

CONSTRUCCIONES CIVILES

TENDENCIAS Y SOSTENIBILIDAD

V O L U M E N 2



INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA
COLEGIO MAYOR
DE ANTIOQUIA®

PÁGINA LEGAL

Datos relativos al copyright del autor y de la editorial

© Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia
© Grupo de Investigación Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad
© Facultad de Arquitectura e Ingeniería
Medellín, Volumen 2, Noviembre de 2025

Compiladores:

Nicolás Steven Pardo Álvarez
José Reynaldo Zelaya Maradiaga

ISBN: (Para libros)

[Edición en línea]: ISBN

Nota Legal



Licensed under a Creative Commons Attribution - <NonCommercial-Sharee
Alike 4.0 International License

Autores

ALEJANDRA SUAREZ HENAO
ALEJANDRO ALBERTO GOMEZ DUQUE
ALEXANDER MENDEZ RINCON
ANA MARIA GAVIRIA SUAREZ
ANA MERCEDES TANGARIFE MONTOYA
ANGY DANIELA VANEGAS VANEGAS
ANGYY VIVIANA ÁLVAREZ ORTIZ
ANLLY TATIANA GOMEZ ARAUJO
BRIYITH KATERINE MACIAS MEDINA
CESAR AUGUSTO RAMIREZ ROJAS
CESAR AUGUSTO VELANDIA HERNANDEZ
DAIRON GARCIA VILLA
DANIEL PEREZ FERNANDEZ
DANIEL RUIZ SANTAMARIA
DANIEL ESTEBAN PIEDRAHITA LOPEZ
DANIELA VASQUEZ CANO
DARWIN ALBERTO BANQUEZ PACHECO
DIEGO ALEJANDRO PALACIO TAVERA
EDISON ALDEMAR HINCAPIE ATEHORTUA
EMMANUEL ROLDAN HERNANDEZ
ESTEBAN ALFREDO RESTREPO PINO
FELIX ANTONIO MEDINA DIAZ
GERMAN DARIO PEÑA GARCIA
HEDILBERTO VANEGAS LOPEZ
HEIDY KATHERINE MARTINEZ GALVIS
HERNAN DARÍO CAÑOLA
IVAN FELIPE VILLA ECHAVARRIA
JAIME ANDRES USUGA SALAS
JHOAN STIVEN CIRO USME
JHONATAN STEVEN AGUDELO BERNAL
JOAN AMIR ARROYAVE ROJAS
JOHN EDISON PAREJA ISAZA
JORGE ANDRES LONDOÑO VASQUEZ
JOSE DANIEL GALVIS RAMIREZ
JOSE REYNALDO ZELAYA MARADIAGA
JUAN CAMILO JARAMILLO
JUAN DIEGO LONDOÑO MESA
JUAN ESTEBAN MARIN MEJIA
JUAN ESTEBAN MEJIA RIOS
JUAN PABLO MOLINA GUTIERREZ
JULIAN VALENCIA MARIN
JULIAN ANDRES POSADA MORALES
JULIAN ANDRES SIERRA VELEZ
KELLY TATIANA ARREDONDO MONTOYA
KEVIN ALDAIR MARQUEZ CORTES
LINSAY LISBETH ALZATE GALEANO
LUIS RODOLFO MARQUEZ SENA
MARIA ALEJANDRA ARGUMEDO LOPEZ
MARIA PAULINA HERNANDEZ ESTRADA
MARIANA AGUDELO OSSA
MARIANA GARZON SOTO
MARIANA URREGO URIBE
MONICA ALEJANDRA ANGEL VASCO
NATALIA CLAVIJO BOLIVAR
NICOLAS STEVEN PARDO ALVAREZ
PABLO ANDRÉS PEREZ LOPEZ
PAULA JULIETH SANCHEZ MORENO
SANDRA LILIANA CANO MOYA
SANDRA MARCELA ARANGO MUÑOZ
SANTIAGO AREIZA RESTREPO
SARA VANESSA PAVONY AGUIAR
SEBASTIAN MORALES CHICA
SEBASTIAN ALONSO OSORIO GALLEGO
SERGIO ANDRÉS ARBOLEDA LOPEZ
VALENTINA QUINTO ALVAREZ
WILMER ALEXANDER BEDOYA AGUDELO

Presentación

El Volumen 2 de la publicación Construcciones Civiles Tendencias y Sostenibilidad, organizado por el Programa de Construcciones Civiles de la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, corresponde a la compilación de los trabajos de investigación presentados en noviembre de 2025 en la ciudad de Medellín, Colombia, en el marco del evento de socialización. Este evento reunió nuevamente a estudiantes, docentes e investigadores en un espacio académico y técnico, dedicado a compartir los resultados de sus investigaciones.

Durante las jornadas, se continuó promoviendo el intercambio de conocimientos y la reflexión sobre los desafíos del sector de la construcción, con miras a impulsar su transformación hacia prácticas más eficientes, innovadoras y sostenibles. Los trabajos de investigación, presentados en formato de resúmenes extendidos, reflejan el aporte académico de los participantes en las mismas cuatro líneas temáticas de la edición anterior: Administración y gestión de la construcción, enfocada en estrategias para optimizar la productividad y la eficiencia en la toma de decisiones; Construcción sostenible, con énfasis en el análisis de ciclo de vida y la reducción del impacto ambiental; Patología y durabilidad de la edificación, dirigida al análisis de deficiencias constructivas y la mejora de la vida útil de las estructuras; y Materiales de construcción, orientada al desarrollo de soluciones innovadoras que integren materiales sostenibles y reciclados.

Nicolás Steven Pardo Álvarez

***Coordinador del área de investigación del Programa de Construcciones Civiles
Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia***

Contenido

DETERMINACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE LOS MÓDULOS A1-A4 DEL CICLO DE VIDA DEL PROYECTO PARQUE COMFAMA CERRO TUSA EN VENECIA, ANTIOQUIA	2
ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD ENERGÉTICA Y ECONÓMICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE VIDRIO FOTOVOLTAICO EN UNA EDIFICACIÓN RESIDENCIAL EN MEDELLÍN, COLOMBIA	13
DESARROLLO DE CONCRETOS MEDIANTE LA ACTIVACIÓN ALCALINA DE METACAOLÍN COMO PRECURSOR Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN DE CONCRETO COMO AGREGADOS	25
ANÁLISIS DEL IMPACTO ECONÓMICO DE LOS TRÁMITES DE APROVECHAMIENTO FORESTAL EN TRES PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN EN EL VALLE DE ABURRÁ, COLOMBIA	31
ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE CONCRETOS PERMEABLES	40
DESARROLLO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN A PARTIR DE LA ACTIVACIÓN ALCALINA DE METACAOLÍN USANDO COMO AGREGADO DIFERENTES TIPOS DE RESIDUOS DE SUELO.....	48
ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL MORTERO FRENTE A LA EXPOSICIÓN ATAQUES QUÍMICOS: DURABILIDAD Y PROPIEDADES MECÁNICAS.....	57
DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA BARRERA FÍSICA FABRICADA A BASE DE FIBRA DE FIQUE Y RESINA DE POLIÉSTER EN LA IMPERMEABILIZACIÓN DE MUROS DE MAMPOSTERÍA.....	66
ESTRATEGIA DE MITIGACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO A TRAVÉS DE JARDINES VERTICALES: ESTUDIO DE CASO AIANA AZUL, FLORIDA PARQUE COMERCIAL Y CENTRO COMERCIAL VIVA LAURELES EN MEDELLÍN, COLOMBIA	73
EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MECÁNICAS Y TÉRMICAS DE UN BTC (BLOQUE DE TIERRA COMPACTADA) REFORZADO CON FIBRA DE FIQUE	84
MODERNIZACIÓN DE LA FACHADA DEL EDIFICIO VICENTE URIBE RENDÓN MEDIANTE EL AJUSTE DE LA RELACIÓN VENTANA-PARED SEGÚN LA RESOLUCIÓN 0194 DE 2025	96
COMPARACIÓN ENTRE LA METODOLOGÍA BIM VS LA METODOLOGÍA TRADICIONAL EN EL MANTENIMIENTO DE FACHADAS EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN.....	106
PROPUESTA DE SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA LLUVIAS EN VIVIENDA RESIDENCIAL DEL MUNICIPIO DE MEDELLÍN.....	115
ANÁLISIS DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO MODULAR DE VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL (VIS) EN COLOMBIA ...	123

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA IMPLEMENTAR BIM EN LA ETAPA CONSTRUCTIVA DE LA ESTRUCTURA DE UN PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN. CASO DE ESTUDIO: JARDÍN INFANTIL BUEN COMIENZO EN EL MACROPROYECTO PARQUES DEL RÍO NORTE EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN.....	134
ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA METODOLOGÍA BIM EN LA FASE DE EJECUCIÓN DE UN PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DEL SECTOR PÚBLICO: CASO DE ESTUDIO PROYECTO “CONSTRUCCION DEL CENTRO ADMINISTRATIVO MUNICIPAL DE ENVIGADO CAM”....	141
PROPUESTAS METODOLÓGICAS EN LA LOGÍSTICA DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	158
GUÍA METODOLÓGICA TÉCNICA Y NORMATIVA PARA LA INCORPORACIÓN DE CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD EN ETAPA DE PREFACTIBILIDAD PARA PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE ENVIGADO Y LA ESTRELLA	167
ANÁLISIS DE APLICABILIDAD DE LA TEORÍA DE RESTRICCIÓN Y LA METODOLOGÍA DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE CRONOGRAMAS DE OBRA EN CONTRATOS PÚBLICOS: CASO DE ESTUDIO MANTENIMIENTO DE CUBIERTAS DE ENTIDADES UBICADAS EN EL DISTRITO ESPECIAL DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN DE MEDELLÍN	180

DETERMINACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE LOS MÓDULOS A1-A4 DEL CICLO DE VIDA DEL PROYECTO PARQUE COMFAMA CERRO TUSA EN VENECIA, ANTIOQUIA

Sara Vanessa Pavony Aguiar¹, Nicolás Steven Pardo Álvarez¹

¹ Grupo de Investigación Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, spavony@est.colmayor.edu.co, nicolas.alvarez@colmayor.edu.co

Palabras clave: Huella de carbono, Guadua Angustifolia, Cerro Tusa.

1. INTRODUCCIÓN

La Huella de Carbono permite cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para diferentes procesos o productos y son generados principalmente por actividades humanas (Espíndola & Valderrama, 2012). Los GEI, definidos inicialmente en el Protocolo de Kioto (1997), son parte de la capa atmosférica que retiene la radiación solar, elevando la temperatura global. Entre estos gases, el dióxido de carbono (CO₂) es particularmente crítico, pues las actividades humanas – especialmente el sector de la construcción – han incrementado su concentración en un 50%, amplificando el efecto invernadero (NASA, 2025). Como respuesta a esto, nace la Construcción Sostenible como una práctica clave para lograr reducir emisiones, debido a que el sector de la construcción consume más del 36% de la energía global y genera al menos el 37% de las emisiones totales bajo enfoque de ciclo de vida (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, 2025). Debido a que la mayoría de los materiales de construcción son fabricados a partir de procesos con altos costos energéticos y una alta demanda de recursos naturales no renovables, comienzan a tener relevancia los materiales de carácter renovable, destacando la Guadua Angustifolia. Esta corresponde a una especie nativa de América Latina de rápido crecimiento y alta resistencia, lo que le permite captar grandes cantidades de CO₂, y requiere de poca energía para su procesamiento (Yadav & Mathur, 2021). Su uso en la construcción no solo minimiza impactos ambientales, sino que impulsa economías locales alienado todo esto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, volviéndose un material que aporta en la lucha contra el cambio climático (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, 2025).

Diversos estudios han analizado los procesos y el uso en el sector constructor del bambú como especie principal y sus familias como la guadua. Xu et al. (2022) analizaron los materiales de construcción de bambú como almacenamiento de carbono, además de su potencial para reducir las emisiones de CO₂ asociadas. El estudio determinó que la fase de producción fue la de mayores emisiones de CO₂ (83%), destacándose la carbonización (310–382 kg) y el tratamiento anti moho (130–156 kg). Tras aplicar estrategias de mejora, las emisiones se redujeron a -249,92 kg CO₂/m³, cambiando la probabilidad de un balance negativo del 37% al 83,6%. El bambú, con su rápido crecimiento, mostró un mayor almacenamiento de carbono que la madera o el acero. Por su parte, Zea Escamilla et al. (2016) analizaron las emisiones de CO₂ asociadas a la industrialización del bambú como alternativa para programas de vivienda social en Filipinas. La evaluación mostró que el bambú laminado fue una alternativa sostenible, ya que ambientalmente, captó $4,5 \times 10^6$ tCO₂e en 10 años y almacenó 32×10^7 t CO₂e en edificios, logrando un balance neto positivo de 10×10^7 tCO₂e. Por otra parte, económicamente generó un ingreso potencial de 7 millones de CHF por créditos de carbono y socialmente, creó 28.000 empleos en 55.000 ha, superando ampliamente a la madera. De la misma forma, Kazulis et al. (2017) analizaron el

almacenamiento de carbono en productos de madera, revelando que 1m³ de PB (tableros de partículas) y OSB (tablero de virutas de madera) evita 720 kg de CO₂ cada uno, mientras que el MDF (fibra de densidad media) almacena 820 kg. Sin embargo, la alta intensidad energética asociada al procesamiento del MDF invierte su ventaja, mostrando PB y OSB balances netos más favorables. Finalmente, De Lima Oliveira et al. (2024) realizaron el análisis de la simulación y mitigación de la huella de carbono de materiales de construcción convencionales y su sustitución con materiales alternativos. El estudio reveló que el uso del bambú como alternativa sostenible en la construcción logró una reducción del 2,2% en emisiones por vivienda (4,69 kgCO₂), con valores específicos de solo 0,00202 kgCO₂ frente a los 0,241 kgCO₂ de los ladrillos cerámicos. Al combinarse con energías renovables y diseño bioclimático, se alcanzó una reducción de hasta el 90,65% en componentes específicos.

A pesar de lo anterior y del creciente interés de la Guadua Angustifolia como material de construcción sostenible, aún se desconoce el impacto real de la huella de carbono en proyectos contruidos a escala real. Si bien se señalan factores muy positivos de captación carbono en la etapa de siembra y cosecha, se ha identificado que tiene un impacto negativo en la fase de producción. Por lo tanto, en este proyecto se determinó la huella de carbono de los módulos A1-A4 del ciclo de vida del proyecto Parque Comfama Cerro Tusa en Venecia, Antioquia. Para esto, inicialmente se estimó el factor de emisión de la guadua para la empresa Guadua Bamboo SAS a partir de la información disponible por el proveedor. Posteriormente, se cuantificaron las cantidades de obra a partir de los planos y se complementaron con actas de finalización y entrega. Finalmente, se estimó la huella de carbono para los módulos A1-A4 a partir de toda la información disponible, todo esto para continuar mejorando los procesos de la guadua en la construcción, cuantificar y determinar las emisiones de CO₂ y replicar los elementos positivos en posteriores proyectos con este material.

2. METODOLOGÍA

En la Figura 1 se presenta el diagrama metodológico, enfocado en las etapas de cálculo del factor de emisión para la guadua de la empresa Guadua Bamboo SAS, la cuantificación de cantidades

de obra y la estimación de la huella de carbono para los módulos A1-A4 del proyecto Parque Comfama Cerro Tusa en Venecia, Antioquia.

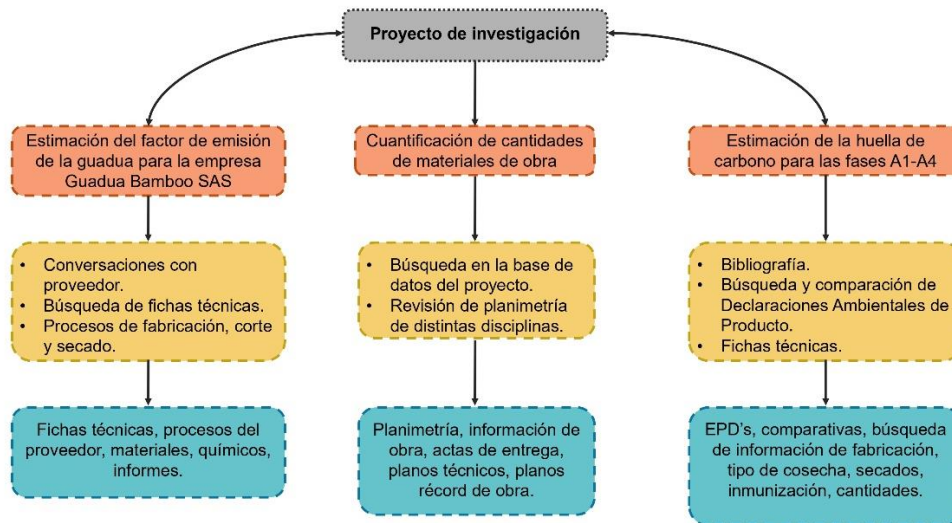


Figura 1. Diagrama metodológico.

2.1 Estimación del factor de emisión de la guadua para la empresa Guadua Bamboo SAS.

En conjunto con el contratista de la obra y el subcontratista Guadua Bamboo SAS, se recolectó información acerca de los procesos de fabricación, corte e inmunización de la guadua. Además, se revisaron las fichas técnicas del material y los productos que se le aplican a este durante la producción y fabricación, para así obtener la trazabilidad y componentes claves para calcular con mayor exactitud las emisiones de CO₂ para los módulos A1-A3 (International EPD System, 2025).

2.2 Cuantificación de cantidades de materiales de obra

A partir de la planimetría arquitectónica y estructural principalmente, se tomaron los datos en cantidades precisas de los materiales utilizados en obra. Igualmente se revisaron las actas de entrega, APU's (Análisis de Precios Unitarios) y documentos récord del proyecto para complementar la información y cantidades finales de obra.

2.3 Estimación de la huella de carbono para los módulos A1-A4

A partir de la cantidad de material utilizado en la obra, con base en distintos EPD's (Environmental Product Declaration por sus siglas en inglés o Declaraciones Ambientales de Producto), en la ficha técnica del proveedor de guadua del proyecto, y teniendo en cuenta los consumos de combustibles y energías para los momentos del transporte, se calculó la huella de carbono emitida en los módulos A1-A4 (materiales y transporte), de cuna a puerta (International EPD System, 2025).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Estimación del factor de emisión de la guadua para la empresa Guadua Bamboo SAS.

En la Tabla 1 se presentan las estimaciones del factor de emisión para la Guadua Angustifolia del proveedor de Guadua Bamboo SAS a partir de la información y fichas técnicas suministradas por el mismo. Según la información suministrada por el proveedor se determinó que, bajo la

metodología UNE-EN 15978, para los módulos A1 y A2 no se reportaron emisiones de CO₂. Esta condición es resultado de la adopción de un sistema de cultivo que prescinde del uso de fertilizantes sintéticos (uso de gallinaza), de la implementación de métodos de cosecha exclusivamente manuales (corte manual) y que el transporte entre los lugares de extracción y procesamiento no requiere ningún tipo de combustible, debido a la contigüidad del tanque de inmunización de las guaduas cosechadas. Para el módulo A3, el proveedor solo especificó “boro no tóxico”, por lo cual, mediante una revisión y análisis de bibliografía, se pudo determinar que para el proceso de inmunización por inmersión de guadua se requieren 3,5 kg de ácido bórico y 3,5 kg de sal de bórax en 100 litros de agua (Guadua y Bambú Colombia, 2014). En adición, por revisión bibliográfica, los factores de emisión asociados a sales de bórax y ácido bórico sólido son 6,92 kg CO₂e/kg y 3,3 kgCO₂e/kg respectivamente (An & Xue, 2014). Para un tanque de aproximadamente 78.000 l de una capacidad de 600 guaduas de dimensiones Ø=0,11m y L=6m y una perforación de 1,27 cm cada una, el resultado corresponde a un valor de 0,034 kgCO₂e/kg de guadua. Sin embargo, la guadua cuenta con una captura de emisiones que se logra durante su proceso crecimiento previo a la cosecha, lo que da lugar a que funcione como sumidero de carbono y compense parte o completamente las emisiones asociadas a su procesamiento. En este sentido, para estimar las emisiones capturadas, se utilizó el procedimiento descrito por moso BAMBOO (moso BAMBOO, 2025), con un resultado de 891 kgCO₂/m³ o 1,37 kgCO₂/kg (kgCO₂ capturado por cada kg de guadua), lo que finalmente da como resultado -1,336 kgCO₂/kg.

Tabla 1. Estimación de factor de emisiones de la guadua para la empresa Guadua Bamboo SAS. Módulos A1-A3.

Módulo	Valor kgCO ₂ e/kg	Descripción
A1	0	Sin fertilizantes
A2	0	Cosecha y corte manual
A3	0,034	Volumen del tanque de inmunización: 78.000 l para una capacidad de 600 guaduas por batch de dimensiones Ø=0,11m y L=6m y una perforación de 1,27 cm de diámetro por guadua Cantidad de sales de bórax y ácido bórico sólido, para disolver en 100 l de agua: 3,5 kg cada uno (Guadua y Bambú Colombia, 2014) Factores de emisión para sales de bórax y ácido bórico: 6,92 kg CO ₂ e/kg y 3,3 kgCO ₂ e/kg respectivamente (An & Xue, 2014) Propiedades físicas relevantes: Densidad=650 kg/m ³ , humedad=16,5% y peso=37 kg
	-1,37	Captura de emisiones: 891 kgCO ₂ /m ³ o 1,37 kgCO ₂ /kg
Total	-1,336	Valor final

3.2 Cuantificación de cantidades de obra

Para la cuantificación de los materiales de obra, se tomaron en cuenta en primera instancia la planimetría en AutoCAD, además de los APU's presentados durante la ejecución del proyecto, avances de obra y actas de entrega. En la Figura 2 se presenta el esquema de localización de los Ámbitos de Sombra y en la Figura 3 se presenta la planimetría arquitectónica por edificio en cada zona del proyecto. El proyecto cuenta con 7 Ámbitos, los cuales corresponden a: 1) Casa de Guadua, con 501,9 m² construidos, 2) Saludo a la Montaña sin m² construidos, 3) Viaje a la

Memoria con 8 m², 4) Cátedra de la Naturaleza con 60 m², 5) Piedra del Eco con 88 m², 6) Casa Madre de la Vida con 206 m² y 7) Conexión con el Cielo con 168 m².

