

Doctorado en proyectos

Diseño de una mezcla compuesta con fibra natural para la elaboración de placas prefabricadas en concreto

Henry Yecid Bustos Castañeda

Director: Dr. Ricardo Martínez Gutiérrez

Co Director: María García Ballesta

Bogotá D. C., 25/05/2024

Resumen

La presente investigación realizó un análisis comparativo de la viabilidad de utilizar diferentes tipos de fibra vegetal como aditivo de refuerzo mecánico en mezclas de concreto y tuvo como objetivo diseñar una mezcla compuesta con fibra natural que contenga las propiedades mecánicas y productivas requeridas para cumplir con las especificaciones técnicas en la elaboración de placas prefabricadas en concreto con unas características favorables de impacto económico y medioambiental. Para realizar el estudio se implementaron técnicas avanzadas de caracterización de materiales, como son la microscopía electrónica de barrido (SEM) y el análisis por energía dispersiva de rayos – X (EDX). Adicionalmente, se realizaron los respectivos ensayos establecidos en la normativa nacional para evaluar la resistencia a la compresión del concreto, este ensayo se define a detalle en la normativa colombiana “NTC-673”. Los resultados mostraron un aumento considerable en la resistencia a la compresión para todos los cilindros de concreto que contenían aditivo de fibra vegetal. La composición química evidenció la presencia de Silicio, Calcio y Potasio como elementos relevantes para estudiar la influencia de la composición química en el aumento de la resistencia a la compresión del concreto. Estos hallazgos lograron demostrar que fue posible diseñar mezclas compuesta con fibra natural con propiedades mecánicas acordes a la normativa colombiana que evalúa la resistencia a la compresión. Adicionalmente, un análisis financiero comprobó que el uso de aditivos de fibra vegetal representa una alternativa viable para la construcción de placas de concreto.

***Palabras clave*:** Concreto, fibras vegetales, coco, fique, guadua.

Abstract

This research conducted a comparative analysis of the feasibility of using different types of plant fiber as a mechanical reinforcement additive in concrete mixes. Its objective was to design a composite mixture with natural fiber containing the mechanical and productive properties required to meet technical specifications in the production of precast concrete panels, with favorable economic and environmental impacts. Advanced material characterization techniques, such as Scanning Electron Microscopy (SEM) and Energy-Dispersive X-ray Analysis (EDX), were implemented for the study. Additionally, the respective tests established in the national regulations to evaluate concrete compression strength were conducted, as detailed in the Colombian standard "NTC-673." The results demonstrated a considerable increase in compression strength for all concrete cylinders containing plant fiber additives. The chemical composition revealed the presence of Silicon, Calcium, and Potassium as relevant elements to study the influence of the chemical composition on the increase in concrete compression strength. These findings successfully demonstrated that it was possible to design composite mixtures with natural fiber with mechanical properties in accordance with Colombian standards that evaluate compression strength. Additionally, a financial analysis confirmed that the use of plant fiber additives represents a viable alternative for the construction of concrete panels.

***Keywords*:** Concrete, vegetable fibers, coconut, fique, guadua.

Dedicatorias

Dedico esta tesis al creador, por considerarlo mi guía espiritual en esta experiencia académica, gracias por escuchar mis peticiones y reconfortarme en todos los momentos difusos.

Dedico este trabajo a mi hija y a la familia completa, por la paciencia y comprensión que han demostrado durante el proceso doctoral.

Presento especial dedicatoria a mi compañera de vida y de aventuras, sin ella no hubiera sido posible culminar mi proyecto.

Agradecimientos

Presento mis agradecimientos al personal académico y administrativo de UNADE, tutores y coordinadores que me orientaron durante el proceso de mi doctorado.

Agradezco enormemente a las directivas de la Universidad Americana de Europa por su diligencia e interés que presentaron en el tiempo que desarrolle mis estudios.

Contenido

Resumen ii

Dedicatorias iv

Agradecimientos v

Introducción 14

1. Marco de referencia 20

1.1 Marco Legal 20

1.2 Marco Normativo 25

1.3 Marco Conceptual 33

1.4 Definiciones 40

1.5 Marco Teórico 42

1.6 Estado del arte 46

2. Diseño metodológico 62

2. 1 Enfoque 62

2.2 Tipo de investigación 63

2.3 Hipótesis 63

2.4 Objetivo general 64

2.5 Objetivos específicos 64

2.6 Variables 65

2.6.1 Definiciones teóricas 65

2.6.2. Definiciones operacionales 72

2.7 Instrumentos 81

2.7.1. Máquina universal 81

2.7.2. Microscopio electrónico de barrido MEB/SEM – EDX (Análisis por espectroscopia de energía dispersiva de rayos X) 82

2.8 Población 84

2.8.1 Diseño de la mezcla de concreto hidráulico 84

2.8.2 Fibras 84

2.8.3 Caracterización y preparación de las muestras analizadas en el análisis SEM – EDX. 89

2.9 Contexto y georreferenciación del proyecto 92

2.10 Procesamiento de datos 97

3. Resultados 101

3.1 Propiedades y comportamiento mecánico fibras de coco, fique y guadua, por medio de los ensayos en laboratorio 101

3.1.1 Resultados SEM – EDX (Mapeo químico) 101

3.1.2 Fibra de fique 111

3.1.3 Fibra de guadua 115

3.1.4 Fibra de coco 118

3.2 Definición de la propuesta de mezcla y resultados del ensayo NTC – 673 121

3.2.1 Análisis estadístico 123

3.2.2 Análisis mecánico 126

3.3 Evaluación financiera 132

4. Conclusiones 137

4.1 Hallazgos en la muestra 139

Referencias 143

Glosario 158

Lista de tablas

Tabla 1 Características de los materiales. 73

Tabla 2 Proporciones de materiales para el diseño de mezcla 74

Tabla 3 Tabla diseño de mezcla sin adición de fibra. 74

Tabla 4 Tabla diseño de mezcla con adición de fibra de coco. 75

Tabla 5 Tabla diseño de mezcla con adición de fibra de fique. 75

Tabla 6 Tabla diseño de mezcla con adición de fibra de guadua. 76

Tabla 7 Unidades utilizadas en el ensayo 78

Tabla 8 Tiempo trascurrido desde el proceso de curado, hasta el día de falla de las muestras de concreto con tolerancias admisibles 85

Tabla 9 Edad de falla de las muestras de concreto con tolerancias admisibles 86

Tabla 10 Cantidad de cilindros fallados 87

Tabla 11 Taxonomía para cada una de las especies que aportaron fibra para la mezcla de concreto 90

Tabla 12 Condiciones ambientales para el desarrollo óptimo de guadua angustifolia, cocos nucifera y furcraea andina 93

Tabla 13 Actividades económicas de Tauramena, centradas en la economía agropecuaria 95

Tabla 14 Concentraciones elementales presentes en la muestra observada (furcraea andina) .. 113

Tabla 15 Concentraciones elementales presentes en la muestra observada (guadua angustifolia) 116

Tabla 16 Concentraciones elementales presentes en la muestra observada (cocos nucifera).... 119

Tabla 17 Resultados del ensayo de resistencia a la compresión según NTC – 673..... 121

Tabla 18 Propiedades mecánicas de la guadua y el acero. [Nudos en los bordes (NE), un nudo en el medio (NM) de la sección y sin nudos (SN)]..... 126

Tabla 19 Comparación en composición química..... 130

Tabla 20.Comparativo de precios unitarios 133

Lista de figuras

Figura 1 Esquemas típicos de falla en cilindros de concreto a compresión 31

Figura 2 Plantación de fique y momentos del aprovechamiento de la hoja de la planta 49

Figura 3 Corte transversal del coco, fruto del cocotero 53

Figura 4 Bosque de guadua 57

Figura 5 Esquematización de la aplicación de cargas axiales en cilindros de concreto (esfuerzo a compresión) 66

Figura 6 Microscopio electrónico de barrido Universidad Javeriana de Colombia 69

Figura 7 Emisión de rayos X característicos en los análisis EDX. 71

Figura 8 Esquema del uso de escalas en el SEM. 81

Figura 9 SEM, énfasis en el dispositivo de detección de rayos X (EDX). 83

Figura 10 Cilindros fallados en la investigación 88

Figura 11 Especies vegetales utilizadas en el muestreo. 89

Figura 12 Ubicación de la finca en Tauramena – Izquierda: Geografía referencial, derecha: Ubicación del área de estudio 96

Figura 13 Subunidad de Peptidoglicano presente en la pared celular bacteriana. A la izquierda la estructura de la molécula en 2D y a la derecha el modelo tridimensional de esferas. 102

Figura 14 Conformación estructural de la celulosa. Diferentes escalas de la estructura de celulosa en las microfibras que componen entidades estructurales en las células de las plantas (Adaptado de Alberts, 2015) 103

Figura 15 Modelo a escala de una porción de la pared celular primaria de una planta en dónde se muestra como intervienen las redes intrincadas de polisacáridos 105

Figura 16 Micrografía electrónica de conformaciones fibrosas en tejido estructural vegetal proveniente guadua angustifolia 107

Figura 17 Micrografía electrónica de conformaciones estructurales de tejido vegetal proveniente de cocos nucifera..... 108

Figura 18 Micrografía electrónica de redes fibrosas de tejido vegetal proveniente de furcraea andina..... 110

Figura 19 Espectro de caracterización química del análisis SEM-EDS, en el “eje y” se aprecia el conteo por segundo por unidad de energía; mientras que en el “eje x” se encuentra la energía característica para cada elemento (furcraea andina) 112

Figura 20 Mapeos químicos de la muestra analizada en SEM-EDS, para tres diferentes elementos encontrados en el análisis. (furcraea andina)..... 114

Figura 21 Espectro de caracterización química del análisis SEM-EDS, en el “eje y” se aprecia el conteo por segundo por unidad de energía; mientras que en el “eje x” se encuentra la energía característica para cada elemento (guadua angustifolia). 115

Figura 22 Mapeos químicos de la muestra analizada en SEM-EDS, para tres diferentes elementos encontrados en el análisis. (guadua angustifolia) 117

Figura 23 Espectro de caracterización química del análisis SEM-EDS, en el “eje y” se aprecia el conteo por segundo por unidad de energía; mientras que en el “eje x” se encuentra la energía característica para cada elemento (cocos nucifera)..... 118

Figura 24 Mapeos químicos de la muestra analizada en SEM-EDS, para tres diferentes elementos encontrados en el análisis (cocos nucifera) 120

Figura 25 Prueba de bondad de ajuste (Kolmogorov) 123

Figura 26 ANAVA – Análisis de la varianza 124

Figura 27 Diferencia mínima significativa, test LSD de Fisher – Teniendo en cuenta el factor de mezcla 124

Figura 28 Diferencia mínima significativa, test LSD de Fisher – Teniendo en cuenta la influencia del factor días respecto al factor de mezcla 125

Figura 29 Cilindro fallados a esfuerzo de compresión. A la izquierda se observa el cilindro después de una falla súbita, a la derecha un esquema del tipo de falla presentado en el cilindro. 128

Introducción

Las piezas prefabricadas en concreto representan una herramienta de trabajo muy efectiva al momento de avanzar en un proyecto constructivo, esto en términos de rendimientos. Sin embargo, los componentes básicos que conforman el concreto (Khan, 2018) no tienen un ciclo adecuado de sustentabilidad desde el enfoque de aprovechamiento que promueve hoy día la Organización de las Naciones Unidas (Organización de las naciones unidas ONU, 2018) y las tendencias medio ambientales, contemplando desde su mezclado inicial, hasta la demolición y disposición de los escombros finales (Prasad, 2018), en un ciclo amigable con el cuidado/protección del planeta, y la prospectiva de las necesidades del desarrollo humano sostenible.

La vinculación de fibras naturales en las mezclas de concretos ha representado una solución a la disposición de algunas fibras que no cuentan con un destino final adecuado (Teixeira, Santos, Christoforo, & Savastano, Extrudability of cement-based composites reinforced with curauá (Ananas erectifolius) or polypropylene fibers, 2019). Al formular un compuesto de concreto y fibra natural, es necesario establecer la matriz del material constituyente y el material de refuerzo (Groover, 1997). El primero toma la forma que se desea que adopte el producto prefabricado que contribuya a la transferencia de las cargas al material de refuerzo. El segundo, presenta la fase de refuerzo de orden fibroso, ofreciendo un mejor comportamiento mecánico (Teixeira, Santos, Christoforo, & Payá, 2019).

En la búsqueda de posibles soluciones con el aprovechamiento de los residuos orgánicos y las fibras naturales, en América se presentan alternativas que conjugan mezclas de fibras y derivados pétreos, por citar algunas acciones cercanas, hay propuestas para la creación de un

concreto polimérico añadiendo fibras de luces o túneles internos de carácter cilíndrico con el fin de mejorar la resistencia a la compresión y a la flexión, así como el grado de elasticidad (Martínez, Martínez, & Martínez, 2013). En Brasil hay propuestas que buscan analizar la posibilidad de reemplazar una parte del cemento Portland con polvo residual obtenido a partir de la descomposición química de desechos orgánicos derivados de fuentes vegetales o animales. El propósito inherente de este estudio es ofrecer una contribución científica que tenga el potencial generar un material alternativo, capaz de respaldar procesos más sostenibles en la industria de la construcción" (Izquierdo, 2018). Adicionalmente se conocen propuestas que establecen un tratamiento para las fibras de coco con el fin de mejorar las propiedades de los compuestos fabricados con cemento (Da Silva, 2017) lo anterior, mencionando algunas de las acciones actuales.

En Colombia se han trabajado propuestas de prefabricados con reforzamiento en fibras naturales, considerando elementos estructurales, esbeltos y con secciones gruesas (Ferreira, 2010).

En línea similar, el estudio aquí propuesto, busca el diseño de una mezcla compuesta con fibra natural que contenga las propiedades mecánicas y productivas requeridas para cumplir con las especificaciones técnicas establecidas en la Norma Colombiana de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-10 (AIS, 2010), orientada hacia la elaboración de placas prefabricadas en concreto que logren emplearse en muros de edificaciones no estructurales (Barba, 2018).

En ese contexto, se abordarán diversas interrogantes relacionadas con la utilización de fibras naturales en la producción de placas prefabricadas en concreto no estructural. Dividiendo el enfoque principal de la investigación en tres aspectos fundamentales: primero; se indagará

sobre los resultados y desempeño del diseño de una mezcla compuesta que emplea fibras naturales en la elaboración de estas placas. Segundo, se investigará la disponibilidad en el mercado de desechos agroindustriales de fibras naturales alternativas que cumplan con los requisitos necesarios para la producción de placas prefabricadas, evaluando su idoneidad y calidad. Finalmente, se evaluará la viabilidad económica de un proyecto industrial dedicado a la fabricación de placas prefabricadas utilizando estas mezclas de fibras vegetales, analizando su rentabilidad y su contribución a la sostenibilidad en la industria de la construcción. El objetivo es contribuir al conocimiento y la aplicación práctica de soluciones sostenibles en la construcción de placas prefabricadas en concreto no estructural.

El empleo de fibras no naturales se ha generalizado en el medio de la construcción, en especial cuando de concretos y prefabricados se trata. Conociéndose la procedencia de las fibras, que en su mayoría son importadas por países latinoamericanos y en otros casos, tienen un impacto negativo en el medio ambiente, consecuencia del alto consumo energético en el proceso de creación, agravantes que motivan para presentar propuestas amigables con el medio ambiente (Bustos, 2018). En contraste, se cuenta con las fibras naturales que aparecen en su gran mayoría como residuos de otros procesos industriales o agroquímicos. La utilización de estas fibras en mezclas de concreto permitiría reducir los niveles de contaminación, facilitando a su vez, el aprovechamiento de los referidos desechos o sobrantes de tipo industrial o agrícola.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura establece que el 50% del material original orgánico se pierde durante el proceso de degradación, situación que obliga a la industria agrícola a tomar medidas como la creación de pilas de compost utilizando inóculos microbiológicos que reducen las cantidades de materiales perdidos en el

proceso (FAO, 2013). Es posible efectuar referencia y a manera de uno de varios ejemplos concurrentes en este país, qué en la jurisdicción del municipio de Tauramena (Colombia), no se efectúa un aprovechamiento pleno y/o conveniente de los desperdicios creados por el cultivo y cosecha de la mayoría de los productos de la región, como la caña de azúcar, yuca, guadua, palma de aceite, entre otros (Enviromental Consultores, 2007).

El estudio, se orienta hacia evaluar y probar las alternativas de presentar una mezcla de concreto combinada con fibras naturales de diferente origen, pero con características similares de obtención y tratamiento, como lo son las fibras de coco, fique y guadua. Una vez identificadas las propiedades mecánicas de cada combinación, se determinan a la composición óptima para el correcto funcionamiento, desde el punto de vista mecánico, garantizando el empleo de materiales naturales reutilizados y el reemplazo de fibras sintéticas. Los resultados que se evidencian en la investigación tienen continuidad con una segunda fase que culmine los análisis de laboratorios que se obviaron y que se consideran de relativa relevancia investigativa, al mismo tiempo que, se revise la viabilidad de implementación del proyecto productivo, por medio de un seguimiento y control de recursos en términos de tiempo y costos.

El beneficio directo se puede discriminar en tres estados, uno corresponde al impacto positivo en el medio ambiente, otro se enmarca en el aporte técnico de índole académico de un producto innovador, desde un enfoque de aprovechamiento local, constituyendo así un proceso de desarrollo de tecnologías adecuadas, incluyendo finalmente, la presentación de una alternativa productiva de comercialización, como han mostrado investigadores como Sarkar (2013).

La presentación de una matriz de moldeo para el concreto, elaborada con fibras naturales, disminuye el impacto ambiental por emplearse fibras que requieren poco nivel de energía para su

tratamiento, su reciclaje es simple y su producción es de fácil obtención (Proaño, 2015). La investigación en este aparte técnico se basaría en encontrar, los resultados más favorables en la propuesta de un diseño que presente una mezcla compuesta con fibra natural, para la elaboración de unas placas prefabricadas en concreto no estructural, que a su vez puedan comercializarse exitosamente.

Las principales deficiencias en la actualidad en el estudio de concretos reforzados con fibras naturales, como guadua, coco y fique, abarcan diversas áreas críticas. En primer lugar, existe una notoria falta de investigaciones integrales que examinen en detalle las propiedades mecánicas, durabilidad y comportamiento a largo plazo de los concretos reforzados con estas fibras naturales. Además, la ausencia de estándares y normativas específicas en el uso de estas fibras dificulta la adopción generalizada, ya que no se dispone de pautas claras para el diseño y la evaluación de estructuras reforzadas con estos materiales. La variabilidad en las propiedades de estas fibras naturales plantea otros retos, ya que su calidad y características físicas pueden variar significativamente. También preocupa la resistencia de estas fibras a factores ambientales, como la humedad y los insectos, dado que su durabilidad a largo plazo en aplicaciones de construcción aún no se ha explorado completamente. Finalmente, la escasa conciencia y aceptación en la industria de la construcción constituye un obstáculo clave para la implementación de concretos reforzados con guadua, coco y fique en proyectos comerciales y gubernamentales. Superar estas deficiencias requerirá una investigación más amplia y detallada, el desarrollo de normativas específicas, así como esfuerzos continuos para promover la confianza y la adopción de estas fibras naturales en la industria de la construcción.

Para abordar estas limitaciones de estudio, se llevaron a cabo diversas técnicas de caracterización de materiales que permitió conocer a mayor detalle las características de los materiales implementados en el estudio, con la finalidad de brindar una mayor información de los procesos físico-mecánicos que se están llevando a cabo en los concretos reforzados con fibras vegetales, además de esto, el desarrollo de un protocolo de mezclado y análisis ayuda a comprender como se debe realizar la dosificación adecuada de fibras en una mezcla de concreto. Adicionalmente se revisó a detalle la normativa vigente que evalúa la posibilidad de emplear aditivos en el concreto, sin embargo, el desarrollo de nuevas normativas y regulaciones de aditivos en el concreto depende enteramente de la continua revisión e investigación de los resultados obtenidos en investigaciones análogas a la presente investigación, por lo tanto, los resultados contribuirán a mejorar esta deficiencia de aceptación en el marco industrial, normativo y legal. En otro punto de vista, la deficiencia que se presenta frente a la variabilidad en las fibras será suplida por los análisis de microscopía que permitirán conocer a mayor detalle la morfología, brindando mayor información sobre la distribución y organización de las fibras a escala micrométrica y como esto puede afectar el comportamiento dado por la relación de cantidad de fibra por mezcla empleada en la fabricación del concreto. Finalmente, la degradación y afectación de las fibras vegetales por agentes químicos y biológicos aún requiere de mayor estudio y la presente investigación no aborda esa deficiencia, lo cual presenta un limitante para la presente investigación, pero una oportunidad para futuras investigaciones.

1. Marco de referencia

1.1 Marco Legal

Este apartado tiene como finalidad dar a conocer el marco legal que dio origen al desarrollo de normativas que regulan la disposición de materiales en Colombia, y además las políticas y normativas de vivienda.

Un primer aspecto para reseñar en el contexto legal internacional responde a la perspectiva de construcción, vivienda y derecho, en el contexto de un nivel de vida adecuado. Da cuenta de lo anterior el derecho internacional de los derechos humanos, que plantea, el derecho a una vivienda adecuada como una garantía para brindar calidad de vida a los ciudadanos, así como el establecimiento de deberes y obligaciones de los estados para con sus ciudadanos. Esto se encuentra establecido a partir de la Declaración Universal de Derechos Humanos de 1948 y en el Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales de 1966 (Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2010). Sin embargo, lo anterior aún se encuentra en relativa desconexión de la legislación desde una perspectiva técnica y en cuanto a construcción, hecho probable a partir del déficit de vivienda a nivel global que se estimaba para 2010 en más de 1,000 millones de personas que no contaban con una vivienda adecuada.

En Latinoamérica, también se ha dado una gran relevancia al derecho a la vivienda, siendo definida por instituciones de carácter público, como la describe la Alianza Internacional de Habitantes (AIH). En el marco de un compromiso más amplio con el progreso de una nación, se hace imperativo invertir en el desarrollo humano, lo cual no es solo un enfoque pragmático, sino un derecho inalienable de toda la humanidad. Todos los seres humanos, como parte de una sociedad, requieren un entorno adecuado donde puedan vivir y crecer junto a sus seres queridos.

Este entorno debe proporcionar abrigo, seguridad, y promover la salud, al tiempo que fomente un fuerte sentido de pertenencia y facilite el fortalecimiento de los lazos sociales (AIH, 2013, pág. 98).

Dada la importancia de la vivienda, los gobiernos Latinoamericanos han avanzado en sus estrategias para promover políticas públicas que permitan dar abasto a la creciente demanda de vivienda en diferentes países Latinoamericanos, tales como lo son los programas de vivienda de interés social, programas de reubicación, viviendas de interés prioritario o los créditos de vivienda. Según mencionan los investigadores Chirivi, Quiroz y Rodríguez, pese a los nuevos enfoques sociales en la satisfacción de la demanda de vivienda Latinoamérica aún debe enfrentar problemas que se enfocan a la creciente demanda por aumento de población y la inversión necesaria para satisfacer dicha demanda (Chirivi, Quiroz, & Rodriguez, 2011). Esto contrasta con el problema actual del déficit de vivienda en América Latina, para lo cual según se publicó en el último reporte de déficit de vivienda realizado por Uniapravi (Unión Interamericana para la Vivienda), el déficit de vivienda calculado a forma general para América Latina y el Caribe, a partir de los datos recolectados en diferentes años y provenientes de diferentes países, se estima en aproximadamente 55.114.791 viviendas, lo que evidencia una problemática en torno a la capacidad para satisfacer la demanda de vivienda. Adicionalmente, se encuentra que para Colombia, el déficit habitacional reportado por CAMACOL fue de 5.103.000 viviendas para el año 2020 (Sánchez & Navarro, 2020), mostrando nuevamente la problemática local que existe y dimensionado a comparación con América Latina y el Caribe, como Colombia hace parte de un 9.26% del total del déficit de vivienda, mostrando la necesidad de mejorar las condiciones actuales que garantizan la consecución de viviendas dignas para la población.

Ahora, teniendo en cuenta el marco normativo internacional que relaciona la problemática ambiental y como alcanzar un desarrollo sostenible a la par del crecimiento de la población y la expansión urbanística que esto plantea, se encuentra el Protocolo de Kioto, el cual hace referencia a un acuerdo internacional que obliga a los países a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero para volver a los niveles de 1990 entre 2008 y 2012. El objetivo es combatir el calentamiento global causado por seis gases, incluyendo dióxido de carbono y metano. En contraste con la problemática ambiental, se evidencia que el sector de la construcción tiene un impacto relevante en cuanto a la capacidad de generar emisiones de CO_2, como según lo informan los reportes de las naciones unidas tras la última conferencia de la ONU sobre el clima COP27, en dónde se mencionó que el sector de la construcción "fue responsable de más del 34% de la demanda energética y alrededor del 37% de las emisiones de CO_2 asociadas a la energía y sus operaciones durante 2021", con estadísticas que estiman que las emisiones alcanzan cerca de 10 Giga Toneladas de CO_2 (ONU, 2022). De esta forma se muestra el impacto que genera el sector y la expansión urbanística, mostrando la necesidad de establecer nuevas estrategias que permitan disminuir este impacto ambiental.

En la actualidad, los países lideran diferentes estrategias que permitan brindar alternativas de solución para la disminución de las emisiones de CO_2, por ejemplo, Colombia ha desarrollado Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL), que contribuyen al desarrollo sostenible y son capaces de generar inversiones en el país, mediante la creación de estrategias de innovación sostenible en diferentes industrias. El presente trabajo busca analizar como el uso de fibras vegetales promueve de forma progresiva estrategias de construcción sostenible que pueden

mitigar el impacto de las emisiones de CO_2 generadas por el sector de la construcción y buscar alternativas más sostenibles y de menor impacto ambiental.

Finalmente, las regulaciones legales de los materiales se encuentran establecidas y vigiladas por autoridades y entidades gubernamentales de normalización tales como el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) en Colombia. Estas regulaciones y normas definen los estándares de calidad y seguridad que los materiales de construcción, incluyendo los concretos con aditivos, deben cumplir. El proceso de introducción y regulación de nuevos materiales, como los concretos con aditivos, generalmente involucra la revisión y aprobación por parte de las autoridades competentes y puede basarse en investigaciones científicas y pruebas de laboratorio que demuestran la eficacia y seguridad de estos materiales.

De la misma manera el ICONTEC emite normas que cubren diversos aspectos de la construcción, incluyendo la especificación y el uso del concreto, para lo cual las normas técnicas colombianas más relevantes para el concreto suelen estar relacionadas con las siguientes áreas:

- ***Especificación de materiales***: Estas normas definen las especificaciones técnicas para los materiales utilizados en la elaboración del concreto, como cemento, agregados, aditivos y agua. Por ejemplo, la norma NTC 121 establece los requisitos para el cemento Portland.
- ***Diseño y construcción de estructuras de concreto***: Estas normas abordan aspectos relacionados con el diseño y construcción de estructuras de concreto, incluyendo códigos de construcción y recomendaciones para la ejecución de obras. Por ejemplo, la norma NSR-10 (Norma Sismo Resistente de Colombia) se enfoca en el diseño sísmico de estructuras de concreto.

- ***Ensayos y control de calidad***: Estas normas establecen los procedimientos y métodos para la realización de ensayos de control de calidad en el concreto, como pruebas de resistencia, trabajabilidad y durabilidad. La norma NTC 673 describe los métodos de ensayo para determinar la resistencia a la compresión del concreto en Colombia.

1.2 Marco Normativo

La normativa legal que define la construcción y políticas de vivienda en Colombia se encuentra regida por un principio y derecho fundamental establecido en la constitución política de Colombia que especifica que “todos los colombianos tienen derecho a vivienda digna” (Constitución Política de Colombia, 1991). A partir de este artículo, el estado se promulga como un ente central que establece las condiciones necesarias para garantizar el derecho, de allí provienen los planes de vivienda de interés social, sistemas adecuados de financiación a largo plazo y formas asociativas de ejecución de estos programas de vivienda. A partir del establecimiento de este derecho fundamental en Colombia, se han generado múltiples garantías que han permitido progresar en el cumplimiento de este derecho fundamental y solventar el déficit de vivienda en el país, una de estas garantías se da en 2011 a partir de la conformación de la entidad denominada “Ministerio de Vivienda” a partir del “Artículo 14 de la Ley 1444 de 2011”. A partir del cual se comienzan a regular los reglamentos del sector vivienda, cuidad y territorio. En este documento se detallan las normativas que rigen las soluciones de viviendas establecidas para los ciudadanos, y aunque algunos de los decretos establecidos han sido derogados por normativas recientes del 2021, en este documento se estructuran las políticas y normativas que rigen la adquisición de vivienda, así como los procedimientos que rigen acciones de las políticas del ministerio de vivienda. Para las políticas y normativas que rigen durante los años actuales, el ministerio de vivienda establece una agenda regulatoria que permite visualizar los proyectos en curso, referentes al marco normativo de vivienda en Colombia. Otros decretos referentes a las políticas de vivienda se pueden encontrar en el sitio web del ministerio de vivienda de Colombia, siendo el más reciente el decreto 0490 de 2023 relacionado a las políticas

de vivienda de interés social en el marco del proyecto “Mi Casa Ya” así como otras disposiciones relacionadas. En cuanto a las resoluciones, el ministerio también cuenta con un compendio de resoluciones en el sitio web, para las cuales se encuentran diferentes temáticas relacionadas con:

- Fondos de vivienda
- Institucional
- Vivienda
- Agua y Saneamiento
- RAS
- Directiva

Y dentro del contexto legislativo, se cuenta con la reciente ley 2277 de 2022 relacionada a la reforma tributaria, y la más importante relacionada con la presente investigación, que es la ley 2206 de 2022, que establece un incentivo para el uso productivo de la guadua y el bambú, garantizando su sostenibilidad en el territorio nacional, en esta ley se presentan las disposiciones que definen las políticas públicas que promueven el uso de la guadua en una cadena productiva y sostenible, de allí de destacan los artículos 9°, 18° y 19° que incentivan al uso de la guadua en una cadena productiva (Congreso de Colombia, 2022).

Estos artículos se hacen bastante relevantes en el contexto de la presente investigación, debido a la importancia que se le da a la guadua como elemento de una cadena productiva, ayudando a justificar el uso e investigación de la fibra de guadua en modelos constructivos, como por ejemplo en viviendas.

Dentro de la normativa relacionada con el ministerio de vivienda también se pueden encontrar 29 documentos CONPES (Consejo Nacional de Política Económica y Social), relacionados con diferentes políticas de vivienda, actuación ante emergencias climáticas y temas referentes al agua y saneamiento. Otros documentos normativos, tales como circulares, avisos y sentencias, también pueden ser encontradas en el sitio web del ministerio de vivienda.

Por otro lado, otras normativas, como las que se establecen a partir de los planes de ordenamiento territorial (POT) han desarrollado una hoja de ruta normativa que ha permitido regular la implementación de estrategias que promueven el desarrollo sostenible y la inversión en ecourbanismo y construcción sostenible. Por ejemplo, en los artículos 117 y 118 del POT de Bogotá se especifica sobre la política sostenible, el ecourbanismo y la adecuación de espacios públicos mediante el uso de prácticas sostenibles (Secretaría de Planeación, 2022).

Otras normativas ambientales, se encuentran reguladas mediante una serie de decretos y resoluciones que fomentan el uso de prácticas ambientalmente sostenibles, apoyadas por entidades como el Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible (Minambiente); el cual dispone documentos normativos como los Criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana", que permite conceptualizar la implementación de la construcción sostenible en la infraestructura urbana, determinando los criterios ambientales de acuerdo a una zonificación climática. Dichos criterios tienen en cuenta cuatro ejes temáticos que son el agua, el suelo, los materiales y la energía, definidos como bases fundamentales en la estructuración de proyectos sostenibles, a partir de los cuales se pueden aplicar diferentes prácticas que minimizan el impacto de las obras de infraestructura de civil de tipo vivienda (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012). Así mismo, existen otros documentos normativos como el CONPES 3919 de

2018 y la NTC – 6112 de 2016, que relacionan temáticas sostenibles similares, y fomentan el uso de materiales de construcción. Además de estas regulaciones el ministerio de ambiente publicó el 6 de junio del presenta año 2022 un documento titulado “guías de materiales para la construcción sostenible” en el cual se especifican diferentes avances desarrollados el uso y aplicación de prácticas que promueven la utilización de materiales que generen un menor impacto ambiental, para el contexto colombiano. En esta guía se hace alusión y se da importancia al uso de materiales orgánicos, como los de origen vegetal, tales como la madera, el corcho, el caucho, la fibra de mezcal, el bambú, entre otros (Castañeda et al, 2022).

Respecto a las normativas técnicas referentes a los materiales usados en la construcción y más específicamente al concreto reforzado, para esta investigación fue necesario revisar normativas que relacionan las características en el diseño de mezcla, falla a compresión y materiales empleados de los concretos colombianos. En el año 2016 Empresas Públicas de Medellín (EPM) desarrolló un documento normativo para la construcción de concretos, denominado “NORMA DE CONSTRUCCIÓN DE CONCRETOS – NC-MN-OC07-01” en donde se presentan los requisitos técnicos establecidos para las construcciones en concreto realizadas por EPM, allí se encuentran especificados muchos de los requisitos técnicos aplicados en el diseño y construcción con concreto, adicionalmente se relacionan todas las normas técnicas colombianas NTC referentes a la construcción con concreto. Para la presente investigación se tendrá en cuenta el marco normativo relacionado con el diseño de la mezcla, el cemento, la adición de agregados, aditivos y fibras y el ensayo de resistencia a la compresión efectuados para verificar la calidad del concreto, pero para más información sobre la normativa técnica

relacionada con la construcción en concreto se puede revisar la normativa NC-MN-OC07-01 (EPM, 2016).

