotura a compresión. Los eco-concretos no estructurales (M10, M11) mostraron resistencias superiores al concreto no estructural convencional (M9). Los eco-morteros con 50% de sustitución de RCD fino (M13) mostraron resultados positivos a compresión superando las resistencias del eco-mortero convencional (M12), sin embargo, los eco-morteros con un 75% (M14) de sustitución mostraron disminución de resistencias con respecto al eco-mortero convencional.

Todos los eco-concretos y eco-morteros se encuentran dentro de las exigencias de las Normas Técnicas Colombianas 4076 y 4026.

El prototipo final con enfoque arquitectónico se muestra en perfectas condiciones, lo que evidencia un adecuado proceso de elaboración y fabricación del molde que permite la reproducción de dichas piezas.

Se evidencia en las pruebas de corte que los dos tipos de fachaletas elaboradas con concreto ecológico presentan resultados de corte estéticos y viables para la instalación en edificaciones, sin embargo, la fachaleta con un 50% de agregado reciclado se elige como la mejor opción debido a que no emite tanto material particulado en el momento del corte, presenta menor absorción, mayor densidad y mejores resultados a flexión.

De igual manera se evidencia que la elaboración de productos elaborados con concreto ecológico demuestra reducciones en impactos ambientales y en costos económicos.

8. Lista de Referencias

- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2020). *Lineamientos ambientales para centros de aprovechamiento de residuos de construcción y demolición – carcd. bogotá: secretaria de ambiente*. retrieved from lineamientos ambientales para centros de aprovechamiento de residuos de construcción y demolición – carcd: <http://www.ambientebogota.gov.co/documents/10157/1247415/lineamientos+ambientales+para+centros+de+tratamiento+y+aprovechamiento+de+rcd.pdf>
- Apaza Lazo , e., & salcedo tejeda, j. (2019). Influencia de la ceniza de hoja de maíz, cáscara de cebada y bagazo de caña de azúcar (materiales puzolánicos artificiales), como sustitutos parciales del cemento en la resistencia del concreto para diseños: $f'c = 175 \text{ kgf/cm}^2$, $f'c = 210 \text{ kgf/cm}^2$, $f'c = 280$. *trabajo de grado*. universidad católica de santa maría, arequipa, perú. retrieved from <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/ucsm/8803>
- Argos. (2020). *360 en concreto*. retrieved from <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/191qu233-es-la-puzolana#:~:text=resumen%3a,un%20compuesto%20con%20propiedades%20cementantes>.
- Bogotá, i. i. (2019). *invest in bogotá*. retrieved from <https://es.investinbogota.org/sectores-de-inversion/materiales-de-construccion>
- C.F. Oliveira, et al. (2020). use of concrete fine fraction waste as a replacement of portland cement . *cleaner production*, 1-9. retrieved from <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0959652620331711?token=9950128ab8>

- 1bf3399a8bcdabe1a2cd08618c3b54807a8c8e8295ef61028245dcd662e320e499250e3e2ab51c2d5b7a7c&originregion=us-east-1&origincreation=20211102025649
- Camacol. (2019). *la economía circular en el sector de la construcción*. cartagena: minambiente. retrieved from <https://camacol.co/sites/default/files/la%20econom%c3%8da%20circular%20en%20el%20sector%20de%20la%20construcci%c3%93n.pdf>
- Castaño O, et al. (2013). gestión de residuos de construcción y demolición (rcd) en bogotá: perspectivas y limitantes. *tecnura*, 9.
- Cemex. (2020). *cemex*. retrieved from <https://www.cemex.com/es/productos-servicios/productos/cemento>
- Cemex. (2020). *cemex.com*. retrieved from <https://www.cemex.com/es/productos-servicios/productos/cemento>
- Ching F. (1979). *forma, espacio y orden*.
- ConceptoDefinición. (2021, octubre 04). <https://conceptodefinicion.de>. retrieved from <https://conceptodefinicion.de/concreto/>
- Cruz Veloza, m., & gómez rodríguez, o. (2013). influencia del agregado grueso reciclado de mampostería en el. *tesis maestría*. universidad javeriana, bogotá. retrieved from <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/12676/cruzvelozamoni-caasleidy2013.pdf?sequence=1&isallowed=y>
- D.A. Adesanya. (1996, september). evaluation of blended cement mortar, concrete and stabilized earth made from ordinary portland cement and corn cob ash. *construction*