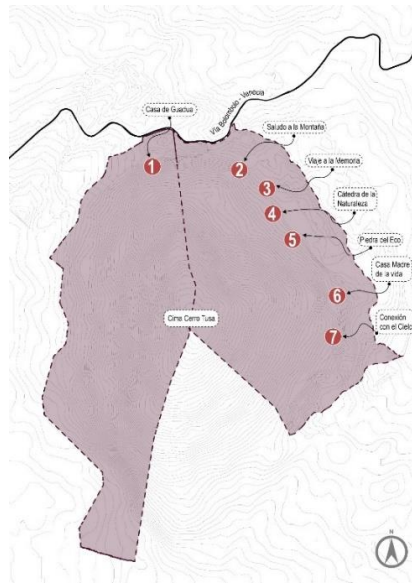
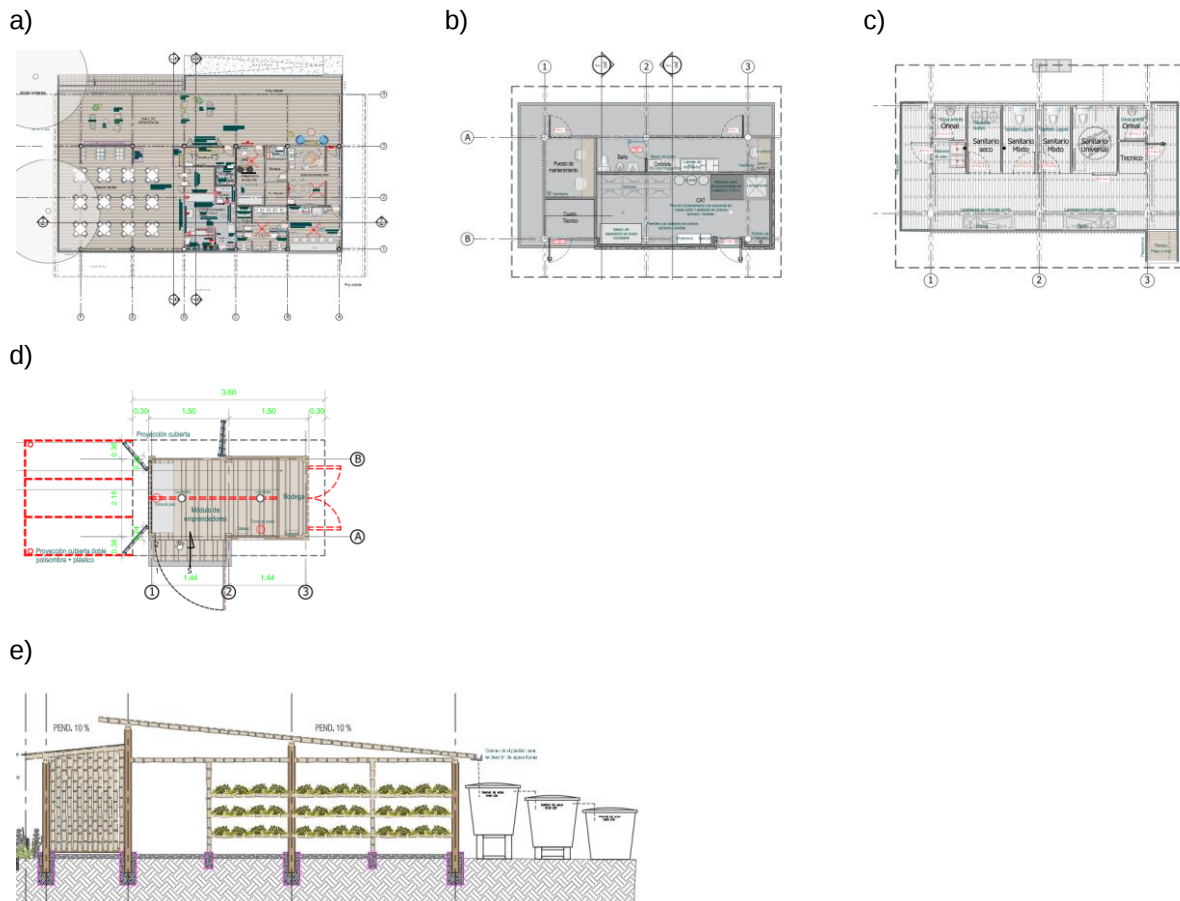


Figura 2. Esquema de localización Ámbitos de Sombra (zonas) del parque.



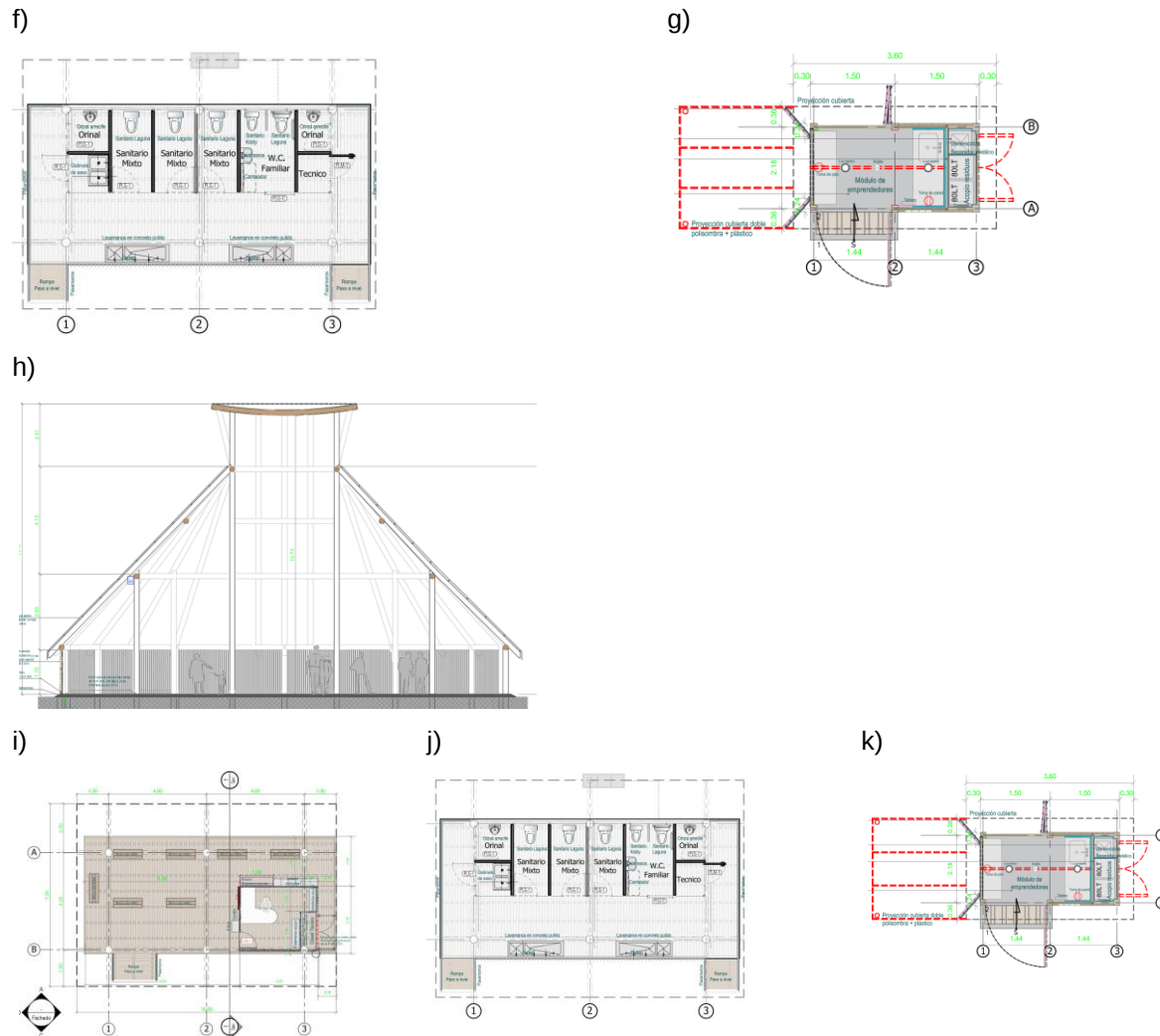


Figura 3. Ámbito Casa de Guadua con a) Administración y trabajadores b) Portería c) Baños. Ámbito Viaje a la Memoria con d) Módulo de Emprendedores. Ámbito Cátedra de la Naturaleza con e) Vivero. Ámbito Piedra del eco con f) Baños y g) Módulo de emprendedores. Ámbito Casa Madre de la Vida con h) Maloca. Ámbito Conexión con el Cielo con i) Campamento base, j) Baños y k) Módulo de emprendedores.

En general, todos los edificios cuentan con una combinación de materiales. Por ejemplo, para la estructura de los edificios principales, se utilizó una combinación entre elementos metálicos y largueros de Guadua Angustifolia (ver Figura 4a), para los cerramientos externos se instalaron bastidores metálicos bien sea con guaduas rollizas, con medias guaduas y/o latas de guadua para dar movimiento y ventilación en fachadas, cubriendo así de manera parcial o completa las fachadas con la guadua (ver Figura 4b), y para divisiones internas se utilizaron placas de superboard y otros acabados según los usos de cada espacio, pisos en madera inmunizada instalada a tope, entre otros materiales.

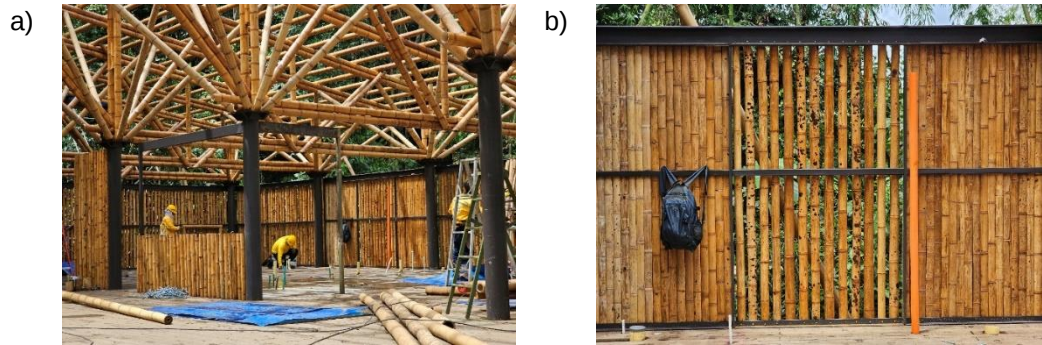


Figura 4. a) Estructura metálica y guadua y b) Tipología de fachada. Elaboración propia.

La estimación de emisiones se realizó para los materiales de mayor consumo (imágenes de referencia en la Figura 5). El análisis en peso, detallado en la Tabla 2, identifica a la guadua como el material predominante, seguido en orden por los elementos metálicos, el superboard, la madera inmunizada, los bloques de concreto y el shingle. La aplicación específica de cada material fue la siguiente: la guadua se destinó a cerchas estructurales, cerramientos y latas traslapadas; el superboard a divisiones internas; la madera inmunizada a pisos tipo deck; el shingle a tejas asfálticas hexagonales; los bloques de concreto a mampostería a la vista; y los elementos metálicos a columnas y bastidores.





Figura 5. Imágenes representativas de los materiales más utilizados en el Proyecto. a) Guadua, b) Superboard, c) Madera inmunizada, d) Shingle, e) Bloques de concreto y f) Elementos metálicos.

Tabla 2. Cantidades de materiales de construcción usados en el proyecto.

Ámbito	Material (kg)					
	Guadua	Superboard	Madera Inmunizada	Shingle	Bloque concreto	Elementos metálicos
Casa de Guadua	24.957,5	9.656,6	2.755,6	1.334,7	2.643,2	8.948,4
Viaje a la Memoria	-	-	-	-	-	-
Cátedra de la Naturaleza	-	91,7	398,4	20,5	-	-
Piedra del Eco	2.355,2	155,2	1.155,0	33,9	-	-
Casa Madre de la Vida	4.896,3	1.735,0	419,6	225,9	2.643,2	2.363,0
Conexión con el Cielo	3.848,0	-	-	-	-	-
Casa de Guadua	9.314,7	2.675,6	1.275,5	431,2	2.643,2	4.297,9

3.3 Estimación de la huella de carbono para los módulos A1-A4

Inicialmente, y ante la ausencia de Declaraciones Ambientales de Producto (EPDs) locales para los principales materiales del proyecto, se llevó a cabo una extensa revisión bibliográfica. Esta se complementó con valores de emisión publicados en investigaciones y EPDs internacionales, siempre que las características de los materiales fueran similares a las de los utilizados en la construcción. Los resultados de esta búsqueda se consolidan en la Tabla 3, la cual no solo resume los factores de emisión en kgCO₂e, sino que también detalla el proveedor, el país de origen y la referencia de cada dato. En la Tabla 3 se resumen los factores de emisión encontrados y sus proveedores, donde se revelan hallazgos significativos: materiales como la guadua y la madera inmunizada presentan valores de carbono negativo (-1,336 y -1,35 kgCO₂e, respectivamente), lo que los identifica como sumideros de carbono y subraya su beneficio ambiental. En contraste, materiales como el shingle para cubiertas (3,49 kgCO₂e) y los elementos metálicos (2,17 kgCO₂e) exhiben las huellas de carbono más elevadas, destacándose como los principales focos de emisión dentro del inventario.

Tabla 3. Resumen de EPDs utilizadas para los factores de emisión.

Material	kgCO ₂ e	Proveedor	País	Referencia
Guadua	-1,336	Guadua Bamboo SAS	Colombia	(Guadua Bamboo SAS, 2025)
Superboard	0,484	Superboard	Colombia	(Superboard, 2024)
Madera Inmunizada	-1,35	Finsa	Chile	(SAVIA - FINANCIERA MADERERA S.A., 2024)

Shingle	3,49	Owens Corning Asphalt Shingles	Estados unidos	(Owens Corning Roofing and Asphalt, 2020)
Bloque concreto	0,0493	Indural SA	Colombia	(Indural SA, 2024)
Elementos metálicos	2,17	Acesco	Colombia	(ACESCO, 2018)

Mediante el análisis de la planimetría, actas de obra y documentación técnica del proyecto, se cuantificaron las cantidades totales de los principales materiales. A partir de estos datos, y considerando la superficie construida de cada Ámbito de Sombra (Omitiendo Saludo a la Montaña, el cual no cuenta con áreas construidas), se calcularon las emisiones de CO₂, obteniendo como resultado un balance neto negativo para una de estas zonas, conforme se detalla en la Tabla 4.

Tabla 4. Cuantificación emisiones de materiales por m² de cada Ámbito de Sombra

Ámbito	kg CO ₂ e totales	Área construida en m ²	kg CO ₂ e/m ²
Casa de Guadua	-67.195,4	501,9	-133,88
Viaje a la Memoria	-682,2	8	-85,28
Cátedra de la Naturaleza	-4.942,2	60	-82,37
Piedra del Eco	-16.410,1	88	-186,48
Casa Madre de la Vida	-5.140,9	206	-24,96
Conexión con el Cielo	-27.572,4	168	-164,12

Para la cuantificación específica de las emisiones correspondientes al módulo de transporte (A4), se diseñó una metodología basada en los registros reales de la obra. El proceso consistió en recopilar y procesar los datos de consumo de combustible Diésel B10 (ACPM) reportados directamente por el contratista, los cuales fueron cotejados y validados contra los presupuestos oficiales y las actas finales de obra para garantizar mayor precisión. Con esta información y aplicando los factores de emisión del Informe FECOC 2016, se calcularon las emisiones por metro cuadrado construido para cada Ámbito de Sombra, cuyos resultados en kg CO₂e se presentan en la Tabla 5. Cabe destacar una limitación importante en el proceso: no fue posible desglosar los consumos de combustible para cada ámbito de forma individual, ya que la recolección de información en campo se realizó de manera global para toda la obra.

Tabla 5. Cuantificación de emisiones por consumo de combustible en galones asociado al transporte de cada material.

Material	Cantidad galones	kg CO ₂ e
Guadua	533	5.476,0
Superboard	168	1.727,6
Madera Inmunizada	71	724,6
Shingle	24	246,9
Bloque concreto	93	957,0
Elementos metálicos	183	1.883,9
Total	1.072	11.016,0

Finalmente, la Tabla 6 consolida los resultados de la evaluación de los módulos A1 – A4 del ciclo de vida, desglosando las emisiones totales en kg CO₂e por metro cuadrado construido. El análisis revela un balance de emisiones positivo para el proyecto en su conjunto. Este resultado se atribuye directamente al significativo balance negativo de la fase A1-A3 (-144,6 kg CO₂e/m²), el cual, al actuar como un sumidero de carbono, no solo compensa las emisiones asociadas al transporte (10,7 kg CO₂e/m²), sino que genera un superávit neto, evidenciando el potencial de la selección de materiales para alcanzar una huella de carbono negativa.

Tabla 6. Resultado emisiones kg CO₂e/m² módulos A1-A4.

Módulo	Valor (kg CO ₂ e/m ²)
A1-A3	-144,6
A4	10,7

4. CONCLUSIONES

El presente estudio logró determinar la huella de carbono de los módulos A1-A4 del ciclo de vida del proyecto Parque Comfama Cerro Tusa, demostrando el potencial de la Guadua Angustifolia como material de construcción con capacidad de generar balances de carbono negativos. La caracterización del factor de emisión para el proveedor Guadua Bamboo SAS reveló un valor de -1,336 kgCO₂e/kg, resultado que compensa ampliamente las mínimas emisiones de su procesamiento, logradas mediante prácticas agrícolas sin fertilizantes sintéticos y cosecha y procesamiento manual. Esta condición se tradujo en que todos los ámbitos constructivos del proyecto presentaran emisiones netas negativas en la fase de producción de materiales (A1-A3), con valores que oscilaron entre -24,96 y -186,48 kg CO₂e/m². Si bien el módulo de transporte (A4) generó 10,7 kg CO₂e/m² en total, el balance negativo global de A1-A3 (-144,6 kg CO₂e/m²) no solo lo compensó, sino que resultó en un superávit de carbono para el proyecto completo. Estos hallazgos confirman que el uso de guadua, especialmente cuando proviene de una cadena de suministro optimizada, puede transformar a las edificaciones en sumideros de carbono, aportando una solución tangible para la descarbonización del sector de la construcción. Se recomienda para futuras investigaciones realizar análisis de sostenibilidad sobre los factores de emisión de la inmunización para refinar la precisión de los resultados y contar con EPDs locales.

5. AGRADECIMIENTOS

A mi asesor Nicolás Pardo le agradezco su dedicación, entusiasmo y aporte para el proyecto, fue una persona, profesional y profesor clave para sacar adelante el proyecto de investigación. A mis padres por su paciencia, amor y apoyo incondicional, a mis compañeros de la especialización, compañeros de trabajo, a Comfama y equipos de trabajo de la obra de Cerro Tusa por brindarme información valiosa y alimentar el trabajo paso a paso. Gracias a cada uno de los profesores de cada módulo y no menos, a Dios.

6. REFERENCIAS

ACESCO. (2018, January). *DECLARACIÓN AMBIENTAL DE PRODUCTOS*.

An, J., & Xue, X. (2014). Life cycle environmental impact assessment of borax and boric acid production in China. *Journal of Cleaner Production*, 66, 121–127. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.020>

Consejo Colombiano de Construcción Sostenible. (2025). *Sostenibilidad en la Construcción*.

<https://www.cccs.org.co/sostenibilidad-en-la-construccion/>.

- de Lima Oliveira, T., Vigoderis, R. B., de Albuquerque, A. M. S., da Silva, J. M., & Guiselini, C. (2024). SIMULATION AND MITIGATION OF THE CARBON FOOTPRINT FROM CONVENTIONAL CONSTRUCTION MATERIALS AND REPLACEMENT WITH ALTERNATIVE MATERIALS. *Revista de Gestao Social e Ambiental*, 18(8). <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n8-004>
- Espíndola, C., & Valderrama, J. O. (2012). Huella del carbono. Parte 1: conceptos, métodos de estimación y complejidades metodológicas. *Informacion Tecnologica*, 23(1), 163–176. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000100017>
- Guadua Bamboo SAS. (2025). *Guadua angustifolia (Bambú Guadua)*. https://www.guaduabamboo.co/blog/que-es-la-guadua-angustifolia?srsId=AfmBOopPUBms2Ax-qMNchSAqpQs0Yh22RRMIdRQhIjJ7RmRHG47fv_p0
- Guadua y Bambu Colombia. (2014, September). *Guadua y bambu Colombia. Inmunizantes*. <https://guaduabambucolombia.co/inmunizantes/>.
- Indural SA. (2024, August 12). *DECLARACIÓN AMBIENTAL DE PRODUCTO - Bloques en concreto para la construcción de mampostería*.
- Kazulis, V., Muizniece, I., Zihare, L., & Blumberga, D. (2017). Carbon storage in wood products. *Energy Procedia*, 128, 558–563. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.009>
- moso BAMBOO. (2025). *¿Cuánto CO2 se almacena en el bambu?*
- NASA. (2025, February). *Dióxido de carbono*. <https://climate.nasa.gov/en-espanol/signos-vitales/dioxido-de-carbono/?Intent=111>.
- Owens Corning Roofing and Asphalt, L. (2020, July 1). *Environmental Product Declaration Owens Corning Asphalt Shingle*.
- SAVIA - FINANCIERA MADERERA S.A. (2024, June 27). *Environmental Product Declaration Pne Wood Parts*.
- Superboard. (2024, September 29). *Superboard - Declaración Ambiental (EPD)*.
- Xu, X., Xu, P., Zhu, J., Li, H., & Xiong, Z. (2022). Bamboo construction materials: Carbon storage and potential to reduce associated CO2 emissions. *Science of the Total Environment*, 814. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152697>
- Yadav, M., & Mathur, A. (2021). Bamboo as a sustainable material in the construction industry: An overview. *Materials Today: Proceedings*, 43, 2872–2876. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.125>
- Zea Escamilla, E., Habert, G., & Wohlmuth, E. (2016). When CO2 counts: Sustainability assessment of industrialized bamboo as an alternative for social housing programs in the Philippines. *Building and Environment*, 103, 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.003>

ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD ENERGÉTICA Y ECONÓMICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE VIDRIO FOTOVOLTAICO EN UNA EDIFICACIÓN RESIDENCIAL EN MEDELLÍN, COLOMBIA

Mariana Agudelo Ossa¹; Laura Rendón Gaviria¹; Nicolás Steven Pardo Álvarez¹

¹ Grupo de Investigación Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, marianaao@est.colmayor.edu.co; laura.rendon@colmayor.edu.co; nicolas.alvarez@colmayor.edu.co

Palabras clave: Vidrio fotovoltaico, Energía solar integrada en edificaciones (BIPV), Eficiencia energética, Viabilidad económica.