1. Diseño de mezcla ACI 211: El comité 211 del instituto americano de concretos (*American Concrete Institute*) ACI, desarrolló una metodología para la elaboración de mezclas de concreto a partir de unas tablas en dónde se especifican la proporción adecuada y necesaria de los diferentes componentes del concreto, es decir, el agua, el cemento, los agregados, y aditivos, con la finalidad de generar una calidad determinada en el concreto (Cáder & Oliva, 2012). Esta metodología se divide en una serie de etapas como son: determinación del requerimiento en resistencia a la compresión del concreto, especificación de tamaño máximo de agregados, definición de la relación agua cemento, cálculo del contenido de cemento, agregado y agua, ajuste de mezcla y verificación de la mezcla (mediante los ensayos determinados definidos para el desempeño mecánico).
2. Agregados en concretos NTC 174: En esta normativa colombiana, se especifican los requisitos de gradación y calidad para los agregados finos y gruesos en mezclas de concretos. En la norma se definen parámetros de material fino tales como características fisicoquímicas, gradación, sustancias dañinas, impurezas orgánicas y sanidad. También se relacionan los diferentes métodos de muestreo y ensayo para verificar las características y propiedades de los agregados finos o gruesos. (ICONTEC, 2000).
3. Concretos reforzados con fibra NTC 5541: Se especifican los tipos de fibras implementadas en concreto, que incluyen materiales como el vidrio, el acero u otros

polímeros o materiales manufacturados, y aunque no se incluyen las fibras vegetales debido a que aún se encuentran bajo investigación constante, el uso de fibras sintéticas como el polipropileno brinda información sobre el desempeño de una matriz de concreto en conjunto con compuestos químicos sintetizados a partir del carbono y su desempeño es importante para el estudio de las fibras vegetales dado que los compuestos orgánicos son sintetizados a partir del carbono. En la norma también se definen diversos parámetros de calidad que deben cumplir los concretos reforzados con fibra, los materiales utilizados y los ensayos necesarios para determinar la calidad del concreto. Además de ello cabe resaltar que la norma exige a los proveedores del concreto reforzado con fibra estudios que evidencien que las fibras no reaccionan adversamente con la matriz de concreto (ICONTEC, 2007).

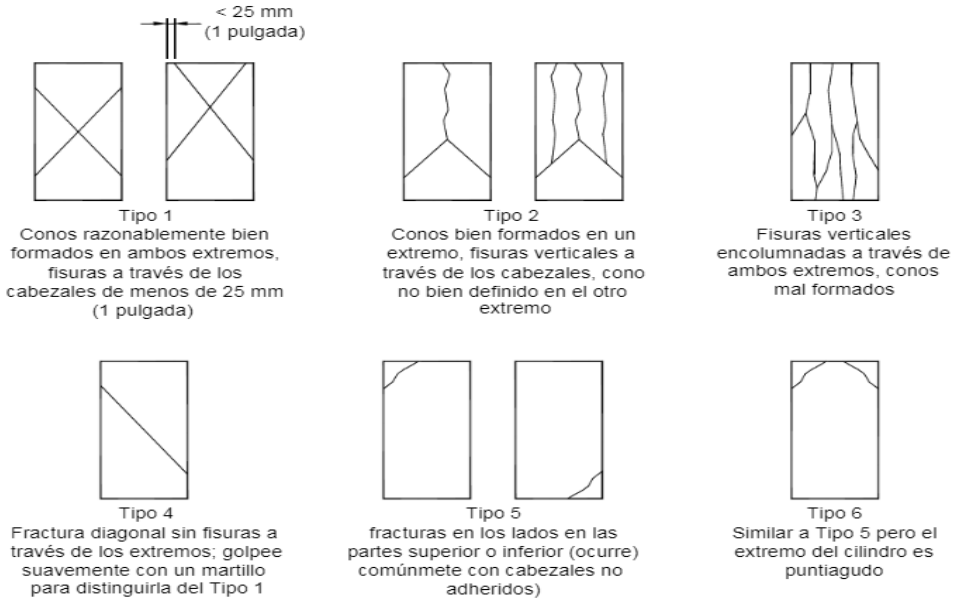
4. Aditivos NTC 1299: La NTC 1299 define una serie de aditivos químicos agregados en concretos que permiten modificar las propiedades del concreto. En la norma se define una clasificación de los diferentes tipos de aditivos empleados, así como los ensayos necesarios para verificar el desempeño del concreto con aditivos de diferente tipo. Según la clasificación dada por la norma se pueden encontrar aditivos reductores de agua, retardantes, acelerantes, reductores de agua y retardantes, reductores de agua y acelerantes, reductores de agua de alto rango y reductores de agua de alto rango y retardantes (ICONTEC, 2008).
5. Método de ensayo para el asentamiento del concreto – NTC 396: Esta norma técnica presenta de forma detallada el procedimiento del ensayo de asentamiento del concreto

mediante la metodología del cono Abrams, la cual permite medir el asentamiento como de diferencial de desplazamiento del concreto (ICONTEC, 1992).

6. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto – NTC – 673: En esta norma técnica se define el método de ensayo empleado para determinar la resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de concreto al aplicar una carga axial, comprimiendo los cilindros hasta el punto de falla y la resistencia a la compresión se determina mediante la división de la carga máxima alcanzada en el ensayo entre el valor del área transversal del espécimen. La norma también esquematiza algunos de los modelos típicos de falla, detallados en la figura 1

Figura 1

Esquemas típicos de falla en cilindros de concreto a compresión



Nota. Tomado de *Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto* (p.9), *ICONTEC,* 2010. Normas Técnicas Colombianas – NTC 673

7. Cemento NTC 121: Esta norma técnica define los parámetros necesarios a tener en cuenta para evaluar la calidad del cemento hidráulico utilizado en los procesos de construcción.
8. Otras normativas relevantes NTC3823: Esta normativa define el muestreo y ensayo de cenizas volantes o puzolanas naturales y su utilización como aditivos minerales en concretos. Esta normativa se hace importante debido a que el uso de estas alternativas de cenizas permite reduce la proporción de cemento en la mezcla de concreto, brindando beneficios tales como ahorro de energía, eliminación de productos de desecho de procesos contaminantes, optimización del desempeño mecánico del concreto o reducción de costos. En la actualidad existen investigaciones que indagan en la posibilidad de utilizar cenizas provenientes de material orgánico de plantas en el concreto, obteniendo resultados óptimos principalmente relacionados a la reducción del coste del concreto y la modificación de propiedades mecánicas en concretos (Camargo, 2017).

Las normativas mencionadas anteriormente son importantes debido a la relación que presentan con los procedimientos desarrollados en la presente investigación. Se destaca el hecho de que no existen normativas que definan el uso de compuestos orgánicos en las mezclas de concreto, razón por la cual es necesario continuar investigando y fortaleciendo el conocimiento sobre las fibras y otros compuestos provenientes de plantas u otro tipo de materia orgánica, con la finalidad de establecer parámetros más robustos que permitan su implementación en mezclas de concreto y que a la vez garanticen un buen comportamiento físico, químico y mecánico a largo plazo.

1.3 Marco Conceptual

Las fibras naturales acompañan al ser humano desde tiempos inmemoriales y en diversidad de usos; en el contexto de la ingeniería civil, existen referencias desde campamentos al aire libre, hasta puentes y amarres, incluyendo técnicas de mezcla para recebo en diferentes tipos de caminos, levantamiento de paredes y recubrimientos en cuevas, casas y proyectos monumentales, siendo uno de los mayores ejemplos las primeras ciudades estado organizadas en Sumer y Asur hacia el año 4.500 antes de la era cristiana (A.C.), incluyendo terrenos de las hoy Irán, Irak, Siria y Turquía aproximadamente (Garcia, 2016). Igualmente, en el continente americano un claro ejemplo de esto se encuentra en el poblado de Monte Verde en Chile, que data del año 13.000 A.C., asentado sobre un terreno rico en óxido de hierro de origen volcánico con casas de estructura de madera y paredes de piel y cueros curtidos (García, 2016).

Sin embargo, en décadas recientes, gracias a los nuevos paradigmas eco sistémicos y de productividad se ha dado una oportunidad de uso más frecuente al grupo de las fibras y materiales de origen vegetal, las cuales vienen configurando una alternativa de aplicaciones industriales debido a su asequibilidad, ligereza y su cualidad de ser una fuente renovable, incluso presentando un desempeño óptimo al ser empleada en conjunto con compuestos poliméricos (Velásquez, Peláez, & Giraldo, 2016). Estos materiales se encuentran en diversas industrias, como la producción de zapatos y otras manufacturas en cuero, componentes de caucho, el sector del transporte y, sobre todo, en la construcción, entre otros sectores de relevancia, aplicaciones directas o resultado de mezclas y diversas técnicas que requieren de mayor atención y procesos de investigación en la búsqueda de sus mayores potencialidad y aplicabilidad.

Las propiedades de las fibras naturales se caracterizan por ser livianas y de alto rendimiento. A esto se le suma la facilidad de adquisición, el bajo costo que representa, el alto rendimiento y la propiedad particular de ser no abrasivas (Pérez, 2015). Estas características convierten a las fibras naturales en componentes de materiales alternativos, que pueden ser aptos para ser usados como componente de compuestos poliméricos (Muñoz, 2014).

En el escenario de los procesos constructivos, la elección de agregar fibras naturales posibilita una mejor disposición porcentual y su distribución en la matriz de la mezcla de agua cemento y agregados; promoviendo así, la mejora de propiedades físico-mecánicas como la resistencia a la compresión, el nivel de esfuerzo requerido para manipular - trabajabilidad -, segregación y la contracción (Paricaguán & Muñoz, 2019). En la mayoría de los casos, es necesario que las fibras naturales sean previamente tratadas para potenciar las propiedades ya mencionadas al máximo, las cuales mejoran específicamente: homogeneización y la adherencia de la fibra, estabilidad térmica, grado de polimerización y cristalización, entre otras (Kesikidou, 2019). Tratándose de las estructuras prefabricadas en concreto que hacen parte esencial de algunos proyectos de infraestructura en dónde se requiere soportar los diferentes esfuerzos a los que son sometidas las construcciones, en especial en los momentos de ocurrencia de un sismo. Una matriz conformada por fibras naturales puede brindar beneficios que modifican el comportamiento físico-mecánico de los elementos prefabricados en concreto (Barba, 2018).

Por otra parte, y en el caso de la adquisición de las fibras naturales en Colombia, es relativamente factible, de forma sencilla y económica, comparada con la obtención de fibras sintéticas o procesadas. De esta manera, para estos fines de reciclado, es viable acudir a los depósitos de materiales desechados en procesos cotidianos en el comercio agroindustrial

(Guancha, 2020). Las fibras catalogadas como sobrantes de procesos industriales de gran volumen resultan en materiales que ocupan espacios y copan volúmenes aprovechables para otros efectos en el espacio de una planta o fabrica, por lo cual la capacidad de reutilizar las fibras favorece menores costos y dedicación de espacios a procesos ociosos, logrando de paso mejoras en los resultados de la producción final (Betancourt, 2014).

Incluso, desde la perspectiva de sectores de alta exigencia tecnológica, se utiliza fibra, cómo indicadores de potenciales caminos de experimentación para el logro de compuestos y materiales de aplicabilidad en construcción y grandes beneficios de tipo ecológico, menores costos y un mejorado aprovechamiento de materiales de origen natural o de otros tipos reciclados. Tal es el caso en el sector aeronáutico, donde el diseño de matrices de experimentación efectuada sobre fibras de coco y yute entre otras, permite siempre y cuando se cumplan los ítems reglamentarios básicos, llegar a materiales donde la interacción matriz – refuerzo, presentan mejores propiedades mecánicas, resultado de reemplazar la fibra de vidrio como refuerzo, por los materiales de origen vegetal y que, tratados con agentes mínimamente agresivos con el tejido, ofrecían mejores resultados (Basaldúa, 2016). Estos aspectos revisados en los paradigmas aplicados a la construcción de elementos para uso aeronáutico ofrecen potencial trazabilidad de dicha innovación hacia el sector de la construcción en la búsqueda de alternativas de alta resistencia, versatilidad y hasta opciones de ecoeficiencia.

En América Latina, este avance viene tomando mayor fuerza cada vez, y ejemplo de ello está en la posibilidad de mencionar entre otros los siguientes estudios: Como punto de partida, el presentado en el X simposio internacional de compuestos delgados y fibro cemento reforzado, en el marco del cual la comunidad internacional de expertos e interesados en el tema, revisaron los

resultados sobre la metodología desarrollada para el diseño de pastas reforzadas con fibras orgánicas en matriz de cemento Portland, para obtener un material alternativo, con propiedades físicas, mecánicas, térmicas y de durabilidad, que resultan adecuadas para la fabricación de paneleria ligera de uso en vivienda de interés social de forma competitiva (Acevedo & Bojórquez, 2012). Este autor concluye en primera instancia que: Con el uso de fibras orgánicas en matrices de cemento, es posible lograr compuestos durables, con las propiedades físicas y mecánicas necesarias para elementos constructivos de vivienda, la clave está en las proporciones adecuadas, y en la aplicación de la presión negativa, durante un tiempo determinado, que depende a su vez, de la fracción volumétrica del refuerzo y el uso, en este caso, del silicato de calcio como agente mineralizador. Enfatiza también, sobre la incompatibilidad potencial física originada por al exceso de agua en el refuerzo y falta de un elemento aglutinador entre la matriz y el refuerzo.

Adicionalmente, está la experiencia de Cuba en el empleo del denominado Fibrequén, obtenido de la planta henequén, cuyo nombre científico es *Agave Fourcroydes*, (Macías & Artola, 2012), llegando a validar el nuevo material fibro-reforzado y determinándose las características fundamentales del mismo junto con sus propiedades de empleo en el sector de la construcción.

Otro agregado de fibra vegetal que ha llegado a tener relativa popularidad es el bambú, sobre el cual, una de las principales razones del uso frecuente está en su amplia capacidad de resistencia a los embates sísmicos dada la flexibilidad que le proporciona su contenido leñoso. - Existen los conocimientos y la tecnología necesaria para la transferencia tecnológica y producción en talleres de este tipo de soluciones constructivas bien de forma prefabricada o

semi-prefabricadas, con las ventajas correspondientes. Sin embargo, es importante profundizar en el tratamiento de los componentes que se obtienen del bambú, de cara a lograr una mejor compatibilidad con las matrices de los diferentes tipos de mortero, de los cuales forme parte y que posibilite un mayor tiempo de vida útil (Mora, Älvarez, & Hernandez, 2009)

Es importante reseñar que desde la evaluación del desempeño de materiales termoplásticos, combinados con fibras naturales se vienen explorando posibilidades para roto moldeo y otras técnicas con potencial de aplicación en el sector de la construcción; al respecto se ha confirmado que existe poca documentación relacionada con procesos de roto moldeo en Colombia, y también se presenta una ausencia en la documentación de concretos aplicados a conformar componentes para estructuras convencionales o en madera plástica a partir de este proceso (Álvarez, 2014).

El presente trabajo, parte de una exploración en el estado del arte del uso de fibras naturales vegetales junto con el concreto en procesos de construcción. Lo anterior, implicará como eventual contribución de la tesis doctoral, la exploración y prueba de técnicas de laboratorio que permiten identificar con alta precisión y con un menor costo de inversión, aplicando algunos métodos de prototipaje rápido, el tipo de fibra de origen natural y de carácter esencialmente vegetal que, puede emplearse en la elaboración de una mezcla de concreto para la construcción de placas prefabricadas (Moreno, 2007).

Para la presente investigación se emplearon técnicas de microscopía electrónica de barrido SEM (*Scanning electron microscopy*), con la finalidad de generar una mayor calidad en los análisis de materiales, y también para conocer los comportamientos que se están generando en la escala micro y nano métrica. Sumado a esto, se emplearán técnicas convencionales de

ensayo de materiales de construcción debidamente reguladas por el estándar nacional e internacional. De esta forma será posible establecer un procedimiento estandarizado que permita estudiar y definir las propiedades del concreto reforzado con fibras y así posteriormente caracterizar los diseños de mezcla requeridos para un desempeño óptimo en piezas de concreto utilizables en contextos reales.

Asimismo, las piezas (bloques o equivalente) deben conservar las propiedades mecánicas exigidas por las normas vigentes en Colombia de sismo resistencia (AIS, 2010)

El estudio, dentro del proyecto de investigación de esta tesis considera las opciones para las fibras de fique, coco y guadua. Tales fibras, tienen su origen en los trópicos de América, especialmente en las regiones andinas de Colombia, Venezuela y Ecuador (Beltrán, 2015). Así, el fique posee una excelente resistencia mecánica, es liviana y tiene una densidad de 1.3g / cm3. La fibra asociada, se obtiene de la hoja de la planta, se separa por pulpa manual o mecánica y se emplea en estado seco (R.P.A.V. , 2011). Por otro lado, la composición química de la fibra de coco es ≈ 45% de lignina, ≈ 42% de celulosa y ≈ 5% de agua (Bustos, 2019) (Y.B.F., 2011), es un árbol muy común en las zonas costeras. Adicionalmente, para el caso de la guadua, la cual hace parte del grupo de plantas del bambú y de la familia de las gramíneas y adquiere un crecimiento entre los 6 metros a los 20 metros de altura, se puede anotar que sufre foliación laminar irregular, posee compuestos volátiles derivados de hidrocarburos saturados con una concentración energética baja y gran contenido de celulosa (43%). Los constituyentes químicos restantes son hemicelulosa y lignina, con algunos componentes menores como resinas, taninos, esteroles, vitamina E y grasas (Carmiol, 2016).

Dentro de la presente investigación es considerado de gran importancia la caracterización y evaluación técnica de cada una de las fibras estudiadas, de los resultados en los laboratorios se definirá la mejor alternativa para el compuesto y mezcla para la construcción de las piezas prefabricadas en concreto. Adicionalmente, se evaluarán las opciones de acceso y disponibilidad de estos tipos de fibra en el mercado de residuos industriales, para poder estimar la mejor alternativa en cada caso, de las tres fuentes comparadas.

En ese sentido, los concretos compuestos de escala industrial se han caracterizado por los impactos generados debido al uso de fibras no naturales, y eso a causa de la naturaleza en la composición química, sus procesos de producción y poca compatibilidad con el medio ambiente. Es por esto, que realizar modificaciones en los procesos productivos y la materia prima empleada en la fabricación de los concretos compuestos e introducir el uso de material orgánico puede tener un impacto positivo en la calidad de vida de personas que trabajan con estos subproductos y de igual forma, disminuye su exposición a partículas contaminantes que pueden ocasionar daños en la salud (Paricaguan, 2013).

Los elementos prefabricados en concreto se comenzaron a emplear luego de terminarse la segunda guerra mundial en donde se reemplazaron las construcciones en Europa, por materiales de acero, madera y hormigón, los que eran atornillados y empotrados de manera manual (Porras, 2019). Por considerarse un proceso controlado con la creación de prefabricados, es posible obtener mejores estándares de calidad y eficiencia al momento de ser instalados; ofreciendo así, menores tiempos en los procesos constructivos y amigable con el medio ambiente, al reducir a su vez, los consumos energéticos de los insumos (Ferreira, 2010).

La investigación se lleva a cabo con base en la iniciativa por dar a conocer alternativas eventualmente rentables y nuevas, para presentación de elementos prefabricados en concreto reforzado con fibras naturales, identificando, impactos bajos en el ambiente y que sean, además, viable técnica y comercialmente durante su elaboración, producción y comercialización.

1.4 Definiciones

A continuación, se define la terminología empleada en la presente investigación

1.4.1 Microscopía electrónica de Barrido SEM (*Scanning Electron Microscopy*)

Técnica de caracterización de materiales empleada para determinar la topografía y morfología a escala micrométrica de muestras preparadas de forma especializada. Esta técnica se realiza mediante el escaneo de una superficie determinada, en donde el escáner es un haz de electrones que permite crear señales características que son interpretadas como imágenes con ayuda de un software especializado (Thermo Fisher, 2023).

1.4.2 Fibra vegetal

Las fibras vegetales son compuestos orgánicos provenientes del tejido celular de las plantas, principalmente de la matriz que conforma la pared celular, según lo han definido autores como Fernández *et al.* (2015) las fibras se componen de una matriz de componentes orgánicos de origen vegetal como la lignina, la celulosa, la hemicelulosa y la pectina.

1.4.3 Espectroscopía Dispersiva de Rayos X

Técnica de caracterización elemental, que permite conocer la composición química de los materiales que están siendo analizados mediante técnicas de microscopía electrónica. Esta técnica consiste en un detector de rayos X característicos expulsados por la muestra cuando es impactada por un haz de electrones (Thermo Fisher, 2023).

1.4.4 Resistencia mecánica

La resistencia mecánica es el esfuerzo último que resiste un material antes del momento de falla, mientras es sometido a un tipo de carga determinada. Esta propiedad de los materiales se puede expresar en unidades de presión como el Pascal [Pa] (Osorio, 2023).

1.4.5 Concreto

El concreto es un material diseñado y perfeccionado por el ser humano, y consiste en una mezcla de diferentes compuestos como son el cemento, la grava, la arena, algunos aditivos y agua (360 en concreto, 2023). Dicho material tiene propiedades mecánicas que lo hacen óptimo para ser utilizado en obras civiles contemporáneas, la adición de una variedad de aditivos puede modificar sus propiedades para generar otros tipos de concreto, como el concreto poroso, traslúcido, impermeable, entre otros.

1.4.6 Aditivos

Los aditivos son una serie de productos de diferente origen ya sean de síntesis química u orgánica, que se agregan al concreto para modificar sus propiedades; generalmente son agregados a la mezcla del concreto inmediatamente antes o durante el mezclado (Silva, 2023).

1.4.7 NTC

NTC son las siglas de “Norma Técnica Colombiana” y son una serie de reglamentos que permiten generar estándares de calidad en los procesos desarrollados en el campo profesional de Colombia.

1.5 Marco Teórico

En la industria constructiva el concreto es material de uso prioritario y por ende de alta frecuencia de aplicación. Se involucran en su configuración materiales naturales de carácter no renovable, lo cual en el escenario de desarrollo sustentable deriva un aspecto importante a tener en cuenta más aún cuando el origen de estos se focaliza en las corrientes superficiales de los ríos y fuentes de agua. Junto con lo anterior, están los aspectos que hacen referencia al mejoramiento de las propiedades del concreto y su potencial rendimiento al utilizar dichas fibras.

Si bien los residuos generados por diversas actividades humanas han existido desde la aparición de este sobre la faz del planeta, corresponden finalmente a un fenómeno socialmente construido, y solo hasta décadas más recientes su presencia ha evidenciado una problemática ambiental de gran formato que requiere prioridad en su atención. Surge la intervención a través de los mecanismos de gestión pública y comunitaria, para mitigar la afectación, pues es frecuente que el material se utilice en sitios, localidades, territorios o lugares, distantes de los espacios donde se origina o produce (Chavéz & Manzanares, 2012), lo cual hace necesario agregar a este escenario de planteamiento de soluciones, una que a la par de los aspectos ambientales procure el mejoramiento y rendimiento en diversas dimensiones del uso y aplicación de materiales. Un mejoramiento presente en las mezclas, a partir de las fibras naturales, en la medida que su adición, ha procurado mejores condiciones en la utilización del concreto, ya que varian y mejoran según refiere Ramón-Rodriguez (2017), “desde la resistencia, compresión, flexión y hasta ductilidad a partir de contar dichas fibras con una ruptura de menor impacto o menos subita” (p.6). Por otra parte, el rendimiento del material desde el uso de agregados, traducido potencialmente y a la vez, en un menor gasto de insumos y energía, junto con un alto potencial

de cierre de ciclos bajo un enfoque de economía circular, que implica escenarios de aprovechamiento de residuos naturales y del mismo proceso constructivo que hoy son descartados; por ejemplo y como lo menciona el documento de la consultora Tecnalia, sobre la utilización de materiales y economía circular en Colombia (2017), en donde se analiza la oportunidad de reutilizar y aprovechar los grandes volumenes de residuos producidos por la industria del concreto premezclado. Por lo cual, no se trata solo del reciclado de materiales vinculados al proceso, pues el planteamiento a revisar en el presente trabajo, incluye el uso de materiales residuales de otras actividades, en dicho sentido el concreto, al igual que el acero, podrían tener una reducción potencial en su impacto ambiental, debido a las dimensiones actual y potencial del mercado de estos productos (TECNALIA y Dirección Nacional de Planeación Colombia DNP, 2017).

La mezcla en cantidades de idoneidad de concreto, agua y los denominados agregados inertes, posibilitan definir un porcentaje variable de rendimiento de los materiales, al respecto mencionan como criterio general expertos del área lo siguiente, dichos agregados constituyen hasta un 70% en volumen de la mezcla del material finalizado, con lo cual, se específica y efectúa la dosificación de acuerdo con cada caso y a las necesidades de aporte en cuanto a resistencia y economía (Espinoza, 2015).

Al agregar fibras de origen natural al concreto, se posibilita entonces, incluir propiedades derivadas de cada fibra en el material final y, a utilizar durante el proceso constructivo en sí, acompañando el despliegue de estas facilidades o propiedades durante la vida útil del resultante de los insumos aplicados. De esta forma y en su estado de dureza, se agregan ventajas a la par de las fibras, que se resumen potencialmente en: aumento de la firmeza o tenacidad y resistencia a

impactos, que traduce un material con características de fuerza especiales, que otorga capacidad de control a las fisuras y mayor resistencia a la fatiga (Olutoge, Ofuyatan, Rachael, & Opaluwa, 2015). Por otra parte, en el contexto del proceso de preparado y aún sin fraguar, el material o mezclado, al cual se han agregado fibras, posibilita el control de la tracción plástica o en general, la denominada retracción del concreto durante dicho procedimiento (Martínez & Poveda, 2018).

Además, las fibras vegetales, como el sisal, el bambú y la paja, han sido objeto de investigación en la mejora de las propiedades del concreto. Según Ahmad et al. (2022), la incorporación de fibras vegetales en el concreto puede mejorar la resistencia a la tracción y la tenacidad del material. Estos autores demostraron que al emplear fibras de sisal como un aditivo en concretos; este aumentó significativamente su capacidad de absorber energía durante la carga, lo que lo hace más resistente a la fisuración. Un estudio de Quintero-Dávila et al. (2019), destacó que el uso de fibras vegetales tiene la capacidad de reforzar el material, al mejorar sus propiedades mecánicas frente a esfuerzos de compresión y flexión. Al incorporar fibras de bambú en el concreto, observaron aumentos de la resistencia y la ductilidad de las muestras estudiadas.

Adicionalmente de los beneficios mecánicos, la sostenibilidad es un aspecto crucial del uso de fibras vegetales en concretos. Khalid et al. (2021), la producción y extracción de fibras vegetales son procesos más respetuosos con el medio ambiente en comparación con las fibras sintéticas. El uso de fibras vegetales contribuye a la reducción de la huella de carbono de la construcción y a la gestión sostenible de los recursos naturales. Sin embargo, es importante considerar la compatibilidad de las fibras vegetales con otros aditivos y materiales del concreto. El estudio de Mulenga et al. (2021), resaltó la necesidad de optimizar la mezcla y el diseño del

concreto al incorporar fibras vegetales para maximizar los beneficios sin comprometer la durabilidad y la trabajabilidad del material.

Gracias a la extensa información sobre el uso de fibras vegetales en el refuerzo de concretos, es posible determinar los beneficios de emplear fibras, no solo en el ámbito sostenible, sino en el ahorro de costos a nivel industrial y en la mejora del desempeño mecánico. La presente investigación abordará temas técnicos que ayudarán a mejorar la comprensión sobre el uso de fibras en compuestos de concreto; y como estas fibras afectan positivamente el desempeño mecánico del concreto.

1.6 Estado del arte

Junto con los aspectos mencionados en la introducción del presente trabajo sobre el uso de concretos reforzados con fibras naturales (CRFN), en estadios arcaicos de la historia del ser humano y más específicamente desde la era de las primeras ciudades de tipo monumental, a saber, Sumer y Asur que datan del año 4.500 antes de la era cristiana, el tema pasa por el siglo XVI en el oeste americano, donde se mencionan vestigios de casas cuyo adobe de pared incluye pelos de crin de caballo como material de construcción y llega a una relativa era moderna, más exactamente el siglo XIX con “Hilaire Chardonet”, inventor de la seda artificial (Espinoza, 2015). Sin embargo, la introducción como tal en la era moderna del CRFN, se difumina con el diseño y aplicación de materiales como el asbesto en 1898, utilizado para matrices de aglometrado de cemento, pero descartado hoy día por razones de salud; continua la industrialización en 1950 y en la Unión sovietica se populariza el uso de fibra de vidrio, descartada luego por su tendencia a presentar fenomenos de alta alcalinidad y tendencia de evolucionar con roturas. En 1960 y 1970 se populariza entonces el uso de fibras sintéticas y se da una oleada inicial de investigación con fibras de origen natural, ante esto, se tiene que desde los reportes del Instituto americano del concreto (ACI) de 1998 se menciona lo siguiente: “tanto las fibras sintéticas como las naturales pueden exitosamente reforzar los compuestos basados en matrices de cemento” (Rico, Farshidpour, & Tehrani, 2017). De esta forma, se está hoy día, a bordo de una tendencia en el contexto de las aplicaciones del CRFN para la construcción y otros subsectores económicos que se resume en el concepto de los materiales compuestos, y que, es equivalente a todo material resultante de una combinación potencialmente no química, para

obtener así una serie de características específicas, en donde los materiales utilizados no se fusionan entre si de manera total (Gómez, 2009).

Desde la década pasada, se ha dado entonces una tendencia a efectuar múltiples estudios sobre concretos reforzados mediante procesos de adición de fibras sintéticas, metálicas y reciente, un especial auge al procedimiento que ocupa el presente estudio: CRFN; sobre este último y en cuanto al uso de fibras vegetales como aditivos, los investigadores han realizado pruebas mayoritariamente con bagazo de caña de azúcar, estopa de coco, lechuguilla, fique, bambú, además de otros especímenes menos estudiados (Saavedra & Ortega, 2020). Lo anterior se explica principalmente por las potencialidades en cuanto a optimización de costo y abundancia y mejoras relativas al comportamiento de los materiales resultantes, como compuesto para utilizar en los procesos de construcción, de allí entonces, la intensidad puesta a las pruebas y aplicación de refuerzos con fibra vegetal, para así reemplazar fibras sintéticas y metálicas en la fabricación de concretos a nivel mundial.

Dado que en la presente investigación se utilizarán fibras accesibles localmente y disponibles subregionalmente, orientar el esfuerzo experimental hacía fibras como las denominadas fique, coco y la guadua, lucen, además de tentativas, y de probarse como viable, se considerarían en término de proyecto, un tanto más medioambiental sostenibles.

Las variables a estudiar en la presente investigación dependen enteramente del tipo de plantas que se utilizarán para extraer la fibra vegetal, por tanto; la comprensión de estas plantas, su procedencia y los estudios relacionados, permiten comprender la forma en la que las fibras vegetales interactúan con la matriz de concreto.

1.6.1 Fibra de Fique: El fique "*Furcraea andina"* es una fibra natural de alta resistencia, considerada en algunos medios académicos y por estudiosos del tema, a constituir un remplazo natural de la fibra de vidrio, lo anterior debido a pruebas realizadas a este respecto y divulgadas por la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia (Unimedios, 2017). Esta fibra natural vegetal, es a la par elástica, y ha sido aprovechado desde tiempos ancestrales por los artesanos de Colombia, en donde tradicionalmente ha obtenido la denominación de "fibra nacional". Así que, el fique corresponde a la familia de las pencas, similar al agave mejicano, pero se diferencia de éste, por no contar con una espina terminal en la punta de sus hojas, en vez de esto, tienen una pequeña punta coriácea (Fundación para la Orientación Familiar FUNOF y Artesanias de Colombia S.A., 2014).

En la figura 2, se observan además de la planta de fique, algunos momentos del procesamiento de la fibra, bajo los parámetros tradicionales de explotación en zonas rurales de Colombia. Igualmente, la fibra de fique tiene un gran potencial que está siendo efectivamente aprovechado en unidades económicas de tipo familiar en el país, donde asociaciones campesinas efectúan ejercicios de asociatividad productiva para mejorar sus capacidades de negociación con intermediarios del producto (FUNOF y Artesanías de Colombia S.A., 2014).

Nativa de los andes sudamericanos, su cultivo es popular en Colombia, allí también la denominación de cabuya, su origen se ubica efectivamente en la América tropical, creciendo de forma prácticamente espontánea y beneficiando a los habitantes de dichas regiones que desfibraban esta penca para fabricar de alpargatas, redes y otra variedad de aplicaciones y usos de tipo doméstico (Servicio nacional de aprendizaje Colombia SENA, 2010).

Figura 2

Plantación de fique y momentos del aprovechamiento de la hoja de la planta



Nota. De izquierda a derecha: plantación, proceso de lavado, secado. Adaptado a partir de Caracterización del Fique (p11 y 29.), por: Fundación para la Orientación Familiar FUNOF y Artesanías de Colombia S.A, 2014.

Hoy día, esta fibra tradicionalmente utilizada en artesanías, fabricación de empaques y cordeles, es de especial interés para arquitectos y constructores, pues se han venido desarrollando nuevos e innovadores aplicaciones como por ejemplo abonos o como material de construcción. Teniendo en cuenta la última afirmación, se tiene el imperativo de disponer de materiales de construcción de calidad, sostenibles y de reducido impacto ambiental al igual que bajo costo para el desarrollo de vivienda de interés social, de tal manera que, se viene ensayando la fabricación de morteros para elementos tales como paneles para techos, vigas y baldosas, entre otros.

Sobre el uso de fique, como material para la composición de CRFN, la unidad de Materiales, del Centro de Investigación Científica de Yucatán, en colaboración con el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México y el Departamento de Mecánica Aeroespacial e Ingeniería Civil, de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Manchester, han realizado en

2020, un trabajo de caracterización mecánica del hormigón celular simple (SCC) por sus siglas en inglés, y el hormigón celular espumado reforzado con fibra (FRFC) por sus siglas en inglés. Que presenta densidades de aproximadamente 700 kg / m3 y el cual fue puesto a prueba bajo ensayos que midieron resistencia a compresión y tracción (Castillo et al, 2020).

El estudio refiere adicionalmente que al configurar un esquema donde el FRFC fue reforzado con fibra de fique, y se dejó una sección como muestra control sin tratamiento, mientras que a la otra se le aplicó un tratamiento alcalino, con volúmenes de 0,5%, 1% y 1,5%; utilizando un refuerzo de fibra de polipropileno como referencia, el resultado principal es qué en los FRFC reforzados con fibras, obtuvieron una respuesta óptima frente a la aplicación de esfuerzos de compresión y tracción, además de un aumento en la eficiencia frente a deformaciones plásticas; mostrando así una mejoría en la integridad de las muestras estudiadas (Castillo-Lara, *et al.*, 2020).

Al someter las muestras a esfuerzo de compresión, no se observó una pérdida considerable en la resistencia mostrando como las fibras no afectaron la respuesta de la muestra a esfuerzos de compresión, mientras que los resultaros del esfuerzo de tracción evidenciaron un aumento en la resistencia, evitando la falla súbita de la muestra y mostrando la forma en que el concreto reforzado con fibras puede cambiar el comportamiento frágil que caracteriza a los concretos utilizados comúnmente (Castillo-Lara, *et al.*, 2020).