- and building materials*, 10(6), 423-485. retrieved from [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(96\)00001-3](https://doi.org/10.1016/0950-0618(96)00001-3)
- Dane. (2018). *encuesta ambiental industrial (eai)*. bogotá: dane. retrieved from https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/eai/2018/bol_eai_2018.pdf
- Dane. (2018). *encuesta nacional agropecuaria ena históricos*. dane, todos. colombia: dane. retrieved from <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-nacional-agropecuaria-ena/encuesta-nacional-agropecuaria-por-departamentos>
- Dane. (2019). *anexo-ena-comercio-cultivos-transitorios-2019-i*. bogotá: dane. retrieved from <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-nacional-agropecuaria-ena/encuesta-nacional-agropecuaria-por-departamentos>
- Dane. (2019). *indice de producción industrial ipi 2019*.
- Dane. (2020). *censo de edificaciones ceed*. bogotá: dane. retrieved from https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/ceed/bol_ceed_ivtrim20.pdf
- Dane. (2020). *dane.gov.co*. retrieved from https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/concreto/bol_concreto_nov_20.pdf

- Dane. (2020). *dane.gov.co*. retrieved from https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/cemento_gris/bol_cemen_gris_dic20.pdf
- Dane. (2020). *economía circular*. bogotá: dane. retrieved from <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/ambientales/economia-circular>
- Dane. (2020). *mercado laboral por departamentos* . bogotá: dane. retrieved from https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/ech/ml_depto/boletin_geih_dep_20.pdf
- De santos, et al. (2011). *gestión de residuos en las obras de construcción y demolición*. madrid: tornapunta ediciones, s.l.u. retrieved from <http://libreria.fundacionlaboral.org/extpublicaciones/gestionresiduos2.pdf>
- Decoraideas. (2021, junio 9). <https://decoraideas.com/>. retrieved from <https://decoraideas.com/fachadas-de-casas/>
- Decorcerámica. (2021, octubre 226). <https://www.decorceramica.com/>. retrieved from <https://www.decorceramica.com/producto/kn03xg082/>
- E. Anastasiou, k. Georgiadis Filikas, & M. Stefanidou. (2014, january 15). utilization of fine recycled aggregates in concrete with fly ash and steel slag. *construction and building materials*, 50, 154-161. retrieved marzo 2021, from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.037>
- Escandon Mejía, J. C. (2011). diagnóstico técnico y económico del aprovechamiento de residuos de construcción y demolición en edificaciones en la ciudad de bogotá.

- (*trabajo de grado*). pontifica universidad javeriana, bogotá. retrieved from <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7516/tesis603.pdf>
- Fernandez Ledesma, e. (2016). use of industrial waste in masonry mortar manufacturing. *trabajo*. universidad de cordoba, córdoba. retrieved from <https://helvia.uco.es/xmlui/bitstream/handle/10396/13695/2016000001438.pdf?sequence=1&isallowed=y>
- Fernandez R, S. E. (2009). evaluación de concretos puzolánicos elaborados con contenido de ceniza de hoja de maíz para uso estructural. (*trabajo grado*). universidad central de venezuela, caracas. retrieved from <http://saber.ucv.ve/handle/123456789/11261>
- Garcia, R. (2019). *gestión de los residuos inertes uf0286*. logroño: tutor formación.
- Mateus Ramírez, c. a., & gelves peña, d. a. (2020). mecánica a compresión en morteros evaluación de resistencia en morteros de cemento con agregado rcd. *trabajo de grado por el titulo de ingeniero*. universidad católica de colombia, bogotá. retrieved from <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/24801/1/doc%20final%20proyecto%20de%20grado%20%23%2014.pdf>
- Mattey, et al. (2015). aplicación de la cascarilla de arroz obtenida de un proceso agro-industrial para la fabricación de bloques en concreto no estructurales. *revista latinoamericana de metalurgia y materiales*, 285-294.
- Minagricultura. (2017). huila_2017. *principales cultivos por área sembrada en 2017*.
- Minambiente. (2017). *resolución 0472 de 2017*.