1. INTRODUCCIÓN

La operación es la fase más extensa del ciclo de vida de los edificios, implica un constante intercambio de energía, agua y residuos, generando la mayor parte de los impactos ambientales y de las emisiones de CO₂ asociadas al ciclo de vida del edificio. En este contexto, la eficiencia operativa debe articularse con la transición hacia fuentes de energía limpia, clave para reducir la demanda de energía y emisiones y garantizar un entorno urbano sostenible (UN Environment Programme & International Energy Agency, 2020b). La energía limpia (proveniente de fuentes como solar, eólica, hidroeléctrica, geotérmica y biomasa), reduce emisiones y la dependencia de combustibles fósiles. Su adopción implica cambios tecnológicos, políticos y sociales, con inversión en infraestructura y capacitación técnica. Para las edificaciones, se deben sustituir progresivamente los sistemas fósiles por energías renovables, apoyados en marcos normativos, incentivos y participación ciudadana para lograr un futuro energético sostenible y resiliente (UN Environment Programme & International Energy Agency, 2020a). Ejemplo de ello son los sistemas fotovoltaicos integrados en edificaciones (BIPV - Building-integrated photovoltaics por sus siglas en inglés). Estos sustituyen materiales convencionales en fachadas, cubiertas o ventanas, generando electricidad y cumpliendo funciones arquitectónicas y constructivas. Su diseño exige considerar orientación, clima y pérdida de eficiencia en la generación por posibles proyecciones de sombras. Una variante son los vidrios STPV (fotovoltaicos semitransparentes), que permiten paso de luz y generación energética. Estos sistemas reducen demanda eléctrica, aportando sostenibilidad y valor funcional al edificio Martín Chivelet et al. (2025). Sin embargo, estas tecnologías solares emergentes, enfrentan barreras técnicas, económicas, normativas y sociales como la baja eficiencia en condiciones reales, pérdidas por sombreado y alta sensibilidad a clima y orientación. Además, los altos costos, ausencia de incentivos, marcos regulatorios insuficientes, débil coordinación institucional y escasa conciencia pública. Estos factores frenan su estandarización, adopción y contribución a una transición energética sostenible (Jayachandran et al., 2022).

Los BIPV han sido estudiados por autores como Hamzah & Go (2023), quienes diseñaron y evaluaron un BIPV para edificios de energía casi nula en climas tropicales, recopilando datos y modelando en Revit y PvSyst, analizaron el desempeño de un edificio existente y concluyeron que el sistema generaría hasta 1,73 GWh, que el techo ofrecía un mejor retorno sobre la Inversión (ROI), de 322 % en 5 años y que ahorraría 10.367 tCO₂. También, Zhang et al. (2016) compararon el rendimiento energético global de ventanas STPV y ventanas comunes de alta eficiencia energética, midieron propiedades ópticas, térmicas y eléctricas simuladas en Window,

EnergyPlus y SAPM. Obtuvieron como resultado que los STPV reducen hasta 47,8 % la ganancia térmica, generan hasta 24,4 kWh/m² anuales y logran el mejor desempeño energético global frente a las ventanas comunes. Para justificar los beneficios económicos, Corti et al. (2024) propusieron un flujo de trabajo para apoyar la comparación de costos y beneficios y el análisis de sensibilidad de estudios de caso de BIPV, confrontando BIPV versus vidrios convencionales, calcularon el NPV (Valor Presente Neto) considerando ingresos, egresos y WACC (Costo Promedio Ponderado de Capital), aplicaron análisis de sensibilidad y evaluaron tres casos reales en Suiza. Hallaron que el costo adicional es considerable y el NPV fue favorable en dos casos, resaltando autoconsumo y costos adicionales como factores clave en la rentabilidad. Por último, Chen et al. (2024) demostraron que el rendimiento de las ventanas BIPV frente a las convencionales varía según el clima, la orientación y la geometría urbana, siendo más beneficiosas en fachadas amplias y bien expuestas al sol.

La implementación de vidrio fotovoltaico se ha consolidado en diferentes países como una alternativa innovadora para integrar la generación de energía limpia en las edificaciones, transformando elementos como ventanas en superficies activas que aportan a la eficiencia energética. Sin embargo, a pesar de sus beneficios comprobados en contextos europeos y asiáticos, en Colombia su adopción es apenas incipiente y se desconoce si esta tecnología resulta viable en términos energéticos y económicos dentro de las condiciones locales. Esta ausencia de estudios limita el aprovechamiento de un recurso solar disponible en ciudades como Medellín, donde además existen lineamientos de sostenibilidad urbana que podrían facilitar su implementación. El principal desafío radica en comprender cómo variables como la ausencia de proveedores, la falta de normatividad específica, la baja necesidad de generación energética percibida y la limitada necesidad de su adopción en Colombia, pueden influir en la rentabilidad y factibilidad de esta solución. No atender este vacío implicaría desaprovechar la posibilidad de diversificar la matriz eléctrica nacional, impulsar nuevas fuentes de generación distribuida, fortalecer la resiliencia energética del sector residencial y avanzar en la transición hacia edificaciones de menor huella de carbono. En este sentido, el análisis de la viabilidad energética y económica para la implementación de vidrio fotovoltaico en una edificación residencial en Medellín, Colombia busca evaluar dicha factibilidad a través del modelado energético de una vivienda típica No VIS, complementado con un análisis de mercado y normativo. Los resultados permitieron dimensionar beneficios y barreras en el contexto local, contribuyendo tanto a la discusión académica como a la toma de decisiones en la práctica profesional. Cabe destacar que, aunque los resultados se desarrollaron en un contexto específico, la metodología y los hallazgos son replicables en otros casos con condiciones similares, como en distintas ciudades de Colombia.

2. METODOLOGÍA

En la Figura 1 se presenta el diagrama metodológico, enfocado en las etapas de elaboración de estado del arte, identificación de barreras y limitaciones para la implementación y evaluación energética del vidrio fotovoltaico en el contexto local.



Figura 3. Diagrama metodológico.

2.1 Elaboración de estado del arte

Para la elaboración del estado del arte se llevó a cabo una revisión sistemática de literatura científica, informes técnicos y estudios de caso relacionados con el vidrio fotovoltaico y su integración en edificaciones. La búsqueda tuvo como propósito identificar cómo se ha abordado esta tecnología desde los enfoques técnico, normativo, energético y económico, priorizando investigaciones que evaluaran su rendimiento, viabilidad y aplicación en edificios. Se seleccionaron los documentos que presentaron una relación directa con el objetivo de esta investigación, en especial aquellos que analizaban el comportamiento del BIPV frente a sistemas convencionales, o que exploraban su potencial en climas cálidos o tropicales y urbanos (ver Figura 2). La información recopilada se sistematizó en una matriz elaborada en Excel, que incluyó variables como autor, año, localización, tipo de edificio, metodología, software empleado, resultados principales y limitaciones. Posteriormente, los estudios fueron correlacionados para identificar tendencias comunes, vacíos en el conocimiento y coincidencias entre metodologías o hallazgos. Este proceso permitió establecer un panorama comparativo sobre el desarrollo del vidrio fotovoltaico a nivel internacional y evidenciar la ausencia de estudios aplicados al contexto local, lo que sustenta la pertinencia de la presente investigación.

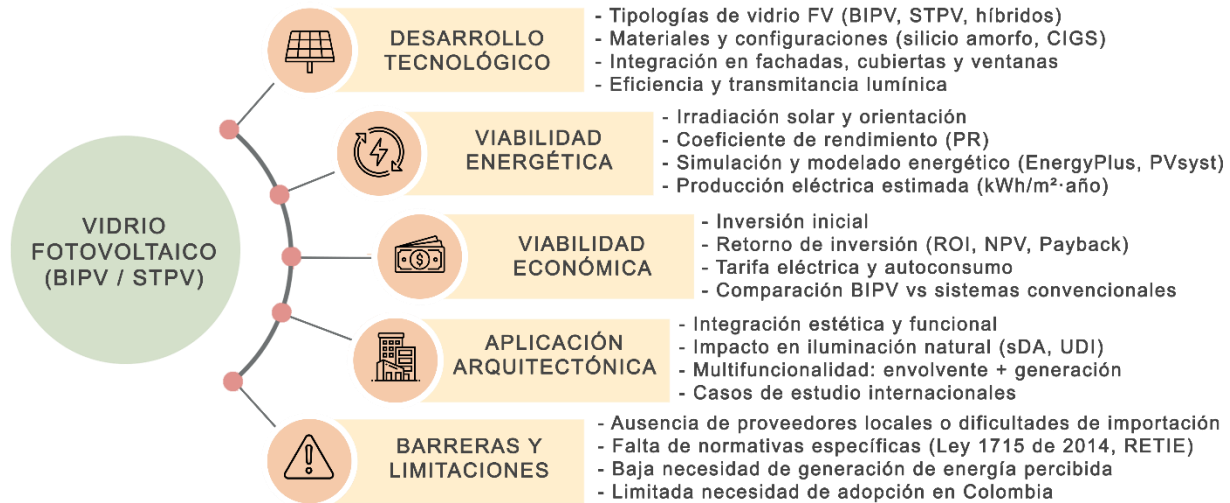


Figura 2. Ejes temáticos identificados en el estado del arte sobre vidrio fotovoltaico.

2.2 Identificación de barreras y limitaciones

Para identificar las barreras que dificultan la implementación del vidrio fotovoltaico en Colombia, se desarrolló un análisis cualitativo basado en tres ejes principales: mercado, normativa y contexto energético. En primer lugar, se efectuó una exploración y estudio de mercado dirigida a conocer la oferta de mercado de tecnologías BIPV y su accesibilidad en el país. Para ello, se contactaron proveedores de sistemas fotovoltaicos y de cerramientos en vidrio, solicitando catálogos, cotizaciones y especificaciones técnicas, con el fin de determinar la disponibilidad comercial y los factores que limitan su distribución. Después, se realizó una revisión normativa y de políticas públicas vinculadas con la generación distribuida, la eficiencia energética y los incentivos por la adopción de energías renovables. Se analizaron documentos como la Ley 1715 de 2014 (Congreso de la República de Colombia, 2014), Decreto 280 de 2015 (Gobierno Nacional, 2015), Decreto 0972 de 2025 (Ministerio de Minas y Energía, 2025), Resolución 40117 de 2024 (Ministerio de Minas y Energía, 2024), Resolución 0194 de 2025 (Ministerio de Vivienda, 2025), para establecer si la ausencia o debilidad regulatoria constituye una barrera de implementación. Finalmente, se abordó el contexto energético nacional, examinando informes oficiales y noticias de XM S.A.S. (2025a), estudios y publicaciones de la UPME (Unidad de Planeación Minero Energética - UPM, 2025a), resoluciones de la CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2025) sobre la composición de la matriz eléctrica, el costo promedio del kWh y las exportaciones energéticas, con el propósito de evaluar cómo la alta participación hidroeléctrica y las tarifas moderadas inciden en la baja demanda de sistemas solares integrados como el vidrio fotovoltaico.

2.3 Evaluación energética del vidrio fotovoltaico

Para estimar la energía producida por la ventanería fotovoltaica, se modeló una edificación residencial No VIS representativa del contexto urbano de Medellín. El análisis se centró en el comportamiento lumínico y energético de los espacios interiores con superficies vidriadas, cuya área total corresponde a 10,4 m² analizados en las cuatro orientaciones principales (norte, oriente, sur y occidente). En primer lugar, se calculó la disponibilidad de radiación solar incidente sobre dichas fachadas utilizando el archivo climático EPW de Medellín, procesado en el software

Climate Consultant desarrollado por UCLA Energy Design Tools (2018). A partir de este, se obtuvieron valores promedio de irradiancia mensual que se ponderaron según los días de cada mes para determinar la radiación anual por metro cuadrado para cada orientación. Después, se definieron las variables a analizar: un vidrio claro convencional de Vidrio Andino como caso base, y tres referencias de vidrios fotovoltaicos de la empresa Onyx Solar, con eficiencias baja, media y alta, y distintos valores de transmitancia visible, respectivamente (ver Figura 3).

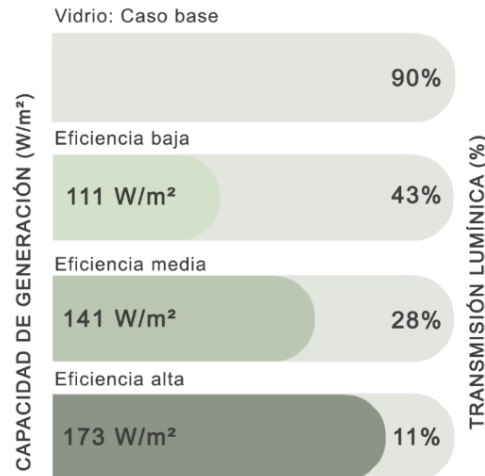


Figura 3. Relación entre capacidad de generación en W/m² y transmisión lumínica en % para el caso base (vidrio sin propiedades de generación energética) y vidrio fotovoltaico de baja, media y alta eficiencia.

Con la radiación anual, la potencia nominal de cada vidrio y un coeficiente de rendimiento de 0,75 (Zomer, 2010), se estimó la generación eléctrica anual. Finalmente, se evaluó el desempeño lumínico mediante el indicador sDA 300/50, y, con base en el consumo promedio residencial (UPME et al., 2019), se estableció el balance energético neto entre la energía generada y la requerida para iluminación artificial adicional, derivada de la reducción de la luz natural ocasionada por los propios vidrios fotovoltaicos (ver Tabla 1).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Elaboración de estado del arte

Al analizar la matriz elaborada para el estado del arte, se evidenció que el vidrio fotovoltaico hace parte de una temática de investigación emergente, la mayoría de publicaciones se concentran en los últimos cinco años, y han sido desarrolladas principalmente por países como China (Chen et al. (2024; Mao & Xiang, 2025; Zhang et al., 2016; Zhao & Gou, 2025), Suiza, (Aguacil et al., 2024; Corti et al., 2024), e India (Rodrigues et al., 2025; Shankar et al., 2021). Esto demuestra que hay un nuevo interés internacional en tecnologías BIPV o STPV, sin embargo, todavía se limita en aplicaciones efectuadas en contextos latinoamericanos. En cuanto a las tipologías estudiadas, los edificios residenciales y de oficinas fueron los más recurrentes, coincidiendo con el potencial de estas tipologías para la integración de sistemas en fachadas y/o cubiertas. Se encontraron pocos estudios sobre tipologías más complejas (como hospitales, aeropuertos o centros comerciales), esto plantea la duda sobre su potencial real de aplicación en edificaciones de uso continuo o con alta demanda energética, donde la rentabilidad del sistema podría verse reducida.

Tabla 4. Parámetros de entrada para el cálculo de generación y balance energético de la ventanería fotovoltaica en vivienda tipo en Medellín.

Variable	Símbolo o unidad	Valor
Consumo energético anual promedio residencial en Colombia (UPME)	kWh/año	1.884
Porcentaje del consumo energético anual en iluminación artificial residencial en Colombia (UPME)	%	14
Porcentaje del consumo anual en iluminación artificial en horas diurnas	%	60
Área ventanería vivienda tipo	m ²	10,41
Radiación: Orientación norte	kWh/m ² /año	577,57
Radiación: Orientación este	kWh/m ² /año	684,82
Radiación: Orientación sur	kWh/m ² /año	728,17
Radiación: Orientación oeste	kWh/m ² /año	944,42
Potencia nominal vidrio de eficiencia baja	kW/m ²	0,111
Potencia nominal vidrio de eficiencia media	kW/m ²	0,141
Potencia nominal vidrio de eficiencia alta	kW/m ²	0,173
Transmisión lumínica vidrio de eficiencia baja	%	43
Transmisión lumínica vidrio de eficiencia media	%	28
Transmisión lumínica vidrio de eficiencia alta	%	11
Coefficiente de rendimiento (PR)		0,75

De acuerdo con las metodologías de estas fuentes bibliográficas, predominan los estudios basados en simulaciones energéticas y económicas (como este estudio), complementados con algunos análisis de ciclo de vida y revisiones sistemáticas. Es frecuente la utilización de software como EnergyPlus (Ancil et al., 2020; Chen et al., 2024; Ghasaban et al., 2025; Rodrigues et al., 2025; Zhang et al., 2016) PVSyst (Barrera Torres, 2021; Hamzah & Go, 2023) o SAM (Rodrigues et al., 2025), esto muestra una tendencia hacia el uso de herramientas de modelado predeterminadas, aunque la evidencia en proyectos construidos aún es limitada. Los resultados de los estudios coinciden en destacar el potencial del vidrio fotovoltaico para mejorar la eficiencia energética, reducir emisiones de gases de efecto invernadero y generar ahorros económicos a mediano y largo plazo, convirtiéndose en una buena opción de transición hacia edificaciones sostenibles. En cuanto a las limitaciones, se abordan las explicaciones de la “lenta” adopción de estas tecnologías, se habla de altos costos iniciales, falta de marcos regulatorios claros, baja disponibilidad de materiales y escasa validación práctica en contextos reales. En general, estas limitaciones evidencian que, aunque existe una aprobación internacional sobre los beneficios del vidrio fotovoltaico, persiste un vacío en su aplicación efectiva en países como Colombia, lo que justifica la pertinencia de avanzar en investigaciones y estudios que exploren su viabilidad energética y económica en escenarios locales (UPME, 2025).

3.2 Identificación de barreras y limitaciones

Los hallazgos muestran tres barreras predominantes que limitan la adopción del vidrio fotovoltaico en Colombia: mercado, normativa y justificación energética.

En primer lugar, la ausencia de oferta comercial local fue constatada mediante búsqueda en directorios, páginas web y contactos directos con empresas vidrieras y comercializadoras de equipos fotovoltaicos: la mayoría no dispone de vidrio fotovoltaico en su catálogo y las respuestas comerciales fueron limitadas. En particular, los proveedores internacionales consultados no suministraron información suficiente sobre precios o condiciones de suministro e importación, lo que impide obtener referencias de CAPEX (gasto de capital) a nivel local. Esta evidencia primaria permite afirmar la falta de una cadena comercial consolidada para BIPV en el país.

Segundo, la normatividad es fragmentaria y poco específica respecto a BIPV: existen marcos

habilitantes como la Ley 1715 de 2014 (Congreso de la República de Colombia, 2014), Ley 1931 de 2018 (Congreso de la República de Colombia, 2018), Ley 2099 de 2021 (Congreso de la República de Colombia, 2021), NTC 2050 (ICONTEC, 2020), Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE (Resolución 90708 de 2013. Por La Cual Se Expide El Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE, 2013) y resoluciones de la Comisión de Regulación de Energía y Gas – CREG, pero las disposiciones tienden a abordar la energía renovable y la generación distribuida en términos generales, dejando vacíos sobre requisitos constructivos, integración de cerramientos activos y procedimientos homogéneos de certificación para vidrios fotovoltaicos. Además, los trámites y procedimientos administrativos complejos constituyen una barrera operativa (UPME, 2025).

Tercero, la justificación energética limita la urgencia de adopción: la matriz colombiana exhibe una alta participación hidroeléctrica (ver figura 4) una producción suficiente para exportación periódica según los informes, lo que, junto a tarifas moderadas y dependencia de importaciones de tecnología, reduce el incentivo económico inmediato para BIPV. Datos de generación y comercio eléctrico recientes confirman excedentes exportables y una proporción mayoritaria de energía renovable convencional (XM S.A.S., 2025b), escenario que atenúa la presión por desplazar capacidad con soluciones solares integradas.

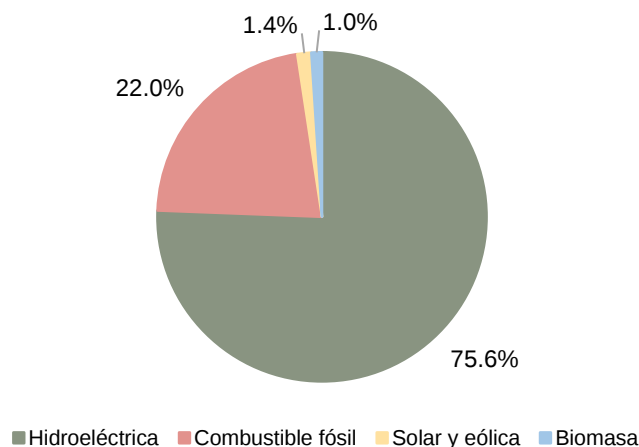


Figura 4. Matriz de generación eléctrica 2019-2024 en Colombia: Participación porcentual de las diferentes fuentes en la generación eléctrica nacional. Basado según los reportes de Generación Real Sistema Interconectado Nacional de XM S.A.S. entre los años 2019 y 2024.