Lo anterior, lleva a concluir que la respuesta del concreto al esfuerzo de tracción aumentó al implementar fibras de fique tratadas, aspecto atribuible a una mayor capacidad de la unión entre fibra y matriz resultante del tratamiento alcalino.

Adicionalmente, la caracterización al microscopio permitió observar la manera como el uso fibras no afectó la porosidad del material, su relación de vacíos o la distribución de los vacíos; también fue posible observar mayor absorción de energía para los FRFC comparados con el PFC, aspecto que se atribuye a una mejora en la tenacidad y ductilidad de las fibras obtenidas (Castillo-Lara, *et al.*, 2020).

Se suman a la anterior investigación relatada en el estado del arte del fique otra serie de estudios que han permitido analizar la respuesta del concreto frente a esfuerzos mecánicos, pero analizando diversas dosificaciones de fique en vigas, cilindros y otros componentes relativos a la infraestructura civil. Al respecto, Saavedra & Ortega (2020), citan un estudio de la Universidad Piloto de Colombia (Pinzón, 2013), a partir del cual se establecieron porcentajes de fibra en concreto que exhiben comportamientos óptimos. En la investigación fue posible observar mejoras en el desempeño mecánico de concretos modificados con fibra, en adiciones que emplearon fibras dispersas, agregadas de forma directa en el concreto en relaciones tales como 0.5%, 1.0%, 1.5% y 2.0%.

Por otra parte, dos estudios de la Universidad Nacional de Colombia también han contribuido a caracterizar materiales cementantes reforzados con fibras de fique. El primero de ellos (Courdet, 2020), menciona como algunas dificultades del uso de las fibras de fique, como por ejemplo la alta sensibilidad con el medio ambiente de carácter alcalino típico del concreto, además de una rápida degradación, lo cual hace que se requieran cuidados de tipo preventivo para el material agregado. En el estudio se indagó sobre el uso de dos alternativas de tratamiento, como es el uso de hidróxido de sodio y la aplicación de parafina liquida para recubrir la superficie del concreto. El trabajo realizado concluyó que, al emplear estos métodos preventivos,

se logró proteger los agregados naturales y no se afectó la resistencia mecánica; sin embargo, el uso de parafina afectó la absorción de energía del concreto de manera negativa.

El segundo y también reciente estudio (Luna, Lizarazo-Marriaga, Luna, Ortiz, & Mayorga, 2019), se analiza la resistencia a flexión de losas de concreto reforzado con mallas de fique, para lo cual se varió el espaciamiento entre las fibras, y se compararon los resultados obtenidos. Tal procedimiento, posibilita concluir que emplear un refuerzo de malla de fique, para modificar el concreto presente en las losas, tiene un impacto positivo en la respuesta del concreto frente a esfuerzos de flexión. Sin embargo, la investigación solo tuvo en cuenta un solo tipo de distribución geométrica de la malla y no tuvo en cuenta las variables de degradación ambiental, debidas principalmente a la alcalinidad del concreto, lo que puede afectar su desempeño mecánico a largo plazo. Este último aspecto genera un vacío de conocimiento en el contexto del estado del arte del fique como material agregado a la fabricación de matrices de CRFN, que ante las diferentes posibilidades de combinación implica también una alta complejidad, sobre lo cual el presente trabajo aporta una opción en términos de solución.

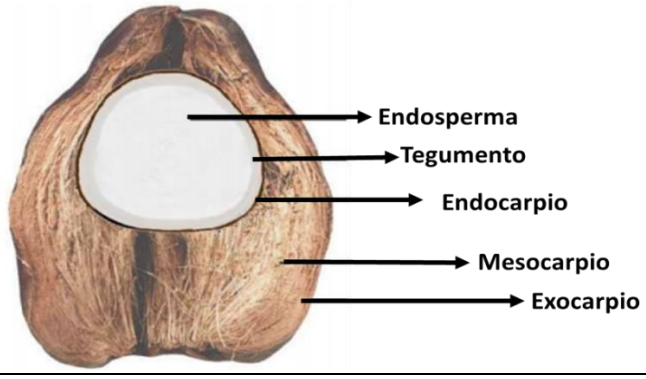
Si bien el estudio de Saavedra & Ortega (2020), parte de este último aspecto señalado, revisando así losas de concreto reforzadas con fique; el comportamiento mecánico y el efecto derivado del revestimiento a dichas fibras y su condición de material agregado al concreto, estas condiciones en el estado del arte de las mezclas con fique, posibilitan un importante campo de estudio sobre el material, su tratamiento y la conformación de matrices para desarrollar versiones mejoradas de CRFN aplicable en construcciones sustentables y de potencial costo racionalizado en función de la disposición de los materiales.

1.6.2 Fibra de coco: Proveniente del árbol del cocotero que, es una planta de la familia de las palmáceas, denominación dada a algunas especies del género Cocas, C., específicamente a la especie Cocos *nucífera*, el coco se compone de una sección interior blanda de color blanco y un líquido relativamente traslúcido, y una sección exterior dura y semidura que le protege absorbiendo los posibles impactos. El coco viene logrando gran popularidad en la industria alimenticia, por esta razón, esta parte interna de la fruta es tratada industrialmente para producir grasas, aceites comestibles, dulces y pulpa seca de coco – (Quintero y González, 2011). A partir de estos procesos agroindustriales, se asumía hasta hace algunas décadas y mayoritariamente como residuo, la estopa o mesocarpio, que más recientemente viene cobrando importancia por los usos potenciales y efectivos de la fibra de coco que se obtiene de esta parte del fruto.

En la figura 3 se presentan las partes del coco correspondientes al mesocarpio y exocarpio, de las cuales se compone la estopa de coco, el primero contiene esencialmente tejidos fibrosos relativamente duros, y el segundo a su vez está constituido por numerosas fibras que recorren el fruto longitudinalmente y por un tejido de parénquima, se obtienen fibras largas del procesamiento del mesocarpio (Puentes & Joya, 2005).

Figura 3

Corte transversal del coco, fruto del cocotero



Nota. Adaptado a partir de *Reconocimiento de características, obtención y utilización de la estopa de coco* (p.13) (Puentes y Joya, 2005).

En contraste con la popularidad y profusidad en cuanto a estudios sobre el fique, la fibra y estopa de coco aplicadas en el contexto constructivo, están empezando apenas a desplegar su versatilidad y potencialidad en diversos procedimientos y subsectores de la actividad económica. Sólo a manera de ejemplo al respecto, un trabajo de la Universidad Autónoma de Occidente sobre potencial de uso y establecimiento de una empresa comercializadora de fibras y sustrato a partir de la estopa de coco (Estupiñan & Sánchez, 2019), mencionan en su modelo de negocio, el uso como aislamiento termo acústico de material base en la elaboración de colchones. No obstante, se excluye en dicho trabajo aún, la potencialidad en el área de los CRFN. Este espacio de investigación, abierto aún, ofrece una oportunidad en la potencialidad de continuar y profundizar las potencialidades de la fibra y estopa de coco como material agregado en la preparación de CRFN. Tal cómo se pretende y se aplica experimentalmente en este trabajo doctoral.

Esta última perspectiva, lleva entonces a mencionar el estudio de la Universidad Nacional (Quintero & González, 2011), donde se evaluaron las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las fibras y se estudió la posibilidad de usarlas en morteros como adyuvante en la distribución de esfuerzos del mortero, empleando proporciones de estopa de coco de 0.5 y 1.5% y definiendo largos para el corte de fibra de entre 2 - 5 cm, se realizaron pruebas de esfuerzo mecánico que demostraron que el uso de fibras disminuye la deformación máxima para las diferentes muestras de concreto analizadas, un aspecto que es coincidente con resultados y observaciones de experimentos anteriormente ejecutados y en idéntica línea, de documentos revisados al respecto,

ratificando así que, los refuerzos de fibra benefician las propiedades del material que relacionan la tenacidad de la matriz cementante.

La fibra proveniente de la estopa de coco es igualmente denominada fibra bonote, y de acuerdo con grosor, extensión y rudeza es posible clasificarla principalmente en 3 categorías así: la primera de ellas corresponde a la conocida como fibra de esteras, que es la más larga y fina; una segunda de tipo más tosco, y a la cual se le denomina comúnmente como fibra de cerda, y una tercera categoría más corta, denominada como fibra para colchones (Quintero y González, 2011).

A la vez, es importante reseñar la propiedad del bonote para superar su límite elástico sin presentar rompimiento; también la capacidad de absorber deformaciones permanentes al ser sometido a cargas; sin embargo, la resistencia a la tracción de la fibra de bonote seca es relativamente menor comparada con otras fibras, aspecto que es potencialmente corregible por inmersión en agua. Posteriormente a un lapso de 4 meses de estar sumergida en el agua, esta fibra pierde solamente entre un 35 a 45% de su resistencia y se afirma que, cuenta con unas características de flotabilidad y a condiciones altamente salinas, así como ambientes de gran proliferación de microorganismos (Quintero y González, 2011).

Por otra parte, teniendo en cuenta aspectos morfológicos de la fibra en procesos industriales de construcción, la Pontificia Universidad Javeriana de Cali (Quirós, 2018), desarrolló tres tipos de pruebas así que permitieron evaluar de forma comparativa el uso de fibras en mortero reforzado, para tres condiciones diferentes, que fueron: un mortero tipo control, uno reforzado con fibra de coco a 4% y 2%, y uno con tratamiento químico de óxido de hierro. Los resultados mostraron efectos positivos en la resistencia mecánica del material para los dos casos

del concreto modificado. En los estudios, se logró concluir que la fibra ejerce una especie de anclaje en la matriz de concreto ligero, evitando la propagación acelerada de grietas y mejorando la resistencia a los esfuerzos mecánicos para esfuerzos de tipo tracción y flexión, además la fibra ofrece otras cualidades como la inhibición del crecimiento microbiano acelerado y los efectos de la salinidad en estructuras sumergidas, control térmico y reducción del peso del concreto.

1.6.3 Fibra de Guadua: La Guadua "*Guadua angustifolia"*, la cual recibe la denominación popular de guadua, es una planta perteneciente a la subfamilia de las gramíneas "*Bambusoideae"*, se caracteriza por habitar las selvas húmedas tropicales con una alta preferencia por los ambientes cercanos a ríos, propia de las selvas del área norte-centro de Suramérica, es de señalar su parentesco con el Bambú, a través del *"filum plantae"* de las pomáceas o gramíneas.

Sin embargo, es importante mencionar que aquella planta comúnmente denominada guadua corresponde a una especie nativa de américa, que puede encontrarse en el territorio colombiano de forma natural, territorio en el cual desde un enfoque de servicios eco sistémicos, la guadua, posibilita un importante vínculo entre el funcionamiento de sus ecosistemas y el bienestar humano, debido a los aportes de nutrientes, el efecto positivo sobre cuerpos de agua y la acción de la biomasa en suelos (Muñoz, Camargo, & Romero, 2017), adicionalmente, su aplicación en construcción cuenta con referencias tan antiguas, como una que menciona Hidalgo (1978), mencionando hasta un estimado de 9.500 años de antigüedad en el territorio del Ecuador.

En la figura 4 que aparece a continuación, se observa un bosque de guadua situado en la región con mayor inventario registrado de este tipo de plantas en Colombia, donde el estimado de 51.000 hectáreas existentes, un aproximado de 28.000 se encuentran en la región del eje

cafetero, la imagen corresponde a un bosque de la especie "*guadua angustifolia kunthque",* la cual crece en la región mencionada (Unimedios, 2011).

En un trabajo adelantado por investigadores como Bejarano (2019), se menciona que a través de un estudio experimental se evidenciaron los siguientes resultados en CRFN utilizando guadua: el uso de fibras de la denominada "*angustifolia Kunth"* en una mezcla de concreto permite una mejorar la respuesta del concreto regular frente a los ensayos de compresión, sin embargo, el curado con radiación UVB a las fibras posibilitó una mejora en los resultados de resistencia. Por otra parte, en términos generales se logró determinar que emplear fibras de guadua puede aumentar el comportamiento del concreto en cuanto a su resistencia y ductilidad al ser sometido a cargas axiales. En la figura 4 se aprecian el estado natural del bosque de guadua.

Figura 4

Bosque de guadua



Nota. Tomado de Una Guadua Prodigio (Fotografía), por (Unimedios, 2011).

El trabajo es concluyente en cuanto a las ventajas del uso de guadua, por sus propiedades de resistencia, facilitando así el diseño de CRFN aplicados a una mayor capacidad de carga, junto con el hecho de que, por la facilidad de extracción de este tipo de fibra natural frente a otras artificiales o minerales, resulta un aditivo en el concreto más económico respecto a otros materiales convencionales de refuerzo. Finalmente, es de resaltar también los beneficios derivados de la sostenibilidad que presenta el uso de materiales orgánicos como refuerzo en los concretos. Estos aspectos hacen de la fibra de guadua un material ideal en los procedimientos de diseño para procesos constructivos tanto de matrices como en general CRFN.

Es importante mencionar que el análisis más relevante para la investigación se relaciona con la interpretación de los resultados en los ensayos de la resistencia a la compresión, dado que es un producto de la evaluación de la variable de estudio más representativa.

En investigaciones relacionadas como la de Bustos *et al.* (2020), realizaron una caracterización mediante microscopía de fuerza atómica “AFM”, que permitió determinar características relativas al desempeño mecánico en fibras de fique (*furcraea andina*). Para su estudio, los autores realizaron análisis mediante microscopía de fuerza atómica, una técnica avanzada capaz de ofrecer información relevante sobre la topografía de la muestra y que además permite determinar el comportamiento mecánico de materiales a pequeña escala; haciendo uso de técnicas especializadas que reciben el nombre de pruebas de identación (Bustos, y otros, 2020). Los autores reportaron propiedades de rugosidad que le permiten a la fibra de fique interactuar de forma adherente con diferentes compuestos especialmente con matrices poliméricas; esto cobra relevancia en esta investigación dado que la morfología de la fibra presentada en las imágenes de microscopía electrónica mostró distribuciones rugosas de interés que pueden

generar sistemas de anclaje para la matriz cementante propia del concreto, como lo han mostrado autores como Pons-Ribera *et al.* (2023), quienes reportaron interacciones micrométricas de la fibra con el concreto que influyen en resultados como la propagación de fallas, especialmente debido a la superficie y estructura rugosa de fibras como las fibras de cáñamo, lino y bambú (2023). Los autores además señalan que para los casos de las fibras de cáñamo y lino hubo una descomposición de la macrofibra en filamentos más delgados de fibra, aumentando el área de superficie en la interacción de las fibras con la matriz de concreto. Los autores atribuye este fenómeno a la reacción de $Ca(OH)_2$ presente en el concreto, con los grupos hidroxilo de la celulosa y la hemicelulosa, dividiendo la estructura en filamentos más delgados. Caso contrario a las fibras provenientes del bambú las cuales fueron definidas por los autores como “fibras rígidas” dada su capacidad para no dividirse en microfibras y conservar su macroestructura posterior a la interacción con el concreto. Según los datos reportados por los autores, las fibras parecen tener un efecto de anclaje con comportamientos elasto-plásticos que permiten deformaciones que favorecen a la estructura frente a efectos de microgrietas. Estas interacciones podrían explicar el aumento en el desempeño mecánico presentado en los concretos reforzados por fibras y la divisibilidad y aumento del área superficial de las fibras dispersas podría contribuir a un mejor desempeño en las fibras de coco y de fique.

Adicionalmente Bustos *et al.*, reportaron una rugosidad de 14 nm como parámetro que influye en la interacción de la fibra con materiales compuestos. Por otro lado, la investigación reportó una dureza de 15 MPa, un módulo de elasticidad de 841 GPa y una recuperación elástica promedio ante efectos de deformación de aproximadamente 93.25%. Este gran desempeño mecánico puede contrastar de forma adecuada con los resultados obtenidos en los ensayos de

resistencia a la compresión de la presente investigación, dónde se obtuvo que el concreto reforzado con fibra de fique reportó un aumento de la resistencia en comparación con los otros cilindros de concreto reforzados con otro tipo de fibras.

En los estudios reportados por Gil *et al.* (2021), los cilindros de concreto fallados mostraron respuestas positivas en el desempeño mecánico como resultados del ensayo de compresión, sin embargo, pese al buen desempeño mecánico, la resistencia a la compresión fue menor que la del cilindro de concreto utilizado como control, es decir, sin fibras de coco. Para la presente investigación, la resistencia a la compresión tuvo un aumento, lo que señala que la proporción y distribución de las fibras en el cilindro debe tener un porcentaje adecuado, así como un mezclado que no afecte la estabilidad estructural en los cilindros de concreto. Las afectaciones dadas por la relación de longitud de fibra y la cantidad de fibra agregada en una mezcla, se pueden evidenciar en investigaciones como las de Mora (2017), en este estudio, la autora evidencia las fallas estructurales en ensayos de compresión y de flexión aplicados a probetas de concreto y vigas diseñadas para falla en laboratorio.

Por otro lado, investigaciones como las de Quintero-Dávila *et al.*, sugieren que un porcentaje de fibras de *guadua angustifolia* de entre 4.0 y 8.0wt% en una matriz de concreto pueden generar una mejora en la respuesta mecánica de más de un 100% (2018). Razón por la cual es necesario revisar los contenidos de fibra para cada mezcla de concreto, en la presente investigación se utilizó la misma proporción de fibra para cada cilindro de concreto. Estos comportamientos mecánicos en función con la cantidad de fibra y la morfología brindan información sobre como los compuestos de hemicelulosa con diferentes distribuciones espaciales permiten desarrollar respuestas variadas en el esfuerzo mecánico. Adicionalmente, dichas

respuestas mecánicas permiten determinar cómo actúa la morfología en el anclaje de los compuestos cementantes, en relaciones que permiten cuestionar la longitud de la fibra, las celdas presentes en la estructura del xilema, las relaciones del lumen y la pared vegetal y la presencia de otros compuestos y estructuras que pueden interactuar con el área superficial del concreto.

2. Diseño metodológico

A continuación, se presenta el diseño metodológico empleado para la presente investigación

2. 1 Enfoque

Para llevar a cabo este proceso de investigación se seleccionó un método de investigación de tipo experimental, con la finalidad de estudiar como influyen los tipos de fibra utilizados en la mezcla, con respecto a la resistencia a compresión de cada uno de los cilindros de concreto. Para conducir el experimento a partir del ensayo de descrito en la NTC – 121 y los análisis realizados en Microscopía Electrónica de Barrido (MEB o SEM[1] en inglés) con la finalidad de obtener información relevante del comportamiento de la microestructura en los materiales de construcción y evaluar una respuesta positiva frente al uso de este tipo de fibras. Según la clasificación determinada de acuerdo a los tipos de estudios referenciados por el autor Dagnino (2014), este estudio se clasifica dentro del componente experimental en el cual las condiciones se encuentran bajo control directo del investigador (Šipetić-Grujičić, 2008) (Last, 2004). Ahora, de acuerdo con esta clasificación se pueden tener diferentes tipologías de estudio experimental, dentro de las cuales se puede encontrar las siguientes:

- Diseño preexperimental
- Diseño por experimentos “verdaderos o puros”
- Cuasiexperimentos

[1] *Scanning Electron Microscopy*

2.2 Tipo de investigación

La presente investigación se clasifica como un diseño por experimentos verdaderos o puros, debido a que se hace uso del análisis estadístico para poner a prueba una hipótesis determinada, y correlación con lo escrito por Sapieri, Collado y Baptista (1997, pág. 102), los experimentos auténticos, verdaderos o puros permiten manipular las variables independientes con el fin de observar cómo influyen en las variables dependientes en un entorno controlado. Teniendo en cuenta que se manipula una variable independiente que en este caso es el tipo de fibra y que los efectos se analizan mediante la variable de respuesta identificada como la resistencia a la compresión, se define esta investigación de acuerdo con los parámetros del diseño por experimentos verdaderos o puros.

En investigaciones como la presente, se manipulan deliberadamente variables independientes (en este caso, la presencia de fibras vegetales y sus características morfológicas) para observar los efectos que tienen sobre las variables dependientes (la resistencia a la compresión de los cilindros de concreto) en un entorno controlado.

2.3 Hipótesis

Existen dos hipótesis para la presente investigación:

Hipótesis Nula (H0): No hay diferencias significativas en la resistencia a la compresión entre las categorías de probetas de concreto, incluyendo el grupo de control (sin fibras) y los grupos reforzados con fibras de coco, fique y guadua.

Hipótesis Alternativa (H1): Existen diferencias significativas en la resistencia a la compresión entre al menos dos categorías de probetas de concreto, lo que sugiere que la

presencia y morfología de las fibras (coco, fique y guadua) influyen en la resistencia del concreto.

Esta formulación establece la base para un análisis estadístico, como un ANOVA (Análisis de Varianza) para comparar las medias de las diferentes categorías de probetas. El rechazo de la hipótesis nula indicaría que al menos dos grupos son significativamente diferentes entre sí en términos de resistencia a la compresión.

2.4 Objetivo general

Diseñar una mezcla compuesta con fibra natural que contenga las propiedades mecánicas y productivas requeridas para cumplir con las especificaciones técnicas en la elaboración de placas prefabricadas en concreto con unas características favorables de impacto económico y medioambiental.

2.5 Objetivos específicos

- Establecer y evaluar las propiedades y el comportamiento mecánico de las fibras de coco, fique y guadua, por medio de los ensayos en laboratorio.
- Definir la propuesta de mezcla para la fabricación de elementos prefabricados, teniendo en cuenta los porcentajes en peso de la fibra natural y el concreto. Generando una matriz comparativa para los ensayos de laboratorio de las fibras.
- Evaluar financieramente los costos y la inversión de los componentes de la mezcla propuesta, revisando su viabilidad económica, validando el producto diseñado, en términos de costo beneficio, en consideración de la competitividad y uso comercial.

2.6 Variables

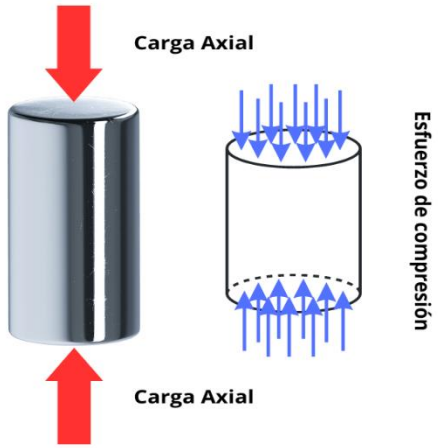
2.6.1 Definiciones teóricas

2.6.1.1 *Ensayo de concreto*

La variable de respuesta estudiada en la investigación corresponde al esfuerzo último de compresión soportado por los cilindros en el instante antes de ser fracturados por la acción de una carga axial; estos cilindros serán fallados en diferentes periodos de tiempo. Según lo definen Beer *et al.* (2017), la fuerza por unidad de área, o a la intensidad de las fuerzas distribuidas en un plano de área determinada se denomina esfuerzo y usualmente es representado utilizando la legra griega "σ". El esfuerzo a compresión es en efecto la fuerza por unidad de área que se obtiene al aplicar una fuerza axial en los planos que definen la sección transversal de un elemento, con la finalidad de generar un efecto de aplastamiento que en ocasiones disminuye la longitud del elemento en un eje determinado o puede llegar a generar la falla de este, este efecto depende de la fragilidad o ductilidad del material y su capacidad o no para deformarse plásticamente. En la figura 5 se presenta un esquema que ilustra la forma en la que las cargas axiales inducen el esfuerzo de compresión, la misma que será utilizada para fallar los cilindros propuestos para la investigación:

Figura 5

Esquematización de la aplicación de cargas axiales en cilindros de concreto (esfuerzo a compresión)



Nota. Fuente: Elaboración propia

El esfuerzo de compresión se define matemáticamente mediante la siguiente relación:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Ecuación [1]

En dónde:

- σ = corresponde al esfuerzo de compresión
- P = corresponde a la carga axial aplicada
- A = corresponde al área trasversal del elemento sometido a compresión

La comprensión de este esfuerzo permite conocer parámetros importantes como la resistencia que presenta el material cuando es sometido a este tipo de fuerzas y uno de los mejores ejemplos de aplicación se encuentra en la ingeniería civil, cuando las columnas de las edificaciones son sometidas a la carga axial del peso propio de la estructura.

2.6.1.2 *Microscopio electrónico de barrido*

Con la finalidad de realizar una caracterización de las fibras utilizadas, especialmente de su microestructura y de la organización de las células vegetales, se hizo uso de un equipo especializado llamado microscopio electrónico de barrido MEB o SEM por sus siglas en inglés que permite analizar la topografía micrométrica y nanométrica de diferentes tipos de muestras. En contraste con los microscopios ópticos, los microscopios electrónicos hacen uso de un haz de electrones en lugar de un haz de luz. En consecuencia, dicho haz interactúa con el espécimen y reenvía información de dicha interacción a sensores capaces de recolectarla y representarla en forma de imágenes. Para hacer que la calidad de la imagen tenga una buena resolución, los microscopios electrónicos enfocan el haz de electrones mediante lentes electromagnéticas y permiten observar características de hasta 0.1 nm (nanómetro[2]) (Thermo Fisher Scientific, 2023).

El funcionamiento del microscopio electrónico emplea principios de la física que permiten superar los límites de difracción de la luz, al emplear una fuente de iluminación que posee una longitud de onda más corta de la que poseen los fotones de la luz, y en consecuencia logrando la visualización de objetos que se encuentran separados por distancias diminutas, del orden de los nanómetros y picómetros. En el caso de los microscopios electrónicos se hace uso de los electrones, los cuales tienen una longitud de onda mucho más pequeña que los fotones (2.5 pm a 200keV) (The University of Utah, 2011). La longitud de onda de estos electrones, depende de la masa, el voltaje de aceleración de los electrones y la constante de Planck, y puede calcularse mediante la siguiente relación:

[2] Nanómetro: 1 [nm] = 1×10^{-9} [m]

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meV}}$$

Ecuación [2]

En donde:

- λ = Longitud de onda
- h = constante de Planck
- m = masa de un electrón
- eV = voltaje de aceleración (energía adquirida por el electrón para moverse a través de una diferencia de potencial)

El microscopio electrónico de barrido hace uso del haz de electrones para generar una imagen tridimensional de la estructura que se está analizando, para conseguirlo, el haz es dirigido a la muestra y realiza un escaneo o barrido de la superficie (Cooper & Hausman, 2017), de allí su nombre. En la interacción con la muestra los electrones que impactan al espécimen producen una serie de señales que pueden ser detectadas y amplificadas mediante detectores y otros dispositivos especializados, Renau-Piqueras y Faura clasifican estas señales en tres grupos (Renau-Piqueras & Faura, 1994):

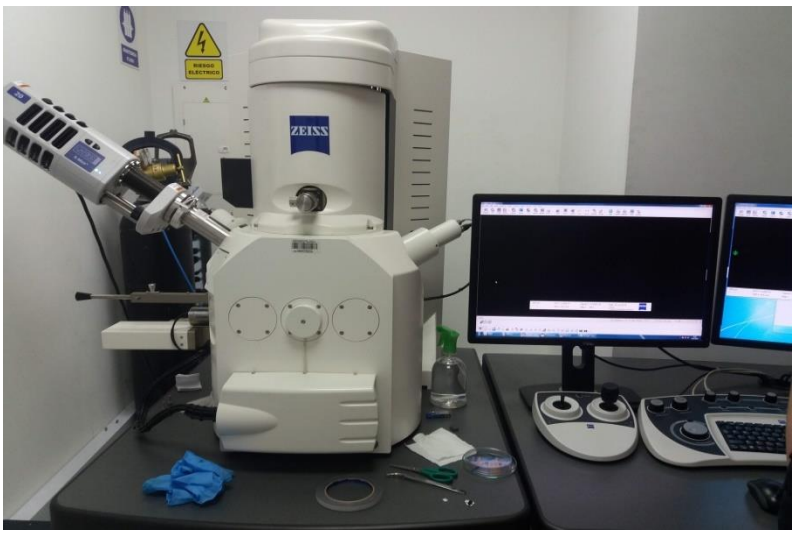
a. Ondas electromagnéticas: Rayos X y cátodoluminiscencia
b. Electrones: retrodispersados (*backscattered*), secundarios, transmitidos y absorbidos.
c. Señales de fuerza electromotriz (solo para semiconductores)

Adicionalmente, es importante mencionar que el microscopio electrónico debe operar en condiciones de alto vacío, principalmente por el hecho de que los electrones actúan como la luz solo cuando se controlan en el vacío (Thermo Fisher Scientific, 2023), además de evitar las interferencias con otras moléculas que pueden interferir con el paso del haz de los electrones y

dificultar la visualización del espécimen. Otras características importantes para el análisis de muestras orgánicas y no conductoras se relacionan con preparaciones especiales realizadas a la muestra que permiten conservar hasta cierto punto su estructura biológica, mejorar la interacción con el haz de electrones y la eliminación de las moléculas de agua en el espécimen. Estas preparaciones se conocen como procesos de fijación, deshidratación, secado de punto crítico y cobertura con carbono o metales capaces de emitir señales de electrones retrodispersados o electrones secundarios (Karp, 1996) (Renau-Piqueras & Faura, 1994). El microscopio electrónico empleado en la investigación pertenece al laboratorio de nanotecnología del instituto ÓMICAS de la Pontificia Universidad Javeriana en Bogotá-Colombia (figura 6):

Figura 6

Microscopio electrónico de barrido Universidad Javeriana de Colombia



Nota. Fuente*:* Elaboración propia

Las principales aplicaciones del SEM están relacionadas con los estudios de morfología y topografía superficial de los materiales, así como la organización microestructural de diferentes componentes de la muestra, como las células, los átomos, cristales, fibras, filamentos, entre

otros. La variable de estudio es entonces la superficie del espécimen, en este caso se busca estudiar la morfología y organización microestructurada de las células vegetales que componen las fibras de fique, guadua y coco.

Sin embargo, autores como Renau-Piqueras y Faura mencionan otras aplicaciones del SEM, tales como los análisis de composición química, análisis inmunocitoquímicos y microscopía tridimensional por congelamiento.

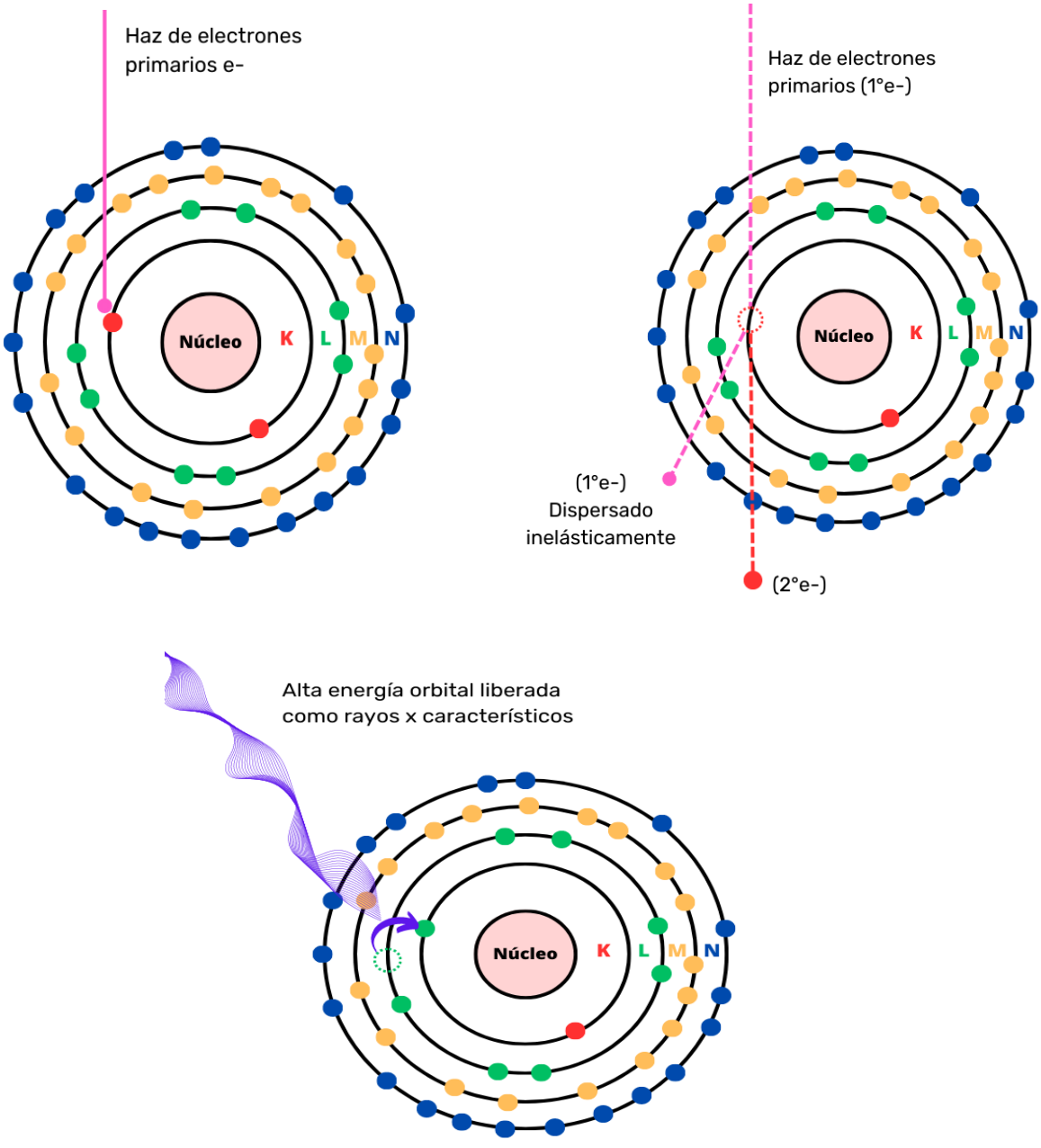
2.6.1.3 *Microscopio electrónico de barrido MEB/SEM – EDX (Análisis por espectroscopia de energía dispersiva de rayos X)*

La variable de estudio en los análisis SEM-EDX corresponde a la composición química del volumen superficial de las muestras de fibra de guadua, fique y coco. Para comprender la variable estudiada, es necesario saber cómo funciona la emisión de los rayos X característicos y como esta energía característica puede ofrecer información de la composición química. Todos los elementos de la tabla periódica poseen un número determinado de electrones y cada electrón se encuentra en un nivel específico de energía. “En condiciones normales los electrones son asociados a ciertas “capas” las cuales poseen energías diferentes y discretas” (Nanakoudis, 2019). Teniendo en cuenta lo anterior, cuando el haz de electrones utilizado en el SEM impacta los átomos es capaz de desplazarlos de la capa de energía en la que se encuentran. Al realizar esto, ambos electrones salen expulsados del átomo dejando un espacio en la capa de energía con una carga positiva resultante. Dicha carga atrae otro electrón de una capa de energía más externa para llenar el espacio que dejó el electrón expulsado. Cuando esta transición de un nivel de mayor energía a un nivel menor de energía ocurre la diferencia de energía es expulsada del átomo en forma de rayos X característicos, estos rayos X son únicos de cada elemento y por esta

razón permiten identificar la composición química de los mismos. La secuencia de imágenes de la figura 7 ilustra este fenómeno:

Figura 7

Emisión de rayos X característicos en los análisis EDX.