- Minambiente. (2020). *minambiente.gov.co*. retrieved from <https://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias/2681-minambiente-reglamenta-%7c%20manejo-y-disposicion-de-residuos-de-construccion-y-escombros>
- ONU. (1987). *informe de la comisión mundial sobre el medio ambiente y el desarrollo (informe brundtland)*. global: naciones unidas. retrieved from http://www.ecominga.uqam.ca/pdf/bibliographie/guide_lecture_1/cmmad-informe-comision-brundtland-sobre-medio-ambiente-desarrollo.pdf
- ONU. (2015). *un.org*. retrieved from <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Páez Jiménez , c., & Pacheco Bustos, c. (2019). *guía para el manejo integral de los residuos de construcción y demolición en la ciudad de barranquilla*. barranquilla: universidad del norte.
- Prada, a., & Cortés , C. E. (2010). la descomposición térmica de la cascarilla de arroz: una alternativa de aprovechamiento integral. *revista orinoquia*, 155-170.
- Puente de Andrade, g., De Castro polisseni, g., pepe, m., dias, r., & filho, t. (2020, august 20). design of structural concrete mixtures containing fine recycled concrete aggregate using packing model. *construction and building materials*, 1-11. retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119091>
- Ordoñez Mejía, D, Ramos Páez, M., Rodríguez Florez, c., Segura, R., Díaz, J., & UAN. (2020). diseño y construcción de fachaleta arquitectónica con material de residuos de construcción y demolición (rcd). colombia.

- Restuccia et al. (2016). recycled mortars with c&d waste. *publicación*. politecnico di torino, catania, italy. retrieved from <https://pdf.sciencedirectassets.com/314029/1-s2.0-s2452321616x00030/1-s2.0-s2452321616303808/main.pdf?x-amz-security-token=iqojb3j pz2lux2vjeot%2f%2f%2f%2f%2f%2f%2f%2f%2fweacxvzlvhc3qtmsjimeyciqdd2kn%2fap58azfwj%2bsy7fbigaykzwqh4axqtcfnfxiwswhak%2b0rk>
- Sandoval, J., Vallejo, J., Duarte, M., Rios, A., & Vallejo, L. (2016). localizacion y caracterizacion de los escombros de la ciudad de neiva. *revista ambiental agua aire y suelo*, 8. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/230759983.pdf>
- SCI. (2021). *SCI Control e Inspección*. Retrieved from <https://scisa.es/ensayos-mecanicos-tipos/#:~:text=Los%20ensayos%20mec%C3%A1nicos%20que%20realizamos,es%20la%20resistencia%20que%20presentan.>
- Secretaria de Agricultura y Minería. (2019). *evaluacion definitiva consolidada para cultivos agrícolas semipermanentes y permanentes año 2019*. Huila: Gobernación del Huila. Retrieved from <https://www.huila.gov.co/publicaciones/5032/evaluaciones-agropecuarias-476/>
- Secretaria Distrital de Ambiente, Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. (2014). *Guía para la elaboración del Plan de Gestión Integral de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en obra*. Bogotá.
- Shakouri, M., Exstrom, C., Ramanathan, S., Suraneni, P., & Vaux, J. (2020). Pretreatment of corn stover ash to improve its effectiveness as a supplementary cementitious

- material in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 112, 1-10. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103658>
- Suárez Silgado, S., Betancourt Quiroga, C., Molina Benavides, J., & Mahecha Vanegas, L. (2019). La gestión de los residuos de construcción y demolición en Villavicencio: estado actual, barreras e instrumentos de gestión. 224-244.
- Suárez Silgado, S., Molina, J., Mahecha, L., & Calderón, L. (2018). Diagnóstico y propuestas para la gestión de los residuos de construcción y demolición en la ciudad de Ibagué (Colombia). *Gestión y Ambiente*, 9-21.
- Tertre Torán, J. (2016). *conama.org*. Retrieved from http://www.conama.org/conama/download/files/conama2016/STs%202016/1998972374_ppt_JITertre.pdf
- Universidad Antonio Nariño, & Suárez Silgado, S. (2020-1). Proyecto presentado en la convocatoria interna de la UAN en el 2020-1, denominado "Evaluación bajo un enfoque multicriterio del uso de residuos en la producción de concreto". Colombia.