En conjunto, las evidencias presentadas apuntan a que, aunque existen señales políticas favorables, la implementación masiva del vidrio fotovoltaico requerirá fortalecer mercado local, clarificar y adaptar la normativa técnica y, articular medidas económicas que reduzcan la brecha entre ingreso energético potencial y costos iniciales UPME (2025).

3.3 Evaluación energética del vidrio fotovoltaico

A partir de la simulación realizada para un apartamento tipo No VIS en Medellín, se obtuvo la radiación incidente anual en las cuatro orientaciones principales. Con base en esta información y considerando la potencia nominal y el coeficiente de rendimiento de los vidrios fotovoltaicos seleccionados, se estimó la generación eléctrica anual para cada escenario de eficiencia y transmitancia visible. El cálculo consideró las horas de radiación comprendidas entre las 6:00 a.m. y 6:00 p.m., correspondiente al rango horario de mayor disponibilidad solar en la ciudad. Los

resultados muestran que la orientación oeste presenta el mejor desempeño energético, seguida por las fachadas sur, este y norte, lo que coincide con la incidencia solar predominante en Medellín.

Tabla 2. Generación energética anual (kWh/año) en ventanas de un apartamento tipo No VIS, según eficiencia del vidrio fotovoltaico (EB: baja, EM: media, EA: alta) y orientación (N: norte, E: este, S: sur, O: oeste).

EB-N	EM-N	EA-N	EB-E	EM-E	EA-E	EB-S	EM-S	EA-S	EB-O	EM-O	EA-O
500,5	635,8	780,1	593,5	753,9	924,0	631,1	801,6	983,5	818,5	1039,7	1275,6

Posteriormente, se calculó la penalidad lumínica, expresada como el incremento del consumo energético asociado a la disminución de la autonomía lumínica (sDA 300/50), al comparar los vidrios fotovoltaicos frente al vidrio convencional. Este valor representa la cantidad de energía adicional que debe consumirse para compensar la pérdida de luz natural y mantener las condiciones de iluminación adecuadas en el espacio interior. La penalidad fue mayor en los vidrios de eficiencia alta (con un valor de transmitancia de 11 %), con un promedio cercano a 155 kWh/año, mientras que los vidrios de eficiencia baja (43 % de transmitancia) mostraron un incremento menor, de aproximadamente 105 kWh/año.

Tabla 3. Penalidad en el desempeño de luz natural (kWh/año), calculada a partir de la diferencia entre la sDA del vidrio fotovoltaico y la del vidrio convencional (caso base), según eficiencia del vidrio (EB: baja, EM: media, EA: alta) y orientación (N: norte, E: este, S: sur, O: oeste).

EB-N	EM-N	EA-N	EB-E	EM-E	EA-E	EB-S	EM-S	EA-S	EB-O	EM-O	EA-O
110,8	136,1	156,8	102,1	130,5	155,5	106,2	133,2	155,9	102,9	132,4	156,3

El balance energético neto, obtenido al restar la penalidad del total de energía generada, demuestra que en todos los casos la generación excede el consumo promedio de iluminación artificial en viviendas (158 kWh/año según UPME et al. (2019)). La generación excedente neta varía entre 389 y 1.119 kWh/año, según la orientación y la eficiencia del vidrio. La gráfica de dispersión (ver Figura 5) evidencia una tendencia lineal positiva: a menor valor de transmitancia lumínica, mayor eficiencia fotovoltaica, mayor producción eléctrica y mayor porcentaje de excedente respecto al consumo promedio colombiano. No obstante, los resultados no permiten señalar una única orientación o un tipo específico de vidrio como óptimo, pues si bien los mayores valores de generación corresponden a la fachada oeste, también se observan desempeños significativos en las fachadas sur y este, lo que sugiere que el potencial de aprovechamiento solar es distribuido y depende de la configuración arquitectónica del edificio. En términos relativos, el excedente energético alcanza entre el 20 % y el 60 % del consumo anual residencial.

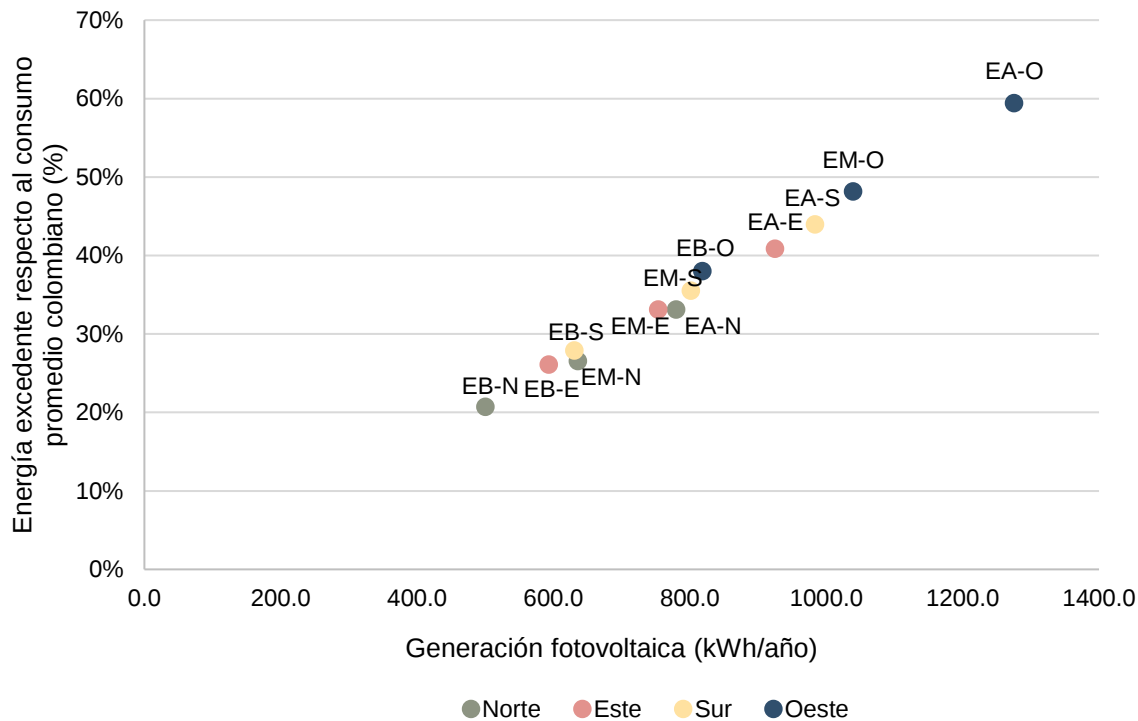


Figura 5. Generación fotovoltaica (kWh/año) vs. excedente energético neto (%). Elaborada a partir de los resultados obtenidos para las cuatro orientaciones principales y tres niveles de eficiencia de vidrio fotovoltaico.

4. CONCLUSIONES

La implementación de vidrio fotovoltaico en edificaciones residenciales No VIS en Medellín es energéticamente viable bajo las condiciones solares y climáticas propias de su latitud tropical. A partir del modelado realizado, se evidenció que, incluso en la orientación con menor radiación y con vidrios de baja transmitancia visible, la generación eléctrica supera el consumo de iluminación artificial. En promedio, los vidrios de alta eficiencia produjeron excedentes entre el 20 % y el 60 % del consumo residencial anual reportado por la UPME et al. (2019), destacándose la fachada oeste como la de mayor rendimiento, aunque también se observaron desempeños favorables en las fachadas sur y este, lo que evidencia un potencial distribuido según la configuración arquitectónica. Los resultados confirman el potencial del vidrio fotovoltaico para ampliar la generación distribuida en entornos urbanos, donde las fachadas representan superficies aprovechables ante la escasez de cubiertas disponibles, siempre que se consideren estrategias de diseño que mitiguen el sombreado entre edificaciones.

Sin embargo, su implementación requiere considerar la disminución de la autonomía lumínica diurna que estos sistemas ocasionan. Si bien la penalidad lumínica representa un incremento moderado del consumo artificial, su inclusión en el balance energético es fundamental para obtener resultados realistas y evitar sobreestimaciones de rendimiento.

En el contexto nacional, se identificaron barreras estructurales que dificultan su adopción. En el ámbito del mercado, no existen proveedores locales ni oferta consolidada, lo que implica la dependencia de importaciones, que, a su vez, eleva los costos iniciales. Desde el punto de vista

normativo, aunque Colombia ha avanzado en políticas de energías renovables, aún no existen lineamientos específicos para sistemas fotovoltaicos integrados a la edificación, lo que limita la regulación y estandarización técnica.

Asimismo, la matriz energética colombiana, con más del 75 % proveniente de fuentes hidroeléctricas, según (XM S.A.S., 2023), reduce la urgencia percibida de diversificar hacia energía solar. Aun así, esta alta dependencia de la hidrología vuelve al sistema vulnerable frente a las alteraciones climáticas proyectadas por el cambio climático, que podrían modificar los regímenes de lluvia y generar imprecisiones en la disponibilidad hídrica, afectando la estabilidad y los costos de generación. En este contexto, la energía solar emerge como una alternativa complementaria, más estable y predecible, que podría contribuir a la resiliencia del sistema eléctrico nacional.

Finalmente, el vidrio fotovoltaico se perfila como una oportunidad real para avanzar hacia edificaciones de baja huella de carbono, siempre que se fortalezcan los marcos regulatorios, los incentivos de inversión y la articulación entre el sector público y privado. Futuros estudios podrían evaluar la relación ventana–muro (WWR por sus siglas en inglés) y su efecto sobre la generación eléctrica y el confort térmico interior, considerando el equilibrio entre área vidriada, ganancia solar y autonomía lumínica. También sería pertinente analizar la configuración on-grid y off-grid del sistema, así como aspectos de mantenimiento y durabilidad del vidrio fotovoltaico en climas tropicales como el de Medellín.

5. AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a mi profesora Laura Rendón Gaviria por su acompañamiento, orientación y apoyo durante todo el proceso de esta investigación, así como por la pasión y compromiso que transmite en su labor docente.

6. REFERENCIAS

- Aguacil, S., Duque, S., Lufkin, S., & Rey, E. (2024). Designing with building-integrated photovoltaics (BIPV): A pathway to decarbonize residential buildings. *Journal of Building Engineering*, 96. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110486>
- Ancil, A., Lee, E., & Lunt, R. R. (2020). Net energy and cost benefit of transparent organic solar cells in building-integrated applications. *Applied Energy*, 261. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114429>
- Barrera Torres, L. (2021). *Análisis de viabilidad para implementar sistemas fotovoltaicos de autogeneración para terrazas menores a 2000 m2 en Medellín*.
- Chen, L., Sun, Y., Zhang, N., Yang, J., & Wang, D. (2024). Quantifying the benefits of BIPV windows in urban environment under climate change: A comparison of three Chinese cities. *Renewable Energy*, 221. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119740>
- Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2025). *Resoluciones*.
- Corti, P., Follo, A., & Bonomo, P. (2024). Workflow to support cost-benefits comparison and sensitivity analysis of BIPV case studies: Three examples of BIPV facades in the south of Switzerland. *Energy and Buildings*, 322. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114732>
- Decreto 280 de 2015. Por El Cual Se Crea La Comisión Interinstitucional de Alto Nivel Para El Aislamiento y La Efectiva Implementación de La Agenda de Desarrollo Post 2015 y Sus Objetivos

de Desarrollo Sostenible (ODS) (2015).

Decreto 0972 de 2025. Por El Cual Se Adiciona La Sección 4C al Capítulo 2 Del Título 111 Sector de Energía Eléctrica de La Parte 2 Del Libro 2 Del Decreto Número 1073 de 2015, Que Habilita El Desarrollo de La Energía Solar Como Fuente de Autogeneración Para Los Usuarios de Los Estratos 1, 2 Y 3 Del Sistema Interconectado Nacional (SIN) y de Las Zonas No Interconectadas (ZNI) Como Una Alternativa al Subsidio Existente Para El Consumo de Electricidad y Crea El Programa Colombia Solar (2025). DO N°53239

Ghasaban, M., Yeganeh, M., & Irani, M. (2025). Optimizing daylight, sky view and energy production in semi-transparent photovoltaic facades of office buildings: A comparative study in four climate zones. *Applied Energy*, 377. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124707>

Hamzah, A. H., & Go, Y. I. (2023). Design and assessment of building integrated PV (BIPV) system towards net zero energy building for tropical climate. *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2022.100105>

ICONTEC. (2020). *Código Eléctrico Colombiano*.

Jayachandran, M., Gatla, R. K., Rao, K. P., Rao, G. S., Mohammed, S., Milyani, A. H., Azhari, A. A., Kalaïarasy, C., & Geetha, S. (2022). Challenges in achieving sustainable development goal 7: Affordable and clean energy in light of nascent technologies. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102692>

Ley 1715 de 2014. Por Medio de La Cual Se Regula La Integración de Las Energías Renovables No Convencionales al Sistema Energético Nacional. (2014). DO N°49150

Ley 1931 de 2018. Por La Cual Se Establecen Directrices Para La Gestión Del Cambio Climático (2018). DO N°50667

Ley 2099 de 2021. Por Medio de La Cual Se Dictan Disposiciones Para La Transición Energética, La Dinamización Del Mercado Energético, La Reactivación Económica Del País y Se Dictan Otras Disposiciones (2021).

Martín Chivelet, N., Kapsis, C., & Frontini, F. (2025). *Building-Integrated Photovoltaics; A Technical Guidebook*. <https://orcid.org/0000-0003->

Resolución 0194 de 2025. Por Medio de La Cual Se Definen Los Parámetros y Lineamientos de Construcción Sostenible, Se Adopta La Guía Para El Ahorro de Agua y Energía En Edificaciones, Se Sustituye La Resolución 0549 Del 2015 y Se Dictan Otras Disposiciones (2025). DO N°53097

Resolución 40117 de 2024. Por La Cual Se Modifica El Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE (2024). DO N°52716

Resolución 90708 de 2013. Por La Cual Se Expide El Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE (2013). DO N°48904

Rodrigues, P., Pallathadka, H., Kanabar, B., Bareja, L., Ramachandran, T., Vakada, N. B. R., AL-Hamairy, A. K., Khazaal, W. M., & Foladi, A. (2025). Techno-economic and sensitivity analysis of a building integrated photovoltaic/thermal systems. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 20, 136–145. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctae277>

Shankar, A., Vijayakumar, K., & Chitti Babu, B. (2021). Techno-economic and energy assessment of building integrated photovoltaic module as an envelope of the building. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31(11). <https://doi.org/10.1002/2050-7038.13105>

UCLA Energy Design Tools. (2018). *Climate Consultant* (6.0).

- UN Environment Programme, & International Energy Agency. (2020a). *GlobalABC Regional Roadmap for Buildings and Construction in Latin America 202002050 Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector*. www.iea.org
- UN Environment Programme, & International Energy Agency. (2020b). *GlobalABC Regional Roadmap for Buildings and Construction in Latin America Activity 4: Building operations*.
- Unidad de Planeación Minero Energética - UPM. (2025). *Estudios y publicaciones*. <https://www.upme.gov.co/home/estudios-y-publicaciones/>
- UPME. (2025). *Plan Energético Nacional 2024-2054*. https://docs.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2024_2054/PDF1_PEN_2024-2054_Tomo_I.pdf
- UPME, Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien, & Corpoema. (2019). *Primer balance de Energía Útil para Colombia y Cuantificación de las Perdidas energéticas relacionadas y la brecha de eficiencia energética*. https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Balance_energia_util/BEU-Residencial.pdf
- XM S.A.S. (n.d.). *Generación Real Sistema Interconectado Nacional*. Retrieved October 25, 2025, from <https://sinergox.xm.com.co/oferta/Paginas/Informes/GeneracionSIN.aspx>
- XM S.A.S. (2025a). *Noticias XM*. <https://www.xm.com.co/noticias>
- XM S.A.S. (2025b, February 21). *Informe de XM sobre las variables del Mercado de Energía Mayorista en enero de 2025*. <https://www.xm.com.co/noticias/7607-informe-de-xm-sobre-las-variables-del-mercado-de-energia-mayorista-en-enero-de-2025>
- Zhang, W., Lu, L., Peng, J., & Song, A. (2016). Comparison of the overall energy performance of semi-transparent photovoltaic windows and common energy-efficient windows in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 128, 511–518. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.016>
- Zomer, C. D. (2010). *Geração solar fotovoltaica integrada a uma edificação inserida em meio urbano e conectada à rede elétrica*. <https://core.ac.uk/download/pdf/30374775.pdf>

DESARROLLO DE CONCRETOS MEDIANTE LA ACTIVACIÓN ALCALINA DE METACAOLÍN COMO PRECURSOR Y RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN DE CONCRETO COMO AGREGADOS

Sharles Agustín Gómez Rammírez¹, Carolina Vasquez Cuellar¹, Nicolás Steven Pardo Álvarez², José Reynaldo Zelaya Maradiaga²

¹ Semillero de Investigación en Ciencias y Tecnología de la Construcción SITEC, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, sagustingomez@est.colmayor.edu.co, carolinav@est.colmayor.edu.co

² Grupo de Investigación Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, nicolas.alvarez@colmayor.edu.co, jose.zelaya@colmayor.edu.co

Palabras clave: Residuos de Construcción y Demolición (RCD), concretos, activación alcalina, aprovechamiento.

1. INTRODUCCIÓN

El término Residuos de Construcción y Demolición (RCD) se ha utilizado para referirse a cualquier material generado como residuo en obras de construcción, en la demolición de edificios o estructuras, o en una combinación de ambas. Los RCD tienen su origen en tres etapas del ciclo de vida de las edificaciones, asociadas a la planeación del proyecto de construcción con la estimación de los RCD a generar, la ejecución llevando a cabo el proyecto conforme a su propósito y la demolición parcial o total, cuando el edificio o una de sus partes alcanza el final de su ciclo de vida (Hoffmann et al., 2024). La composición de los RCD es variable y depende de diferentes factores. De manera específica, para los residuos generados durante la fase de las estructuras de concreto, predominan fragmentos de concreto, acero y encofrados de madera, entre otros. El reciclaje de los RCD para ser implementados de nuevo en el sector constructor generalmente se refiere a la generación de agregados reciclados, los cuales deben cumplir con requisitos específicos de granulometría y propiedades que permita ser utilizados en la elaboración de concretos (Torgal, 2013). La implementación de agregados reciclados a partir de RCD mediante la activación alcalina es una nueva estrategia que mitiga el problema de las impurezas, uno de los principales factores asociados a estos agregados, ya que por la naturaleza del proceso en el que un precursor al entrar en contacto con el activador alcalino genera una matriz cementante que tiene la capacidad de inmovilizar una amplia variedad de elementos nocivos y presenta menor susceptibilidad a la expansión inducida por la reacción álcali-sílice (Reinhardt et al., 2014).

Diversos autores han desarrollado concretos a partir de la activación alcalina de diferentes materiales cementantes suplementarios o puzolanas utilizando agregados reciclados generados a partir de RCD. Ílcan et al (2024) desarrollaron un material activado alcalinamente a partir del polvo de RCD como precursor activado con una solución de NaOH 5 M y con 100% RCD como agregado. Obtuvieron resistencias a la compresión de 10,5 MPa y resistencias a la flexión de 2,3 MPa a los 28 días. De igual forma, Alhawati et al (2024) realizaron un estudio sobre los parámetros de mayor influencia en el desarrollo de concretos activados alcalinamente, la matriz cementante fue elaborada a partir de polvo de RCD (75 μ m) de concreto y/o ladrillo combinados con 25% de escorias de fundición de alto horno y activados con NaOH 12 M, obtuvieron resistencias a la compresión de 35 MPa a los 28 días. Cantero et al (2024) optimizaron el desempeño de morteros

activados alcalinamente utilizando como precursores concreto reciclado (RC), ladrillo reciclado (RB) y baldosa reciclada (RT) y una mezcla de NaOH con Na_2SiO_3 como activadores, obteniendo resistencias a la compresión y flexión de hasta 12,5 y 2,8 MPa respectivamente. Tan et al (2022) analizaron la mitigación de la eflorescencia en concretos activados alcalinamente a partir de RCD, utilizando metacaolín y/o escorias de fundición como precursores y NaOH 5 M como activador, encontrando que la adición de metacaolín en el sistema redujo la cantidad de álcalis en exceso, de 24,5 % a 10,2 % en moles, mediante la incorporación de especies de aluminio y resistencias a la compresión de hasta 35 MPa curados en aire.

Como se ha mostrado, el uso de RCD en concretos fabricados mediante la activación alcalina con diferentes precursores, incluyendo el mismo RCD, es una estrategia que ha permitido desarrollar materiales con diferentes rangos de resistencia a la compresión. Sin embargo, debido a la variabilidad de las materias primas la implementación de metacaolín y silicato de sodio comercial como precursor y activador respectivamente, sumado al uso de RCD generados por una empresa local es un campo que requiere estudios específicos. Debido a lo anterior, en este proyecto tiene como objetivo desarrollar concretos mediante la activación alcalina de metacaolín como precursor con silicato de sodio como activador y residuos de construcción y demolición de concreto como agregados, todos ellos disponibles a nivel comercial. Para esto, los materiales fueron obtenidos a partir de empresas locales y se plantearon diseños de mezcla en los cuales se varió simultáneamente la relación entre el silicato de sodio y agua ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{H}_2\text{O}$) con la relación entre agregado grueso natural y agregado grueso reciclado (Agn/Agr) para evaluar su efecto en la resistencia a la compresión a los 28 días de edad luego de curar al ambiente (sin inmersión en agua).

2. METODOLOGÍA

En la Figura 1 se presenta el diagrama metodológico, enfocado en las etapas de identificación de propiedades, planteamiento de los diseños de mezcla y evaluación de propiedades.