Nota. Fuente: Elaboración propia

Los rayos X que son emitidos durante el bombardeo electrónico son recolectados mediante un detector de deriva de silicio, este permite medir la señal e interpretarla empleando un software (Nanakoudis, 2019). Una vez recolectada e interpretada la información el software ofrece diferentes medios para analizar la información, estos medios pueden ser mapas elementales, espectros gráficos o tablas de datos. De esta forma la variable se concibe como la variación en la composición elemental de las muestras analizadas.

2.6.2. Definiciones operacionales

2.6.2.1 *Ensayo de compresión NTC – 673*

- Diseño y preparación de mezcla de concreto

- Según el método A.C.I. 211 para diseñar mezcla de 3000 PSI

El proceso de preparación de cilindros de concreto consiste en utilizar un molde metálico cilíndrico dividido en dos partes, previamente lubricado en su interior para facilitar la liberación del concreto. La mezcla de concreto se prepara de acuerdo con las proporciones y características especificadas. Al verter el concreto en el molde, se compacta en capas para eliminar espacios vacíos y se golpea ligeramente para liberar burbujas de aire. Posteriormente, se alisa la superficie superior del concreto y se retira cualquier exceso del borde.

Una vez colado, el cilindro se somete a un proceso de curado, ya sea cubriéndolo con un paño húmedo o colocándolo en un ambiente controlado. Después del período de curado, se retira el molde con cuidado, y se identifica el cilindro con información relevante como la fecha de colado. Finalmente, los cilindros curados se almacenan hasta que estén listos para ser sometidos

a los ensayos de resistencia a la compresión, siguiendo las pautas de la ASTM para garantizar uniformidad y precisión en los resultados.

Para conseguir un cilindro de características deseadas, según lo establecido en el método A.C.I. 211, los materiales deben cumplir ciertas características, para la presente investigación, las características de cada material fueron organizadas en la tabla 1, que se muestra a continuación:

Tabla 1

Características de los materiales

Agua	Grava	Arena	Cemento
Agua estandarizada para ensayos de laboratorio de Ingeniería civil acorde con lo establecido en el Método A.C.I. – 211.	Masa unitaria suelta: 738,9 [kg/m³] Masa unitaria compacta: 773,9 [kg/m³] Densidad aparente seca: 2,5 [g/cm³] Absorción: 6.4 % Humedad: 5,0 % Forma: redondeada (grava de rio) Tamaño máximo nominal: 25.4 mm Sobre tamaño: 38.1 mm	Masa unitaria suelta: 1.58 [kg/m³] Masa unitaria compacta: 1.701 [kg/m³] Densidad aparente seca: 2,4 [g/cm³] Absorción: 3.52 % Humedad: 4.1 % Forma: redondeada (arena gris de rio)	Porcentaje de finura: 95,6 % Peso específico: 3.14 g/cm³ Agua para consistencia normal: 24 % Fraguado inicial: 2 horas 20 minutos Fraguado final: 7 horas 20 minutos Fluidez: 109.15 %

Nota. Adaptado de ASTM, Método A.C.I. – 211.

- Asentamiento del concreto: relación existente entre consistencia de mezcla y desplazamiento vertical al liberar la muestra del cono de Abrams (norma NTC 396), el resultado es una consistencia entre blanda y fluida con asentamiento de 7.5 centímetros, clasificada entre media y húmeda en el medio de la construcción.
- Proporciones obtenidas para el diseño de mezcla: Para lograr realizar un diseño adecuado de los cilindros de concreto, se generaron cantidades de materiales a utilizar

en el diseño de la mezcla, estas cantidades se pueden observar en la tabla 2. Todo de acuerdo a la respectiva normativa colombiana.

Tabla 2

Proporciones de materiales para el diseño de mezcla

COMPONENTE	PESO SECO Kg/m³	PESO ESPECÍFICO Gr/cm³	VOLUMEN ABSOLUTO L/m³
Cemento	345.6	314	110
Agua	160	1	160
Contenido de aire	0	0	0
Agregado grueso	1050	2.51	418
Agregado fino	760	2.44	312
TOTALES	2315.6		1000

Nota. Peso seco y volumen absoluto de los componentes por metro cubico de concreto ajustado para un concreto hidráulico de 3000 PSI

- Lineamientos: Con base en los lineamientos establecidos en la norma colombiana NTC 174 se diseñan y preparan las mezclas para construir los cilindros de pruebas a los esfuerzos de compresión. Los resultados de las mezclas por cada tanda o lechada se muestran en las siguientes tablas, en donde la tabla 3 corresponde al diseño de la mezcla control, la tabla 4 al diseño de la mezcla con fibra de coco, la tabla 5 al diseño de mezcla con fibra de fique y la tabla 6 al diseño de mezcla con fibra de guadua.

Tabla 3

Tabla diseño de mezcla sin adición de fibra.

CANTIDAD DE MATERIALES Y COMPONENTES PARA CONCRETO HIDRÁULICO DE 3000 PSI			
RELACIÓN AGUA CEMENTO (A/C): 0.463			
MATERIAL	**PESO (Kg) EQUIVALENTE PARA UN (1) m³**	**PESO (Kg) EQUIVALENTE POR MEZCLADO**	**PORCENTAJE POR MEZCLADO**

CANTIDAD DE MATERIALES Y COMPONENTES PARA CONCRETO HIDRÁULICO DE 3000 PSI			
Cemento	345.60	18.13	14.92%
Agua	160.00	8.40	6.91%
Agregado grueso	1050.00	55.09	45.34%
Agregado fino	760.00	39.88	32.82%
TOTAL	**2315.60**	**121.50**	**100.00%**
Volumen por cilindro		0.0053m³	
volumen total de los 9 cilindro	**0.0525 m³**		**Se considera un 10% por desperdicio en el proceso**

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 4

Tabla diseño de mezcla con adición de fibra de coco.

CANTIDAD DE MATERIALES Y COMPONENTES PARA CONCRETO HIDRÁULICO DE 3000 PSI			
RELACIÓN AGUA CEMENTO (A/C): 0.463			
MATERIAL	**PESO (Kg) EQUIVALENTE PARA UN (1) m³**	**PESO (Kg) EQUIVALENTE POR MEZCLADO**	**PORCENTAJE POR MEZCLADO**
Cemento	345.60	18.13	14.92%
Agua	160.00	8.40	6.91%
Agregado grueso	1048.50	55.01	45.28%
Agregado fino	758.50	39.80	32.76%
Fibra de coco	**3.00**	**0.16**	**0.13%**
TOTAL	**2315.60**	**121.50**	**100.00%**
volumen por cilindro	0.0053m³		
volumen total de los 9 cilindro	**0.0525 m³**		**Se considera un 10% por desperdicio en el proceso**

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 5

Tabla diseño de mezcla con adición de fibra de fique.

CANTIDAD DE MATERIALES Y COMPONENTES PARA CONCRETO HIDRÁULICO DE 3000 PSI
RELACIÓN AGUA CEMENTO (A/C): 0.463

CANTIDAD DE MATERIALES Y COMPONENTES PARA CONCRETO HIDRÁULICO DE 3000 PSI			
MATERIAL	**PESO (Kg) EQUIVALENTE PARA UN (1) m³**	**PESO (Kg) EQUIVALENTE POR MEZCLADO**	**PORCENTAJE POR MEZCLADO**
Cemento	345.60	18.13	14.92%
Agua	160.00	8.40	6.91%
Agregado grueso	1048.50	55.01	45.28%
Agregado fino	758.50	39.80	32.76%
Fibra de fique	**3.00**	**0.16**	**0.13%**
TOTAL	**2315.60**	**121.50**	**100.00%**
volumen por cilindro	0.0053m³		
volumen total de los 9 cilindro	**0.0525 m³**		**Se considera un 10% por desperdicio en el proceso**

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 6

Tabla diseño de mezcla con adición de fibra de guadua.

CANTIDAD DE MATERIALES Y COMPONENTES PARA CONCRETO HIDRÁULICO DE 3000 PSI			
RELACIÓN AGUA CEMENTO (A/C): 0.463			
MATERIAL	**PESO (Kg) EQUIVALENTE PARA UN (1) m³**	**PESO (Kg) EQUIVALENTE POR MEZCLADO**	**PORCENTAJE POR MEZCLADO**
Cemento	345.60	18.13	14.92%
Agua	160.00	8.40	6.91%
Agregado grueso	1048.50	55.01	45.28%
Agregado fino	758.50	39.80	32.76%
Fibra de guadua	**3.00**	**0.16**	**0.13%**
TOTAL	**2315.60**	**121.50**	**100.00%**
volumen por cilindro	0.0053m³		
volumen total de los 9 cilindro	**0.0525 m³**		**Se considera un 10% por desperdicio en el proceso**

Nota. Fuente: Elaboración propia

Los cilindros fueron almacenados por un periodo de 24 horas. Pasadas 24 horas de almacenamiento se procedió a desencofrar y los cilindros fueron llevados para realizar el proceso de curado y finalmente ser fallados en intervalos de tiempo de 7, 14 y 28 días.

a) Instrucciones de administración para la máquina universal: Según establece la NTC 673, la máquina de ensayos debe ser operada por medio de electricidad y debe aplicar la carga de forma continua, no intermitente y sin impacto, debe poseer un dispositivo de calibración elástico.

El espécimen debe ser ubicado de acuerdo con los parámetros definidos en la NTC – 673 (numeral 7.4), ubicando el bloque de apoyo plano (inferior), con su cara endurecida hacia arriba, sobre la mesa de platina de la máquina de ensayo directamente debajo del bloque de apoyo de asiento esférico (superior). Se deben limpiar las caras de apoyo de los bloques de apoyo superior e inferior, así como del espécimen, para luego colocarlo en el bloque de apoyo inferior alineando cuidadosamente los ejes del espécimen con el centro de empuje del bloque de asiento esférico (ICONTEC, 2010). Es importante verificar y ajustar el indicador de carga cero antes comenzar el ensayo. Luego se debe aplicar la carga de forma progresiva (velocidad de carga definida) hasta que los cilindros de concreto produzcan un patrón de fractura definido.

b) Tiempo de respuesta: Este tipo de máquinas se encuentran calibradas y equipadas con un sensor conectado a un dispositivo digital que permite obtener una variable de respuesta casi inmediata de la carga a la que se somete el espécimen, por lo cual se obtienen valores en tiempo real de la cantidad de carga desde el inicio del ensayo hasta el punto de fractura, permitiendo obtener curvas de esfuerzo-deformación.

La velocidad de carga con la cual se realizó el ensayo se encuentra definida en el numeral 7.5.1 de la NTC – 673, que especifica que la carga debe ser aplicada de acuerdo con la siguiente

velocidad de carga 0.25MPa/s ± 0.05 MPa/s [35 psi/s ± 7 psi/s], procurando que dicha velocidad sea mantenida durante el ensayo. (ICONTEC, 2010).

c) Unidades – escala: Las unidades definidas para los ensayos se describen a continuación en la tabla 7:

Tabla 7

Unidades utilizadas en el ensayo

Tipo de medida	*Unidad*		*Símbolo*	
	Sistema Internacional	*Sistema inglés*	*Sistema Internacional*	*Sistema inglés*
Longitud	Metro	Pulgadas	[m]	[in]
Área	Metro cuadrado	Pulgada cuadrada	[m^2]	[in^2]
Masa	Kilogramo	Libra (masa)	[Lb]	[Lb]
Tiempo	Segundo	Segundo	[s]	[s]
Fuerza	Newton	Libra-fuerza	[N] = [$kg \cdot m/s^2$]	[Lbf]
Esfuerzo	Pascal	Libra por pulgada cuadrada	[Pa] = [kN/m^2]	[Psi]

Nota. Fuente: Elaboración propia

La división de escala de la máquina universal es de 0.1kN, con un rango de medición de 1000 kN.

d) Validación y confiabilidad: La máquina de ensayos empleada para la investigación se encuentra calibrada según los parámetros establecidos en la NTC 673 (numeral 5.1.3.1), en dónde el porcentaje de error de las cargas, dentro del rango de uso propuesto para la máquina de ensayo, no excede ± 1.0 % de la carga indicada. La precisión de la máquina también se encuentra ajustada conforme la norma técnica lo exige (numeral 5.1.3.2), en dónde se verificó dicha precisión aplicando cinco ensayos de carga en cuatro incrementos aproximadamente iguales en

orden ascendente, y se verificó que la diferencia entre cualquiera de los dos ensayos sucesivos no excediera un tercio de la diferencia entre los ensayos de carga mínima y máxima.

El error se calculó de acuerdo con el numeral 5.1.3.3 que se muestra en la siguiente ecuación:

$$E = A - B$$

$$E_P = \frac{100(A - B)}{B}$$

Ecuación [3]

En donde:

A = Carga en Lbf [kN] indicada por la máquina

B = Carga aplicada, Lbf [kN] determinada por el dispositivo de calibración

e) Distribución de la mezcla: Las mezclas para los cilindros se distribuyen de la siguiente manera: 3 cilindros sin fibras, 3 cilindros con fibras de coco, 3 cilindros con fibras de fique y 3 cilindros con fibras de guadua. Cada uno de los cilindros fue sometido al ensayo de resistencia a la compresión según la norma colombiana NTC 673, con edades temporales de 7, 14 y 28 días. Cada mezclada se repite por tres veces, resultando un total de 36 probetas y sus respectivos ensayos.

Aplicación de ensayo, metodología:

- Ubicación de los cilindros de concreto en la máquina universal
- Verificación de ceros y asentamiento de bloque
- Velocidad de carga según NTC – 673
- Aplicación de la carga de compresión

- Revisión de fracturas en el cilindro

2.6.2.2 *Análisis SEM – EDX*

Objetivo del instrumento: Realizar un escaneo superficial de las muestras de tres tipos diferentes de fibra vegetal, otorgando información valiosa en forma de imágenes que representan la morfología y la microestructura a escalas micrométricas.

a) Instrucciones de administración: Para visualizar las muestras en el SEM, se debe contar con un operario experto en el manejo del microscopio electrónico, por esta razón en la universidad Javeriana se cuenta con un profesional encargado de manipular el SEM y realizar la visualización de las muestras. La preparación adecuada para la visualización de muestras biológicas se realizó de acuerdo con el protocolo seleccionado para el análisis. Además de esto, se realizó un secado de punto crítico y cobertura metálica con oro para darle conductividad de la muestra y mejorar la calidad de las imágenes.

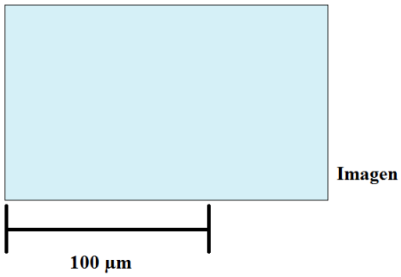
b) Unidades y escala: Las unidades utilizadas en el SEM corresponden a micrómetros que poseen la equivalencia que se describe a continuación:

$$1\,\mu m = \ 1 \times 10^{-6}\,m$$

Dado que las imágenes del SEM tienen un rango de aumento de 10x a 500.000x (Moutinho, 2023), se hace necesario el uso de escalas especiales que vienen incluidas en las imágenes del SEM. Estas escalas permiten mostrar la equivalencia de la longitud que se está midiendo en la muestra, respecto a los pixeles representados en la imagen, la figura 8 muestra cómo se representa esta equivalencia:

Figura 8

Esquema del uso de escalas en el SEM.



Nota. Fuente: Elaboración propia

Cómo se muestra en la imagen, la pequeña regla en el costado inferior izquierdo representa 100 µm lo que quiere decir que la longitud de los pixeles que se señalan en ese espacio de la imagen equivale a aproximadamente 100 µm en la superficie real de la muestra, lo que brinda información sobre las dimensiones de la superficie que se está analizando.

2.7 Instrumentos

Los instrumentos aplicados para los fines de esta investigación fueron:

2.7.1. Máquina universal

La máquina de ensayos universal es un tipo especializado de maquinaria utilizada en el estudio de materiales, principalmente por su capacidad para realizar una serie de pruebas que permiten conocer comportamientos y propiedades mecánicas que definen a los materiales, tales como la resistencia a los esfuerzos de tracción, compresión, cortante y flexión, o también para analizar propiedades como la ductilidad, la energía de deformación, la elasticidad, el alargamiento, entre otros. Esta máquina funciona como un tipo de prensa hidráulica que permite comprimir materiales con cargas bastante elevadas que pueden llevar a estos materiales hasta el

punto de falla. En esta investigación la máquina universal fue utilizada para determinar la resistencia a la compresión de los cilindros de concreto.

Parámetros de calidad de la máquina: (Unidades medidas en PSI)

Otros parámetros de calidad respecto a las piezas de la máquina, la lectura de carga y los bloques de apoyo fueron revisados y ajustados según lo establece la NTC – 673. (ICONTEC, 2010)

2.7.2. Microscopio electrónico de barrido MEB/SEM – EDX (Análisis por espectroscopia de energía dispersiva de rayos X)

Como se mencionó anteriormente, cuando se está utilizando el microscopio electrónico para analizar un material, espécimen u organismo determinado, el haz de electrones que impacta sobre el objetivo, hace que sean emitidas distintas señales como respuesta a la interacción de los electrones con la superficie de la muestra. Una de estas señales son los rayos X característicos y ofrecen información importante sobre la composición química de un volumen específico de la superficie de la muestra analizada en el SEM (NanoPhysics, 2023). Los microscopios SEM, pueden ser equipados con un dispositivo llamado espectrómetro de rayos X de dispersión de energía (EDX), que se encarga de contar y clasificar los rayos X según su energía (Thermo Fisher Scientific, 2023), y de esta forma son capaces de generar mapas y espectros que indican la composición química de la muestra analizada. En la figura 9 se puede apreciar un SEM equipado con un detector EDX que se encuentra situado en la parte superior izquierda del microscopio.

Figura 9

SEM, énfasis en el dispositivo de detección de rayos X (EDX).



Nota. Fuente: Elaboración propia

Análisis: Una vez se realizó la debida preparación de las muestras, se llevaron al microscopio electrónico para su análisis. Para ello se colocaron en monedas con discos adhesivo que permitieron mantenerlas estáticas al momento de la observación. Luego se procedió a colocarlas en el porta-muestras para introducirlas en la cámara de vacío del microscopio. Para realizar el análisis el operario experto se encargó de la manipulación del instrumento, mientras se le fue indicando los posibles puntos de interés para la observación.

También se realizaron mapeos de composición química para evaluar las propiedades de la superficie analizada. El procedimiento consta de la selección de sitios de interés para la realización de mapeos utilizando el software y el dispositivo EDX. Aunque este procedimiento permite realizar un análisis puntual en un punto de interés específico, en la presente investigación no se realizó análisis puntual. Razón por la cual, los análisis químicos corresponden a las áreas superficiales que se pueden apreciar en las imágenes de SEM.

2.8 Población

Cómo se mencionó anteriormente la población a estudiar se compone de un conjunto de tres unidades experimentales definidas como cilindros de concreto por cada tratamiento, en este caso los tratamientos se presentan con el cilindro modificado con fibras de fique, otro cilindro modificado con fibras de guadua y el último cilindro modificado con fibras de coco. Para los tres, se buscan identificar y caracterizar algunas propiedades morfológicas de la microestructura de las fibras seleccionadas para la investigación, estas fibras no se tienen en cuenta como parte de la población de estudio sino como un elemento característico que influye en la variable de respuesta. Los treinta y seis cilindros de concreto fueron construidos de acuerdo con las especificaciones establecidas en la metodología ACI – 211 y se consideran la población de estudio.

Las especificaciones que caracterizan a las unidades experimentales se presentan a continuación:

2.8.1 Diseño de la mezcla de concreto hidráulico: Empleando el método de la A.C.I. – 211 para diseñar una mezcla de concreto hidráulico para 3000 PSI (*Pound per square inch*), por sus siglas en inglés que traducen libra por pulgada cuadrada) de resistencia. Las características de los componentes ya fueron descritas anteriormente, sin embargo, ahora se describe las características de la fibra como nuevo aditivo a la mezcla:

2.8.2 Fibras: de origen 100% natural, sin ningún tratamiento químico y recolectadas del municipio de Tauramena que dispone de buenas condiciones climatológicas para la siembra de los tres tipos de planta que son: g*uadua angustifolia, cocos nucifera y furcraea andina.*

Las muestras de concreto fueron definidas según lo establece la NTC – 673 cumpliendo las siguientes características:

- Los diámetros de los cilindros no difieren en más del 2% entre cada cilindro para cada prueba. Para esto se utilizaron moldes especializados que permitieron tener los diámetros justos que no ofrecieron variación significativa.
- Ninguno de los extremos de las nuestras superó la perpendicularidad a los ejes en más del 0.5° (1 mm en 100 mm).
- Diámetro utilizado para calcular la sección transversal
- Área sección transversal: 27.34 [in²] ≈ 0.018 [m²]
- Diámetro: 5.9 [in] ≈ 149.86 [mm]
- Existen diferentes edades de ensayo en las cuales las probetas de concreto pueden ser sometidos a compresión hasta el punto de falla:

De la misma forma, la norma colombiana NTC – 673 exige unos porcentajes de tolerancia admisible para diferentes periodos de falla de los cilindros, con la finalidad de evaluar el aumento en la resistencia a la compresión, estos valores se pueden apreciar en la tabla 8.

Tabla 8

Tiempo trascurrido desde el proceso de curado, hasta el día de falla de las muestras de concreto con tolerancias admisibles

Edad de ensayo	*Tolerancia admisible*
24 h	± 0.5h o 2.1%
3 d	2h o 2.8%
7 d	6h o 3.6%
28 d	20h o 3.0%

Edad de ensayo	*Tolerancia admisible*
90 d	2d o 2.2%

Nota. Adaptado de ICONTEC (2010)

Los ensayos fueron realizados seleccionando edades de 7, 14 y 28 días y respetando los tiempos de tolerancia definidos en la tabla 8 de la página 85. La razón de seleccionar las edades del ensayo, es principalmente debido a la evolución progresiva de la resistencia del concreto, influenciada por el tiempo y la temperatura. De esta forma el concreto es capaz de alcanzar su resistencia óptima a los 28 días (NRMCA, 2016). En la siguiente tabla 9 se muestran las aproximaciones porcentuales del incremento de la resistencia del concreto respecto momento en el cual se realiza la falla a compresión del cilindro:

Tabla 9

Edad de falla de las muestras de concreto con tolerancias admisibles

Momento de falla	*Porcentaje de esfuerzo*
1día	16%
3 días	40%
7 días	65%
14 días	90%
28 días	99%

Nota. Adaptado de INGEGEEK (2020)

Para cada ensayo característico, se realizaron un total de tres cilindros como un número de repeticiones estadísticamente representativo para cada uno de los días de falla. El resultado obtenido por cada tres cilindros fallados en un día fue promediado, dicho promedio debe ser

igual o superar la resistencia a la compresión, que se especifica como $f'c$. La siguiente relación explica a mayor detalle el número total de cilindros de concreto:

Teniendo en cuenta las indicaciones técnicas definidas por la NTC – 673, se definió una cantidad de cilindros para cada una de las condiciones de muestra, con la finalidad de realizar una comparación de cada uno de los resultados obtenidos para cada uno de los diseños de mezcla. La cantidad de cilindros y la edad del cilindro al momento de falla a compresión se muestra en la tabla 10.

Tabla 10

Cantidad de cilindros fallados

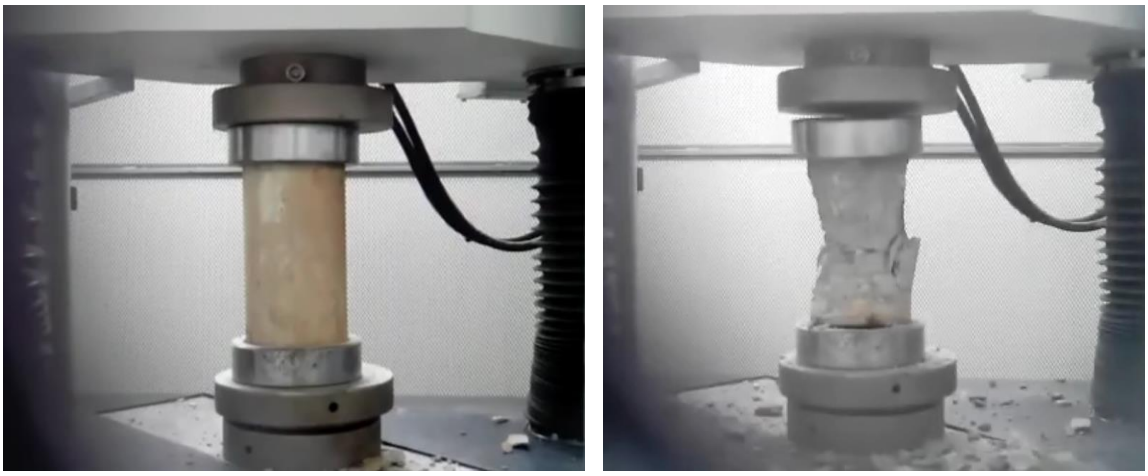
Ensayo	*Tipo de cilindro*	*Edad de ensayo*	*Cantidad de cilindros*
1	Control	7	3
		14	3
		28	3
2	Con fibras de coco	7	3
		14	3
		28	3
3	Con fibras de fique	7	3
		14	3
		28	3
4	Con fibras de guadua	7	3
		14	3
		28	3
Total de cilindros fallados			36

Nota. Fuente: Elaboración propia

En la figura 10 se pueden apreciar algunos de los cilindros fallados en el proceso de la investigación, estos cilindros de concreto se encuentran contenidos en sus respectivos encofrados y marcados de forma adecuada

Figura 10

Cilindros fallados en la investigación

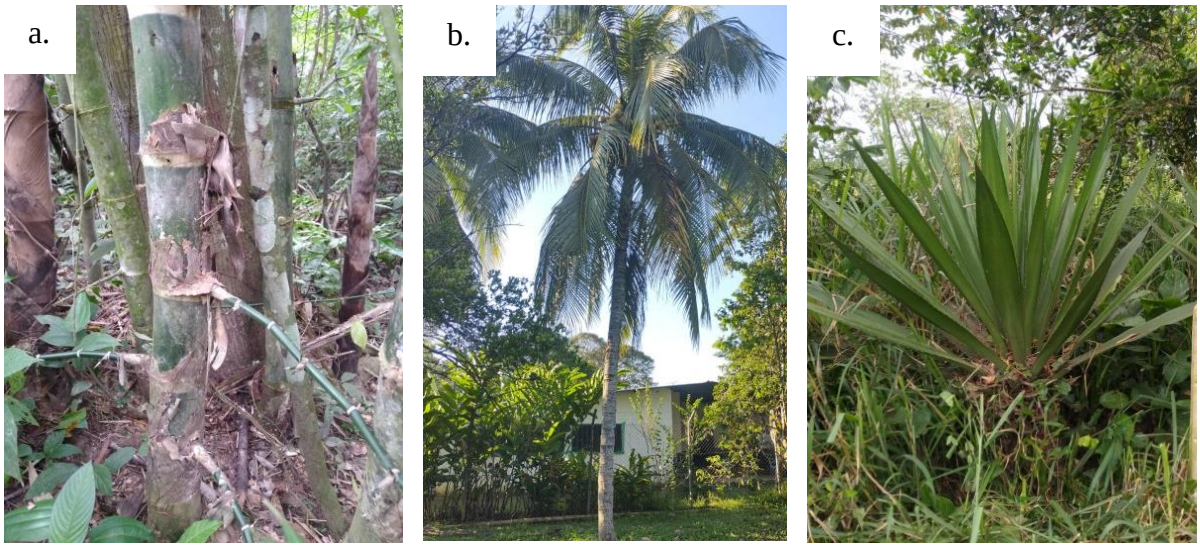


Nota. Fuente: Elaboración propia

Para el análisis SEM y SEM-EDX se estudiaron tres diferentes muestras de fibra vegetal recolectados en Tauramena Casanare, cada espécimen corresponde a las tres diferentes especies de plantas seleccionadas para la investigación. En la figura 12, se pueden apreciar los diferente de recolección de muestras, así como las plantas utilizadas para la extracción de cada una de las muestras de fibra. En el lado izquierdo de la figura 11, señalado con la letra “a”, se encuentran plantas de guadua, la letra “b” muestra una palma de coco plantada de forma aislada, y en la

Figura 11

Especies vegetales utilizadas en el muestreo.



Nota. a. Guadua angustifolia, b. Cocos nucifera, c. Furcraea andina.

Con el fin de ampliar la información de procedencia de cada una de las especies que se utilizaron para la extracción de fibra y el posterior uso en las mezclas de concreto, se generó una tabla con la clasificación taxonómica de cada una de las tres especies. La tabla 11 presenta de forma organizada esta información y contribuye a establecer relaciones entre las diferentes especies de plantas y como esta relación podría influir en el desempeño y la calidad de la fibra, o en características morfológicas que atribuyen un mejor desempeño mecánico.

Tabla 11

Taxonomía para cada una de las especies que aportaron fibra para la mezcla de concreto

Clasificación taxonomica	*Guadua angustifolia*	*Cocos nucifera*	*Furcraea andina*
Dominio	Eukarya	Eukarya	Eukarya
Reino	Plantae	Plantae	Plantae
Filo - División	Magnoliophyta	Tracheophyta	Tracheophyta
Subfilo	Angiospermae	Angiospermae	Angiospermae
Clase	Liliopsida	Liliopsida	Liliopsida
Orden	Poales	Arecales	Asparagales
Familia	Poaceae	Arecaceae	Asparagaceae
Subfamilia	Bambusoideae	Arecoideae	Agavoideae
Supertribu	Bambusodae	-	-
Tribu	Bambuseae	Cocoseae	-
Subtribu	Guaduinae	-	-
Género	*Guadua*	Cocos	Furcraea
Especie	*G. Angustofila* Kunth 1822	*C. Nucifera*	*F. Andina*

Nota. Fuente: Elaboración propia

2.8.3 Caracterización y preparación de las muestras analizadas en el análisis SEM

– EDX: Las muestras para analizar son trozos pequeños de materia orgánica, provenientes de las plantas: *Guadua angustifolia, Cocos nucifera* y *Furcraea andina.* Debido a que las muestras a analizar son material biológico extraído de las plantas y por ende propenso a la rápida degradación ambiental y muerte tisular, es necesario adaptar un protocolo especial para la preparación de las muestras y su visualización en el SEM, evitando la degradación de su integridad estructural, la descomposición y garantizando la conservación de los tejidos, cavidades y superficies necesarias para el análisis. Para conseguir esto se deben seguir los siguientes pasos:

a) Seccionado de las muestras: Seccionar la muestra utilizando un bisturí, procurando evitar la alteración de la integridad estructural del tejido, procurando que las muestras cortadas se encuentren en un estado aproximado a un análisis *in-situ*, manteniéndolos vivos y en buen estado en el momento de realizar el corte y la posterior fijación. En un ambiente controlado (utilizando guantes de laboratorio) cortar y extraer un trozo de fibra de aproximadamente 0.125 cm^3 – 1 cm^3 y depositar en frascos de Eppendorf.

b) Fijación: Para conservar e inmovilizar la estructura y composición química de los tejidos orgánicos al momento de la muerte (Romero, 2003)se debe realizar un proceso de fijación utilizando un reactivo. En este caso se empleó el glutaraldehído ($C_5H_8O_2$) y un amortiguador o buffer fosfato:

- Método de fijación: inmersión
- Agente fijador: Glutaraldehído a 3%
- Amortiguador: Fosfato a 0.025 Molar
- pH: 6.8 – 7.0
- Temperatura: ambiente
- Tiempo: 8 días

(Glauert, 1975)

c) Deshidratación: Luego de la fijación se hace necesario realizar un proceso de deshidratación.

- 50% de etanol o acetona en agua a 10 min.
- 70% de etanol o acetona en agua a 10 min

- 95% de etanol o acetona en agua a 10 min
- 100% de etanol o acetona a 15 min
- 100% de etanol o acetona a 15 min

(Glauert, 1975)

d) Secado de punto crítico: El secado de punto crítico consiste en desplazar el etanol con dióxido de carbono (CO_2) en estado líquido. En condiciones determinadas, el CO_2 puede sufrir una transición de fase líquido-gas sin cruzar un límite de fase. "Como resultado, el secado no va acompañado del estrés capilar que se ejerce sobre las paredes de los poros, que es responsable del daño por secado en el procedimiento convencional" (Suleimenova, et al., 2014). Para realizar este procedimiento se utiliza un secador de punto crítico Automatizado Leica EM CPD300.

e) Para mejorar la calidad de las imágenes en el SEM, se realizó una cobertura o *sputtering* con oro, permitiendo la conductividad de la muestra y mejorando la calidad de las imágenes. El dispositivo empleado fue un Recubridor Por Pulverización Catódica De Iones Automático Compacto DC De Materials Science – LITH-SD800.

2.9 Contexto y georreferenciación del proyecto

Para realizar la presente investigación se seleccionó al municipio de Tauramena, ubicado en el departamento de Casanare – Colombia, como sitio de muestreo; enfocando la investigación a dar una utilidad a los residuos orgánicos de origen vegetal que se generan en este municipio.

Sin embargo, todas las investigaciones y análisis se desarrollaron en la ciudad de Bogotá, en los laboratorios de la universidad Católica de Colombia y la Pontificia Universidad Javeriana.

El municipio de Tauramena tiene una extensión de 2607.2 km², con una extensión urbana de 2.44 km² y una extensión rural de 2604.75 km², cuenta con una altitud de 460 msnm y la temperatura media reportada es de 25.3°C, con valores máximos de entre 33.6°C y 39.8°C y mínimos de entre 12°C y 19°C, en 2020 se determinó que la población era de 25173 personas para ese año (Alcaldía de Tauramena, 2023).

Según los reportes del IDEAM, la población de Tauramena se caracteriza por un clima de tipo cálido húmedo, con una humedad relativa promedio anual de aproximadamente 76%, una precipitación total anual promedio de 2500 a 3000 mm y una mayor incidencia de lluvias en los meses de abril a julio. (IDEAM, 2011). Los datos de brillo solar en el municipio de Tauramena, reportados en el año 2012, indicaron que el municipio registró un brillo solar de 1861 horas al año (CMGRD - Tauramena, 2012).

Este tipo de clima es óptimo para los tres tipos de plantas seleccionados en la investigación, como se muestra en la tabla 12, donde se presentan las condiciones óptimas para el crecimiento de guadua angustifolia, cocos nucifera y furcraea andina:

Tabla 12

Condiciones ambientales para el desarrollo óptimo de guadua angustifolia, cocos nucifera y furcraea andina

Condiciones	Guadua angustifolia	Cocos nucifera	Furcraea andina
Temperatura promedio (°C)	20 – 26	27	18 – 24
Precipitación (mm/año)	2000 – 2500	1200 – 2000	1300 (±) 300

Condiciones	Guadua angustifolia	Cocos nucifera	Furcraea andina
Altitud (msnm)	900 – 1600	0 – 400	1200 – 2000
Brillo solar (horas/luz/año)	1800 – 2000	2000	1825 – 2190
Humedad relativa (%)	75 – 85	>60	50 – 70
Vientos	Débiles – Moderados	Débiles – Moderados	
Suelos	Franco arenoso, Franco, Arenoso franco, Fértil, Negro, Suelto, Aluvial, Ceniza volcánica, Rico en materia orgánica, Suministrado por fuentes de agua naturales y buen drenaje, húmedo, pero no inundado	Suelos con texturas livianas (de francos a arenosos), aluviales, profundos (más de un metro), con una capa freática superficial de uno a dos metros de profundidad. (Puede crecer en suelos arcillosos y limosos, adaptada a suelos salinos y arenosos)	Suelos de buen drenaje, de textura areno arcillosos, tolera pH entre 5.6 – 7. (Capacidad de crecer en suelos áridos)

Nota. Adaptado de los textos presentados por Schröder, (2023), SEMARNAT (2006) y Minambiente (2019).

Como se puede observar de las condiciones óptimas para cada especie y teniendo en cuenta la capacidad de adaptación que presentan estas plantas tropicales, Tauramena puede brindar un ambiente de desarrollo adecuado para el crecimiento de este tipo de cultivos. Razón por la cual se da la existencia de plantaciones en la región de Tauramena.

La economía del municipio se caracteriza principalmente por la producción de hidrocarburos que según menciona la Alcaldía de Tauramena ha conseguido desplazar a la economía agropecuaria a partir de la década de los 90, trayendo beneficios económicos y sociales para la población, según menciona la alcaldía municipal (Alcaldía de Tauramena, 2023). Sin embargo, la población de Tauramena ha expresado inconformidad sobre las acciones de explotación petrolera en el municipio, principalmente por las implicaciones ambientales de la extracción de recursos naturales como el gas o el petróleo (Semana, 2018) razón por la cual el municipio ha analizado una ruta de “despetrolización” de la economía por medio del incentivo a

las actividades agropecuarias como la ganadería, la agricultura y la piscicultura, los datos de estas actividades en el municipio se presentan de forma organizada en la tabla 13:

Tabla 13

Actividades económicas de Tauramena, centradas en la economía agropecuaria

Ganadería	Agricultura	Piscicultura
El departamento de Casanare cuenta con un total de 2.283.987 bovinos (7.7% del total nacional), de los cuales Tauramena representa un 6.3% del total de la población de bovinos a nivel departamental, con un total de 143.946 bovinos, y un total de 1.139 fincas con bovinos. Según lo informado en el último censo bovino del 2023 realizado por el ICA.	Dentro de los cultivos que se pueden encontrar en el municipio de Tauramena se destacan el plátano, el maíz y la yuca, generalmente de autoconsumo. Sin embargo, según menciona la alcaldía de Tauramena, se están analizando otros cultivos como son la palma africana, el maíz, la caña y los frutales.	Para la piscicultura que caracteriza a Tauramena, se encuentran los cultivos de Cachama que representan un 70%, la mojarra de un 25% y otros peces un 5%.

Nota. Adaptado de los textos presentados por ICA (2023), Alcaldía de Tauramena (2023)

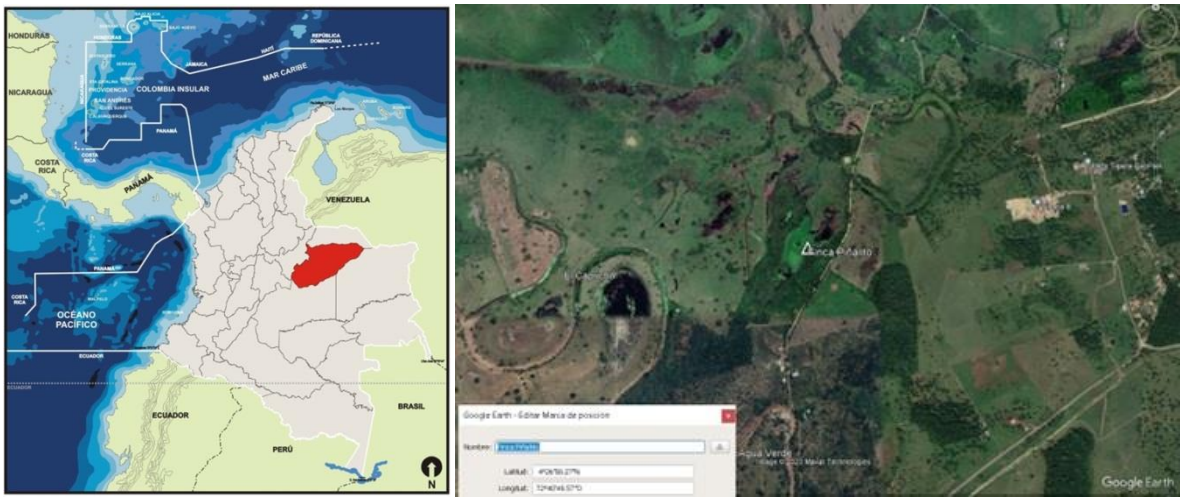
Dentro de la biodiversidad característica de Tauramena, una investigación reciente de la flora y fauna del departamento de Casanare lo han destacado como el municipio con la mayor diversidad de flora identificada en todo el departamento, al poseer la mayor cantidad de especies de flora, con aproximadamente 721 especies diferentes (Usma & Trujillo, 2011). Otras investigaciones muestran que este municipio cuenta con 614 especies de fauna y flora registradas, con 29 especies de reptiles, 269 especies de aves, 54 especies de peces, 38 especies de escarabajos coprófagos, 160 especies de mariposas, 41 especies de mamíferos, 23 especies de anfibios, 189 especies de flora terrestre, 95 especies de vegetación asociada a ecosistemas acuáticos y 189 especies de flora acuática (Trejos, 2019).

Cómo se puede apreciar de los aspectos que caracterizan a Tauramena, su capacidad y necesidad para albergar investigaciones en torno al desarrollo sostenible y la preservación de los ecosistemas es bastante notoria, razón por la cual se evalúo como potencial lugar de muestreo para la recolección de las fibras de *guadua angustifolia, cocos nucifera y furcraea andina.* Para las cuales se realizó una respectiva caracterización mediante técnicas de microscopía con la finalidad de evaluar como la microestructura puede influir en la distribución de la matriz cementante en torno a la fibra aplicada. Luego se distribuyeron las fibras en una mezcla de concreto y se falló para verificar propiedades mecánicas del concreto con fibras vegetales.

La recolección de las muestras se realizó en una finca ubicada en Tauramena Meta, la ubicación se puede apreciar con mayor detalle en la figura 12.

Figura 12

Ubicación de la finca en Tauramena – Izquierda: Geografía referencial, derecha: Ubicación del área de estudio



Nota. Izquierda: (Geografía referencial): Mapa digital integrado. IGAC, 2022. Adaptado de: *Sociedad Geográfica de Colombia. Atlas de Colombia*. Derecha: (Ubicación del área de estudio) Fuente: Imagen recuperada de Google Earth. 2023

Las plantaciones se encuentran en cercanías de la unidad de vivienda, en esta finca las plantas no se encuentran cultivadas de forma masiva, sin embargo, se pueden encontrar varios especímenes en los alrededores; como se puede observar en las figuras 8, 9, 10 y en la tabla 6.

Para recolectar las muestras se seleccionó material vegetal con características fibrosas encontrado cerca de los cultivos de cada una de las plantas de fique, guadua y coco. Se recolectó el material suficiente para llevar al laboratorio, la recolección se realizó por inspección visual y no se pesó una cantidad específica antes de llevar al laboratorio, por lo cual se procuró llevar una cantidad mayor a la requerida para la realización de los cilindros de concreto. Sin embargo, para realizar la extracción de las muestras para análisis en el SEM, se tuvieron recomendaciones especiales (como el uso de guantes de nitrilo), con la finalidad de evitar contaminar las muestras.

2.10 Procesamiento de datos

Para esta investigación, se definió la prueba de "Bondad de Ajuste" de *Kolmogrov Smirnov*, que según menciona el manual del software InfoStat (2008, pág. 68), este tipo de prueba determina si la muestra se ajusta a un modelo de distribución, dado que la muestra aleatoria puede seguir diferentes tipos de distribución, la prueba de bondad de ajuste permite conocer si dicha muestra se ajusta o no a una distribución normal. La hipótesis planteada en este modelo sigue la siguiente forma:

$H_0: G(x) = F_{teórica}(x)\ vs.\ H_1: G(x) \neq F_{teórica}(x)$, para al menos una x

Ecuación [4]

En donde:

- G(x): Función de distribución empírica
- $F_{teórica}$: Función de distribución teórica

La prueba permite evaluar una diferencia máxima entre las dos distribuciones dadas por cada función y comprende la distancia vertical máxima entre las dos funciones. El estadístico "D" está dado por:

$$D = \sup_{x} \{|F_{teórica}(x) - G(x)|\}$$

Ecuación [5]

2.10.1 Factorial anidada

El Diseño seleccionado para realizar el análisis estadístico se conoce con el nombre de diseño con estructura anidada en tratamientos, o diseño factorial anidado. Según lo mencionan Balzarini *et al.* (2008, pág. 96), este tipo de diseño es conducido cuando los experimentos cuentan con más de un factor de tratamiento, pero en los cuales los niveles de un factor no representan lo mismo bajo los niveles del otro factor. Para este caso, el factor días, que presenta una resistencia a la compresión característica típica de las estructuras de concreto, se encuentra anidado en el factor de tipo de fibra agregada. Dicho modelo se puede expresar mediante la siguiente expresión matemática:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_{i(j)} + \varepsilon_{ijk}$$

Ecuación [6]

Los individuos a evaluar son 3 cilindros sin fibras, 3 cilindros con fibras de coco, 3 cilindros con fibras de fique y 3 cilindros con fibra de guadua.

2.10.2 Análisis estadístico (ANAVA – Análisis de la varianza)

El análisis estadístico aplicado en el presente estudio es la técnica de análisis de la varianza también denominada ANAVA o ANOVA por sus siglas en inglés (*Analysis of Variance*). El manual de usuario de Infostat, también ofrece información sobre este tipo de análisis estadístico, allí se define a la ANAVA como un análisis estadístico capaz de probar hipótesis referidas a los parámetros de posición (esperanza) de dos o más distribuciones Balzarini *et al.* (2008, pág. 82). Para definir la hipótesis utilizada en la ANAVA, se realiza un análisis comparativo respecto a las medias obtenidas por cada uno de los tratamientos y se puede escribir de la siguiente forma:

Hipótesis nula

$$H_0: \mu_1 = \mu_a = \cdots = \mu_a \qquad con\ i = 1, \ldots, a$$

Ecuación [7]

Hipótesis alternativa

$$H_1: Al\ menos\ una\ de\ las\ medias\ es\ diferente$$

En dónde

- μ: medias obtenidas por cada uno de los tratamientos
- a: número de poblaciones o tratamientos

Para el presente experimento se buscó comparar la resistencia a la compresión presentada por los tratamientos aplicados a las unidades experimentales. Los tratamientos aplicados fueron el uso de diferentes fibras en las mezclas de concreto incluyendo una población control sin tratamiento aplicado. Las unidades experimentales fueron los cilindros de concreto sometidos al ensayo de compresión.

2.10.3 Intervalo de confianza – LSD de Fisher

La prueba de LSD Fisher que por sus siglas en inglés "*Least significant difference"* que traducen "diferencia menos significativa" es una prueba que permite realizar comparaciones múltiples calculando el valor crítico correspondiente a la prueba T para dos muestras independientes en cada par de promedios muestrales (Balzarini et al, 2008). La ecuación que permite determinar los procesos estadísticos implicados en la prueba LSD es:

$$LSD = t_{\frac{\alpha}{2},N-k}\sqrt{\frac{2CM_E}{n}}$$

Ecuación [8]

En donde:

$t_{\frac{\alpha}{2},N-k}$: Se lee en las tablas de distribución de *T- student* con N-k

CM_E: Es el cuadrado medio del error y se obtiene de la tabla de ANAVA

n_i, n_j: Son el número de observaciones para los tratamientos i y j respectivamente

N-k: corresponde a los grados de libertad del diseño experimental

Todos los cálculos estadísticos fueron realizados haciendo uso del software Infostat, cita: (Infostat, 2020)

3. Resultados

Respondiendo con cada uno de los objetivos, en este capítulo se presentan los resultados obtenidos en los ensayos realizados en la investigación, teniendo en cuenta la morfología de las muestras, la composición química y la resistencia a la compresión del concreto, junto con los resultados derivados de la aplicación de técnicas estadísticas en el procesamiento de la información.

3.1 Propiedades y comportamiento mecánico fibras de coco, fique y guadua, por medio de los ensayos en laboratorio.

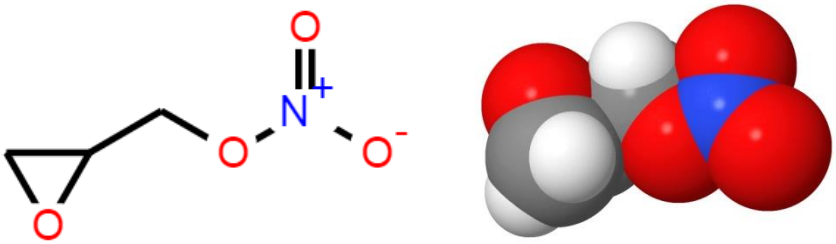
3.1.1 Resultados SEM – EDX (Mapeo químico)

Las células vegetales se componen de una variedad de compuestos químicos importantes, dentro de los cuales, para la presente investigación, se resaltan principalmente aquellos que componen las redes estructurales de las plantas, especialmente aquellos que hacen parte de la pared celular. Estas conformaciones proteicas son de gran importancia en la actualidad y han despertado un gran interés en los estudios relativos a la ingeniería de materiales, como se ha podido evidenciar en las investigaciones relativas a la industria textil (Steins, 1957). En la naturaleza se pueden encontrar diversas conformaciones moleculares de interés, como por ejemplo los polisacáridos estructurales presentes en la celulosa de las plantas, la quitina de los animales y hongos, o el peptidoglicano de las bacterias; cada uno de estos compuestos químicos se compone de subunidades, como la que se puede apreciar en la figura 13, y permite evidenciar como la organización de la bioquímica estructural contribuye a generar una mayor estabilidad en las estructuras fibrosas. Otros ejemplos se pueden encontrar en proteínas de tipo hélice α o lámina β que cumplen papeles fundamentales en las estructuras fibrosas, tales como la queratina,

encontrada en el cabello, los cuernos o las pezuñas, o las proteínas laminares encontradas en la seda de las arañas (Mader & Windelspecht, 2019). Conocer la forma en la que se organizan estos compuestos puede brindar información sobre su posible interacción en otros tipos de estructuras, como por ejemplo la del concreto.

Figura 13

Subunidad de Peptidoglicano presente en la pared celular bacteriana. A la izquierda la estructura de la molécula en 2D y a la derecha el modelo tridimensional de esferas.

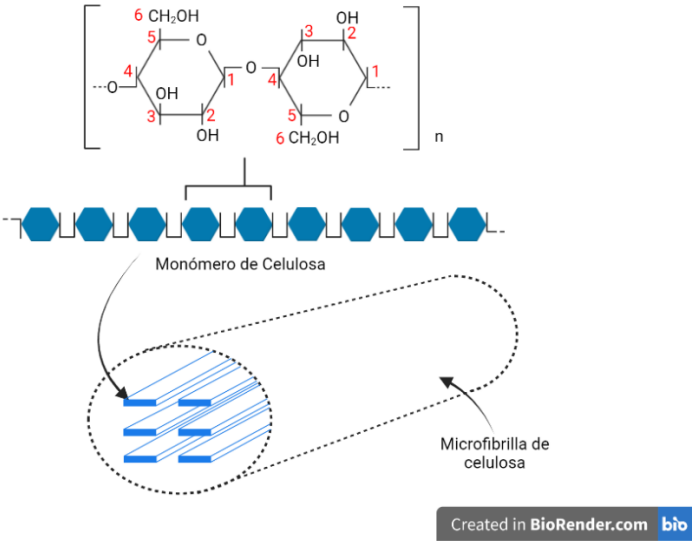


Nota. Pubchem, elaborado empleando la herramienta online de software libre "Editor Molecular JSME", que se puede utilizar de forma gratuita bajo los términos de la Licencia BS (Bienfait & Ertl, 2013)

En las plantas, estos monómeros que conforman la matriz estructural se denominan monómeros de celulosa y se encuentran unidos a partir de fuertes enlaces glucosídicos que permiten crear microfibras que se agrupan, entrelazan y cruzan de forma que se genera una estructura más estable, como por ejemplo las microfibras de celulosa, como se puede observar en la figura 14. La forma en la que se organizan estas estructuras químicas ayuda a entender cómo podrían estar actuando las fibras al ser sometidas a diversos esfuerzos, y cómo podrían contribuir a la estabilidad en una matriz cementante como la del concreto, ya sea por fuerzas de adhesión, tracción, redistribución de esfuerzos o anclaje.

Figura 14

Conformación estructural de la celulosa. Diferentes escalas de la estructura de celulosa en las microfibras que componen entidades estructurales en las células de las plantas (Adaptado de Alberts, 2015)



Nota. Fuente: Elaboración propia, Creado en Biorender.com

En las células vegetales, muchos de los compuestos encargados de brindar la estabilidad estructural se encuentran presentes en la pared celular la cual representa un complejo orgánulo compuesto de diferentes polisacáridos, proteínas y sustancias aromáticas, según se mencionó en el libro de Buchanan, Gruissem y Jones. Los autores también mencionan como algunas de estas moléculas estructurales pueden actuar como “fibras mientras que otras actúan como una matriz reticular análoga a la fibra de vidrio y la matriz plástica en la fibra de vidrio” (2015, pág. 45). Estas estructuras se componen principalmente de polímeros que carecen de nitrógeno de los cuales se destacan principalmente la lignina y la celulosa, y aunque la estructura específica que

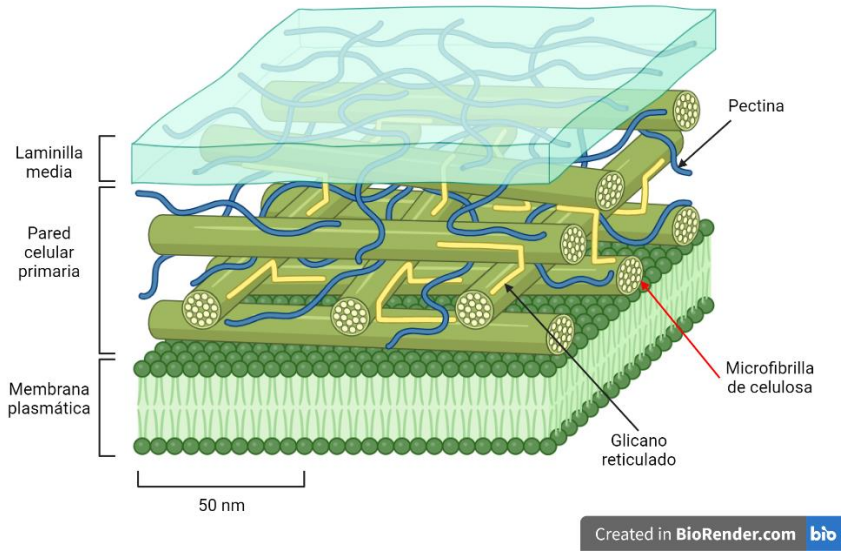
compone la pared celular puede variar dependiendo del tipo de planta que se estudie, plantas tales como las plantas de orden superior tienen fibras características de tracción compuestas de polisacárido de celulosa (Alberts, 2015).

Estas interacciones moleculares poseen ventajas al trabajar de forma eficiente a favor de la distribución del área superficial, además de interactuar con compuestos variados, como la pectina y la lignina. Además de esto, estas estructuras desempeñan un papel importante en el transporte de fluidos en el interior de la planta.

Investigaciones como las de Keller (1992), han permitido determinar algunas de las proteínas que componen la matriz estructural que hace parte de la pared celular en las células vegetales. El autor menciona la presencia de extensinas, PRPs y GRPs, de las cuales algunas de ellas como las extensinas son tan diversas que en la actualidad se desconocen varias de sus funciones en las células vegetales, pero que contribuyen a la conformación estructural y se ha teorizado su desempeño en funciones de regulación dinámica en la pared celular (Moussu & Ingram, 2023). Gracias a esta gran variedad de proteínas y a las interacciones entre componentes moleculares como la red de glicanos reticulados, estas estructuras generan complejos intrincados que pueden transmitir esfuerzos de forma eficiente, ya sea en tensión o compresión. Estas microestructuras y las redes que las componen se pueden apreciar en la figura 15:

Figura 15

Modelo a escala de una porción de la pared celular primaria de una planta en dónde se muestra como intervienen las redes intrincadas de polisacáridos



Nota. Fuente: Elaboración propia, Creado en Biorender.com

Cómo se puede observar, la matriz estructural compuesta por la red de fibras que intervienen en la conformación de la pared celular contribuye a generar un complejo que brinda estabilidad estructural, capaz de transmitir esfuerzos de forma eficiente, especialmente cuando la célula se ve sometida a cambios ambientales que promueven la presión de turgencia en los tejidos vegetales.

La diversidad de los componentes estructurales presentes en la pared celular, como son, la celulosa (ensamblada a partir de glucano), la hemicelulosa (esqueletos de β-glicanos), las pectinas (polímeros estructurales) y la lignina (sustancias aromáticas) permite conformar complejas geometrías que contribuyen a funciones celulares como su morfogénesis y

crecimiento o en la resistencia mecánica de la planta. Por otro lado, la gran variedad de compuestos también brinda a la planta medios para generar respuestas de adaptación y defensa (Zhang, Gao, Zhang, & Zhou, 2021). Estos componentes bioquímicos permiten analizar la capacidad de las plantas para generar materiales complejos, a partir de un recurso renovable como es el Carbono, a un bajo costo, mostrando a la eficiencia de los tejidos vegetales y como las microestructuras contribuyen a la estabilidad de estructuras de mayor escala en las plantas.

Los conocidos como fibra vegetal son descritos por autores como Sorieul *et al*., como unas células vegetales alargadas que poseen paredes gruesas que permiten a las plantas tener un soporte mecánico y estructural que da forma a la morfología típica de las plantas (2016). Estas fibras se pueden categorizar dependiendo de la forma de crecimiento que presentan los diferentes tipos de plantas, ya sea que se trate de un alargamiento de los tejidos o un engrosamiento generalmente en un patrón que sigue una circunferencia.

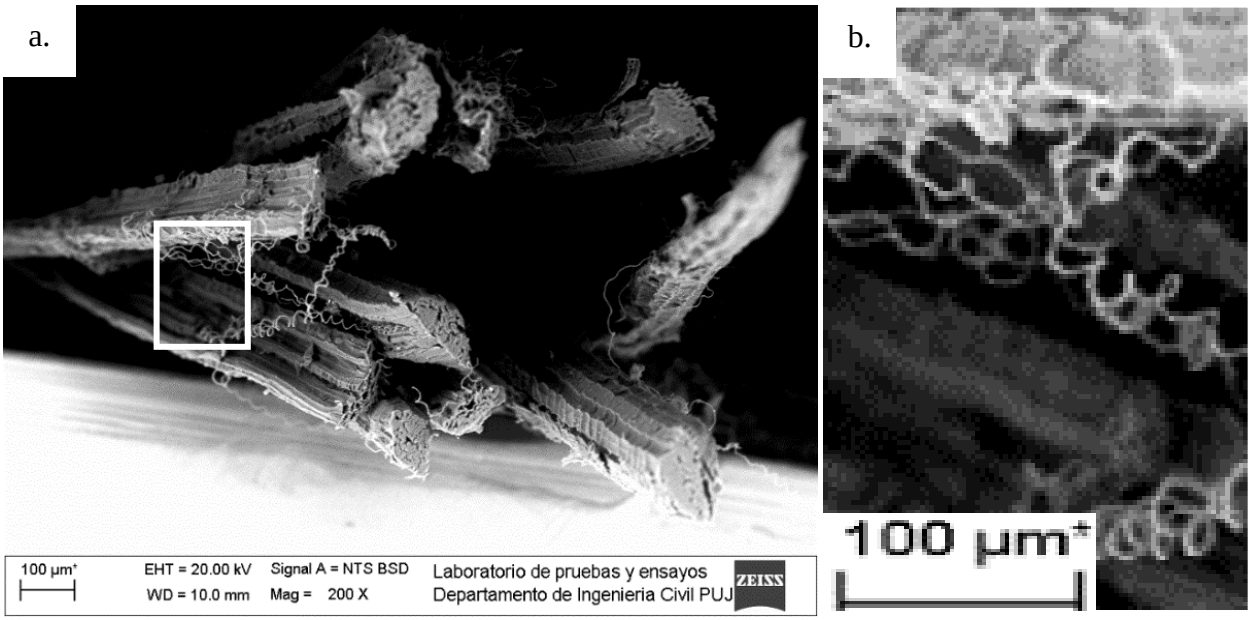
Los resultados obtenidos en los estudios topográficos y morfológicos de las muestras de fibra analizada, han permitido observar la eficiencia de estas conformaciones estructurales. Las siguientes figuras evidencian conformaciones estructurales de interés.

En el primer análisis, mostrado en la figura 16a, se pueden apreciar secciones transversales de una macroestructura compuesta de microfibrillas que podrían asociarse a las microfibrillas de celulosa mencionadas anteriormente. Autores como Jarvis (2017), describen que las microfibras encontradas en plantas vasculares (como es *guadua angustifolia*) generalmente tienen diámetros de aproximadamente 3 nm, sin embargo, en la ampliación realizada a la micrografía, es posible observar diferentes agrupaciones de microfibrillas que se desprenden de la macroestructura y que muestran cómo se encuentran organizadas de forma

rizada en la matriz principal de la macrofibra. Se resalta la organización de las microfibras, dado que su conformación parece seguir un patrón organizado a manera de resorte. Además de ello, se destaca la composición química de celulosa y lignina como elementos de alto desempeño estructural frente a esfuerzos de tipo mecánicos (Maya-Echeverry, Camargo-García, & Marino-Mosquera, 2017).

Figura 16

Micrografía electrónica de conformaciones fibrosas en tejido estructural vegetal proveniente guadua angustifolia



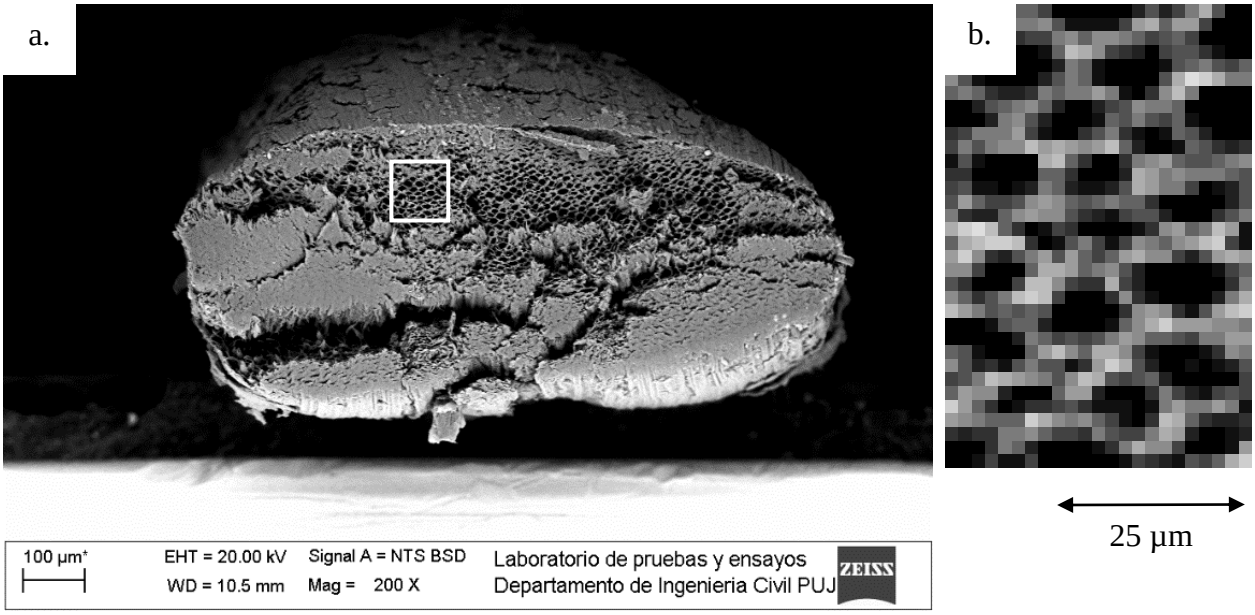
Nota. a. Micrografía electrónica de la fibra de guadua, b. ampliación de la micrografía, sección de microfibrillas que se desprenden de la macroestructura. Cortesía de Daniel Otálora, Pontificia Universidad Javeriana

En la figura 17a, se muestran los resultados de caracterización topográfica y morfológica para la fibra proveniente del tejido vegetal de *cocos nucifera*, que, a diferencia de las fibras

encontradas en las conformaciones organizadas de *guadua angustifolia*, esta muestra posee un gran número de cavidades en forma de celdas las cuales corresponden al Lumen del tejido vegetal mientras que la estructura que rodea las cavidades corresponde a las células de fibra. Dichas cavidades se pueden apreciar con mayor detalle en la figura 17b en donde se realiza una ampliación de la micrografía electrónica.

Figura 17

Micrografía electrónica de conformaciones estructurales de tejido vegetal proveniente de cocos nucifera



Nota. a. Micrografía electrónica de la fibra de coco, b. Ampliación de una sección de interés en la fibra de coco, en organizaciones que se asemejan a celdas. Fuente: Autor. Cortesía de Daniel Otálora, Pontificia Universidad Javeriana

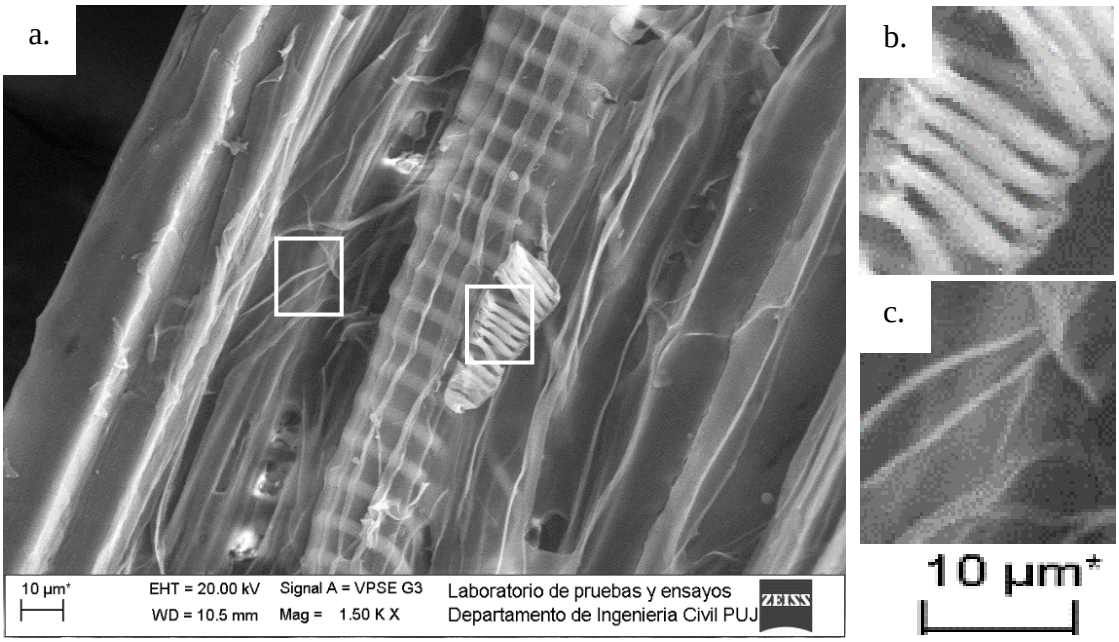
La relación del área que compone el lumen y el espesor de la pared celular secundaria que lo rodea tienen una gran relevancia respecto al desempeño mecánico, según se reportó en un estudio comparativo de diferentes fibras incluyendo la fibra de coco. En dicha investigación,

Alves *et al.* (2013), determinaron que una menor área de lumen y un espesor mayor en la pared celular secundaria incrementa la resistencia de la fibra y el módulo de Young para materiales sometidos a esfuerzo de tracción. Además de estos datos importantes, la caracterización morfológica permitió determinar la acumulación de tejido vegetal en formaciones escamosas alrededor del lumen como posible organización del tejido vegetal al interior de la fibra.

En la figura 18 se puede observar la micrografía electrónica del tejido vegetal de fibra proveniente del sistema vascular presente en la fibra de fique, en el centro de la imagen se pueden apreciar conformaciones fibrosas organizadas de forma similar a las que se observaron en la muestra de guadua. El sistema vascular al centro de la imagen se denomina xilema y permite a la planta la interacción con factores bióticos y abióticos relacionados con funciones de transporte de agua y nutrientes desde la interfaz planta-suelo, hasta los tallos y las hojas de la planta (Myburg, Lev-Yadun, & Sederoff, 2013). Además de esto, la estructura del xilema proporciona estabilidad a la planta, debido a su composición química que en su mayor parte se conforma de aproximadamente un 28% de lignina, un 4% de pectina, un 29% de hemicelulosa, y un 39% de celulosa (Grabber, Panciera, & Hatfield, 2002). Las cavidades observadas en la estructura del xilema, también permiten a la planta almacenar diferentes compuestos, además del transporte de agua. Usualmente se almacenan polisacáridos en forma de gránulos de almidón.