2.1 Identificación de propiedades

Como precursor se utilizó metacaolín (MK) comercial Fortacret de la empresa Corona. Como activador se utilizó una mezcla de silicato de sodio (Na_2SiO_3) comercial de referencia Flocsil de la empresa Spin S.A. Los agregados finos (Af) y gruesos (Agn) naturales corresponden a materiales comerciales. El agregado grueso reciclado (Agr) fue suministrado por la empresa GeoNatural. Se realizaron las pruebas para determinar la densidad, porcentaje de absorción, porcentaje de humedad y análisis granulométrico según las normas NTC 237:2020, NTC 77:2018, NTC176:2019, NTC 92:2019 y NTC 1776:2019. La información del metacaolín y el silicato de sodio fue tomada de la ficha técnica suministrada por cada una de las empresas, complementada con revisión literaria.

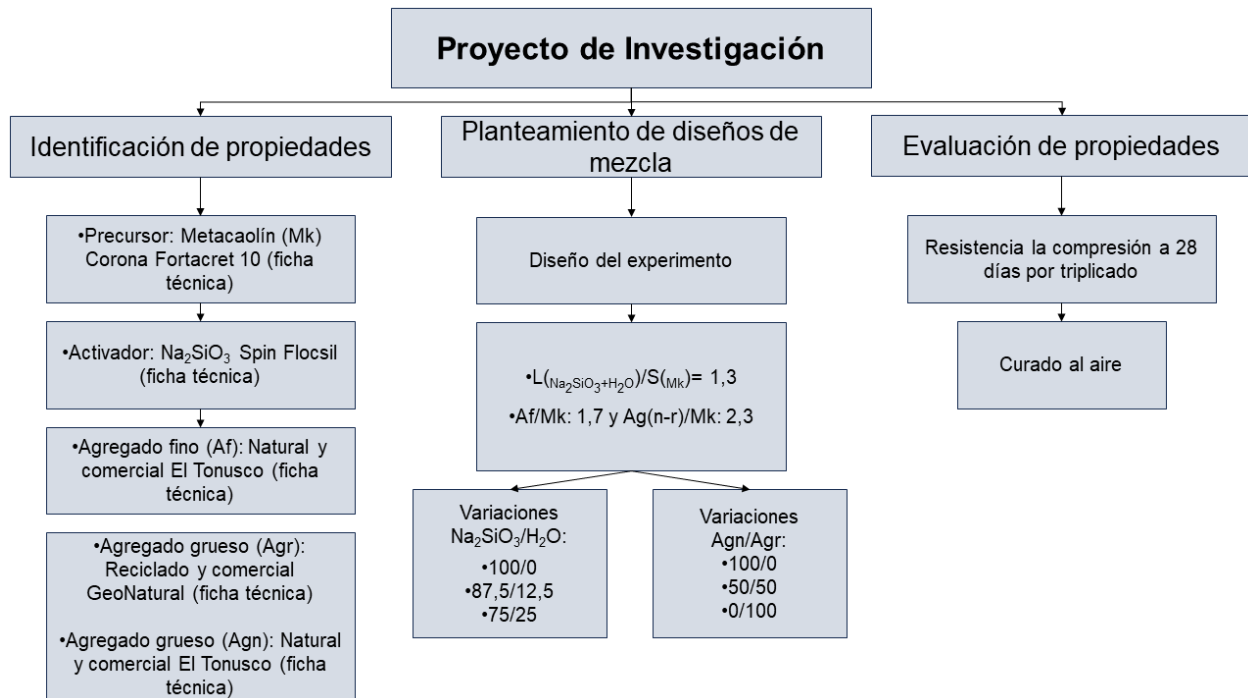


Figura 4. Diagrama metodológico.

2.2 Planteamiento de los diseños de mezcla

Los diseños de mezcla de concretos se plantearon manteniendo fija la relación $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{O}/\text{MK}$ en 1,3 y la relación Af/MK y $\text{Agn-r}/\text{MK}$ en 1,7 y 2,3 respectivamente. La mezcla $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ se planteó en las proporciones 100/0, 87,5/12,5 y 75/25 y la relación Agn/Agr se planteó en las proporciones 100/0, 50/50 y 0/100, con el fin de determinar la influencia del contenido de agua en el activador y la inclusión de agregado grueso reciclado en la resistencia a la compresión de los concretos activados alcalinamente.

2.3 Evaluación de propiedades

La resistencia a la compresión se evaluó a los 28 días de acuerdo a la NTC 673:2021, los diseños se plantearon por triplicado y el curado se realizó al ambiente, sin inmersión en gua.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Identificación de propiedades

La Tabla 1 muestra las principales propiedades de los materiales utilizados. El MK se caracteriza por su alto contenido de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , y una gravedad específica que oscila entre 2.500 y 2.600 kg/m^3 . El Na_2SiO_3 , por su parte, corresponde a un líquido alcalino con un porcentaje de sólidos de 44,92%, compuesto por Na_2O y SiO_2 . Por otra parte, el Af corresponde a una arena gruesa con un módulo de finura de 3,1, un porcentaje de absorción del 3,18% y una densidad aparente seca de 2.780 kg/m^3 . Además, tanto para el Agn como para el Agr, se utilizó un tamaño máximo nominal de 19 mm, con importantes diferencias en el porcentaje de absorción y densidad aparente seca, siendo para Agn 2,62% y 2.820 kg/m^3 respectivamente, mientras que para Agr fue de 8,02% y 2.068 kg/m^3 respectivamente.

Tabla 1. Propiedades de los materiales.

Materiales	Principales propiedades
Metacaolín (Fortacret 10)	% SiO ₂ + % Al ₂ O ₃ + % Fe ₂ O ₃ > 70% Según norma ASTM C618-15 (Corona, 2022).
Spin Flocsil (Na ₂ SiO ₃)	Según ficha técnica (Spin S.A., 2024), características: % Na ₂ O = 16,67% y % SiO ₂ = 28,25 %. % Sólidos = 44,92%
Agregado fino	Densidad aparente seca: 2.780 kg/m ³ Absorción: 3,18% Módulo de finura: 3,1 Humedad: 0%
Agregado grueso natural	Densidad aparente seca: 2.820 kg/m ³ Absorción: 2,62% Tamaño máximo nominal: 19 mm Densidad volumétrica: 1.620 kg/m ³ Humedad: 0%
Agregado grueso reciclado	Densidad aparente seca: 2.068 kg/m ³ Absorción: 8,02% Tamaño máximo nominal: 19 mm Densidad volumétrica: 1.540 kg/m ³ Humedad: 0%

3.2 Planteamiento de los diseños de mezcla y evaluación de propiedades

En la Figura 2 se presenta la densidad (kg/m³) en función de los diseños de mezcla evaluados. La densidad disminuye a medida que aumenta la cantidad de Agr en la mezcla, probablemente relacionado con la densidad aparente seca la cual es menor que el natural. En adición, se observó que una mayor proporción de agua en la solución (reducción del Na₂SiO₃/H₂O de 100/0 a 75/25) disminuyó densidad de los concretos, posiblemente debido a un incremento en la porosidad de la matriz cementante. El efecto combinado del uso de agregado reciclado y agua en la solución, muestran que el diseño con 100% Agn y activador 100/0 presentó la mayor densidad (2.276,9±25,4 kg/m³), mientras que la mezcla con 100% Agr y activador 75/25 la menor densidad (1.956,6±9,4 kg/m³) logrando una reducción de 14,07%. En los diseños intermedios con mezcla de agregados (50-50), la densidad fue menor que la del concreto con solo Agn, pero mayor que la de aquel con solo Agr, siguiendo una tendencia decreciente con el aumento del contenido de Agr y agua en el activador.

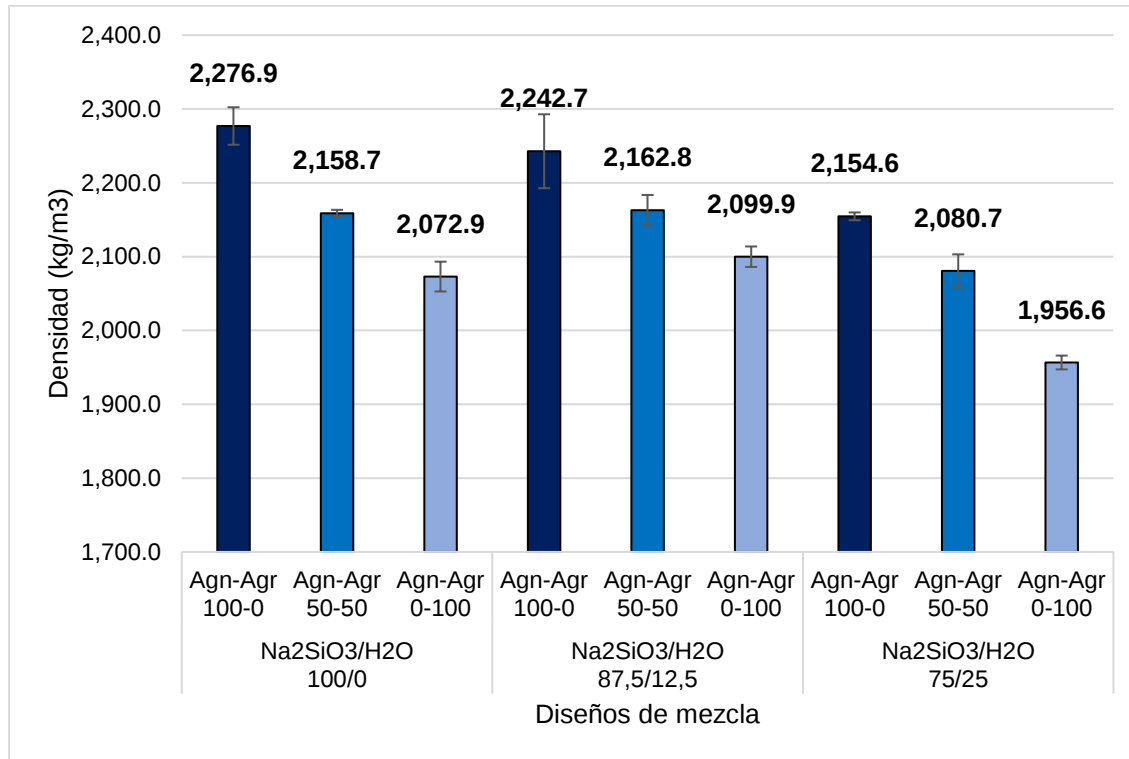


Figura 5. Densidad (kg/m³) en función de los diseños de mezcla.

En la Figura 3 se presentan los resultados de la resistencia a la compresión (MPa) en función de los diseños de mezcla evaluados. El diseño con mayor resistencia corresponde a la mezcla con 100% Agn y una relación Na₂SiO₃/H₂O de 87,5/12,5, alcanzando 37,6±0,1 MPa, sugiriendo que un ligero aumento en el contenido de agua con respecto al activador 100/0 mejoró la reactividad del metacaolín y favoreció el desarrollo de resistencia. Mientras que el grupo de mezclas (100/0) mantuvieron resistencias entre los 25,2±4,0 y 26,2±1,5 MPa. Sin embargo, el incremento adicional del contenido de agua en el activador (75/25), generó una reducción en la resistencia a la compresión de 62,5% alcanzando valores de 25,1±0,4 MPa con 100% Agn y solo 9,4±0,4 MPa con 100% Agr, indicando que el exceso de agua negativamente la formación de la matriz cementante mientras que el uso de RCD pudo causar una baja interacción entre la pasta-agregado y un concreto con mayor porosidad.

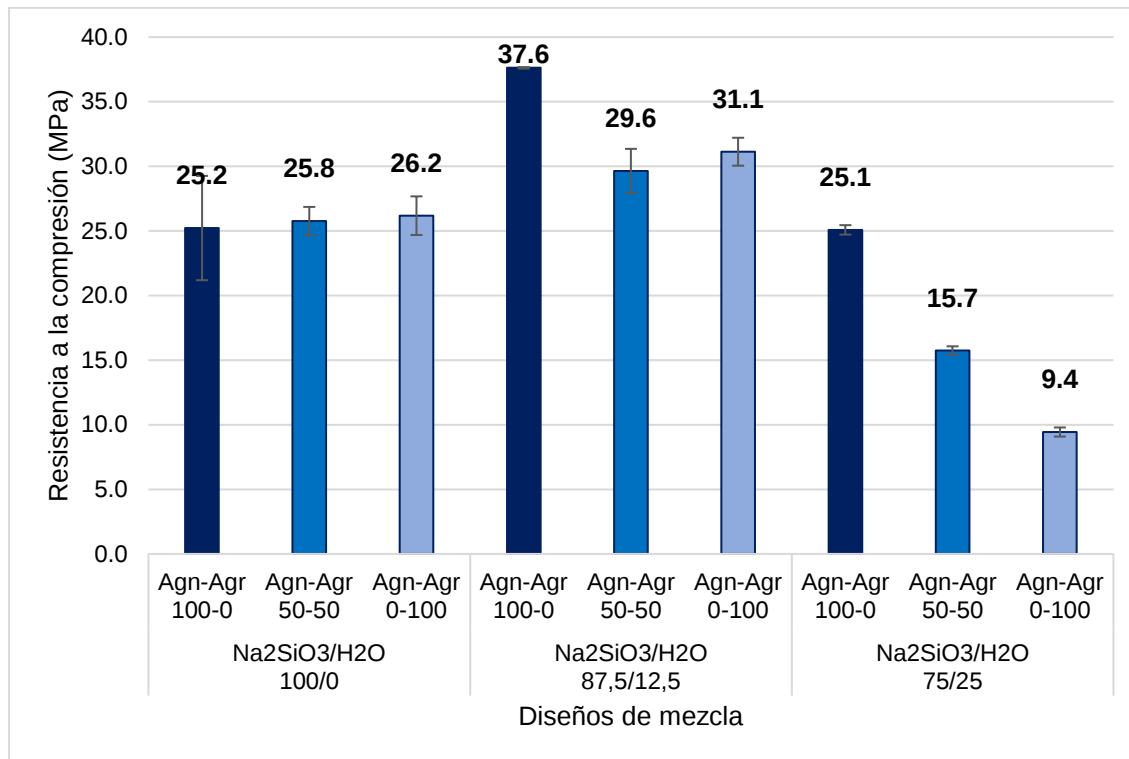


Figura 6. Resistencia a la compresión (MPa) en función de los diseños de mezcla.

4. CONCLUSIONES

El estudio demostró que el desarrollo de concretos mediante la activación alcalina de metacaolín (MK) como precursor y la incorporación de agregados reciclados de construcción y demolición (Agr) presentó propiedades físicas y mecánicas similares a las obtenidas con agregados naturales. La densidad del concreto disminuyó progresivamente al incrementar el contenido de Agr, asociado a su mayor porosidad y absorción de agua, lo que afectó la compactación de la mezcla. Además, la reducción en la proporción de silicato de sodio (Na_2SiO_3) y el aumento de agua en el activador (relación 75/25) generaron una menor densidad, evidenciando que el exceso de agua incrementó la porosidad de la matriz cementante. La resistencia a la compresión más alta ($37,6 \pm 0,1$ MPa) se obtuvo con 100% de agregado natural (Agn) y una relación $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{H}_2\text{O}$ de 87,5/12,5, sugiriendo que la incorporación de agua mejoró la reactividad del MK. Sin embargo, al aumentar el agua en el activador (75/25) o reemplazar el Agn por Agr, la resistencia disminuyó notablemente, alcanzando valores bajos ($9,4 \pm 0,4$ MPa), lo que demostró que el exceso de agua y la presencia de Agr redujeron la eficiencia de la matriz activada alcalinamente. Los diseños con mezclas intermedias de Agn y Agr (50/50) mostraron un comportamiento decreciente en densidad y resistencia, siguiendo una tendencia proporcional al contenido de Agr. Estos resultados indicaron que, aunque es viable emplear Agr en concretos activados alcalinamente, su dosificación debe ser cuidadosamente controlada para mitigar los efectos negativos en la microestructura y las propiedades mecánicas. Asimismo, se evidenció que la relación óptima $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{H}_2\text{O}$ fue 87,5/12,5, ya que maximizó la resistencia sin comprometer la integridad de la pasta.

5. AGRADECIMIENTOS

Extendemos un especial agradecimiento al profesor Nicolás Steven Pardo por su constante orientación y apoyo a lo largo del desarrollo de nuestro trabajo de grado. Su compromiso, conocimientos y disposición para brindar asesoría en cada etapa del proyecto fueron claves para alcanzar los objetivos propuestos. Agradecemos también la confianza que depositó en nosotros y su acompañamiento cercano, que no solo enriqueció el contenido técnico del trabajo, sino también fortaleció nuestro crecimiento académico y profesional.

6. REFERENCIAS

- Alhawati, M., Yildirim, G., Ashour, A., Ozcelikci, E., Aldemir, A., & Sahmaran, M. (2024). A study on the influencing parameters in developing construction and demolition waste-based geopolymer concretes and their sustainability assessment. *Construction and Building Materials*, 426. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136143>
- Cantero, B., Neves, R., Sequeira, L., de Brito, J., & Bravo, M. (2024). Optimisation of the performance of alkali-activated mortars using CDW binders from different sources. *Construction and Building Materials*, 442. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137677>
- Hoffmann, S., Lasarov, W., Reimers, H., & Trabant, M. (2024). Carbon footprint tracking apps. Does feedback help reduce carbon emissions? *Journal of Cleaner Production*, 434. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139981>
- İlcan, H., Demirbaş, A. O., Ulugöl, H., & Şahmaran, M. (2024). Low-alkaline activated construction and demolition waste-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 411. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134546>
- Reinhardt, H.-Wolf., Maierhofer, Christiane., & Dobmann, Gerd. (2014). *Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures. Volume 1, Deterioration processes and standard test methods*. CRC Press.
- Tan, J., Cizer, Ö., Vandevyvere, B., De Vlieger, J., Dan, H., & Li, J. (2022). Efflorescence mitigation in construction and demolition waste (CDW) based geopolymer. *Journal of Building Engineering*, 58. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105001>
- Torgal, F. Pacheco. (2013). *Eco-efficient concrete*. Woodhead Publishing.

ANÁLISIS DEL IMPACTO ECONÓMICO DE LOS TRÁMITES DE APROVECHAMIENTO FORESTAL EN TRES PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN EN EL VALLE DE ABURRÁ, COLOMBIA

Cesar Augusto Ramírez¹, Natalia Andrea Arboleda López¹; Nicolás Steven Pardo¹

¹ Grupo de Investigación Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, marianaao@est.colmayor.edu.co; natalia.arboleda@colmayor.edu.co; nicolas.alvarez@colmayor.edu.co

Palabras clave: Trámites, compensación, sostenibilidad, aprovechamiento forestal.

1. INTRODUCCIÓN

El acelerado crecimiento urbano a nivel mundial, según las Naciones Unidas prevé que el 85% de la población mundial será urbana para 2030 (Banco Mundial, 2022). Este modelo de ocupación, impulsado por migraciones campo-ciudad con un incremento cada vez más acelerado, conlleva una alta demanda habitacional que deriva en asentamientos informales, déficit de servicios públicos y ocupación de zonas de riesgo. La industria de la construcción, uno de los sectores más contaminantes, responsable de más de un tercio de las emisiones de CO₂ (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2021) estimulando la fragmentación de los ecosistemas urbanos y la pérdida de biodiversidad en los contextos urbanos. Frente a esto, las autoridades han implementado instrumentos de compensación ambiental. Estos mecanismos, como la reposición forestal, los bancos de biodiversidad o los aportes a fondos ambientales, buscan lograr una "no pérdida neta" basándose en principios de equivalencia ecológica, priorización geográfica y un enfoque ecosistémico. Otro instrumento clave que se está implementando en pro de mitigar las afectaciones a la fauna directamente son los estudios de conectividad ecológica, que aportan soluciones basadas en identificación de corredores y nodos dentro del área urbana valorando su relevancia en la red ecológica urbana, en el caso de Medellín y el Valle de Aburrá es la espina dorsal de la sostenibilidad ambiental del territorio (Alcaldía de Medellín, 2023, p. 112) puesto que la apuesta representa un hito sustantivo dentro del desarrollo sostenible de la ciudad.

En Suecia, la adopción es metodológicamente inconsistente y fragmentada. Si bien el 56% de los municipios incorpora el concepto en la planificación urbana, la efectividad real está severamente limitada por la falta de estandarización en los criterios. Menos de un tercio de los municipios aplica correctamente la jerarquía de mitigación, y solo el 10% establece tasas de reemplazo claras para asegurar la "no pérdida neta" (Hanson & Olsson, 2023). Por el contrario, Australia opera un modelo económico-ambiental donde el Índice Ecológico (IE) funge como variable de valoración cuantitativa. La fórmula de compensación implementada establece un incentivo financiero directo que internaliza efectivamente el costo ambiental, logrando una reducción promedio del 60% en los costos para el desarrollador. Este éxito se atribuye mayoritariamente a la disminución del área de desmonte (57% de la reducción total), confirmando que los agentes perciben el costo marginal principalmente en función de la superficie intervenida (Pascoe et al., 2019). En el caso de Finlandia, se demostró que la conservación forestal es una medida viable de compensación de carbono. Específicamente, proteger 79 hectáreas de bosque compensa la deforestación de 19 hectáreas para desarrollo urbano, generando un sumidero neto de carbono a 100 años. Aunque la estrategia se confirma como efectiva, su eficacia está condicionada por variables críticas como

la edad de los bosques y las tasas de descuento económicas, y requiere la superación de desafíos de adicionalidad y permanencia para garantizar su integridad a largo plazo (Järveläinen et al., 2024).