Figura 18

Micrografía electrónica de redes fibrosas de tejido vegetal proveniente de furcraea andina



Nota. a. Micrografía electrónica de la fibra de fique, b. Ampliación de la sección de fibra con forma de resorte, c. ampliación de secciones de microfibra de aproximadamente 1 µm Fuente: Autor. Cortesía de Daniel Otálora, Pontificia Universidad Javeriana

Todas las características estructurales mostradas en cada una de las figuras tienen una gran importancia para la investigación y la influencia en la estructura de la matriz cementante se ampliará en la discusión y análisis de resultados.

Los resultados de composición química de las diferentes fibras en el análisis de espectroscopia dispersiva de rayos X o SEM – EDX mostraron la presencia de elementos encontrados comúnmente en compuestos orgánicos, tales como el Carbono y el Oxígeno, los cuales presentaron proporciones significativas dada la naturaleza del material. Sin embargo, la

presencia de formaciones cristalinas es de gran interés para la investigación debido a su capacidad para interactuar con otros materiales encontrados en las mezclas de concreto. Para cada una de las fibras se obtuvieron distintos mapeos químicos junto con la respectiva proporción de los elementos que componen al material. Debido a esto, se clasificaron y separaron los resultados para cada una de las fibras analizadas, y aunque la preparación fue igual para todas las muestras, las especificaciones de análisis SEM – EDX se describen para cada una de las fibras.

3.1.2 Fibra de fique

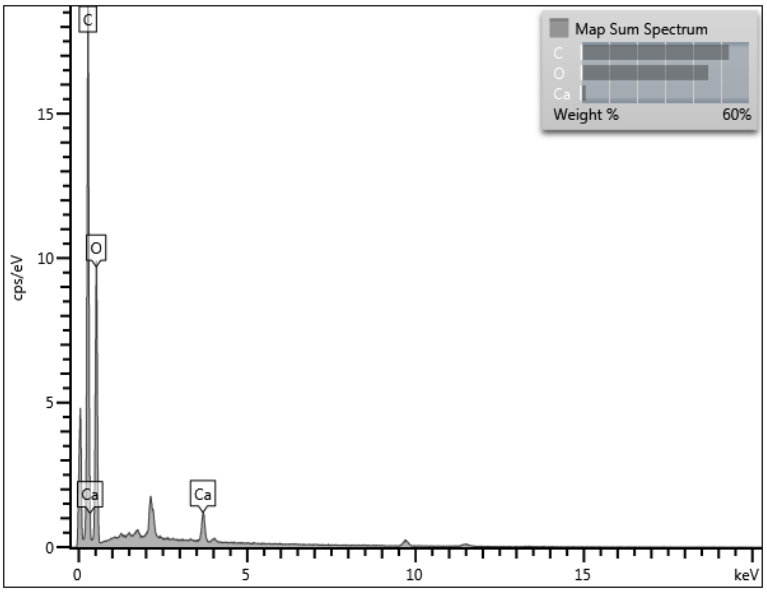
- *Espectro de análisis químico*

En el gráfico que se muestra en la figura 19 se puede apreciar el espectro de análisis realizado para las fibras de fique, en donde se pudo encontrar la presencia de tres elementos químicos, cuya concentración se puede observar en los picos más altos del espectro. A la derecha se presentan las especificaciones de trabajo empleadas para realizar el análisis SEM. Es importante resaltar el hecho de que se recibieron señales de emisión característica de rayos X de tipo α_1 para el calcio en dos diferentes capas de energía “K” y “L” para lo cual se tienen los siguientes valores típicos obtenidos en el elemento del calcio:

- **[Ca]** $K\alpha_1 = 3.692$ (keV)
- **[Ca]** $L\alpha_1 = 0.341$ (keV)
- **[Ca]** $L\beta_1 = 0.345$ (keV) (BRUKER, 2023)

Figura 19

Espectro de caracterización química del análisis SEM-EDS, en el "eje y" se aprecia el conteo por segundo por unidad de energía; mientras que en el "eje x" se encuentra la energía característica para cada elemento (furcraea andina)



Especificaciones de trabajo	
Voltaje de aceleración	20.00 kV
Magnificación	1503 x
Distancia de trabajo	10.2 mm
Inclinación de la muestra (grados)	0.0
Elevación (grados)	35.0
Azimut (grados)	0.0
Número de canales	2048
Rango de energía (keV)	20 keV
Energía por canal (eV)	10 eV

Nota. Fuente: Elaboración propia.

- *Concentraciones elementales en la muestra y mapeo químico*

Como se puede observar en la tabla 14 se encuentran los tres elementos mencionados anteriormente, en tres diferentes concentraciones. Como se puede observar existe una mayor concentración y peso porcentual para el elemento del carbono, seguido del oxígeno y el calcio con una baja concentración. Las etiquetas estándar son compuestos químicos en los cuales es más común encontrar a los elementos químicos identificados en los análisis químicos, para lo cual se tiene carbono de tipo vítreo, óxido de silicio y un mineral de calcio denominado Wollastonita de formula química $CaSiO_3$.

Tabla 14

Concentraciones elementales presentes en la muestra observada (furcraea andina)

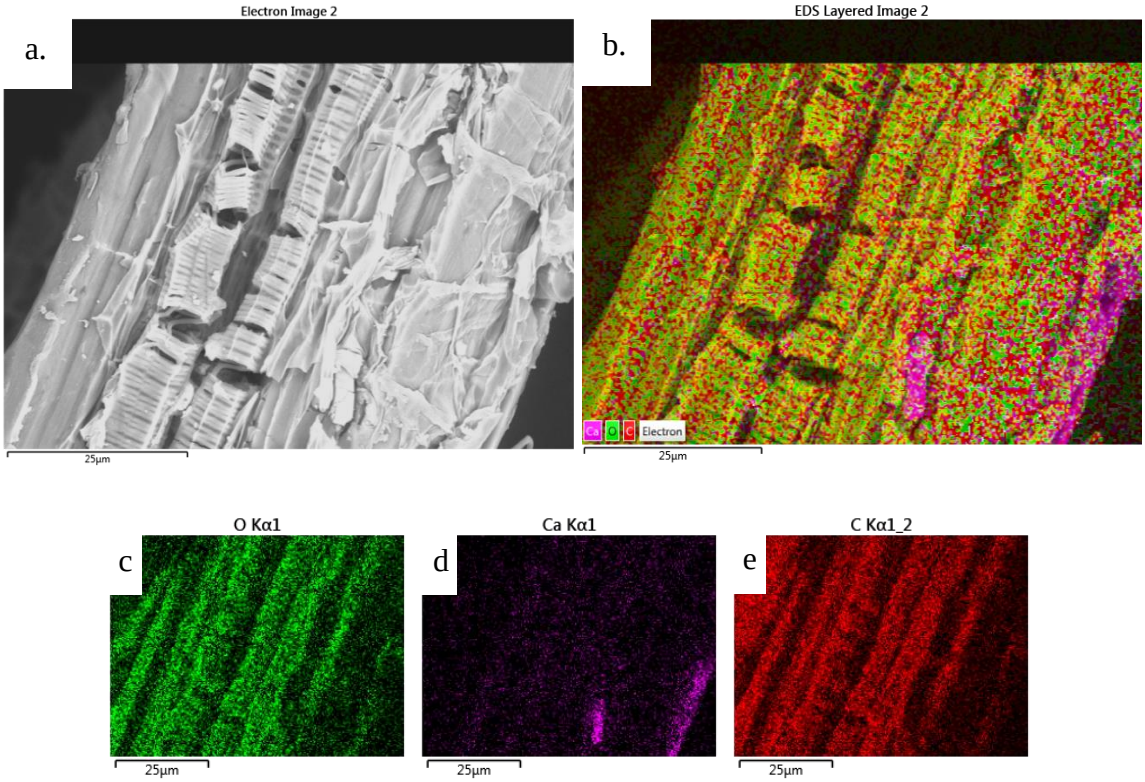
Elemento	*Concentración aparente*	*Radio k*	*Wt%*	*Etiqueta estándar*
Carbono [C]	9.76	0.095759	52.81	C Vit
Oxígeno [O]	8.09	0.02724	45.45	SiO_2
Calcio [Ca]	0.55	0.00493	1.75	Wollastonita
Total			100.00	

Nota. Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, en la figura 20, se pueden observar los diferentes mapeos químicos para los tres elementos encontrados en el análisis SEM-EDX. Aunque la composición química es característica de los tejidos y compuestos vegetales, la presencia de acumulaciones de calcio en sectores específicos de la planta cobra relevancia en la presente investigación, particularmente al área superficial que cubre el compuesto químico que contiene calcio. Es importante resaltar que cada uno de los colores mostrados en la figura 20, representan un elemento químico que se muestra por separado en los incisos c, d y e de la figura. Una mayor coloración indica una mayor concentración del elemento en la superficie de la muestra analizada.

Figura 20

Mapeos químicos de la muestra analizada en SEM-EDS, para tres diferentes elementos encontrados en el análisis. (furcraea andina)



Nota. a. Micrografía electrónica original, b. Mapeo químico que indica la posición y concentración de cada elemento en la muestra (cada coloración indica un elemento que se muestra en la parte inferior izquierda, para esta imagen se encontró Ca, O y C), c. Mapeo químico para la concentración de oxígeno en la muestra, d. Mapeo químico para la concentración de Calcio en la muestra, e. Mapeo químico para la concentración de carbono en la muestra. Fuente: Autor

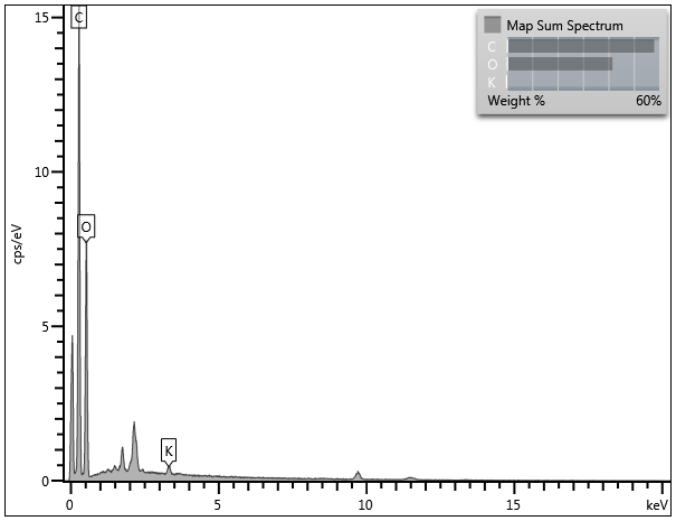
3.1.3 Fibra de guadua

- *Espectro de análisis químico*

En contraste con los resultados encontrados anteriormente para la fibra de fique, la figura 21 evidencia un espectro similar en composiciones de carbono y oxígeno, sin embargo, el pico que señala la existencia de potasio en la composición química de la muestra de guadua ofrece información relevante para la investigación. Al igual que en la sección anterior, las especificaciones de trabajo en SEM – EDX se detallan en el cuadro de la derecha.

Figura 21

Espectro de caracterización química del análisis SEM-EDS, en el "eje y" se aprecia el conteo por segundo por unidad de energía; mientras que en el "eje x" se encuentra la energía característica para cada elemento (guadua angustifolia).



Especificaciones de trabajo	
Voltaje de aceleración	20.00 kV
Magnificación	1500 x
Distancia de trabajo	10.5 mm
Inclinación de la muestra (grados)	0.0
Elevación (grados)	35.0
Azimut (grados)	0.0
Número de canales	2048
Rango de energía (keV)	20keV
Energía por canal (eV)	10.0eV

Nota. Fuente: Elaboración propia.

- *Concentraciones elementales en la muestra y mapeo químico*

En la tabla 15 de concentraciones elementales obtenidas para el análisis con guadua se evidencian concentraciones similares a las encontradas anteriormente para la muestra de fique, sin embargo, el cambio del calcio por el potasio como elemento acumulado ofrece información importante que puede contribuir a la interacción positiva con la matriz cementante propia del concreto y sus agregados.

Tabla 15

Concentraciones elementales presentes en la muestra observada (guadua angustifolia)

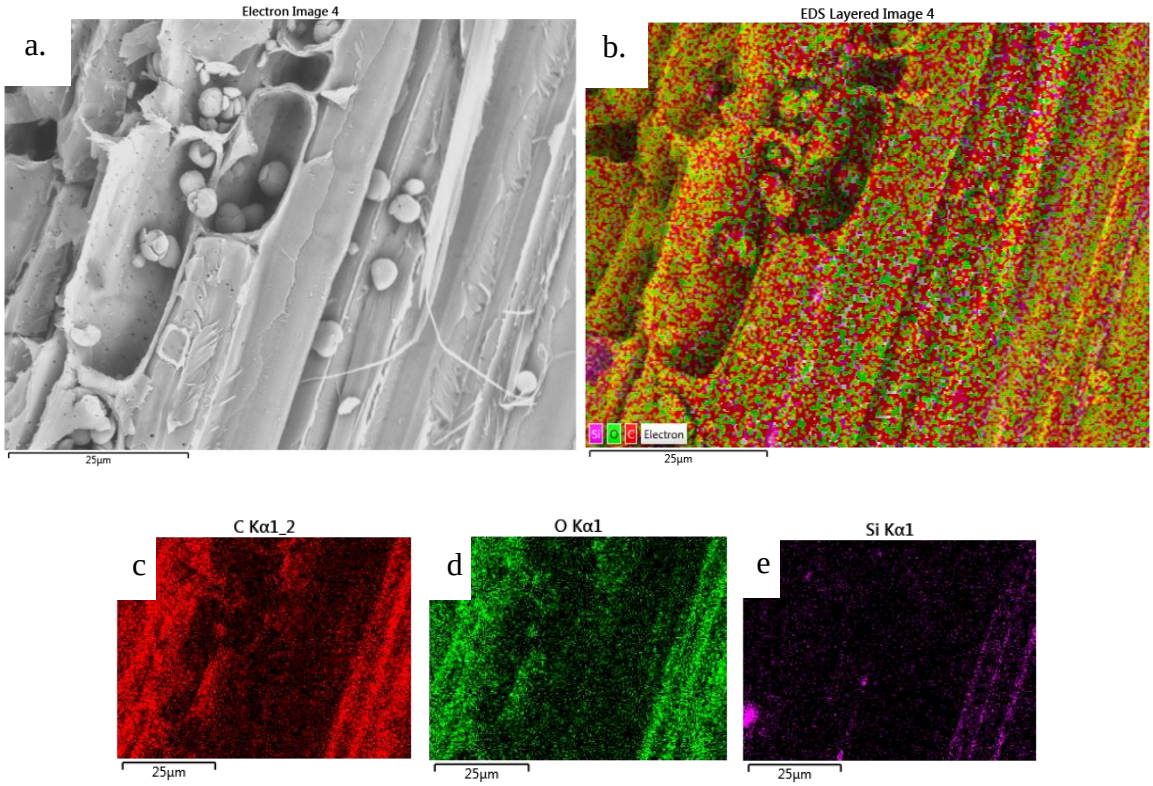
Elemento	*Concentración aparente*	*Radio k*	*Wt%*	*Etiqueta estándar*
Carbono [C]	10.39	0.1093	57.99	C Vit
Oxígeno [O]	6.48	0.02181	41.58	SiO_2
Potasio [K]	0.13	0.00110	0.44	KBr
Total			100.00	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, el mapeo químico que se presenta en la figura 22 mostró acumulaciones relevantes de silicio, el cual es el componente principal del vidrio y por consecuente de la fibra d vidrio, lo que resalta la importancia de la combinación de diferentes compuestos químicos que conforman la estabilidad estructural de la fibra orgánica y por consiguiente pueden brindar resultados positivos en la matriz cementante del concreto. Aunque no se muestra el potasio en los mapeos químicos, no se descarta su relevancia en el estudio.

Figura 22

Mapeos químicos de la muestra analizada en SEM-EDS, para tres diferentes elementos encontrados en el análisis (guadua angustifolia).



Nota. a. Micrografía electrónica original, b. Mapeo químico que indica la posición y concentración de cada elemento en la muestra (cada coloración indica un elemento que se muestra en la parte inferior izquierda, para esta imagen se encontró Si, O y C), c. Mapeo químico para la concentración de carbono en la muestra, d. Mapeo químico para la concentración de oxígeno en la muestra, e. Mapeo químico para la concentración de sílice en la muestra. Fuente: Autor.

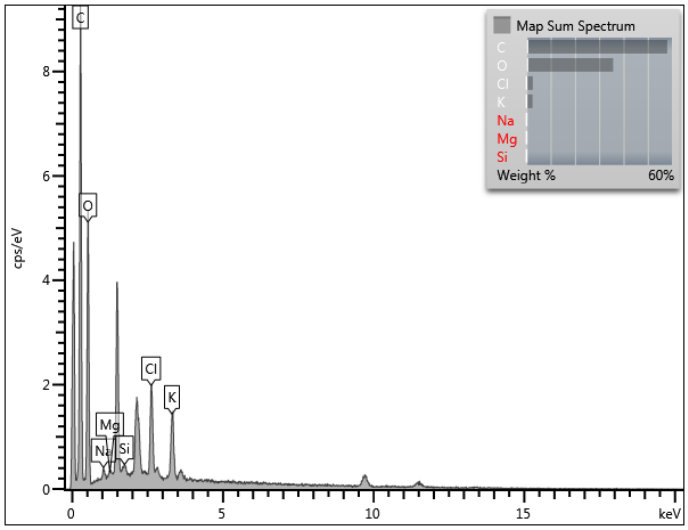
3.1.4 Fibra de coco

- Espectro de análisis químico

El análisis de la muestra de coco que se observa en la figura 23, presentó resultados distintos a los que se encontraron en las otras dos muestras de fibra. Si bien, el contenido de carbono y oxígeno es típico de los tejidos vegetales, la presencia de magnesio, cloro, potasio, silicio y sodio una matriz química vegetal más compleja en comparación con los otros tejidos analizados. Se resalta el hecho de que las concentraciones de [Si, Na y Mg] reportadas son mínimas, pero al observar su distribución de área superficial en los mapeos puede ofrecer interacciones interesantes con la matriz cementante.

Figura 23

Espectro de caracterización química del análisis SEM-EDS, en el "eje y" se aprecia el conteo por segundo por unidad de energía; mientras que en el "eje x" se encuentra la energía característica para cada elemento (cocos nucifera).



Especificaciones de trabajo	
Voltaje de aceleración	20.00 kV
Magnificación	1500 x
Distancia de trabajo	10.4 mm
Inclinación de la muestra (grados)	0.0
Elevación (grados)	35.0
Azimut (grados)	0.0
Número de canales	2048
Rango de energía (keV)	20 keV
Energía por canal (eV)	10.0 eV

Nota. Fuente: Elaboración propia.

- *Concentraciones elementales en la muestra y mapeo químico*

En relación con los resultados encontrados en el espectro SEM – EDX de la muestra de cocos nucifera, además de las típicas concentraciones de C y O, se encontraron concentraciones relevantes de cloro y potasio. Se destaca la presencia del sodio y la relación del análisis con el mineral albita, el cual posee una formula química de NaAlSi3O8. La interacción y dispersión de esta gran diversidad de compuestos puede generar interacciones de interés para la investigación, como se puede apreciar en la tabla 16. La posterior comparación de los resultados del análisis de fibra con el desempeño mecánico ofrecerá información sobre la integración de fibras y compuestos vegetales y orgánicos al concreto estructural y no estructural.

Tabla 16

Concentraciones elementales presentes en la muestra observada (cocos nucifera)

Elemento	*Concentración aparente*	*Radio k*	*Wt%*	*Etiqueta estándar*
Carbono [C]	6.25	0.06254	58.06	C vit
Oxígeno [O]	4.34	0.01462	35.74	SiO_2
Sodio [Na]	0.08	0.00034	0.36	Albita
Magnesio [Mg]	0.07	0.00044	0.33	MgO
Silicio [Si]	0.07	0.00057	0.30	SiO_2
Cloro [Cl]	0.65	0.00572	2.66	NaCl
Potasio [K]	0.65	0.00553	2.54	KBr
Total			100.00	

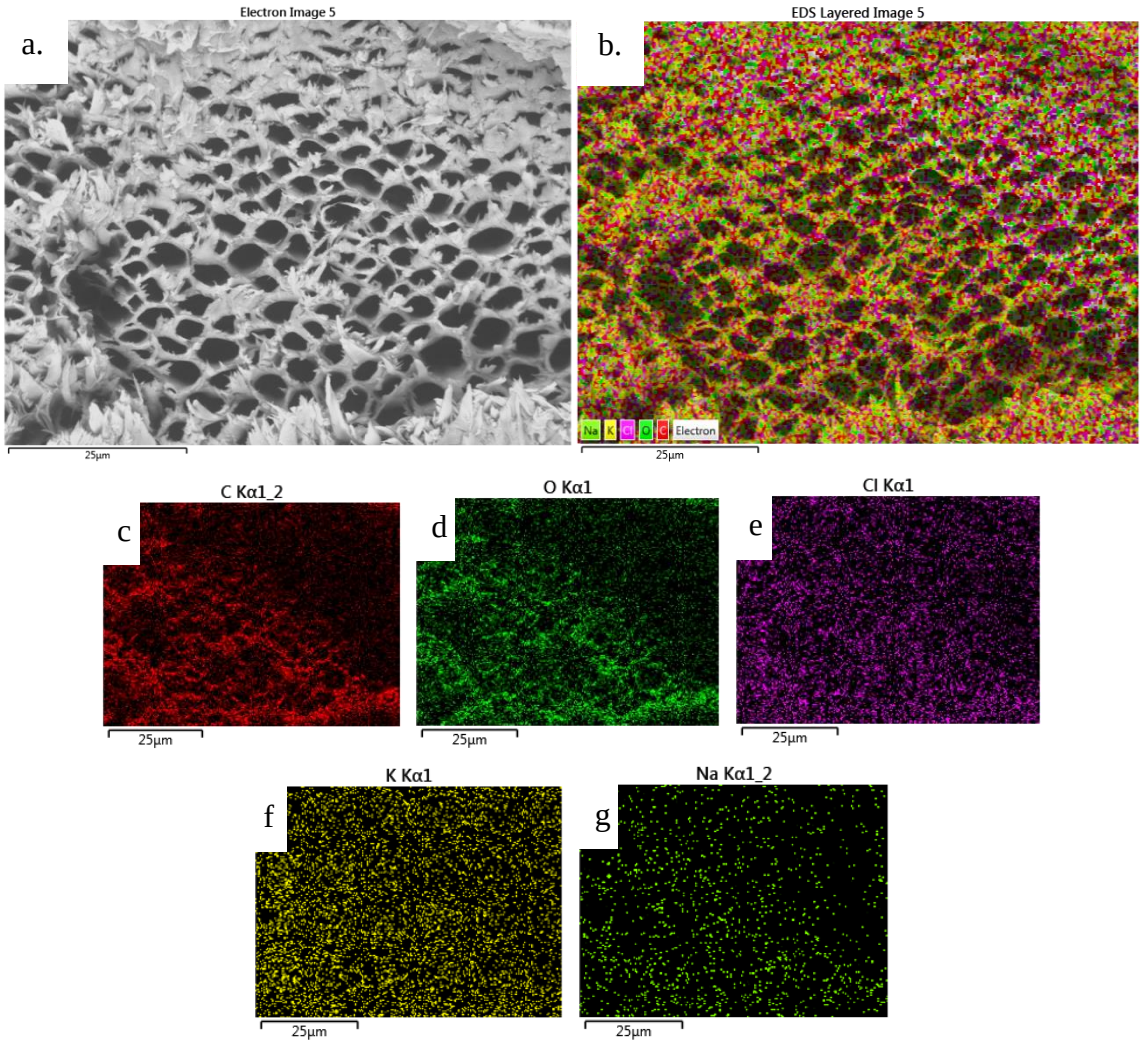
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Los mapeos químicos que se pueden observar en la figura 24, indican una alta dispersión de los compuestos químicos diferentes al carbono y al oxígeno, lo cual es diferente a los hallazgos encontrados en las muestras de guadua y de fique, en donde se tuvo una mayor

acumulación sectorial para sectores específicos. Adicionalmente la presencia de potasio y cloro en forma de cristales de cloruro de sodio podría tener otro tipo de interacciones, sin embargo, aún es necesario investigar más a fondo este tipo de relaciones químicas dado que varios de estos compuestos se pueden encontrar también en los agregados finos y gruesos del concreto.

Figura 24

Mapeos químicos de la muestra analizada en SEM-EDS, para tres diferentes elementos encontrados en el análisis (cocos nucifera).



Nota. a. Micrografía electrónica original, b. Mapeo químico que indica la posición y concentración de cada elemento en la muestra (cada coloración indica un elemento que se muestra en la parte inferior izquierda, para esta imagen se encontró Na, K, Cl, O y C), c. Mapeo químico para la concentración de carbono en la muestra, d. Mapeo químico para la concentración de oxígeno en la muestra, e. Mapeo químico para la concentración de cloro en la muestra, f. Mapeo químico para la concentración de potasio en la muestra, g. Mapeo químico para la concentración de sodio en la muestra. Fuente: Autor.

3.2 Definición de la propuesta de mezcla y resultados del ensayo NTC – 673

Se aplicó un ensayo destructivo de resistencia a la compresión en 36 cilindros de concreto según los parámetros establecidos en la NTC – 673, como se muestra en la tabla 17. Se procuró que la variable de respuesta fuera la resistencia a la compresión para cada cilindro en repeticiones agrupadas por cada día. En dónde, las variaciones de carga máxima soportada por cada uno de los cilindros de concreto son directamente proporcionales al esfuerzo de compresión, dado que este depende de la carga máxima y de la constante de área transversal del testigo de prueba como se expresa en la Ecuación [1]. Los resultados obtenidos se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 17

Resultados del ensayo de resistencia a la compresión según NTC – 673

MEZCLA	*EDAD DÍAS*	*CARGA MÁXIMA*		*TESTIGO ÁREA* (in^2)	*RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN* ($f'c$)	
		KN	***LB - F***		***PSI***	***PROMEDIO (PSI)***
SIN FIBRAS	7	220.75	49629	27.34	1815.25	1812.2
		220.50	49573	27.34	1813.20	
		219.88	49433	27.34	1808.10	
	14	248.56	55881	27.34	2043.94	2041.0
		247.98	55751	27.34	2039.17	

MEZCLA	*EDAD DÍAS*	*CARGA MÁXIMA*		*TESTIGO ÁREA* (in^2)	*RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN* ($f'c$)	
		KN	***LB - F***		***PSI***	***PROMEDIO (PSI)***
		248.05	55767	27.34	2039.75	
	28	358.24	80540	27.34	2945.85	2958.2
		360.98	81156	27.34	2968.38	
		360.02	80940	27.34	2960.49	
CON FIBRAS DE COCO	7	240.95	54170	27.34	1981.36	1981.6
		241.52	54299	27.34	1986.05	
		240.48	54065	27.34	1977.50	
	14	268.76	60423	27.34	2210.05	2210.3
		268.98	60472	27.34	2211.86	
		268.65	60398	27.34	2209.14	
	28	366.44	82383	27.34	3013.28	3018.0
		367.98	82729	27.34	3025.94	
		366.62	82424	27.34	3014.76	
CON FIBRAS DE FIQUE	7	240.35	54036	27.34	1976.43	1984.9
		241.90	54384	27.34	1989.17	
		241.88	54379	27.34	1989.01	
	14	269.16	60513	27.34	2213.34	2216.4
		269.38	60562	27.34	2215.14	
		270.05	60713	27.34	2220.65	
	28	366.84	82473	27.34	3016.57	3025.7
		368.98	82954	27.34	3034.17	
		368.02	82738	27.34	3026.27	
CON FIBRAS DE GUADUA	7	239.85	53923	27.34	1972.32	1980.8
		241.40	54272	27.34	1985.06	
		241.38	54267	27.34	1984.90	
	14	268.72	60414	27.34	2209.72	2209.5
		268.66	60400	27.34	2209.22	
		268.69	60407	27.34	2209.47	
	28	365.64	82203	27.34	3006.70	3011.4
		367.18	82549	27.34	3019.37	
		365.82	82244	27.34	3008.18	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Como se viene apreciando, los diferentes resultados de resistencia a la compresión, el promedio de la resistencia a la compresión dado por las tres repeticiones por día indica un aumento en la resistencia del esfuerzo para todos los cilindros con tratamiento, sin embargo, el análisis estadístico aplicado brindará una mayor información sobre la diferencia significativa que estos resultados tienen para la investigación. Se resalta el hecho de que el mayor aumento en la resistencia a la compresión se presentó en los cilindros de concreto que poseen fibras de fique, mientras que el menor aumento se dio para los cilindros con fibras de guadua. A pesar de esto, todos los cilindros con tratamiento de fibras mostraron resultados positivos.

3.2.1 Análisis estadístico

El análisis estadístico fue desarrollado en el software "Infostat" aplicando un diseño factorial anidado. Los resultados del análisis se presentan a continuación:

Se realizó una prueba de bondad de Kolmogorov con la finalidad de revisar si la distribución de los datos es normal. La figura 25 muestra el análisis empleado.

Figura 25

Prueba de bondad de ajuste (Kolmogorov)

Prueba de bondad de ajuste (Kolmogorov)

Variable	Ajuste	media	varianza	n	Estadistico D	p-valor
R COMP	Normal(0,1)	2370,83	218784,95	36	1,00	<0,0001

Nota. Fuente: Elaboración propia. Imagen capturada del aplicativo. (Infostat, 2020)

La prueba de bondad de Kolmogorov, mostró un ajuste de distribución normal para los datos analizados, con un valor ($p<0.05$), además se encontró que la media fue de 2370.83 y el valor de la varianza de 218784.95, para una población de 36 cilindros de concreto.

Los resultados encontrados en el análisis de la varianza desarrollado en el software Infostat mostrados anteriormente en la figura 26, evidenciaron que el factor mezcla no tiene efecto significativo en el esfuerzo máximo a compresión de los cilindros de concreto (p = 0.9873), sin embargo, existe una varianza en la respuesta de resistencia a la compresión presentada en cada grupo de días dado que se obtuvo un valor (p = 0.0001). El modelo experimental presentó 11 grados de libertad y un coeficiente de varianza de (CV = 0.26) para un total de 36 cilindros de concreto analizados.

Figura 26

ANAVA – Análisis de la varianza

Análisis de la varianza

Variable	N	R^2	R^2 Aj	CV
RCOMP	36	1,00	1,00	0,26

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	(Error)
Modelo.	7656540,58	11	696049,14	17911,79	<0,0001	
MEZCLA	121215,91	3	40405,30	0,04	0,9873	(MEZCLA>DIAS)
MEZCLA>DIAS	7535324,67	8	941915,58	24238,80	<0,0001	
Error	932,64	24	38,86			
Total	7657473,22	35				

Nota. Fuente: Elaboración propia. Imagen capturada del aplicativo. (Infostat, 2020)

Figura 27

Diferencia mínima significativa, test LSD de Fisher – Teniendo en cuenta el factor de mezcla

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=1055,01761

Error: 941915,5836 gl: 8

MEZCLA	Medias	n	E.E.	
SIN FIBRAS	2270,46	9	323,51	A
FIBRAS DE GUADUA	2400,55	9	323,51	A
FIBRAS DE COCO	2403,33	9	323,51	A
FIBRAS DE FIQUE	2408,97	9	323,51	A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Nota. Fuente: Elaboración propia. Imagen capturada del aplicativo. (Infostat, 2020)

Las medias generales no son significativamente diferentes, sin embargo, es posible apreciar un aumento considerable entre la muestra control y muestras reforzadas con fibras vegetales.

El test de Fisher para determinar la diferencia mínima significativa, mostró resultados de interés que se resumen en la figura 28, al encontrarse que las fibras presentes en los cilindros de concreto efectivamente generaron un aumento de la resistencia a la compresión, para todos los intervalos de tiempo haciendo que todos los cilindros con fibras presentaran una mayor resistencia a la compresión con respecto a los cilindros control. Adicionalmente, para el intervalo de tiempo de 28 días, la fibra de fique mostró un mayor aumento a la compresión en los cilindros, con respecto a la fibra de guadua. De esta forma se confirma una influencia positiva de la adición de fibras vegetales a las mezclas de concreto, para el caso particular de un 0.13% de fibras vegetales agregadas en la mezcla.

Figura 28

Diferencia mínima significativa, test LSD de Fisher – Teniendo en cuenta la influencia del factor días respecto al factor de mezcla

Test:LSD Fisher Alfa=0,05 DMS=10,50493

Error: 38,8598 gl: 24

MEZCLA	DIAS	Medias	n	E.E.						
SIN FIBRAS	7,00	1812,18	3	3,60	A					
FIBRAS DE GUADUA	7,00	1980,76	3	3,60		B				
FIBRAS DE COCO	7,00	1981,64	3	3,60		B				
FIBRAS DE FIQUE	7,00	1984,87	3	3,60		B				
SIN FIBRAS	14,00	2040,95	3	3,60			C			
FIBRAS DE GUADUA	14,00	2209,47	3	3,60				D		
FIBRAS DE COCO	14,00	2210,35	3	3,60				D		
FIBRAS DE FIQUE	14,00	2216,38	3	3,60				D		
SIN FIBRAS	28,00	2958,24	3	3,60					E	
FIBRAS DE GUADUA	28,00	3011,42	3	3,60						F
FIBRAS DE COCO	28,00	3017,99	3	3,60						F G
FIBRAS DE FIQUE	28,00	3025,67	3	3,60						G

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

Nota. Fuente: Elaboración propia. Imagen capturada del aplicativo. (Infostat, 2020)

3.2.2 Análisis mecánico.

Los análisis de relación morfológica, fibra y respuesta mecánica, se puede tomar en cuenta los estudios de las propiedades mecánicas de la fibra de guadua; García *et al.*(2019), realizaron un estudio para mostrar las capacidades de la fibra de guadua, con la finalidad de comprender mejor la influencia de la respuesta mecánica de las fibras con respecto a la matriz de concreto, se realizó un cuadro comparativo que evidencia características de la guadua y el acero como referente comercial, esta comparación se aprecia en la tabla 18. Cómo se puede observar, se presentan diferentes valores que evidencian el comportamiento mecánico de dos especies diferentes de guadua, con respecto a un referente estructural ampliamente utilizado en la industria de la construcción "el acero".