Esta investigación buscó analizar los procesos de aprovechamiento forestal, su complejidad administrativa y costo elevado para los desarrolladores, teniendo en cuenta que las tarifas que se cobran al inicio de cada trámite no discriminan la escala del impacto ambiental solo se basan en la envergadura del proyecto construido avalada en sus m², como tampoco suma a favor del constructor que el proyecto sea certificado con algún sello de sostenibilidad, todo esto sumado a la falta de estrategias de sensibilización por parte de las entidades regulatorias con el fin de estimular las buenas prácticas en el componente socioambiental del proyecto. Para evitar los procesos complejos y engorrosos, se propone la estandarización de las solicitudes mediante herramientas digitales amigables, que ponderen las afectaciones ambientales por encima de la construcción. Estas agilizarían los trámites dentro del marco normativo y cuantificarían de manera clara y objetiva el valor económico de las afectaciones ecosistémicas rigiéndose de manera equitativa desde la solicitud del trámite para mitigar los sobrecostos en los proyectos cuyo impacto ambiental sea menor. Dicha estandarización fomentaría un equilibrio en los pagos por trámites de aprovechamiento forestal además de la conciencia efectiva de sus costos desde las etapas más tempranas del proyecto, (adquisición del predio, tipo de proyecto, propuestas de diseño), permitiendo una planificación presupuestal y de tiempo más precisa. Esto garantiza una gestión más eficaz desde la conceptualización hasta el diseño final, sin comprometer los principios de conservación de la biodiversidad y la sostenibilidad. Este enfoque refuerza la responsabilidad ciudadana de remediar los impactos de la construcción formal, contrarrestando además la significativa pérdida de biomasa generada por los desarrollos ilegales e informales, que contribuyen de manera considerable a los indicadores de degradación ambiental en las ciudades.

2. METODOLOGÍA

La investigación se desarrolla en tres fases (ver Figura 1). La primera consiste en una revisión documental técnica, sustentada en la normativa vigente y en marcos teóricos afines al objeto de estudio. Como referencia práctica, se analizarán tres proyectos de diversa escala (públicos y privados) en el Valle de Aburrá. Posteriormente, en una segunda fase, se recopilará información primaria y secundaria de los proyectos seleccionados, específicamente de sus trámites de aprovechamiento forestal y de los entregables exigidos por la corporación ambiental competente (documentos técnicos, planimetría, estudios de conectividad, entre otros). Con esta información, y como fase final se procederá a un análisis detallado que asociará los trámites con los impactos ecosistémicos, ambientales y de biodiversidad evaluados en cada caso.

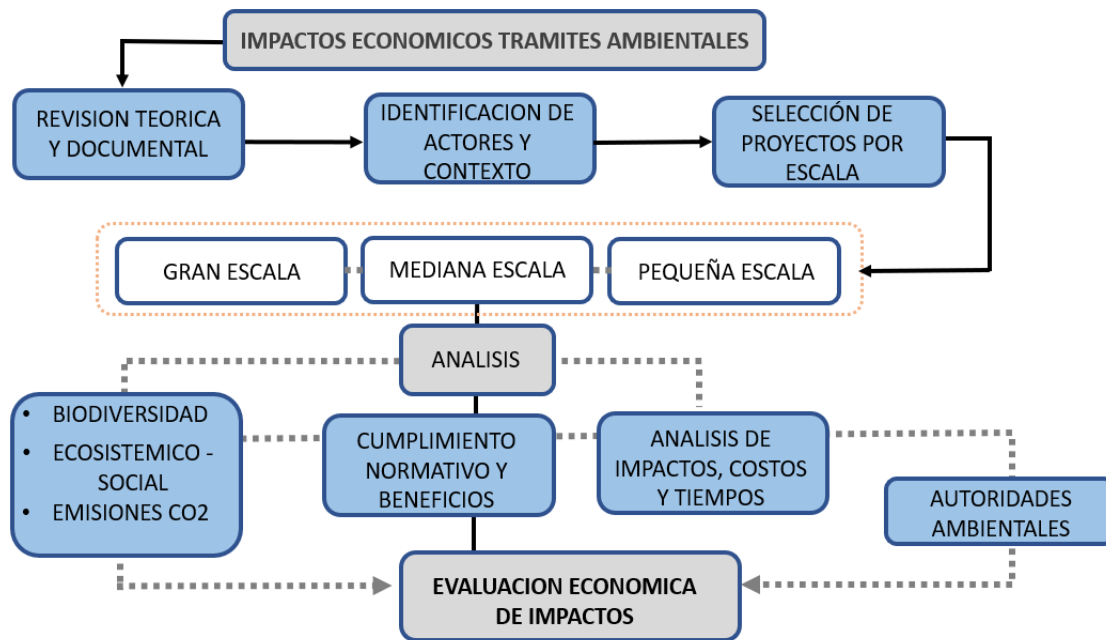


Figura 7. Diagrama metodológico.

2.1 Selección de los proyectos

Esta primera fase tuvo como objetivo la selección de los proyectos que conformarán el estudio de caso. Como punto de partida, la investigación contó con los siguientes insumos: Información base que integra perspectivas de los actores clave del sector público, particularmente las corporaciones ambientales, que definen los lineamientos a seguir; un acervo documental y bibliográfico que aporta los criterios de pertinencia para cada escala de análisis; e información primaria de los proyectos, complementada con la experticia del investigador en el acompañamiento de algunos de estos procesos, la cual sirve como información secundaria valiosa. Con esta base, se procedió a elegir tres proyectos ubicados en el Valle de Aburrá. La selección se realizó teniendo en cuenta la participación de los sectores público y privado (Constructores), identificando tres tipologías de proyectos de acuerdo a su alcance, área de intervención, el impacto socioambiental y ecológico, el presupuesto y los tiempos de ejecución de los tramites de aprovechamiento forestal.

2.2 Impactos a las obras de construcción

En esta fase se realizó una caracterización integral de los proyectos seleccionados, analizando tanto sus aspectos ambientales como administrativos. El estudio abordó de manera sistémica los procesos de gestión, comenzando por los trámites requeridos, incluyendo los requisitos de información que exigen las corporaciones ambientales para la aprobación de permisos y los recursos que debe garantizar el contratista, con especial atención a los costos asociados y los tiempos de ejecución. El análisis examinó igualmente la relación de los proyectos con su contexto territorial, evaluando su incidencia en el entorno inmediato y verificando cómo sus soluciones técnicas se articulan con las políticas ambientales vigentes en el ámbito metropolitano. Un componente fundamental fue la evaluación de las medidas compensatorias, tanto en lo que respecta a sus criterios de implementación como a su efectividad para preservar las condiciones ecosistémicas, la biodiversidad y el impacto de los tramites de aprovechamiento en cuanto a

costos y tiempo que afecten los presupuestos de las obras de infraestructura en el Valle de Aburrá.

2.3 Análisis comparativo

En la tercera y última fase, se analizaron los datos recopilados para identificar los hallazgos más relevantes según criterios técnicos, ambientales, económicos y sociales. Este análisis comparativo permite establecer relaciones entre los tres proyectos estudiados, evaluando específicamente cómo los instrumentos de gestión implementados por las entidades ambientales facilitan los trámites de aprovechamiento forestal, promoviendo la restauración ecosistémica y garantizando la conservación de las redes verdes urbanas. Finalmente, se valoró la efectividad real de estos mecanismos desde una perspectiva de sostenibilidad integral, considerando su capacidad para equilibrar el desarrollo urbano con la preservación ambiental en el Valle de Aburrá y la efectividad de las medidas de los planes de manejo forestal exigidos por la autoridad competente.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Selección de los proyectos

Para la selección de los proyectos se evaluaron varios aspectos importantes dependiendo de la escala y el alcance de cada uno de ellos en términos de relevancia en los impactos forestales, ambientales, económicos y de biodiversidad. Se analizaron tres proyectos entre públicos y privados para establecer las diferencias entre ellos, si hay algún beneficio adicional o se manejan bajo la misma normativa y se evalúa por igual (ver Tabla 1).

- Edificio el Cortijo, Ubicado en Medellín (Barrio los Balsos), Solicitud de intervención Forestal presentado en abril de 2024 por la firma Fajardo Moreno y Cía. S.A.S., cuyo objeto era la construcción de un Edificio de viviendas de baja densidad, con retiros obligatorios y respeto por las quebradas la Volcana y la Acequia las Brisas, solicitando la autorización para intervenir la vegetación existente en el área del proyecto, conforme a la normativa ambiental (Decreto 1076 de 2015 y resolución 2851 de 2019 del AMVA).
- Proyecto Vía el tesoro Linares, Ubicado en Medellín, barrios el Tesoro y los Naranjos, comuna 14 (El Poblado), cuyo objeto era la solución vial de la intersección de la loma El Tesoro (calle 3) con vía Linares (carrera 29) y complementarios, realizando un rediseño de la intersección mediante la construcción de un puente a desnivel para mejorar la movilidad, continuidad de andenes y adecuación de vías. En cumplimiento de la normativa ambiental (Decreto 1076 de 2015 y resolución 2851 de 2019 del AMVA).
- Proyecto Parque Metropolitano de deportes Tulio Ospina – construcción del acceso vehicular en el costado norte, Ubicado en Bello, cuyo objetivo es presentar la solicitud de intervención forestal para la tala de 120 individuos arbóreos que interfieren con la construcción del acceso vehicular norte del proyecto, cumpliendo con la normativa ambiental (Decreto 1076 de 2015 y resolución 2851 de 2019 del AMVA).

Tabla 5. Comparativa técnica de los proyectos

Parámetro	Ed. El Cortijo	Proyecto vial El Tesoro - Linares	Acceso Vehicular Parque Tulio Ospina
Tipo de proyecto	Ed. Viviendas	Solución vial (puente a desnivel)	Acceso vehicular a parque metropolitano
Ubicación	Medellín (Los balsos)	Medellín (El Tesoro, Los Naranjos)	Bello (Cerro Quitasol)
Total, individuos registrados	291	346	120
Volumen total de madera (m³)	2.941,55	204,84	0,6612
Intervención principal	Tala:129/Trasplante:20	Tala: 297 / Trasplante: 36	Tala: 120 / Trasplante: 0
Especies sensibles	6 especies en amenaza	18 especies en amenaza	Tala: 120 / Trasplante: 0
Reposición mínima	1:1 (129 árboles)	1:1 (297 árboles)	1:4 (472 árboles)
Valor económico a talar	\$468.429.219 COP	\$498.672.551	\$176.504.017 COP
Déficit / Compensación	\$172.393.976 (a Fondo Verde)	+\$3.211.016	+\$20.070
Afectación conectividad ecológica	Macrorred La Aguacatala	Macrorred presidenta-Escopetería	Macrorred Río Aburrá
Medidas de manejo	Tala, trasplante, siembra, monitoreo	Tala, trasplante, rescate de fauna, monitoreo	Tala, siembra, mantenimiento 4 años
Duración del Proyecto	12 meses	No especifica	12 meses
Inversión del proyecto	\$25.000.000.000 COP	\$12.000.000.000	\$26.510.000.000 COP
Valor del trámite	\$43.000.000	\$30.000.000	\$44.000.000

3.2 Impactos a las obras de construcción

A los tres proyectos se les realizó los respectivos trámites de aprovechamiento y cumplen con las respectivas normativas ambientales vigentes y presentan planes de reposición arbórea, los tres proyectos son competencia del AMVA, con un enfoque regulatorio aplicado por control urbano-ambiental, nodos de importancia ecológica con criterios de UVE para estimar su valoración, aplicando la normatividad regional, con enfoque en corredores ribereños y como aspecto relevante la protección del Río Aburrá. El Cortijo y el Tesoro presentan mayor grado de complejidad en términos de diversidad ecológica y volumen de madera, mientras que el Parque Tulio Ospina se destaca por su alta tasa de reposición (1:4), y mantenimiento prolongado explícito en la licencia (4 años).

En cuanto a la valoración económica y el pago por déficit al Fondo Verde solo se aplica en el proyecto el Cortijo. Los tres proyectos involucran estudios de conectividad ecológica afectando las macrorredes ecológicas del AMVA, lo que exige mayor rigor en el análisis en impactos a la

biodiversidad y medidas de compensación. El Proyecto vial El Tesoro- Linares presenta mayor diversidad florística (80 especies, 33 familias), mientras el parque Tulio Ospina tiene solo 4 especies, dominada por *Leucaena leucocephala* (93%).

Según la resolución de la corporación que expide el trámite se debe de contar con 12 meses para realizar las actividades aprobadas en el mismo, a eso se le suman las obras complementarias de mantenimiento y demás que se hayan otorgado en el trámite, el mayor impacto percibido se genera en el presupuesto puesto que el trámite es el mismo al igual que el valor apagar si se interviene uno o tres individuos como si se referencian doscientos o trescientos en el mismo proyecto.

3.3 Análisis comparativo

El análisis va relacionado con la identificación de los costos asociados a los proyectos elegidos como estudio de caso, donde podemos identificar datos muy precisos de las compensaciones por los tramites solicitados ante las entidades regulatorias, evidenciando de una manera muy clara que la magnitud de la afectación física (Tala y trasplante), y el costo del trámite (Valor/trámite) a pagar, muestra varias dinámicas interesantes a tener en cuenta en el objeto de estudio. El impacto ambiental directo se mide por el número de individuos que deben ser intervenidos, es decir talados o trasplantados, a los cuales se les asigna una valoración económica a través de la métrica UVE (Unidad de valoración económica) esta se basa en evaluar cada individuo a talar, calculando su relevancia ecológica, su ubicación y por ende su estado físico, a los cuales se les asigna un valor basado en unas tablas con criterios preestablecidos por cada entidad, con las cuales se le asigna un valor a cada individuo (ver Figura 2).

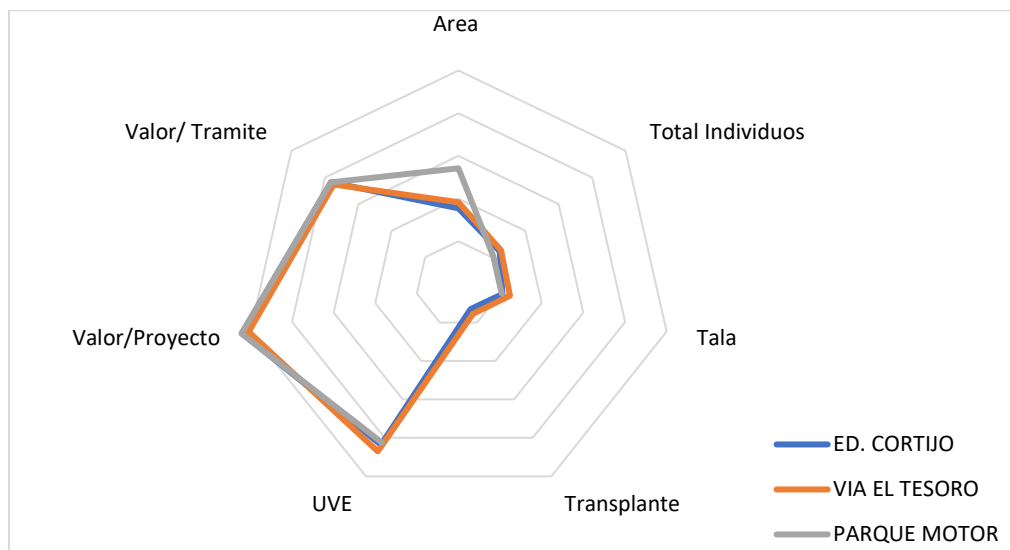


Figura 2. Comparativo general de proyectos.

Como se observa en la Figura 3, El parque Tulio Ospina abarca la mayor área de intervención con gran diferencia frente a los demás proyectos, (262.580 m²), y a pesar de ser una gran área solo afecto a 120 individuos los cuales todos fueron talados (Cero Trasplantes), su UVE es la más baja de los tres proyectos. El Ed. El Cortijo tiene la menor área (3.483 m²), y una UVE de \$226.449.276, con 120 talas y 20 trasplantes. Teniendo en cuenta esta relación podemos establecer que el análisis del costo administrativo del trámite (Valor Trámite), no está directamente correlacionado con la magnitud del impacto ambiental (UVE) ni con la afectación física (Tala y trasplante). Este análisis también establece que hay una disparidad entre los cobros

por los tramites de aprovechamiento forestal, puesto que van asociados a tarifas administrativas preestablecidas (Por valor del proyecto) para dar trámite a las solicitudes de las obras de construcción y de infraestructura y no actúan como un mecanismo progresivo o variable que internalice el costo ambiental valorando los costos con el impacto ambiental asociado a los mismos; que para el caso de los tres proyectos analizados.

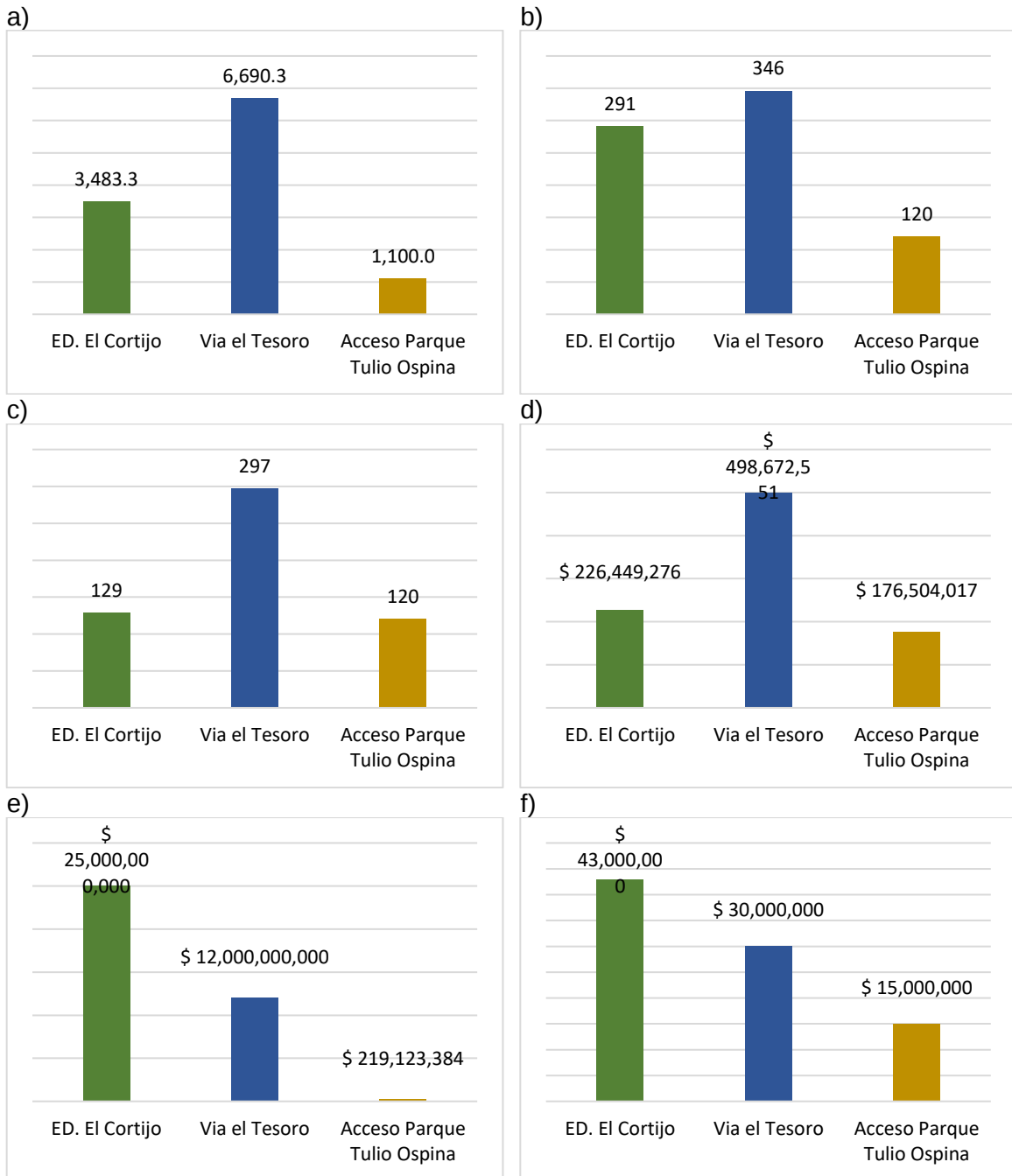


Figura 3. Variables aplicadas a los tres proyectos. a) Área, b) Total individuos, c) Tala, d) UVE, e) Valor por proyecto y f) Valor por trámite.

4. CONCLUSIONES

Con base en el análisis obtenido con el estudio de caso, desde una perspectiva financiera las afectaciones e impactos a las obras de construcción es considerable teniendo en cuenta el criterio único asociado al valor del proyecto, esto iría en contravía con las políticas de sostenibilidad ambiental y ecológicas que promueve con tanto orgullo Medellín y su área metropolitana, que de echo han sido referente a nivel nacional, no solo por los valores que se asocian a los tramites de aprovechamiento sino que además queda en entredicho la importancia ecosistémica del tejido urbano, se debe valorar más en términos presupuestales las obras cuyo tramite de aprovechamiento impacte considerablemente (# de individuos a talar), y que no esté correlacionado con la envergadura del proyecto, ni asociado a los metros cuadrados construidos y tampoco al coste estimado de cada uno de ellos, esto no solamente generaría mayor conciencia de las afectaciones ambientales, entre otras si no que a su vez impulsaría a los constructores a buscar alternativas de diseño que minimicen drásticamente el impacto ecológico antes de la fase de licenciamiento u trámite.

Otra consideración a tener en cuenta es la posibilidad de que dichos tramites tengan en cuenta las certificaciones de sostenibilidad a las cuales se acogen algunos proyectos de construcción para recibir beneficios financieros y descuentos en los tramites ambientales, esto debido a que el esfuerzo del constructor he inversionista también debe asociarse al compromiso ambiental y de sostenibilidad logrando una integración de las consideraciones ambientales, presupuestales y de planificación que incentive la construcción responsable en el valle de aburra.

En los últimos años, el sector de la construcción y las grandes corporaciones han adoptado medidas más responsables para reducir su impacto ambiental, mediante la regulación de permisos y el establecimiento de aprovechamiento forestal; no obstante, es crucial abordar la sostenibilidad de forma integral, de modo que beneficie no solo al medio ambiente, sino también a la viabilidad económica de los proyectos y al gremio en general.

4. AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más sentido agradecimiento a mi directora, la Ing. Natalia Arboleda, y a mi codirector, Nicolás Pardo, por su guía experta y decidido apoyo durante la elaboración de este documento. Asimismo, agradezco a la Institución por la valiosa formación brindada a lo largo del programa; a mis compañeros, por su paciencia y camaradería; y de manera muy especial, a mi compañera de vida y a mis hijos, por su incondicional respaldo, por ser mi guía e inculcarme la perseverancia. Mi gratitud se extiende a todos quienes, de alguna forma, contribuyeron al éxito de esta investigación.

5. REFERENCIAS

- Hanson, H. I., & Olsson, J. A. (2023). Uptake and use of biodiversity offsetting in urban planning – The case of Sweden. *Urban Forestry and Urban Greening*, 80. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127841>
- Järveläinen, M., Pihlainen, S., Karhu, K., Österberg, N., & Mäkipää, R. (2024). Forest conservation as a CO2 offset measure: a case of an urban development project in Finland. *Frontiers in Environmental Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1379630>

- Pascoe, S., Cannard, T., & Steven, A. (2019). Offset payments can reduce environmental impacts of urban development. *Environmental Science and Policy*, 100, 205–210. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.06.009>
- Banco Mundial. (2022). *Urbanization*. Recuperado el [25 de septiembre de 2025] de <https://www.bancomundial.org/es/topic/urbandevelopment/overview>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2021). *2021 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. Naciones Unidas. <https://www.unep.org/resources/report/2021-global-status-report-buildings-and-construction>.
- Alcaldía de Medellín. (2023). *Plan de Desarrollo Medellín Futuro 2020-2023: Acuerdo Municipal 048 de 2023. <https://www.medellin.gov.co/irj/portal/medellin?NavigationTarget=navurl://2d59c78cef74c6f919d14a8d7c7d1370>

ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO PARA LA ELABORACIÓN DE CONCRETOS PERMEABLES

Cristian Alfonso Ariza Rico¹, Yeison Hernán Espinal Arcila¹, Jonnathan Pérez Álvarez¹, Leidy Yurani Ibarra¹, Nicolás Steven Pardo Álvarez², Alexander Méndez Rincón²

¹ Semillero de Investigación en Ciencias y Tecnología de la Construcción SITEC, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, cariza@est.colmayor.edu.co, yespinal@est.colmayor.edu.co, libarra@est.colmayor.edu.co, jperez@est.colmayor.edu.co

² Grupo de Investigación Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, nicolas.alvarez@colmayor.edu.co, alexander.mendez@colmayor.edu.co

Palabras clave: Permeabilidad, granulometría, porosidad, relación agua-cemento.

1. INTRODUCCIÓN

El concreto permeable, conocido también como concreto poroso o drenante, se ha convertido en una solución innovadora para la construcción y el manejo de las aguas lluvias en cuanto a alternativas sostenibles en la construcción. A diferencia del concreto convencional, el cual es más denso y por consiguiente impermeable, el concreto permeable está diseñado para permitir el paso del agua a través de sus poros los cuales se encuentran interconectados. Esta mezcla, compuesta de cemento, agregados gruesos y aditivos específicos, sin agregados finos, crea una red de poros interconectados, lo que le otorga una alta capacidad de drenaje (Huang et al., 2019). El uso del concreto permeable tiene diversos beneficios ambientales, entre los cuales resalta la reducción de la escorrentía superficial, lo que a su vez ayuda a la disminución del riesgo de inundaciones en áreas urbanas, ya que permite la infiltración del agua en el suelo, favoreciendo además la recarga de acuíferos y mejorando la calidad del agua al filtrar contaminantes (Ghaffar et al., 2015). Por otra parte, su uso en pavimentos puede mitigar el efecto de isla de calor en las ciudades, al permitir una mayor evaporación y reducir las temperaturas superficiales. En un contexto de cambio climático y urbanización creciente, el concreto permeable se presenta como una alternativa eficaz para fomentar el desarrollo urbano sostenible. Al promover la infiltración y minimizar la escorrentía, este material contribuye a la creación de ciudades más resilientes y respetuosas con el medio ambiente.

La revisión de la literatura muestra diversos resultados en cuanto a resistencia y permeabilidad. (Perera et al., 2020). estudiaron mezclas de concreto poroso para drenaje en vías peatonales, utilizando agregados con granulometrías de 10-16 mm y 10-19 mm, encontrando capacidades de carga de 568,2 kN/m² y tasas de infiltración de 4,0 x 10⁻³ m³/s. (Sha et al., 2024). por su parte evaluaron el desempeño mecánico y la influencia de la porosidad en un concreto permeable utilizando agregados con tamaños de 4,75-9,5 mm y 9,5-16 mm y diferentes porosidades, encontrando que la mejor resistencia a la compresión y la permeabilidad (5,5 mm/s) se logró con una relación (A/C) de 0,28. (Seshagiri Rao et al., 2023). analizaron el papel de los cementantes suplementarios en el desarrollo de concretos permeables por medio de mezclas con relación (A/C) entre 0,3 y 0,4, encontrando que la mezcla con mayor permeabilidad fue la mezcla con 0,4 dando un valor de 0,71 cm/s, y la mezcla con 0,3 fue de mayor resistencia a la compresión (con 26,33MPa a los 28 días) pero menor permeabilidad. Finalmente, (Brasileiro et al., 2024). evaluaron la influencia de los agregados reciclados de tamaño 4,75-9,5mm y humo de sílice en el concreto permeable con cemento Portland de uso general (PCC) con relación (A/C) de 0,45; y

cemento Portland de altas resistencias (HPCC) con relación (A/C) de 0,40, encontrando que la mezcla con mayor resistencia a la compresión fue HPCC con 39,4MPa a los 90 días, mientras que la mezcla con mayor permeabilidad fue la de PPC con 0,30cm/s.

Como lo han mostrado los estudios anteriores, la resistencia a la compresión y la permeabilidad, dependen en gran medida del rango del tamaño del agregado grueso, y la relación agua/cemento. En Colombia, a nivel comercial se pueden encontrar concretos permeables de las marcas Argos y Cemex. Argos ofrece en su portafolio el Concreto Permeable diseñado para permitir el paso del agua, recreando su ciclo natural y facilitando su almacenamiento y posterior reutilización (Argos et al., 2024). De igual manera, Cemex ofrece el Concreto Pervia que cuenta con un diseño especial de poros interconectados entre sí, que permiten hacer un drenaje apropiado de agua en estructuras horizontales o verticales y permite su uso a nivel decorativo o en pavimentos estructurales de bajo y mediano tráfico vehicular (Cemex et al., 2024). Sin embargo, desde el enfoque investigativo en Colombia no se cuenta con muchos estudios acerca de la influencia de la relación agua/cemento en la resistencia a la compresión y la permeabilidad para concretos permeables. Por esta razón, en este proyecto se pretende evaluar la influencia de la relación agua/cemento en la medición de la resistencia a la compresión, y la permeabilidad a mediante la ley de Darcy, incluyendo la fabricación de un dispositivo para este cálculo. La investigación pretende encontrar resultados que puedan permitir la implementación de este tipo de concretos en parques y zonas peatonales, contribuyendo al manejo de la escorrentía y los procesos de infiltración que se han visto afectados por los procesos de impermeabilización relacionados con la expansión territorial y el crecimiento de la ciudad.

2. METODOLOGÍA

En la Figura 1 se presenta el diagrama metodológico, enfocado en las etapas de determinación de propiedades, diseño de mezcla y evaluación de propiedades.

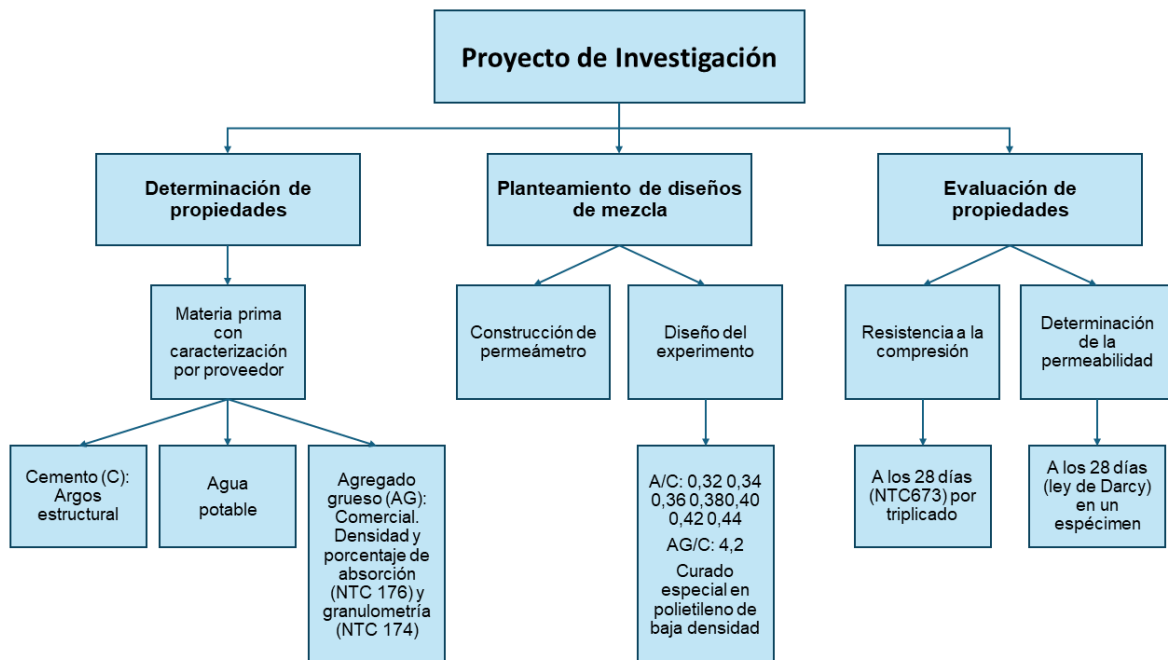


Figura 8. Diagrama metodológico.

2.1 Determinación de propiedades

Para la fabricación de los diseños de mezcla, se utilizó cemento Argos, agua, y agregado grueso comercial. El cemento Argos corresponde a un cemento estructural y el agua corresponde a agua potable. La caracterización del agregado grueso fue suministrada por el proveedor e incluyó la densidad del agregado grueso y porcentaje de absorción de acuerdo con la NTC 176:2019 y la granulometría de acuerdo con la NTC 174:2000.

2.2 Diseño de mezcla

Para el diseño del experimento se elaboraron diseños de mezcla de concretos con variaciones en la relación agua/cemento de 0,32; 0,34; 0,36; 0,38; 0,40; 0,42 y 0,44, manteniendo constante la relación agregado grueso/cemento en 4,2. Se elaboraron 4 cuatro cilindros por cada diseño de mezcla y el curado se realizó recubriendo los cilindros en polietileno de baja densidad. De manera simultánea, se llevó a cabo la construcción de un permeámetro para la evaluación de prueba de la permeabilidad, ya que en la Institución no se contaba con un equipo para evaluar la permeabilidad.

2.3 Evaluación de propiedades

En la tercera se llevó a cabo la resistencia a la compresión por triplicado a los 28 días de acuerdo con la NTC 673:2010 para cada diseño de mezcla. Además, se llevó a cabo la determinación de la permeabilidad a los 28 días para un espécimen mediante el uso de un permeámetro elaborado en la Institución y utilizando la ecuación de la ley de Darcy para el cálculo. Para la fabricación del permeámetro, se utilizaron tubos de PVC de diferentes secciones, los cuales fueron unidos mediante acoples, codos y una válvula. Para garantizar la unión de los componentes, la conexión de los accesorios y tubos se realizó mediante soldadura de PVC en frío. Cada tramo de tubería se ensambló de manera secuencial, reduciendo progresivamente su diámetro con el objetivo de incrementar la velocidad de flujo del agua dentro del permeámetro. En función de la ecuación de Darcy, en la Figura 2 se muestra el permeámetro construido en el laboratorio de construcción con las siguientes medidas: h_1 (31 cm) corresponde a la altura inicial de la columna de agua al momento de ser vertida sobre la muestra, h_2 (22 cm) corresponde la altura final alcanzada por la columna de agua después de haber descendido desde h_1 durante el tiempo medido en el ensayo, l_t (45 cm) es la longitud del tramo horizontal recorrida en el permeámetro al momento de la columna de agua descender por la altura de h_1 , a es el área del tramo de tubería en el cual se introduce la muestra, A es el área de contacto de la muestra con el área de la tubería donde se coloca la muestra, y t es el tiempo que demora en descender el agua a través de la muestra, y salir por el tramo de la tubería de altura h_2 . Con estas medidas se empleó la ecuación de la ley de Darcy, la cual permite calcular el coeficiente de permeabilidad (K) y está dada de la siguiente forma: $K = \frac{a \cdot L}{A \cdot t} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right)$.

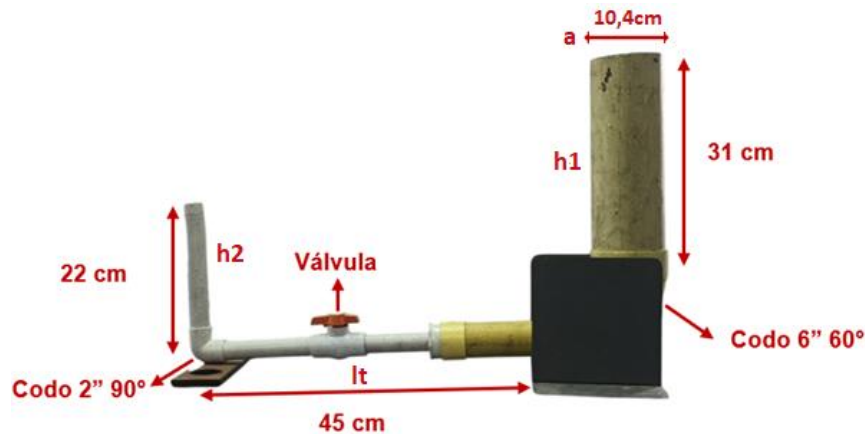


Figura 9. Elaboración de permeámetro.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Determinación de propiedades

El agregado grueso obtenido en la distribuidora “San Pío” presentó un tamaño máximo de 25 mm, un porcentaje de humedad de 1,42% y un porcentaje de absorción de 0,99%. En la Figura 3 se puede apreciar que cerca del 90% del material que pasa por los tamices, corresponde a tamaños entre 3/8" y 1/2".

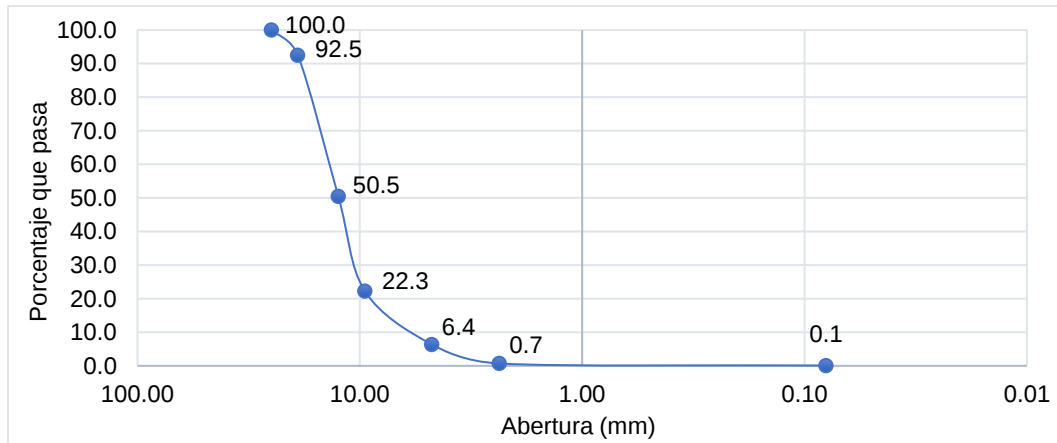


Figura 10. Distribución granulométrica del agregado grueso.

3.2 Diseños de mezcla y evaluación de propiedades

La Figura 4 muestra la variación de densidad en las distintas mezclas según relación agua/cemento (a/c). Si bien se esperaba un comportamiento lineal creciente, las mezclas M3, M5 y M7 no cumplieron con ese comportamiento, presentando densidades más bajas ($1,859.5 \pm 89.9$ kg/m³, $1,898.1 \pm 51.9$ kg/m³ y $1,972.7 \pm 61.4$ kg/m³ respectivamente) con respecto a M1 ($1,909.2 \pm 29.2$ kg/m³). Estas variaciones se asociaron a posibles fallas durante el proceso de elaboración o compactación de la mezcla, generando altas variabilidades en la densidad. Por lo anterior, se decidió centrar el análisis en las mezclas que mostraron un comportamiento más consistente y coherente con la tendencia esperada, donde la densidad aumenta de forma gradual al incrementarse la relación agua/cemento (a/c).

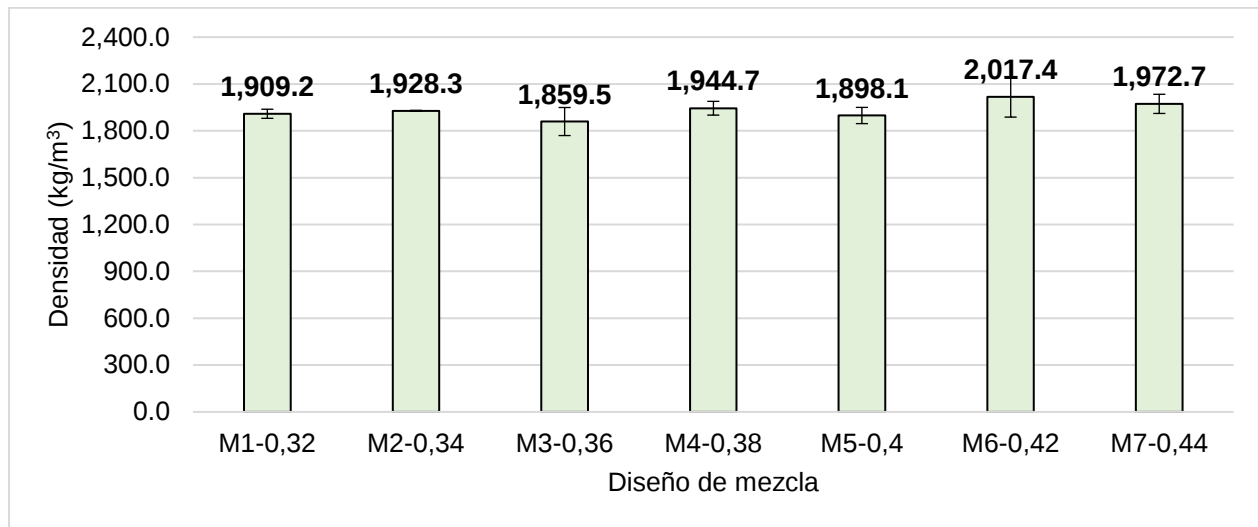


Figura 11. Densidad (kg/m³) en función de los diseños de mezcla.

En la Figura 5 se muestran los resultados del ensayo de resistencia a la compresión. La mezcla M1 presentó una resistencia de $5,2 \pm 1,1$ MPa, similar a la de M4 con $5,2 \pm 1,5$ MPa. Por otro lado, las mezclas M2 y M3 mostraron valores más bajos, con $4,3 \pm 1,2$ MPa y $4,2 \pm 0,8$ MPa respectivamente. A partir de M4 se observa una tendencia creciente en la resistencia, alcanzando su punto máximo en las mezclas M6 y M7, con $7,4 \pm 2,5$ MPa y $7,2 \pm 1,4$ MPa respectivamente. Esto indica una mejora progresiva en la resistencia a la compresión desde M4 en adelante. Los valores más bajos de M2 y M3 se alejan del comportamiento esperado, ya que normalmente un aumento moderado en la relación agua/cemento mejora la trabajabilidad sin afectar significativamente la resistencia. Estas diferencias podrían estar relacionadas con detalles puntuales en la fabricación o compactación que afectaron la uniformidad de la mezcla.

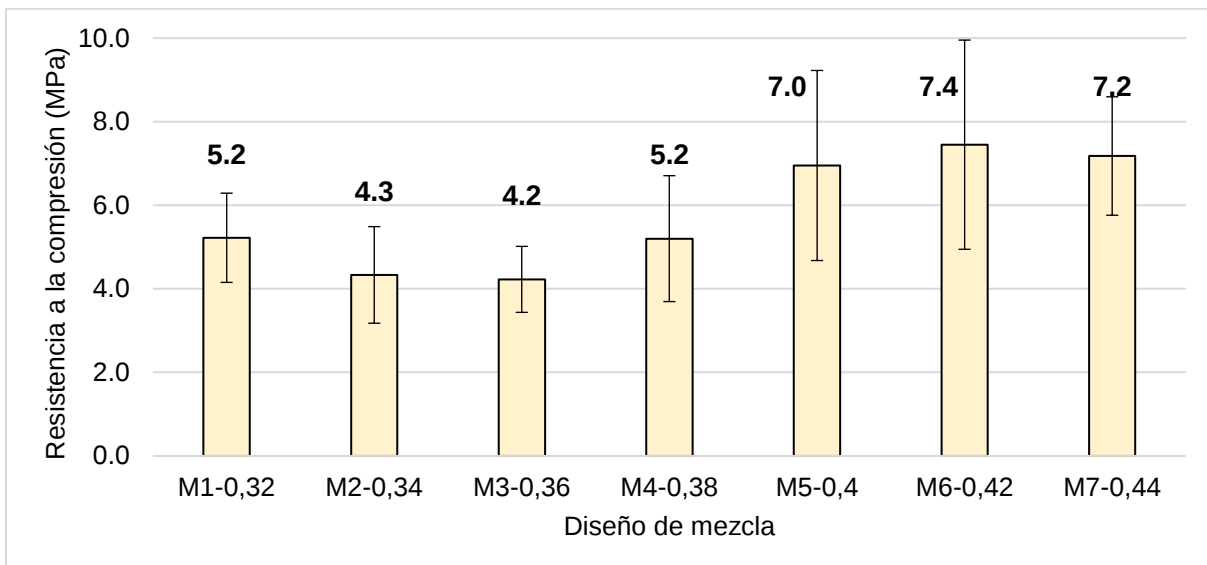


Figura 12. Resistencia a la compresión (MPa) en función de los diseños de mezcla.