Tabla 18

Propiedades mecánicas de la guadua y el acero. [Nudos en los bordes (NE), un nudo en el medio (NM) de la sección y sin nudos (SN)]

Variable	Acero	*Guadua rayada amarilla*	*Guadua angustifolia Kunt*
Esfuerzo de compresión (MPa)	330 - 480	NM 37.9±7.4 SN 33.9±3.4 NE 30.8±2.7	NM 43.6±5.4 SN 36.5±2.5 NE 38.2±4.8
Esfuerzo de flexión (Mpa)	245 - 440	SN 102.7±16.6	NM 103.5±23.1 SN 147.2±20.1
Módulo elástico (Gpa)	200	SN 5.8±0.9	SN 9.6±4.3 NM 7.8±1.7
Esfuerzo de tensión (Mpa)	-	143.1±15.6	-
Resistencia a la tracción (Mpa)	550	-	251.148

Nota. Adaptado de la investigación realizada por SIDENAL (2015), García, et al. (2019) y Takeuchi (2004).

El comportamiento de la guadua tiene resultados mecánicos eficientes para su aplicabilidad como material de construcción, y en relación a los resultados encontrados por Pons-Ribera *et al.* (2023), el buen desempeño mecánico de las fibras y la rugosidad que brinda anclajes microestructurados a la matriz de concreto, permite que las propiedades de los concretos modificados con fibra vegetal como la de *guadua angustifolia*, mejore su capacidad para soportar esfuerzos mecánicos. Sin embargo, pese a la mejora estructura, debe tomarse en cuenta la relación entre el porcentaje de fibra y la distribución en la mezcla, ya que, como se ha mencionado anteriormente tiene una gran influencia en la estabilidad estructural del material.

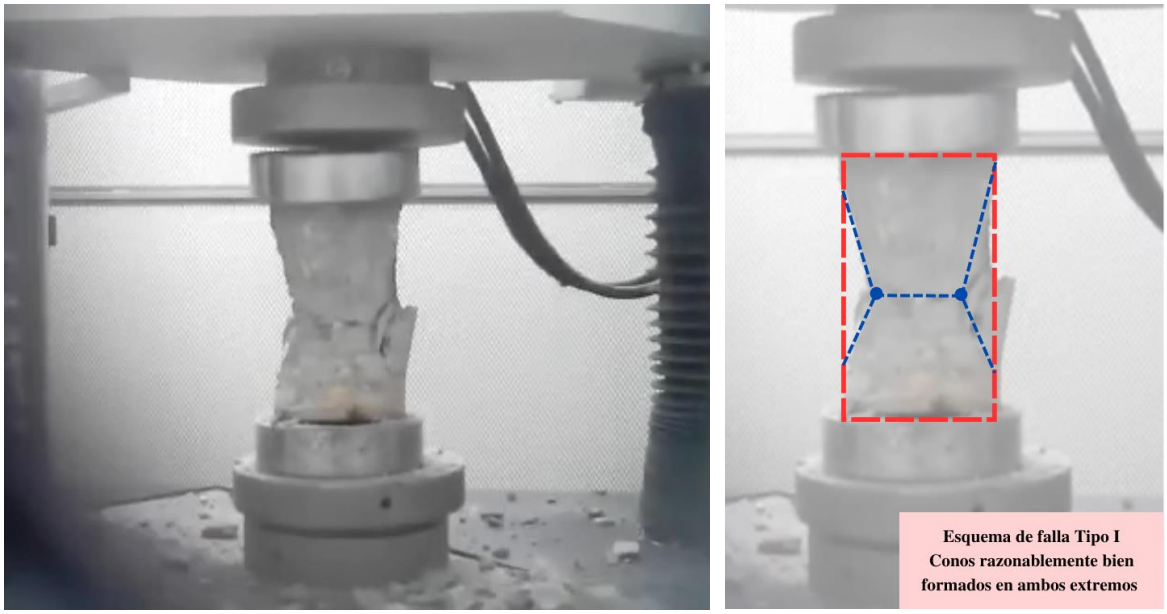
Finalmente, para concluir el análisis de resultados respecto a la respuesta mecánica de los cilindros de concreto modificados con fibra, en esta sección del documento se analiza el tipo de falla presentada en el cilindro. Dicha falla se puede apreciar con mayor detalle en la figura 29, en donde a la izquierda se puede apreciar el cilindro, segundos después del instante de la falla, mientras que a la derecha se realizó un diagrama del esquema típico de falla con la finalidad de categorizar la falla del cilindro acorde a la normativa colombiana e internacional.

Como es evidente en la figura 29 el cilindro presentó una falla de tipo I siguiendo un patrón de planos diagonales que se entrecruzan en un punto determinado, con una mayor resistencia en la parte superior. Este tipo de falla ha sido descrita por autores como Medoza *et al.* (2019), quienes señalan que la describen como una falla relacionada con la relación de esbeltez de la probeta de concreto y justifican dicha afirmación mencionando los cambios diferenciales en la inercia de la probeta de concreto respecto a las inercias establecidas para los ensayos. Y si bien los autores no clasifican la falla “tipo I” como una falla ideal, la empresa de cementos CEMEX resalta que la falla “tipo I” corresponde a cilindros de prueba bien preparados, a los cuales se les

ha aplicado una carga de compresión de forma adecuada y se ha realizado de forma exitosa el ensayo (CEMEX, 2023). Todo ello indica que el ensayo se realizó de forma correcta y que la falla se encuentra en el rango acorde a las fallas típicas en cilindros de concreto que poseen un diseño de mezcla adecuado.

Figura 29

Cilindros fallados a esfuerzo de compresión. A la izquierda se observa el cilindro después de una falla súbita, a la derecha un esquema del tipo de falla presentado en el cilindro.



Nota. Fuente: Elaboración propia. Laboratorio de la Universidad Católica de Colombia

La falla del cilindro se presentó de forma súbita en un intervalo de tiempo menor a 1 segundo. Durante el ensayo no se generaron fallas o agrietamiento en la estructura del cilindro, dichas grietas solo se apreciaron después de que el cilindro falló de forma súbita, indicando la capacidad de resistencia frente a las microfisuras y la propagación de grietas, se sugiere esto

acorde a los hallazgos de anclaje “matriz de concreto-fibras vegetales” que podrían influir en la propagación de microgrietas en la estructura haciendo que la falla se presente de forma súbita.

Los resultados de análisis químicos mostraron diferentes concentraciones químicas de elementos variados para cada tipo de muestra. Y aunque las conformaciones cristalinas en forma de filamentos de Potasio [K] y Calcio [Ca] fueron más evidentes en las muestras de guadua y fique, es importante señalar que no se descarta la presencia de filamentos y acumulaciones de elementos en la fibra de coco, debido a que las imágenes fueron tomadas a diferentes cortes de la sección de la fibra. Es decir, que para el análisis químico de la fibra de guadua y de fique se tomó una sección longitudinal mientras que para el análisis químico de fibra de coco se tomó una sección transversal; lo que explicaría también la mayor distribución de compuestos químicos en el área de análisis de la fibra de coco, razón por la cual no se descarta la posible acumulación mineral en forma de filamentos para la fibra de coco. Por otro lado, autores como Gil *et al.*, reportaron hallazgos que sugieren la bioacumulación de sílice en cavidades específicas de la fibra de coco, estas oclusiones de sílice son caracterizadas por los autores como tílides, debido a su capacidad para obstruir estructuras vegetales propias del tejido conductor de la planta (Gil, Zuleta, & Reyes, 2021) (John, Cincotto, Sjöström, Agopyan, & Oliveira, 2005) (Anggraini, Asadi, Huat, & Nahazanan, 2015). Estos hallazgos también han sido reportados en otras investigaciones como las de Patrik *et al.*, quienes también reportan la presencia de cuerpos de sílice en la fibra de coco (2018); y aunque los autores no hacen mayor énfasis en la presencia de estos cuerpos, para las investigaciones de materiales se hace necesario ahondar en las posibilidades de interacción que pueden tener con la matriz de concreto.

La diversidad de compuestos químicos hallados en el coco parece no tener una relación directa con los cambios en la respuesta de resistencia a la compresión presentada en el concreto, sin embargo es importante considerar que la formación y bioacumulación de elementos químicos, ya que como se mencionó anteriormente en la investigación de Pons-Ribera *et al.* (2023), los grupos hidroxilo presentes en la matriz de fibra celulosa son capaces de reaccionar con los componentes del concreto, por lo cual se hacen necesarios múltiples análisis que permitan determinar distribuciones químicas más detalladas que permitan conocer mejor el impacto que podrían tener acumulaciones cristalinas de minerales, o cuerpos oclusivos como las partículas de sílice presentes en la fibra de coco.

Para contrastar la importancia de la presencia de elementos químicos en las muestras, se realizó una comparación con análisis químicos para cada muestra de fibra, teniendo como referencia un análisis químico realizado por CENIBANANO, Universidad Nacional de Medellín, Secretaría de Agricultura del Cauca, COLTABACO y la Compañía de empaques S.A. Los resultados se pueden apreciar en la tabla 19:

Tabla 19

Comparación en composición química

Composición química				
	Estudio de referencia	**SEM-EDX de la presente investigación**		
ELEMENTOS	**Fibra (*furcraea andina)* [% – ppm] ***	**Fibra (*cocos nucifera*) [wt%]**	**Fibra (*furcraea andina)* [wt%]**	**Fibra (*guadua angustifolia*) [%]**
Nitrógeno [N]	0.22%	-	-	-
Fósforo [P]	0.04%	-	-	-
Potasio [K]	0.26%	2.54%	-	0.44%
Calcio [Ca]	0.96%	-	1.75%	-
Magnesio [Mg]	0.10%	0.33%	-	-

Composición química				
Sodio [Na]	0.55%	0.36%	-	-
Hierro [Fe]	31.60 ppm	-	-	-
Cobre [Cu]	1.40 ppm	-	-	-
Manganeso [Mn]	9.40 ppm	-	-	-
Zinc [Zn]	16.90 ppm	-	-	-
Boro [Br]	1.80 ppm	-	-	-
Cobalto [Co]	Trazas	-	-	-
Cloro [Cl]	Trazas	2.66%	-	-
Silicio [Si]	-	0.3%	-	-

Nota. Adaptado de CENIBANANO, Universidad Nacional de Medellín, Secretaría de Agricultura del Cauca, COLTABACO y Compañía de empaques S.A. (Minambiente, 2019).

Dado que los análisis químicos de las fibras se centran en la composición bioquímica y el contenido de moléculas orgánicas, la literatura que expresa valores químicos de las fibras es escasa, razón por la cual se realizó una comparación con un análisis químico realizado para las fibras de fique, el cual se tomó como referente para estudiar la forma en que la diversidad de compuestos químicos puede tener una influencia en el desempeño mecánico de las probetas de concreto reforzadas con fibras vegetales. Se descartó la posibilidad de que la diversidad elemental en la composición química de la fibra influyera en el comportamiento mecánico, debido a que se hacen necesarios más estudios que abarquen un panorama más amplio de la distribución química de los elementos en la macrofibra. Otra razón para descartar la influencia de la diversidad elemental fue la composición química del coco que exhibió una mayor variedad, pese a ello la fibra de fique obtuvo un desempeño mecánico ligeramente mayor. Por otro lado hay que tener en cuenta el limitante superficial del análisis SEM-EDX que analiza un espesor específico de cada muestra, también es importante tener en cuenta los análisis dados por la posición de la muestra ya sea que se encuentre en corte longitudinal o transversal, esto también

pudo influir en la variación de la distribución superficial de los elementos químicos. Por ello se hace necesario revisar a mayor detalle y con más estudios estas variaciones para poder mejorar la comprensión de las micro-interacciones entre la fibra y la matriz del concreto.

Por otro lado, se encuentra que la fibra de fique arrojó resultados interesantes en cuanto al aumento en la resistencia del concreto frente a esfuerzos de compresión al revisar la tabla 18 se puede determinar la posibilidad de la influencia de los cristales de calcio en la matriz de concreto, cosa que puede contribuir en las reacciones del $Ca(OH)_2$ y los grupos hidroxilos, como se mencionó anteriormente. Sin embargo, para probar esta teoría, se hacen necesarios más estudios que muestren una mayor abundancia de los cristales de calcio en la fibra de *furcraea andina* en comparación con *cocos nucifera* y *guadua angustifolia.*

3.3 Evaluación financiera

En el siguiente análisis, se presenta una relación de costos unitarios calculados para la producción de 1 m² de placa maciza en concreto, las especificaciones de precios y detalles de materiales fueron generados a partir del software para arquitectura, ingeniería y construcción

"Generador de precios Colombia" aplicado en la respectiva industria. Las características técnicas de la losa se tienen un estándar que se puede encontrar en el generador de precios colombiano, como una placa maciza de concreto armado de 21 MPa y acero grado 60 para una altura libre de planta de hasta 3 m y un canto de 24 cm (© CYPE Ingenieros, S.A., 2023)

Con base en los precios y especificaciones establecidas por el software online, fue posible realizar un análisis de precios unitarios para definir el costo de la fabricación de una losa de concreto en condiciones normales. Los resultados de este cálculo se muestran en la tabla 20:

Tabla 20

Comparativo de precios unitarios

Unidad	*Descripción*	*Cantidad (sin fibra)*	*Cantidad (fibra)*	*Valor unitario*	*Valor (sin fibra) parcial*	*Valor (fibra) parcial*
	Materiales					
m²	Tablero madera	0.04	0.04	$ 94,946.91	$ 4,177.66	$ 4,177.66
m²	Estructura soporte	0.01	0.01	$ 212,848.02	$ 1,489.94	$ 1,489.94
Ud	Puntal de metal	0.03	0.03	$ 40,175.69	$ 1,084.74	$ 1,084.74
m³	Madera de pino.	0.003	0.003	$ 741,837.96	$ 2,225.51	$ 2,225.51
kg	Puntas de acero	0.04	0.04	$ 18,259.03	$ 730.36	$ 730.36
l	Agente desmoldeante	0.03	0.03	$ 3,764.91	$ 112.95	$ 112.95
Ud	Separador homologado	3.00	3.00	$ 186.26	$ 558.78	$ 558.78

Unidad	*Descripción*	*Cantidad (sin fibra)*	*Cantidad (fibra)*	*Valor unitario*	*Valor (sin fibra) parcial*	*Valor (fibra) parcial*
	para losas macizas.					
kg	Varillas corrugadas, Grado 60	22.05	22.05	$ 2,009.56	$ 44,310.80	$ 44,310.80
kg	Alambre galvanizado para atar	0.29	0.29	$ 3,130.12	$ 920.26	$ 920.26
m³	**Agua.**	**0.05**	**0.025**	**$ 3,130.12**	**$ 169.03**	**$ 78.89**
m³	**Arena cribada**	**0.14**	**0.065**	**$ 74,278.70**	**$ 10,399.02**	**$ 4,853.45**
m³	**Agregado grueso**	**0.21**	**0.098**	**$ 53,768.19**	**$ 11,291.32**	**$ 5,269.91**
kg	**Cemento gris en sacos**	**90.32**	**100.274**	**$ 461.18**	**$ 41,653.78**	**$ 46,244.52**
l	Agente filmógeno	0.15	0.15	$ 3,258.87	$ 488.83	$ 488.83
		Subtotal de materiales:			**$ 119,612.97**	**$ 112,546.60**
	Equipo					
h	Concretera eléctrica	0.151	0.151	$ 8,427.18	$ 1,272.50	$ 1,272.50
		Subtotal equipo:			**$ 1,272.50**	**$ 1,272.50**
	Mano de obra					
h	Oficial 1ª encofrador.	0.564	0.564	$ 24,323.89	$ 13,718.67	$ 13,718.67
h	Ayudante encofrador.	0.564	0.564	$ 18,180.17	$ 10,253.62	$ 10,253.62
h	Oficial 1ª armador de concreto.	0.332	0.332	$ 24,323.89	$ 8,075.53	$ 8,075.53

Unidad	*Descripción*	*Cantidad (sin fibra)*	*Cantidad (fibra)*	*Valor unitario*	*Valor (sin fibra) parcial*	*Valor (fibra) parcial*
h	Ayudante armador de concreto.	0.308	0.308	$ 18,180.17	$ 5,599.49	$ 5,599.49
h	Peón de obra blanca.	0.284	0.284	$ 16,838.53	$ 4,782.14	$ 4,782.14
h	Ayudante entendido.	0.298	0.298	$ 17,114.99	$ 5,100.27	$ 5,100.27
h	Oficial 1ª cementador de concreto armado.	0.06	0.06	$ 24,323.89	$ 1,459.43	$ 1,459.43
h	Ayudante cementador de concreto armado.	0.244	0.244	$ 18,180.17	$ 4,435.96	$ 4,435.96
	Subtotal mano de obra:				**$ 53,425.12**	**$ 53,425.12**
	Herramienta menor					
%	Herramienta menor	2	2	$ 174,309.20	$ 3,486.18	$ 3,486.18
	Costos directos (1+2+3+4):				$ 177,796.77	$ 170,730.40
	AHORRO TOTAL m²					$ 7,066.37
	CANTIDAD TOTAL DE FIBRA [m³] USADA POR m² DE LOSA					0.000607

Nota. Adaptado de © CYPE Ingenieros, S.A (2023)

Cómo se puede apreciar, para la construcción de 1 m³ de losa maciza en concreto, empleando el diseño de mezcla descrito en la presente investigación y utilizando aproximadamente u 0.13% de fibra en el diseño, se obtuvo una disminución del precio total en $7.066.37 COP por cada metro cuadrado de losa. Si se tiene en cuenta que la adición de fibras no modifica la resistencia a la compresión del concreto, sería posible desarrollar columnas y placas para edificaciones de cualquier tipo, sin embargo, es importante continuar el estudio para considerar otras variables, como el envejecimiento, durabilidad y el periodo de fraguado. Se obtiene un resultado positivo en la reducción del precio del concreto y adicionalmente las consideraciones ambientales como las expuestas por Gil *et al.* (2021), sugieren un efecto positivo en el ciclo de vida del material al utilizar fibras en el proceso productivo, dado que "los compuestos de fibra de coco muestran una menor energía incorporada y emisiones de carbono con potencial de reducción de entre el 9.15 % y el 13,35 % y entre el 9.61 % y el 13.94 %, respectivamente" (2021, p. 69) . Lo que brinda un valor agregado al uso de materia prima vegetal en compuestos de concreto.

4. Conclusiones

Respecto a los ensayos realizados en laboratorio y en concordancia con el primer objetivo de la investigación, en donde se buscaba establecer y evaluar las propiedades y el comportamiento mecánico de las fibras por medio de los ensayos en laboratorio; se encontró que los protocolos y procedimientos especificados para realizar los análisis experimentales, fueron los adecuados y permitieron tener un diseño de mezcla óptimo que genero resultados positivos, además se obtuvieron resultados químicos concluyentes que permitieron ofrecer más información sobre los componentes químicos presentes en la matriz de fibra vegetal para tres especies definidas como fueron *guadua angustifolia, furcraea andina* y *cocos nucifera*. Dentro de los resultados concluyentes, se evidenció potencial en el uso de fique como fibra de refuerzo en la matriz cementante, se teoriza que la composición elemental de la matriz de fibra en el fique contiene elementos más influyentes en el concreto y por consiguiente con una respuesta de resistencia mecánica a la compresión significativamente diferente en comparación con las otras dos fibras, sin embargo se requieren mayores estudios que confirmen la abundancia de los elementos químicos influyentes en la fibra.

Continuando con el objetivo inicial, se establece que la distribución y dispersión de las fibras en la matriz del concreto puede generar una mayor influencia en la resistencia mecánica, del mismo modo como lo mencionó Pons-Ribera *et al.* (2023), en su investigación. Estos fenómenos de dispersión de fibras pueden generar una gran influencia en las interacciones con el concreto, principalmente debido al aumento en el área de superficie de contacto entre el tejido de la fibra y la matriz cementante del concreto. En consecuencia y por las menciones anteriores se da respuesta al primer objetivo específico de la investigación.

Con respecto al segundo objetivo desarrollado para definir la propuesta de mezcla en la fabricación de elementos prefabricados y teniendo en cuenta los porcentajes en peso, tanto de la fibra natural como del concreto, se concluye lo siguiente: Generando una matriz comparativa para los ensayos de laboratorio de las fibras, siguiendo las especificaciones técnicas; se logra seleccionar un adecuado porcentaje de fibra para la fabricación de las probetas de concreto, fue posible realizar un diseño de mezcla, que superó las expectativas en desempeño mecánico, además se consiguió demostrar con éxito que la mezcla desarrollada tiene una viabilidad apta para la construcción de placas de concreto prefabricado. Sin embargo, aún se hace necesario estudiar y revisar el desempeño a largo plazo de los concretos reforzados con fibra vegetal debido a que estudios recientes han mostrado la necesidad de revisar a mayor detalle la durabilidad de los concretos reforzados con fibra debido a la naturaleza de los compuestos orgánicos y su alta reactividad con microorganismos y efectos ambientales (Laverde, Marin, Berjumea, & Rincón-Ortiz, 2022).

Las pruebas de laboratorio permitieron comprender, que el diseño de mezcla implementado para producir el concreto reforzado con fibra vegetal, tiene las dosificaciones óptimas para resistir los ensayos mecánicos sin disminuir la resistencia de diseño que en este caso fue de 3000 PSI; mostrando que un porcentaje óptimo de fibra de 0.13% en relación con la mezcla, permite aumentar la resistencia del concreto, especialmente cuando se agregan fibras de *furcraea andina*. De esta manera se establecen las descripciones y respuestas correspondientes al segundo objetivo específico.

Por último y como respuesta al planteamiento del tercer objetivo, en donde se busca evaluar financieramente los costos y la inversión de los componentes de la mezcla propuesta, se

puede concluir que, el análisis económico permitió evaluar la viabilidad de la implementación de fibras vegetales como aditivos en la mezcla y que además generan un impacto positivo en el desempeño mecánico. La matriz de costos realizada para el precio unitario de 1 m^3 de placa de concreto logró evidenciar una disminución de $ 7000 COP en el costo por metro cuadrado de placa de concreto, según indicadores de precio ofrecidos por el software online "generadordeprecios.com" (© CYPE Ingenieros, S.A., 2023) para la fecha del 21 de agosto de 2023. Lo anterior representa un ahorro considerable, especialmente si se tiene en cuenta que el DANE reportó que para junio del año 2023 la producción de concreto premezclado fue de 579 miles de metros cúbicos (DANE, 2023). Y aunque no se efectuaron relaciones que analizaran el transporte, consecución y triturado de las fibras, se concluye que la baja proporción de fibra en la mezcla y su procedencia indican que no se incurrirán en costos excesivos que puedan perjudicar negativamente la inversión en los concretos reforzados con fibra.

4.1 Hallazgos en la muestra

a) En todos los casos los cilindros reforzados con fibra de fique exhibieron una resistencia ligeramente mayor, en comparación con las otras fibras, y en la respuesta de resistencia máxima a los 28 días, se obtuvo una resistencia a la compresión promedio de 3,025.7 Psi, lo cual fue un 2.23% mayor en comparación con la resistencia de la probeta control que fue de 2,958.2 Psi, la diferencia significativa del estadístico de prueba mostró que efectivamente los grupos con fibras vegetales tienen una resistencia variada en todos los intervalos de tiempo estudiados con un valor ($p < 0.05$).
b) Los análisis químicos ofrecieron información sobre como la concentración elemental parece tener una influencia positiva en la matriz de concreto, la presencia de los cristales

de calcio con una mayor proporción en la fibra de fique ofrece información base para estudiar las relaciones e interacciones microestructuradas de los compuestos propios de la planta.

c) Se encontró que en comparación con las otras muestras analizadas en SEM – EDX y con la referencia bibliográfica de análisis químico del fique (Minambiente, 2019) la fibra de fique se encuentra en capacidad de almacenar mico acumulaciones de filamentos de Calcio lo cual puede influir de forma positiva en el comportamiento mecánico de las probetas de concreto dada la naturaleza del material y su composición química característica que incluye Silicio y Calcio.
d) La morfología de la planta permitió encontrar cavidades y rugosidades perfectas para la formación de anclajes con los cristales de calcio presentes en el concreto, así como lo menciona (Pons-Ribera *et al.* 2023), también se encontraron diferencias en la estructura de la fibra, caracterizando las fibras como macro fibras y microfibras.

Se hacen necesarios más estudios que revisen la forma en la que la matriz de concreto interactúa con la fibra y como las conformaciones irregulares de los compuestos del concreto pueden generar anclajes en las irregularidades superficiales del tejido vegetal de la fibra.

También es posible concluir que los efectos ambientales se ven reflejados en la disminución del uso de materia prima convencional, además, estudios recientes han evidenciado la capacidad de organismos vegetales para propagarse a través de concretos porosos (Hitti, Chapelat, Wu, & Lefsrud, 2021), lo que permitirá llevar las tecnologías de refuerzo con fibras vegetales a un nuevo concepto, para ello se sugiere revisar y estudiar a mayor detalle las

interacciones que podría tener el concreto reforzado con fibras vegetales, con la ecología micro ecosistémica que se podría desarrollar en un modelo de concreto poroso reforzado con fibras.

Si bien, no se establecieron las propiedades mecánicas de las fibras a cabalidad, debido a la falta de ensayos mecánicos únicamente para la fibra, si se logró realizar una caracterización superficial y una descripción morfológica de las fibras. Sin embargo, se hace necesaria la realización de más ensayos que muestren las propiedades mecánicas de las fibras en lo referente a la resistencia de esfuerzos mecánicos como tensión y tracción, con el fin de mejorar la comprensión de los anclajes realizados entre la fibra y la matriz de concreto. Por otro lado, sería relevante para investigaciones futuras, complementar los resultados hallados en la investigación de Bustos *et al.* (2020), dado que las caracterizaciones mecánicas a escala nanométrica usando pruebas de identación instrumentada, pueden mejorar la comprensión de los efectos de las micro fibras en interacción con los componentes del concreto y su conformación estructural. Se sugiere en investigaciones futuras realizar un comparativo entre propiedades mecánicas de la fibra a nano escala, a macro escala y *a posteriori* de los ensayos en la matriz de concreto.

La posibilidad de evaluar la interacción orgánica de las fibras con concretos porosos, permite abrir una nueva oportunidad comercial para concretos reforzados con fibra, que a su vez ofrezcan un valor agregado en la propagación de organismos benéficos como las plantas.

Es importante complementar los estudios elementales que identifiquen como la acumulación química de compuestos tales como el Calcio, el Silicio o el Potasio influyen en el aumento de la resistencia a la compresión del concreto. Por lo tanto, se hacen necesarios más estudios que ayuden a que investigaciones futuras estudien la forma en la que las variaciones porcentuales en el contenido de las diferentes fibras pueden contribuir a mejorar la estabilidad y

la respuesta mecánica frente a esfuerzos de compresión. Además de evaluar otro tipo de esfuerzos, como la tracción y la flexión.

Referencias

© CYPE Ingenieros, S.A. (21 de 08 de 2023). *Colombia Generador de Precios*. Recuperado el 21 de 08 de 2023, de Colombia Generador de Precios - Revisión Independiente IECA: http://www.colombia.generadordeprecios.info/obra_nueva/Estructuras/Concreto_armado/Losas_macizas/Losa_maciza.html

360 en concreto. (2023). *Grupo Argos*. Obtenido de Argos - 360 en Concreto: https://360enconcreto.com/blog/detalle/que-es-el-concreto/

Acevedo, J., & Bojórquez, I. (2012). Uso de las fibras orgánicas en paneles ligeros. *Libro de ponencias del X Simposio Internacional del Ferrocemento y Compuestos Delgados de Cemento Reforzado*. (https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/32559181/1-MEMORIAS_FERRO10_1-137PAG.pdf?1387104251=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3D1_MEMORIAS_FERRO10_1_137PAG.pdf&Expires=1615294216&Signature=RL8GhU6RxKwepaRmCLkdUAxI8oFY1VZngTn2NIkB8ntMwvPz6H6sv, Ed.) Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba (UNAICC).

Ahmad, J., Majdi, A., Farouk, A., Ben, K., & El-Shorbagy, M. (2022). Concrete Reinforced with Sisal Fibers (SSF): Overview of Mechanical and Physical Properties. *Crystals, 12(7)*, 952.

AIH. (2013). *Políticas alternativas de vivienda en América Latina y el Caribe.* Buenos Aires, Argentina: Cooperativa Chilavert.

AIS. (2010). *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR-10).* Bogota Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.

Alberts, B. (2015). *Molecular Biology of the Cell. 6th Edition* . New York: Garland Science, Taylor and Francis Group.

Alcaldía de Tauramena. (1 de Julio de 2023). *Tauramena Casanare*. Recuperado el 03 de Julio de 2023, de Tauramena Casanare: https://www.tauramena-casanare.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx

Álvarez. (2014). Desempeño mecánico de materiales compuestos Termoplásticos reforzados con fibras naturales para Roto moldeo. *(Tesis. Universidad Autónoma de Occidente)*. https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/6894/T05032.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Alves-Fidelis, M., Castro-Pereira, T., Martins-Gomes, O., Silva, F. d., & Toledo-Filho, R. (2013). The effect of fiber morphology on the tensile strength of natural fibers. *Journal of Materials Research and Technology, 2(2)*, 149-157, https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.02.003.

Anggraini, V., Asadi, A., Huat, B., & Nahazanan, H. (2015). Effects of coir fibers on tensile and compressive strength of lime treated soft soil. *Measurement, 59*, 372-381.

Balzarini et al, 2. (2008). *Infostat: Manual del Usuario.* Córdoba, Argentina: Editorial Brujas.

Barba, A. V. (2018). Design aspects and thermo-acoustic performance of precast concrete façades for industrial buildings. *DYNA, 93*(2), 145-149. doi:http://dx.doi.org/10.6036/8486

Basaldúa, F. (2016). Fabricación de materiales compuestos reforzados con fibras naturales mediante el método de prensado en frío para aplicaciones aeronáuticas. *(Tesis Maestria. Universidad Autónoma de Nuevo León)*. http://eprints.uanl.mx/14159/.

Beer, F., Johnston, R., DeWolf, J., & Mazurek, D. (2017). *Mecánica de Materiales.* Bogotá, Colombia: McGrawHill.

Beltrán, G. E. (2015). Evaluación del comportamiento mecánico de un concreto reforzado con fibras textiles de vidrio sometido a cargas de flexión para su uso en la elaboración de elementos urbanísticos prefabricados. *Tekhnê, 10*(1), 5-18.

Betancourt, P. (2014). Fabricación de paneles de papel reciclado para el diseño parcial o total de mobiliario doméstico en el Estado de México. *(Tesis Maestria. Universidad Autónoma del Estado de México)* . http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/79941/2014%20pedro%20tesis%20MAESTRIA%2007oct14.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Bienfait, B., & Ertl, P. (2013). JSME: un editor de moléculas gratuito en JavaScript. *Journal of Cheminformatics, 5(24)*, https://doi.org/10.1186/1758-2946-5-24, https://biomodel.uah.es/en/DIY/JSME/draw.en.htm.

BRUKER. (2023). Periodic Table. *Periodic Table of Elements and X-ray Energies*. Berlin, Alemania: https://www.bruker.com/content/bruker/int/en/products-and-solutions/elemental-analyzers/handheld-xrf-spectrometers.html.

Buchanan, B. B., Gruissem, W., & Jones, R. L. (2015). *Biochemistry and Molecular Biology of Plants, 2nd Edition.* Oxford, United Kingdom: American Society of Plan Biologists, WILEY Blackbell, John Wiley & Sons.

Bustos. (2019). Physical and Nanomechanical Characterization of Fique Fiber (Furcraea gigantea) by Atomic Force Microscopy-AFM. *Journal of Engineering and Applied Sciences, 15*(11), 2452-2456. Obtenido de http://docsdrive.com/pdfs/medwelljournals/jeasci/2020/2452-2456.pdf

Bustos, A. C. (2018). Influence of fibers addittion on the properties of hydraulic lime based mortars. *DYNA*, 228-232. doi: https://doi.org/10.6036/8495

Bustos, H., Espitia, M., Corredor, D., Rodríguez, N., Espitia, G., Benavides, A., . . . Gil-Herrera, R. (2020). Physical and Nanomechanical Characterization of Fique Fiber (Furcraea gigantea) by Atomic. *Journal of Engineering and Applied Sciences, 15(11)*, 2452-2456.

Cáder, G., & Oliva, C. (Septiembre de 2012). ADAPTACIÓN DEL MÉTODO DE DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO SEGÚN ACI 211.1 UTILIZANDO LOS TIPOS DE CEMENTO ASTM C-1157 TIPO GU Y ASTM C-1157 TIPO HE. *ADAPTACIÓN DEL MÉTODO DE DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO SEGÚN ACI 211.1 UTILIZANDO LOS TIPOS DE CEMENTO ASTM C-1157 TIPO GU Y ASTM C-1157 TIPO HE*. Santa Ana, Santa Ana, El Salvador: https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/0749bbc3-3b65-48fa-831d-b1cec418f228/content.

Camargo, N. (2017). LA CENIZA DE CASCARILLA DEL ARROZ COMO APORTE A LA RESISTENCIA DEL CONCRETO HIDRÁULICO. *Revista Orinoquía, Ciencia y Sociedad*, 33-38, http://investigacion.unitropico.edu.co/wp-content/uploads/2017/07/CUERPO-REVISTA-33-38.pdf.

Carmiol, V. (2016). Guadua bamboo In pedestrian bridges. *Revista Tecnología En Marcha, 29*(5), 3-13. Obtenido de https://doi.org/10.18845/tm.v29i5.2513

Castañeda et al, 2. (2022). Guía de materiales para la construcción sostenible / Minambiente. *Guía de materiales para la construcción sostenible / Minambiente*. Bogotá D.C., Bogotá D.C., Colombia: https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2023/06/Guia-de-materiales-para-la-construccion-sostenible.pdf.

Castillo et al. (2020). Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Foamed Concrete. *MDPI Journal Materials, 13(14)*. https://www.mdpi.com/1996-1944/13/14/3060.

CEMEX. (2023). *Cemex Mexico*. Recuperado el 1 de 08 de 2023, de https://www.cemexmexico.com/quizzes-full-view/-/asset_publisher/uG2W76KBBu5B/content/resistencia-pruebas-y-resultados

Chavéz & Manzanares. (2012). El manejo de los residuos sólidos municipales: un enfoque antropológico. El caso de San Luis Potosí, México. *Estudios sociales, 20*(39), 236 -261.

Chirivi, E., Quiroz, Ó., & Rodriguez, D. (2011). *LA VIVIENDA SOCIAL EN AMERICA LATINA: Una revisión de políticas para atender las necesidades habitacionales de la región.* Bogotá, Colombia: Cámara Colombiana de la Construcción - CAMACOL, No. 30.

CMGRD - Tauramena. (2012). *PLAN MUNICIPAL PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO.* Tauramena, Casanare, https://www.tauramena-casanare.gov.co/Transparencia/PlaneacionGestionyControl/Plan%20Municipal%20para%20la%20Gesti%C3%B3n%20del%20Riesgo%20del%20Municipio%20de%20Taurame

na%202011.pdf: Consejo Municipal De Gestión Del Riesgo de Desastres –CMGRD-Tauramena.

Congreso de Colombia. (17 de Mayo de 2022). LEY N° 2206. *LEY N° 2206*. Bogotá, Bogotá D.C., Colombia: https://minvivienda.gov.co/sites/default/files/normativa/ley-2206-de-2022.pdf.

Constitución Política de Colombia. (7 de Julio de 1991). Constitución Política de Colombia de 1991. *Constitución Política de Colombia de 1991*. Bogotá, Bogotá D.C., Colombia: Temis.

Cooper, G., & Hausman, R. (2017). *La Célula, 7 edición.* Madrid, España: MARBÁN.

Courdet, L. (2020). *Influencia del tratamiento superficial de las fibras de fique en las propiedades mecánicas del compuesto fibra-matriz cementante*. [Tesis maestria, Universidad Nacional de Colombia]: https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/78742/Tesis%20Loic%20Coudert%20Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Da Silva, E. M. (2017). A new treatment for coconut fibers to improve the properties of cement-based composites – Combined effect of natural latex/pozzolanic materials. *Sustainable Materials and Technologies, 12*, 44-51. Recuperado el 11 de agosto de 2020, de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214993716300021?via%3Dihub

Dagnino, J. (2014). TIPOS DE ESTUDIOS. *Revista Chilena de Anestesia, 43*, 104-108, https://revistachilenadeanestesia.cl/PII/revchilanestv43n02.05.pdf.

DANE. (2023). *Estadísticas de Concreto Premezclado (EC) - Boletín técnico.* Bogotá D.C.: Departamento Administrativo Nacional de Estadística, https://www.dane.gov.co/files/operaciones/EC/bol-EC-jun2023.pdf.

Enviromental Consultores. (2007). Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca del rio Cusiana. *Documentos Institucionales Corpo Boyacá*. https://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2015/11/informe-diagnostico-rio-cusian.pdf.

EPM. (11 de Noviembre de 2016). NORMA DE CONSTRUCCIÓN DE CONCRETOS. *NORMA DE CONSTRUCCIÓN DE CONCRETOS*. Medellín, Antioquia, Colombia: EMPRESAS P´BLICAS DE MEDELLÍN, https://www.epm.com.co/site/Portals/3/documentos/2017/NC-MN-OC07-01%20Concretos.pdf.

Estupiñan, E., & Sánchez, W. (2019). *Plan de empresa para la creación de "Fibras de Coco", empresa dedicada a la producción y comercialización de fibras y sustrato a partir de la estopa de coco*. [Tesis, Universidad Autónoma de Occidente, Colombia]:

https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/10996/T08570.pdf;jsessionid=5746A1F669D9FEEB5BE265EF7E484AA0?sequence=5.

FAO. (2013). *Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina.* Oficina Regional para América Latina y el Caribe. Santiago de Chile: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado el 01 de octubre de 2020, de http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf

Fernandes, P., De Freitas, M., Hilário, M., Coelho de Carvalho, K., Milanese, A., Cornelis, H., & Mulinari, D. (2015). egetal fibers in polymeric composites: a review. *Polímeros, 25(1)*, 9-22, https://scielo.br/j/po/a/fMdzmd8wz3RJypPD4xW9jww/?format=pdf&lang=en.

Ferreira, T. I. (2010). Elaboración y Evaluación de Placas Prefabricadas de Concreto Aligerado Con Arcilla Expandida para Uso Como Coberturas de Estructuras Pecuarias. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 5651-5660. Recuperado el 19 de julio de 2020, de https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=1799/179918602018

Fundación para la Orientación Familiar FUNOF y Artesanias de Colombia S.A. (2014). Caracterización del fique. *Proyecto Identificación de necesidades y fortalecimiento de la actividad artesanal en el Departamento del Cauca*. https://repositorio.artesaniasdecolombia.com.co/bitstream/001/4859/13/INST-D%202015.%20304.%2011.pdf.

García, B., Preciado, C., Bedoya, M., & Medoza, O. (2019). Mechanical Characterization of Angustifolia Kunth and Rayada Amarilla. *MATEC Web of Conferences , 303, 03002*, 1-6, https://doi.org/10.1051/matecconf/201930303002.

Garcia, T. (2016). *Breve Historia de la Arquitectura.*

Gil, H., Zuleta, A., & Reyes, D. (2021). Mechanical properties and sustainability aspects of coconut fiber modified concrete. *Scientia Et Technica, 26(1)*, 64-71, https://doi.org//10.22517/23447214.22901.

Glauert, A. (1975). *Fixation, dehydration and Embedding of Biological Specimens.* Amsterdam: North Holland Publishing Company.

Gómez, J. (2009). *Diseño de un material compuesto con fibra natural para sustituir la utilización de la fibra de vidrio*. [Tesis, Eafit, Colombia]: https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/297/JoseSantiago_GomezP._2009.pdf;jsessionid=B9E7F654AA6481C121FC4C21C8EC11CD?sequence=1.

Grabber, J., Panciera, M., & Hatfield, R. (2002). Chemical composition and enzymatic degradability of xylem and nonxylem walls isolated from alfalfa internodes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 50(9)*, 2595-2600, https://doi.org/10.1021/jf011598c.

Groover, M. (1997). *Fundamentos de Manufactura Moderna Materiales, procesos y sistemas.* México: Prentice Hall.

Guancha, M. G. (2020). Valorization of Colombian fique (Furcraea bedinghausii) for production of cellulose nanofibers and its application in hydrogels. *Scientific Reports, 10*(11637). Obtenido de Guancha-Chalapud, M.A., Gálvez, J., Serna-Cock, L. et al. Valorization of Colombian fique (Furcraea bedinghausii) for production of cellulose nahttps://doi.org/10.1038/s41598-020-68368-6

Hitti, Y., Chapelat, J., Wu, B.-S., & Lefsrud, M. (2021). Design and Testing of Bioreceptive Porous Concrete: A New Substrate for Soilless Plant Growth. *ACS Agric. Sci. Technol, 1(4),* 285-293, https://doi.org/10.1021/acsagscitech.0c00065.

ICA. (2023). Censo Nacional Bovino 2023. *Instituto Colombiano Agropecuario - Censo Nacional Bovino 2023*. Bogotá D. C., Bogotá D.C., Colombia: https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018. Obtenido de Sitio Web del Instituto Colombiano Agropecua.

ICONTEC. (15 de Enero de 1992). INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL ASENTAMIENTO DEL CONCRETO. *INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA. MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL ASENTAMIENTO DEL CONCRETO.* Bogotá D.C., Bogotá D.C., Colombia: I.C.S: 91.100.30.

ICONTEC. (21 de Junio de 2000). CONCRETOS. ESPECIFICACIONES DE LOS AGREGADOS PARA CONCRETO. *CONCRETOS. ESPECIFICACIONES DE LOS AGREGADOS PARA CONCRETO*. Bogotá D.C., Bogotá D.C., Colombia: I.C.S.: 91.100.20.

ICONTEC. (24 de Octubre de 2007). CONCRETOS REFORZADOS CON FIBRA. *CONCRETOS REFORZADOS CON FIBRA*. Bogotá D.C., Bogotá D.C., Colombia: I.C.S.: 91.100.30.

ICONTEC. (16 de Diciembre de 2008). CONCRETOS. ADITIVOS QUÍMICOS PARA CONCRETO. *CONCRETOS. ADITIVOS QUÍMICOS PARA CONCRETO*. Bogotá D.C., Bogotá D.C., Colombia: I.C.S.: 91.100.30.

ICONTEC. (17 de Febrero de 2010). Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. *Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto*. Bogotá D.C., Bogotá D.C., Colombia: I.C.S.: 91.100.30.

IDEAM. (2011). *CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA Y METEOROLÓGICA DEL CENTRO Y ORIENTE DEL PAÍS (BOYACÁ, CUNDINAMARCA, META Y CASANARE).* Bogotá

D.C., https://www.car.gov.co/uploads/files/5b8d3f574ee71.pdf: Subdirección Meteorología IDEAM – COLOMBIA.

Infostat. (2020). InfoStat versión 2020. *InfoStat*. Córdoba , Argentina: Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba.

INGEGEEK. (25 de Junio de 2020). *INGEGEEK*. Recuperado el 07 de Julio de 2023, de INGEGEEK - BLOGS: https://www.ingegeek.site/2020/06/25/por-que-el-concreto-alcanza-a-los-28-dias-su-maxima-resistencia-%F0%9F%A4%94/

Izquierdo, I. S. (2018). Propiedades físicas y mecánicas del hormigón usando polvo residual de desechos orgánicos como reemplazo parcial del cemento. *Revista ingeniería de construcción, 33*(3), 229-240. Obtenido de https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732018000300229

Jarvis, M. (2017). Structure of native cellulose microfibrils, the starting point for nanocellulose manufacture. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences, 376(2112) 20170045.*, 1-13, https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0045.

John, M., Cincotto, M., Sjöström, C., Agopyan, V., & Oliveira, C. (2005). Durability of slag mortar reinforced with coconut fibre. *Cement and Concrete Composites, 27(5)*, 565-574.

Karp, G. (1996). Técnicas en Biología Celular y Molecular. En G. Karp, *Biología Celular y Molecular* (pág. 713). Delegación Cuauhtémoc: McGrawHill, Interamericana.

Keller, B. (1992). Structural Cell Wall Proteins. *Plant Physiology, 101*, 1127 – 1130. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC160629/pdf/1011127.pdf.

Kesikidou, F. S. (2019). Natural fiber-reinforced mortars. *Journal of Building Engineering, 25*, 100786. Obtenido de https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100786.

Khalid, M., Al Rashid, A., Arif, Z., Ahmed, W., Arshad, H., & Zaidi, A. (2021). Natural fiber reinforced composites: Sustainable materials for emerging applications. *Results in Engineering, 11*, 100263.

Khan, M. A. (2018). Effect of super plasticizer on the properties of medium strength concrete prepared with coconut fiber. *Construction and Building Materials, 182*, 703-715. Obtenido de https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.150

Last, J. (2004). *Epidemiology, 3rd edn.* Philadelphia: Elsevier Saunders.

Laverde, V., Marin, A., Berjumea, J., & Rincón-Ortiz, M. (2022). Use of vegetable fibers as reinforcements in cement-matrix composite materials: A review. *Construction and Building Materials, 340, 127729*, 1-15, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127729.

Luna, P., Lizarazo-Marriaga, J., Luna, L., Ortiz, J., & Mayorga, D. (2019). Mechanical behavior of natural fiber textile reinforced mortar sheets. *Sustain. Constr.Mater. Technol, 2(1),* 1 - 13. http://www.claisse.info/2019%20papers/5119.pdf.

Macías, J., & Artola, M. (2012). La experiencia cubana con el empleo del fibrequén. *Libro de ponenecias, FERRO 10. X Simposio Internacional del Ferrocemento y Compuestos Delgados de Cemento Reforzado, https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/32559181/1-MEMORIAS_FERRO10_1-137PAG.pdf?1387104251=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3D1_MEMORIAS_FERRO10_1_137PAG.pdf&Expires=1615294216&Signature=RL8GhU6RxKwepaRmCLkdUAxI8oFY1VZngTn2NIkB8ntMwvPz6H6sv*. (https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/32559181/1-MEMORIAS_FERRO10_1-137PAG.pdf?1387104251=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3D1_MEMORIAS_FERRO10_1_137PAG.pdf&Expires=1615294216&Signature=RL8GhU6RxKwepaRmCLkdUAxI8oFY1VZngTn2NIkB8ntMwvPz6H6sv, Ed.) Unión Nacional de Arquitectos e Ingenieros de la Construcción de Cuba (UNAICC).

Mader, S., & Windelspecht, M. (2019). *Biología, 13th Edición.* Mexico: McGrawHill Education Holdings, LLC.

Martínez, G., Martínez, M., & Martínez, E. (2013). Polymer Concrete Reinforced with Luffa Fiber. *Información tecnológica, 24*(4), 67-74. Obtenido de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642013000400008&lng=en&nrm=iso&tlng=en

Martínez, J., & Poveda, J. (2018). *Evaluación de la utilización de fibras de guadua como refuerzo del concreto para minimizar elproceso de Fisuración*. [Tesis Tecnólogo, Universidad La Gran Colombia]: https://repository.ugc.edu.co/bitstream/handle/11396/3378/Utilizacion_fibrasguadua_concretofisuracion.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Maya-Echeverry, J., Camargo-García, J., & Marino-Mosquera, O. (2017). Características de los culmos de guadua de acuerdo al sitio y su estado de madurez. *Colombia Forestal, 20(2),* 171-180, http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-07392017000200006.

Mendoza, C. A., Torres, D. A., Campo, R. A., Jiménez, J. E., Contreras, Á. S., & Ballesteros, C. A. (02 de 03 de 2019). COMPRESIÓN DE PROBETAS DE CONCRETO. Cartagena de Indias, Bolívar, Colombia: UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLÍVAR, https://www.researchgate.net/publication/331473896_Ensayo_compresion_de_cilindros_de_concreto.

Minambiente. (2019). Cartilla técnica del cultivo de fique. *Cartilla técnica del cultivo de fique*. Bogotá D.C., Bogotá D.C., Colombia: WPDG Impresiones, Ministerio de Ambiente y

Desarrollo Sostenible, Fenalfique, Cadena Nacional de Fique y su agroindustria, https://sioc.minagricultura.gov.co/Fique/Normatividad/2019-06-30%20Cartilla%20T%C3%A9cnica%20del%20Cultivo%20del%20Fique.pdf.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (Julio de 2012). Criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana / Unión Temporal Construcción Sostenible S.A y Fundación FIDHAP (Consultor). *Criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana / Unión Temporal Construcción Sostenible S.A y Fundación FIDHAP (Consultor).* Bogotá, Bogotá D.C., Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 200 p, https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Cartilla_Criterios_Ambientales_Diseno_y_Construccion_de_Vivienda_Urbana.pdf.

Mora, J. (17 de 05 de 2017). ANÁLISIS MÉCANICO DE UN CONCRETO CON ADICIÓN DEL 2 % DE FIBRA NATURAL DE CÁÑAMO. *ANÁLISIS MÉCANICO DE UN CONCRETO CON ADICIÓN DEL 2 % DE FIBRA NATURAL DE CÁÑAMO*. Bogotá, Bogotá D. C., Colombia: UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA, Creative Commons, https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/0749bbc3-3b65-48fa-831d-b1cec418f228/content.

Mora, L., Älvarez, E., & Hernandez, J. (2009). Determinación de propiedades mecánicas de las fibras de Bambusa Vulgaris a utilizar en tableros prensados. *Revista Ingeniería de Construcción, 24*(2).

Moreno, L. E. (2007). Estudio de las características físicas de haces de fibra de guadua angustifolia. *Scientia et technica, 1*(34), 613-617. Obtenido de http://dx.doi.org/10.22517/23447214.5719

Moussu, S., & Ingram, G. (2023). The Cell Surface. *The cell Surface, 9, 100094.*, 1-3. https://doi.org/10.1016/j.tcsw.2023.100094.

Moutinho, H. (2023). *NREL Transforming Energy*. Recuperado el 08 de Julio de 2023, de Sitio web de NREL Transforming Energy - Materials Science, Scanning Electron Microscopy: https://www.nrel.gov/materials-science/scanning-electron.html

Mulenga, T., Ude, A., & Vivekanandhan, C. (2021). Techniques for Modelling and Optimizing the Mechanical Properties of Natural Fiber Composites: A Review. *Fibers, 9(1),* 6.

Muñoz. (2014). Fibra de fique una alternativa para plásticos reforzados. influencia de la modificación de la superficie. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, 12*(2), 60-70. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-35612014000200007&lng=en&tlng=en.

Muñoz, J., Camargo, J., & Romero, C. (2017). Beneficios de los bosques de guadua como una aproximación a la valoración de servicios ecosistémicos desde la “Jerarquización y Calificación. *Gestión y Ambiente, 20(2)*, 222 - 231. Dialnet-BeneficiosDeLosBosquesDeGuaduaComoUnaAproximacionA-6687516.pdf.

Myburg, A., Lev-Yadun, S., & Sederoff, R. (2013). *Xylem Structure and Function in Encyclopedia of Life Sciences.* John Wiley & Sons, Ltd (Ed.). https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0001302.pub2.

Nanakoudis, A. (28 de Noviembre de 2019). *Thermo Fisher Scientific - EDX Analysis with SEM: How Does it Work?* Recuperado el 9 de Julio de 2023, de Sitio web de Thermo Fisher Scientific: https://www.thermofisher.com/blog/materials/edx-analysis-with-sem-how-does-it-work/

NanoPhysics. (2023). *NanoPhysics Analitical Services*. Recuperado el 9 de Julio de 2023, de Sitio web de NanoPhysics Analitical Services, SEM-EDX: https://www.nanophysics.nl/services-view/edx-analysis/

Nelder, J. (1994). The Statistics of Linear Models: Back to Basics. *Statistics and Computing, 4*, 243-256.

NRMCA. (2016). El concreto en la práctica. *Hormigón*, 1-2, National Ready Mixed Concrete Association - Federación Iberoamericana del Hormigón Premezclado, https://www.crmca.com/wp-content/uploads/2016/08/CIP-35-Spanish.pdf.

Olutoge, F., Ofuyatan, O., Rachael, A., & Opaluwa. (2015). Strength Characteristics of Concrete Reinforced With Sugar Cane Bagasse Fibre. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, 12(3)*, 68-71. http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol12-issue3/Version-3/K012336871.pdf.

ONU. (9 de Noviembre de 2022). *Noticias ONU: Mirada Global Historias Humanas.* Recuperado el 31 de Mayo de 2023, de Noticias ONU: Mirada Global Historias Humanas: https://news.un.org/es/story/2022/11/1516722#:~:text=Las%20emisiones%20de%20CO2%20relacionadas%20con%20la%20energ%C3%ADa%20en,del%20pico%20prepand%C3%A9mico%20de%202019.

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2010). El derecho a una vivienda adecuada. *Folleto Informativo 21*. https://www.ohchr.org/sites/default/files/Documents/Publications/FS21_rev_1_Housing_sp.pdf.

Organización de las naciones unidas ONU. (2018). Perspectiva de la de la Gestión de Residuos en América Latina y el Caribe. *ONU Medio Ambiente*.

https://www.magconsultorias.com/wp-content/uploads/2018/10/UN_Manejo-de-residuos-PREVIEW19-ilovepdf-compressed.pdf.

Osorio, J. (2023). *Grupo Argos*. Obtenido de Argos - 360 en Concreto: https://360enconcreto.com/blog/detalle/resistencia-mecanica-del-concreto-y-compresion/

Paricaguan, B. A. (2013). Effect of the coconut fibers on the flexural strenght of concrete mixtures. *DYNA, 88*(4), 424-432. Obtenido de http://dx.doi.org/10.6036/5646

Paricaguán, B., & Muñoz, J. (2019). Estudio de las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar. *INGENIERÍA UC, 26*(2), 202 - 212.

Pasang, P., Yunianta, Teti, E., & Harijono. (2018). STRUCTURE AND MORPHOLOGY OF CELLULOSE FROM COCONUT COIR FIBERS. *RJOAS, 8(80)*, 452-462, https://doi.org/10.18551/rjoas.2018-08.61.

Patil, S., & Mutkekar, S. (2014). Bamboo as a Cost Effective Building Material for Rural Construction. *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology, 1(6)*, 35-40.

Pérez, D. F. (2015). Evaluación de colorantes de origen vegetal y su aplicación en el tinturado de fibras naturales. *Biotecnología En El Sector Agropecuario Y Agroindustrial, 5*(2), 90-102. Obtenido de https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/662

Pinzón, S. (2013). Análisis de la resistencia a compresión y flexión del concreto modificado con fibra de fique. *Ingenierías, XVI(61)*, 27 - 37. https://docplayer.es/11217757-Analisis-de-la-resistencia-a-compresion-y-flexion-del-concreto-modificado-con-fibra-de-fique.html.

Pons-Ribera, S., Hamzaoui, R., Colin, J., Bessette, L., & Audouin, M. (2023). Valorization of Vegetal Fibers (Hemp, Flax, Miscanthus and Bamboo) in a Fiber Reinforced Screed (FRS) Formulation. *Materials, 16(6)*, 1-31, https://doi.org/10.3390/ma16062203.

Porras, C. S. (2019). Analysis of the viability of prefabricated elements for partitions manufactured with plaster and eps from waste recycling. *DYNA, 94*(4), 415-420. doi:http://dx.doi.org/10.6036/8984

Prasad, K. S. (2018). Effectiveness of the surface modified jute fibre as fibre reinforcement in controlling the physical and mechanical properties of concrete paver blocks. *Construction and Building Materials, 191*(10), 554-563. Obtenido de https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.045

Proaño, A. B. (2015). Desarrollo de un Material Compuesto de Matriz de Poliuretano. *Revista Politécnica EPN, 36*(2). Obtenido de http://revistapolitecnica.epn.edu.ec/images/revista/volumen36/tomo2/DesarrollodeunMaterialCompuestodeMatrizdePoliuretano.pdf

Puentes, L., & Joya, E. (2005). Reconocimiento de características, obtención y utilización de la estopa de coco. *Proyecto "Aprovechamiento artesanal del coco en el municipio de Tumaco – Nariño", Artesanías de Colombia S.A.* https://repositorio.artesaniasdecolombia.com.co/bitstream/001/3945/5/INST-D%202005.%2053.%201.pdf.

Quintero, S., & González, L. (2011). Uso de fibra de estopa de coco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. *Ingeniería y Desarrollo, 20*(20), 134 - 150.

Quintero-Dávila, M., Monteiro, S., & Colorado, H. (2018). Composites of Portland cement and fibers of Guadua angustifolia Kunth from Colombia. *Quintero-Dávila, M., Monteiro, S. N., & Colorado, H. A. (2018). Composites of Portland cement and fibers of Guadua angustifolia Kunth from Colombia. Journal of Composite Materials, 0 (0),* 1-10, 10.1177/0021998318792297.

Quintero-Dávila, M., Neves, S., & Colorado, H. (2019). Composites of Portland cement and fibers of Guadua angustifolia Kunth from Colombia. *ournal of Composite Materials, 53(7),* 883-892.

Quirós, L. (2018). *Estudio del comportamiento mecánico del mortero reforzado con fibra de coco y modificado con óxido de hierro*. [Tesis, Universidad Pontificia Bolivariana]: https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/4228/Estudio%20del%20comportamiento%20mec%C3%A1nico%20del%20mortero%20reforzado%20con%20fibra%20de%20coco%20y.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

R.P.A.V. , R. (2011). Mechanical properties of natural fiber reinforced polyester composites: Jowar, sisal and bamboo. En *Materials & Design* (págs. 4658-4663).

Renau-Piqueras, J., & Faura, M. (1994). Técnicas de microscopía, micromanipulación y análisis de imagen. II Reunión científica en biología celular y molecular, Méndez, J., Cerdán, E. & Rodríguez, A.(eds.). *Principios básicos del microscopio electrónico de barrido* (págs. 73-92). Coruña: Universidade da Coruña, Servicio de Publicacións, https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/9313/CC-011_art_5.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Rico, S., Farshidpour, R., & Tehrani, F. (2017). State-of-the-Art Report on Fiber-Reinforced Lightweight Aggregate Concrete Masonry. *Hindawi, Advances in Civil Engineering*, 9 pgs. https://doi.org/10.1155/2017/8078346.

Romero, G. (2003). M*icroscopía electrónica de transmisión (MET), Área biomédica: Teoría y práctica.* Bogotá D.C.: Academia colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales colección Julio Carrizosa Valenzuela, Ed 12.

Saavedra, J., & Ortega, C. (2020). *Comportamiento mecánico a la flexión y compresión del concreto reforzado con fibra de fique en vigas y cilindros.* [Tesis, Universidad Católica

de Colombia]: https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/25825/1/DOCUMENTO%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf.

Sampieri, R., Collado, C., & Baptista, P. (1997). *Diseños Diseñosexperimentales experimentales de investigación: de investigación: preexperimentos, experimentos preexperimentos, experimentos "verdaderos" y cuasiexperimentos. En: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.* naucalpan: MCGRAW-HILL, p.102.

Sánchez, R., & Navarro, J. B. (2020). *Cuaderno N° 270: Déficit habitacional en países de América Latina y el Caribe.* Lima, Perú: UNIÓN INTERAMERICANA PARA LA VIVIENDA.

Sarkar, A. (2013). Promoting Eco-innovations to Leverage Sustainable Development of Eco-industry and Green Growth. *European Journal of Sustainable Development, 2(1),*, 171.

Schröder, S. (2023). *Guadua Bamboo*. Recuperado el 3 de Julio de 2023, de Guadua Bamboo: https://www.guaduabambu.com.co/blog/las-mejores-condiciones-climaticas-para-el-cultivo-del-bambu-guadua#:~:text=Temperatura,-Culmo%20de%20Guadua&text=El%20l%C3%ADmite%20inferior%20de%20adaptabilidad,20%20y%2026%C2%B0C.

Searle, S. (1971). *Linear Models.* New York: John Wiley & Sons, Inc.

Searle, S. (1987). *Linear Models for Unbalanced Data.* New York: John Wiley & Sons, Inc.

Secretaría de Planeación. (2022). EL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE BOGOTÁ D.C. *EL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE BOGOTÁ D.C.* Bogotá, Bogotpa D.C., Colombia: https://www.sdp.gov.co/micrositios/consulta-pot/libro3.

Semana. (12 de Octubre de 2018). *Revista Semana*. Recuperado el 3 de Julio de 2023, de Revista Semana: https://www.semana.com/medio-ambiente/articulo/los-9-municipios-que-le-dijeron-no-a-la-mineria-usando-la-consulta-popular/41872/

SEMARNAT. (6 de Julio de 2006). CULTIVO DE PALMA de COCO Actividad en Zona federal. *Manifestación de Impacto Ambiental Modalidad Particular*. Manzanillo, Colima, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/col/estudios/2006/06CL2006AD020.pdf.

Servicio nacional de aprendizaje Colombia SENA. (2010). Sub sector Fiquero de Colombia. Estudio de Caracterización Ocupacional. . https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/handle/11404/2103/3023.pdf;jsessionid=C817D6FB25ACF375854F0AB45BAE6F11?sequence=1.

SIDENAL. (30 de 03 de 2015). FICHA TÉCNICA - BARRAS CORRUGADAS. *BARRAS CORRUGADAS*. Bogotá, Bogotá D.C., Colombia: https://www.sidenal.com.co/wp-content/uploads/2015/05/Ficha-Tecnica-Barras-Corrugadas.pdf.

Silva, O. (2023). *Grupo Argos*. Obtenido de Argos - 360 en concreto: https://360enconcreto.com/blog/detalle/generalidades-tipos-de-aditivos-para-el-concreto/

Šipetić-Grujičić, S. (2008). *Experimental Studies. In: Kirch, W. (eds) Encyclopedia of Public Health.* Dordrecht: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5614-7_1092.

Sorieul, M. D. (2016). Plant Fibre: Molecular Structure and Biomechanical Properties, of a Complex Living Material, Influencing Its Deconstruction towards a Biobased Composite. . *Materials (Basel, Switzerland), 9(8)*, 618, https://doi.org/10.3390/ma9080618.

Steins, S. (1957). *The Brazilian Cotton Manufacture: Textile Enterprise in an Undeveloped Area, 1850 - 1950.* Cambridge, MA and London, England: Harvard University Press.

Suleimenova, A., Bake, K., Ozkan, A., Valenza, J., Kleinberg, R., Burnham, A., . . . Pomerantz, A. (2014). Acid demineralization with critical point drying: A method for kerogen isolation that preserves microstructure. *Fuel, 135(1)*, 492-497.

Takeuchi, C. (2004). Comportamiento estructural de la omportamiento estructural de la. *REVISTA INGENIERÕA E INVESTIGACIÓN, 55*, 3-7, https://www.redalyc.org/pdf/643/64324201.pdf.

TECNALIA y Dirección Nacional de Planeación Colombia DNP. (2017). Producto 1. Diagnóstico de eficiencia en el uso de materiales y cierre de ciclos en los sectores manufacturero y de construcción en Colombia: contraste frente a experiencias internacionales . *Estudio en la intensidad de utilización de materiales y economía circular en Colombia para la Misión de Crecimiento Verde.* https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/ejes-tematicos/Circular/MATEC%20Producto%201_FINAL.pdf.

Teixeira, R., Santos, S., Christoforo, A., & Payá, J. (2019). Impact of content and length of curauá fibers on mechanical behavior of extruded cementitious composites: Analysis of variance. *Cement and Concrete Composites, 102*, 134-144. Obtenido de https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.04.022

Teixeira, R., Santos, S., Christoforo, A., & Savastano, J. (2019). Extrudability of cement-based composites reinforced with curauá (Ananas erectifolius) or polypropylene fibers. *Construction and Building Materials, 205*(30), 97-110. Obtenido de https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.010

The University of Utah. (2011). *Electron Microscopy Tutorial*. Recuperado el 08 de Julio de 2023, de Advanced Microscopy - THE UNIVERSITY OF UTAH: https://advanced-microscopy.utah.edu/education/electron-micro/

Thermo Fisher. (2023). *Thermo Fisher Scientific*. Obtenido de Thermo Fisher Scientific - Materials Science Learning Center: https://www.thermofisher.com/co/en/home/materials-science/learning-center/applications/what-is-scanning-electron-microscopy.html

Thermo Fisher. (2023). *Thermo Fisher Scientific*. Obtenido de Thermo Fisher Scientific - Materials Science: https://www.thermofisher.com/co/en/home/materials-science/elemental-analysis.html

Thermo Fisher Scientific. (2023). *Exploring Uncharted Realms with Electron Microscopy.* https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/MSD/Handbooks/Exploring-uncharted-realms-with-electron-microscopy.pdf.

Trejos, N. (2019). *Tauramena Natural: Catálogo de Fauna y Flora.* Tauramena: ALCALDÍA DE TAURAMENA - FUNDACIÓN ORINOQUIA BIODIVERSA.

Unimedios. (2011). Una guadua prodigio. *Unimedios. Agencia de noticias de la Universidad Nacional de Colombia*. https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/una-guadua-prodigio.html.

Unimedios. (2017). Fibra de fique reemplazaría la de vidrio. *Unimedios, agencia de noticias Universidad Nacional de Colombia*. https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/fibra-de-fique-reemplazaria-la-de-vidrio.html.

USD NATIONAL GENETIC RESOURCES PROGRAM. (2018). Germplasm Resources Information Network. https://www.ars-grin.gov/.

Usma, J., & Trujillo, F. (2011). *Biodiversidad del departamento de Casanare: Ecosistemas Estratégicos del Departamento.* Bogotá D.C. : Gobernación de Casanare - WWF Colombia, 286p.

Y.B.F., K. (2011). Suitability of using coir fiber/polymeric composite for the design of liquid storage tanks. *Materials & Design, 36*, 847 - 853.

Zhang, B., Gao, Y., Zhang, L., & Zhou, Y. (2021). The plant cell wall: Biosynthesis, construction, and functions. . *J. Integr. Plant Biology, 63*, 251– 272. https://doi.org/10.1111/jipb.13055.

Glosario

Ampliación (Magnificación): El aumento del tamaño aparente de una imagen en comparación con el objeto original, característica clave en la microscopía para observar detalles finos (Groover, 1997).

Análisis de Elementos Químicos: Proceso de identificación y cuantificación de elementos químicos presentes en una muestra, a menudo realizado mediante técnicas como la microscopía electrónica y el análisis EDX (Groover, 1997).

Análisis de Energía Dispersiva de Rayos X (EDX): Técnica utilizada para identificar y cuantificar elementos presentes en una muestra mediante la detección de los rayos X emitidos durante la interacción de la muestra con electrones (Groover, 1997).

Análisis de Varianza (ANOVA): Método estadístico utilizado para determinar si hay diferencias significativas entre las medias de tres o más grupos, en este caso, las categorías de probetas de concreto (Groover, 1997).

Caracterización por Microscopía: Proceso de examinar y describir las características de las fibras a nivel microscópico para entender su estructura y morfología (Renau-Piqueras, 1994).

Cilindros de Concreto: Muestras cilíndricas de concreto utilizadas para pruebas de resistencia; representan la calidad del concreto en una estructura más grande (Saavedra, 2020).

Difracción de Rayos X: Fenómeno en el cual los rayos X experimentan cambios de dirección al pasar cerca de la superficie de una muestra, utilizado para obtener información sobre la estructura cristalina de materiales (Romero, 2003)

Entorno Controlado: Ambiente experimental en el que se minimizan las variables externas para aislar y medir con precisión los efectos de las variables específicas de interés (Groover, 1997).

Espectro de Energía: Representación gráfica de la cantidad de energía de los rayos X emitidos por los elementos presentes en la muestra, proporcionando información sobre la composición elemental (Groover, 1997).

Estudio Experimental: Investigación que implica la manipulación de variables independientes para observar y medir los efectos en variables dependientes, con el objetivo de establecer relaciones de causa y efecto (Renau-Piqueras, 1994).

Fibra de Coco, Fique y Guadua: Tipos específicos de fibras vegetales utilizadas en la investigación, cada una con propiedades únicas que pueden influir en las características del concreto (Bustos, 2018)

Fibras Vegetales: Elementos naturales derivados de plantas, en este caso, coco, fique y guadua, que se incorporan al concreto para mejorar sus propiedades (TECNALIA y Dirección Nacional de Planeación Colombia DNP, 2017).

Hipótesis Nula (H0) y Alternativa (H1): En estadísticas, la hipótesis nula establece que no hay efecto o diferencia, mientras que la hipótesis alternativa propone que hay una diferencia significativa (Renau-Piqueras, 1994).

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM): Técnica que utiliza electrones en lugar de luz para obtener imágenes de alta resolución de la superficie de las muestras, permitiendo la observación detallada de la morfología de las fibras a nivel microscópico (Groover, 1997).

Morfología: La forma y estructura externa de las fibras vegetales, que puede variar en términos de longitud, diámetro y características superficiales (Renau-Piqueras, 1994).

Patrón de Difracción: Distribución de intensidades de los rayos X difractados que proporciona información sobre la disposición atómica en la muestra (Groover, 1997).

Resolución Espacial: Capacidad de distinguir dos puntos cercanos entre sí en una imagen, una característica importante en la microscopía para discernir detalles finos (Renau-Piqueras, 1994).

Resistencia a la Compresión: La capacidad de un material para resistir fuerzas de compresión sin sufrir deformación excesiva; medida crucial en la evaluación de la calidad y durabilidad del concreto (Saavedra, 2020).