En la Figura 6 se muestra la variación del coeficiente de permeabilidad según la relación agua/cemento (a/c) en las diferentes mezclas. En general, se observa que a mayor relación a/c,

la permeabilidad tiende a disminuir, lo cual es coherente con lo esperado. Esto ocurre porque, al aumentar la cantidad de pasta de cemento, los poros entre los agregados se van cerrando y se dificulta el paso del agua. Las mezclas M1, M3, M5 y M7 siguen esta tendencia de forma clara, siendo M1 con el coeficiente de permeabilidad más alto (0,90 cm/s) y M7 la del coeficiente más bajo (0,42 cm/s). Por otro lado, las mezclas M2, M4 y M6, que están marcadas en rojo en la figura, no tienen un patrón definido arrojando valores que no coinciden con la tendencia esperada. Esto podría deberse a problemas como segregación o una compactación deficiente durante su elaboración, lo cual afectó su estructura interna. Por esa razón, estas tres mezclas no fueron tenidas en cuenta para el análisis.

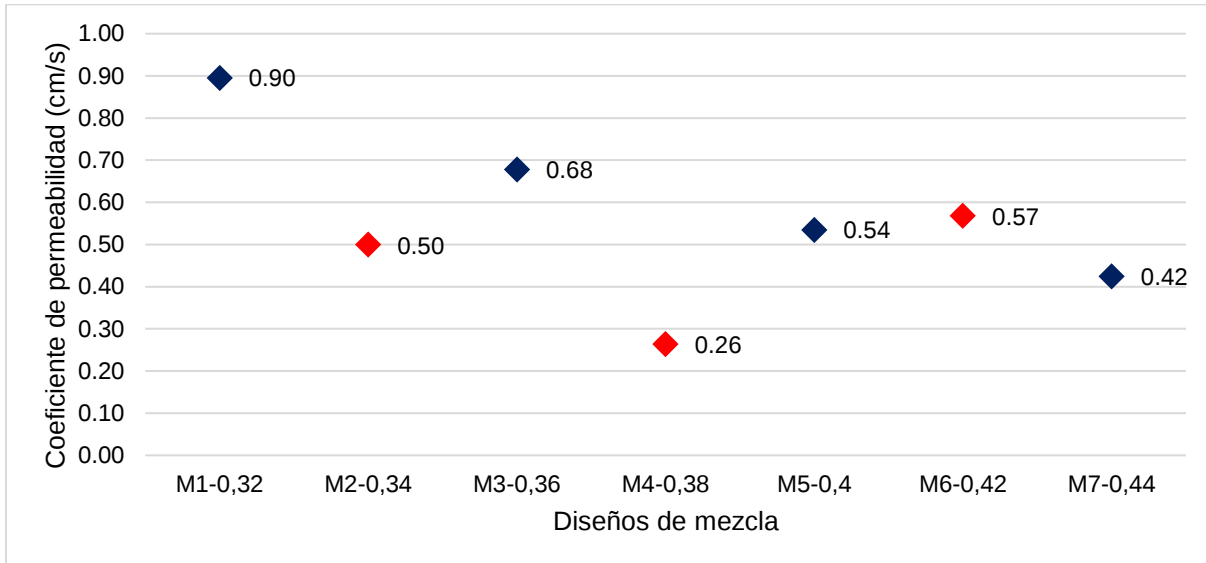


Figura 13. Coeficientes de permeabilidad en función de los diseños de mezcla.

En la Figura 7 se muestran los cilindros correspondientes a las mezclas M2, M4 y M6, donde se observó cierta segregación en la base de cada muestra. La mezcla M2 (Figura 7a) presentó algunas variaciones en la textura en el concreto en la parte inferior, lo que podría indicar una leve segregación o acumulación de finos. Aunque no se presenta una separación muy marcada, estos aspectos podrían haber influido en el comportamiento irregular observado durante el ensayo de permeabilidad. La mezcla M4 (Figura 7b) presentó menos segregación, aunque se aprecian algunas irregularidades en la textura y se evidencia exceso de pasta en la base del cilindro. Por último, la mezcla M6 (Figura 7c) también permitió observar una concentración visible de pasta de cemento, lo que podría explicar las diferencias en el comportamiento de permeabilidad observadas en estas muestras.

a) M2-0,34



b) M4-0,38



c) M6-0,42



Figura 14. Mezclas con alta segregación en la base del cilindro.

Finalmente, en la Figura 8 se llevó a cabo de nuevo el análisis estadístico, esta vez excluyendo las mezclas M2, M4 y M6. El análisis de regresión lineal simple demuestra un comportamiento decreciente, explicado por la ecuación $y = 1,131e^{-0,247x}$ y con un valor $R^2=0,9976$. Con este ajuste, se demuestra para el agregado grueso utilizado que a medida que la relación agua/cemento aumenta, la permeabilidad disminuye de forma exponencial, debido a una mayor cantidad de pasta que disminuye los espacios vacíos en la mezcla. Este comportamiento confirma que, en concretos permeables, existe una relación inversa entre la relación agua/cemento y la permeabilidad, siempre que las mezclas no presenten defectos de fabricación como segregación o mala compactación.

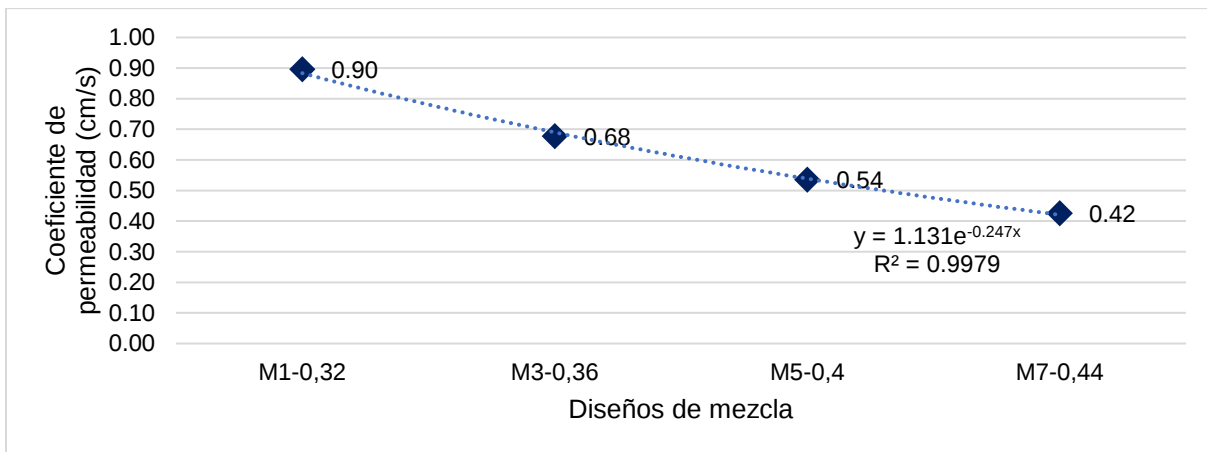


Figura 15. Coeficientes de permeabilidad en función de los diseños de mezcla.

4. CONCLUSIONES

El estudio demostró que la relación agua/cemento (a/c) influye de forma directa en las propiedades del concreto permeable, demostrando un comportamiento diferenciado en densidad, resistencia y permeabilidad. Como era de esperarse, y a pesar los comportamientos atípicos de algunas mezclas, la densidad mostró una tendencia general al aumento con mayores relaciones a/c y el análisis estadístico excluyendo mezclas defectuosas (M2, M4, M6) validó la relación exponencial inversa entre permeabilidad y a/c ($R^2=0,9976$). De forma específica, M5 se configuró como la mezcla con propiedades más equilibradas, al combinar una resistencia a la compresión

de 6,8 MPa, con una densidad de 1.898,1 kg/m³ y una permeabilidad de 0,58 cm/s. Estos resultados resaltan que, más allá de la relación a/c, la calidad del proceso es determinante, siendo M5 la mezcla más confiable al optimizar desempeño mecánico e hidráulico. Futuras investigaciones podrían explorar aditivos en mezclas tipo M5 para mejorar aún más su permeabilidad sin comprometer resistencia, ampliando su aplicabilidad en infraestructuras que requieran tanto capacidad estructural como drenaje eficiente.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos al docente Nicolás Steven Pardo Álvarez por su dedicación y profesionalismo durante el desarrollo de las asignaturas referentes a la investigación, así como las asesorías brindadas, su dominio del tema y la claridad en la transmisión del conocimiento. También reconocemos el apoyo brindado en los momentos en que se requirió orientación adicional para complementar la información y mejorar la calidad del informe. Los aportes técnicos brindados por el docente además de ayudar al desarrollo de este proyecto, aportaron conocimientos valiosos que contribuyeron a nuestra formación y desarrollo como futuros profesionales de la construcción.

6. REFERENCIAS

- Brasileiro, K. P. T. V., Nahime, B. de O., Lima, E. C., Alves, M. M., Ferreira, W. P., Santos, I. S. dos, Filho, C. P. B., & Reis, I. C. dos. (2024). Influence of recycled aggregates and silica fume on the performance of pervious concrete. *Journal of Building Engineering*, 82. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108347>
- Perera, I. M. H., Athapaththu, C. J., & Mamppearachchi, W. K. (2020). Design of a porous concrete mixture for drainage coverslab in pedestrian walkways. *Transportation Research Procedia*, 48, 3678–3695. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.08.080>
- Sánchez-Mendieta, C., Galán-Díaz, J. J., & Martinez-Lage, I. (2024). Relationships between density, porosity, compressive strength and permeability in porous concretes: Optimization of properties through control of the water-cement ratio and aggregate type. *Journal of Building Engineering*, 97, 110858. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110858>
- Seshagiri Rao, M. V., Manoj, T., & Ajith Narayana, K. (2023). Role of supplementary cementitious materials in the development of sustainable pervious concrete. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.332>
- Sha, F., Zhang, S. ming, Sun, X. chao, Fan, G. xi, Diao, Y., Duan, X. feng, Qiao, A. long, & Wang, H. (2024). Mechanical performance and pore characteristics of pervious concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 21. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03674>
- Argos. (2024). *CONCRETO PERMEABLE LA SOLUCIÓN QUE PERMITE EL PASO DEL AGUA PARA UTILIZARLA DE MANERA SOSTENIBLE*. https://colombia.argos.co/fichas_tecnicas/ft-concreto-permeable.pdf
- Cemex. (2024). *PERVIA*. <https://www.cemexcolombia.com/documents/45752949/69932289/ft-pervia-20230802.pdf/f10e5833-4f31-54a3-caf5-93fc2a645955?t=1691701281075>

DESARROLLO DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN A PARTIR DE LA ACTIVACIÓN ALCALINA DE METACAOLÍN USANDO COMO AGREGADO DIFERENTES TIPOS DE RESIDUOS DE SUELO

Valentina Quinto Alvarez¹, Daniel Ruiz Santamaria¹, Lindsay Lisbeth Alzate Galeano¹, Briyith Katherine Macias Medina¹, Nicolás Steven Pardo Álvarez²

¹ Semillero de Investigación en Ciencias y Tecnología de la Construcción SITEC, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, vquinto@est.colmayor.edu.co, druizs@est.colmayor.edu.co, linsaya@est.colmayor.edu.co, bmacias@est.colmayor.edu.co

² Grupo de Investigación Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad SITEC, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, nicolas.alvarez@colmayor.edu.co

Palabras clave: Activación alcalina, silicato de sodio, metacaolín, suelo.

1. INTRODUCCIÓN

El metacaolín es un material cementante suplementario (aluminosilicato activado térmicamente) que se produce al calcinar el caolín a temperaturas alrededor de 500 y 600°C, en las cuales se produce una transformación de su estructura cristalina. Fundamentalmente su aplicabilidad se ha centrado en el aprovechamiento de su composición química y reactividad para usarlo como una puzolana artificial en la producción de morteros y concretos, ya que se reconoce su importante contribución en las resistencias mecánicas y durabilidad. Además, su actividad puzolánica, especialmente a edades tempranas, es comparable o superior al humo de sílice y a las cenizas volantes (Restrepo et al., 2006). Por otra parte, la activación alcalina es una tecnología en expansión global que implica la reacción química entre un precursor sólido (generalmente un aluminosilicato) y un activador alcalino, para obtener un producto endurecido. Estos materiales pueden emplearse para fabricar concretos de alto rendimiento sin clinker, con propiedades comparables o incluso superiores a las esperadas en materiales convencionales a base de cemento Portland (Bernal et al., 2013). Como precursores principales para la producción de materiales activados alcalinamente se utilizan subproductos industriales como escoria granulada de alto horno (derivada de la industria siderúrgica), cenizas volantes (derivadas de la combustión del carbón) y metacaolín, entre otros. Estos aglomerantes activados alcalinamente, son una alternativa al uso de aglomerantes tradicionales para la estabilización del suelo y su aplicación puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero hasta en un 80 % en comparación con el cemento Portland (Tonini de Araújo et al., 2023).

Diversos autores han evaluado la implementación y activación alcalina de metacaolín. Kim et al (2024) evaluaron la estabilidad térmica de geopolímeros a partir de metacaolín, humo de sílice y activadores NaOH y NaOH+Na₂SiO₃, encontrando que los especímenes con relaciones Si/Al de 2,5 y 3,0 alcanzaron resistencias de 35 MPa y 25 MPa a 25 °C, pero la exposición a 300 y 600 °C generó grietas y redujo su resistencia mecánica. Por su parte, Zhang et al (2024) evaluaron los efectos del tratamiento con metacaolín y silicato de sodio en arcilla dragada con alto contenido de agua para mejorar el desempeño como relleno de construcción, encontrando que la mejor condición se logró con el silicato de sodio con un módulo de 0,9 adicionado en 12% en masa en las mezclas, mostrando un aumento en la resistencia a la compresión no confinada de 45,4 kPa (37,3% humedad) a 237,0 kPa (20,3% humedad). Por otra parte, Rivera et al (2021) fabricaron bloques de tierra comprimida estabilizados con residuos de vidrio y cenizas volantes activados

con una solución de limpieza alcalina reciclada, encontrando que los bloques optimizados alcanzaron un valor máximo de 17,23 MPa, superando en más del 50 % la resistencia de la muestra de referencia incremento atribuido principalmente al curado térmico a 85 °C y a la distinta proporción suelo/precursor. Finalmente, Narayanaswamy et al (2020) evaluaron las propiedades mecánicas y térmicas, e impactos comparativos del ciclo de vida, de productos de construcción a partir de tierra estabilizada, encontrando que la muestra que presentó mejores resultados fue la de bloques de tierra comprimida (CEB) estabilizados con geopolímero (NaOH+ceniza volante), alcanzando resistencias de 15,0–21,9 N/mm² a los 31 días, con un incremento del 32% a los 200–215 días.

Como lo han mostrado algunos autores, la implementación de metacaolín y suelo en procesos de activación alcalina ha permitido la fabricación de diferentes materiales de construcción con propiedades mecánicas y de durabilidad similares o superiores a las obtenidas con procesos tradicionales a partir de cemento Portland y agregado fino natural. No obstante, a pesar del potencial que presenta el suelo como un sustituto parcial o completo del agregado fino natural en la fabricación de estos materiales, en Colombia no se han reportado muchas investigaciones relacionadas. En adición, los suelos producto de procesos de excavación y adecuación del suelo suelen ser considerados como residuos de construcción y demolición y llevados a lugares de disposición final, desperdiciando el potencial de estos materiales. A partir de lo anterior, en este proyecto se desarrollaron materiales de construcción a partir de la activación alcalina de metacaolín con una mezcla de silicato de sodio comercial y agua, usando como agregado diferentes tipos de suelos considerados como residuos y producto de procesos de excavación y adecuación del terreno de un proyecto de construcción ubicado en la ciudad de Medellín, Colombia. Para esto, se utilizó metacaolín y silicato de sodio comercial y tres tipos de residuos de suelo para diferentes profundidades del proceso de excavación de un proyecto de construcción. Los suelos fueron caracterizados de acuerdo a su granulometría, límites de Atterberg y equivalente de arena. Posteriormente, se plantearon diferentes tipos de diseños de mezcla de mortero, variando el contenido de silicato y agua en función de procesos de compactación y vibración, los cuales fueron curados en polietileno de baja densidad. Finalmente, se evaluó la resistencia a la compresión a los 7 y 28 días, con el fin de determinar la influencia del tipo de suelo en las propiedades mecánicas.

2. METODOLOGÍA

En la Figura 1 se presenta el diagrama metodológico, enfocado en las etapas de determinación de propiedades, diseño de mezcla y evaluación de propiedades.

2.1 Determinación de propiedades

Para la investigación se empleó metacaolín Fortacret, comercializado por la empresa Corona. El silicato de sodio fue adquirido bajo la referencia Flocsil de la empresa Spin. Las muestras de suelo se obtuvieron de una construcción ubicada en Itagüí, a profundidades de 5,18 y 24 m. Cada muestra fue clasificada por medio del sistema unificado de clasificación de suelos (ASTM D2487-17), caracterizada mediante análisis de granulometría, determinación de los límites de Atterberg y prueba de equivalencia de arenas, de acuerdo con la norma de la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras y Transportes Estatales (AASHTO por sus siglas en inglés). La información relativa al metacaolín y al silicato de sodio se extrajo de las fichas técnicas facilitadas por los fabricantes, complementada con una revisión bibliográfica especializada.

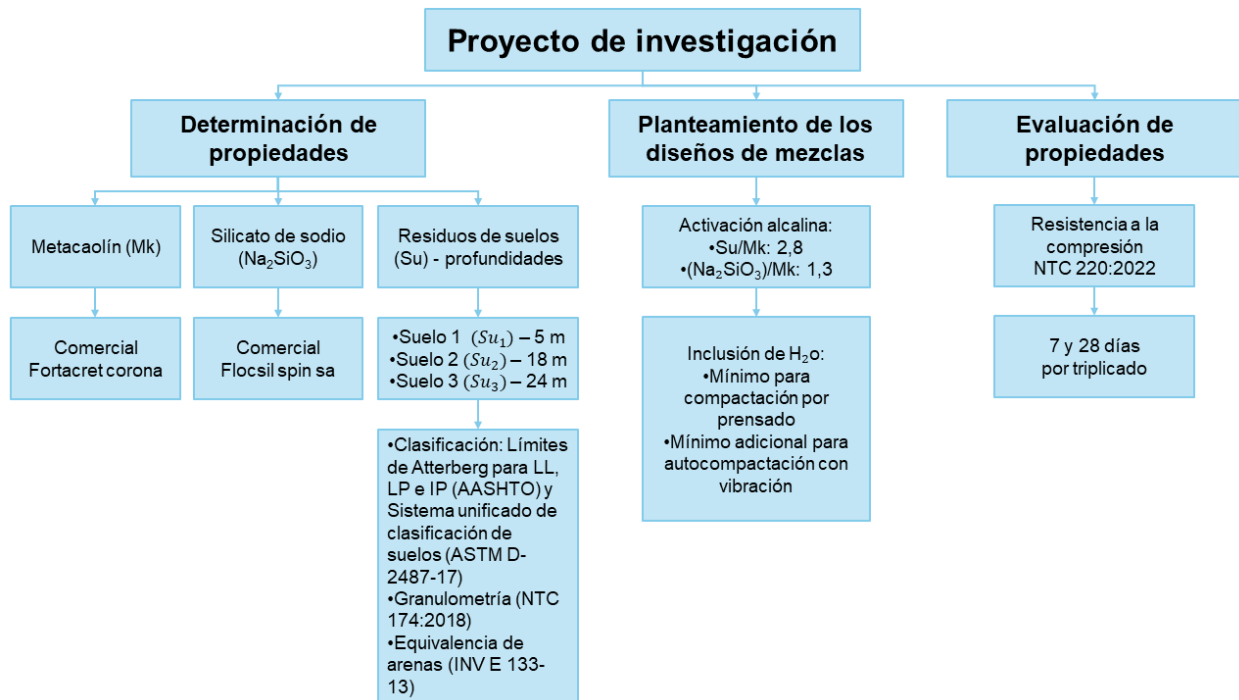


Figura 16. Diagrama metodológico.

2.2 Planteamiento de los diseños de mezclas

Para el diseño se prepararon las mezclas con metacaolín activado y suelo como agregado, la proporción suelo fino/metacaolín se fijó en 2,8 y relación metacaolín/silicato de sodio (precursor/activador) se estableció en 1,3. A partir de estas condiciones, se diseñaron dos variantes de mezcla para cada tipo de suelo: mezclado por compactación y mezclado por autocompactación (vibrado). Para el primero se incluyó el contenido mínimo de agua que permitiera la compactación manual bajo prensa, asegurando la cohesión requerida. Para el segundo se incluyó el contenido mínimo de agua (adicional al anterior) que posibilitara la auto-compactación en el molde mediante vibración, optimizando el asentamiento de las partículas. Una vez obtenidas todas las muestras fueron recubiertas en polietileno de baja densidad para el proceso de curado.

2.3 Evaluación de propiedades

Finalmente, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión (NTC 220:2022) a los 7 y 28 días de curado, con el objetivo de evaluar si la resistencia varía en función del tipo del suelo, o si, por el contrario, estos factores no influyen significativamente en los resultados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Determinación de propiedades

La Tabla 1 presenta los resultados de caracterización del suelo a una profundidad de 5 m. El material corresponde a un limo orgánico de alta plasticidad (MH), según la clasificación AASHTO. Los límites de consistencia registran un límite líquido de 50,0%, un límite plástico de 31,1% y un índice de plasticidad de 18,9, valores que evidencian un comportamiento plástico significativo. La distribución granulométrica indica una composición de 11,6% de grava, 5,0% de arena y 83,4%

de finos, con un tamaño máximo de 10 mm. El ensayo de equivalente de arena, conforme a la norma INV E-133-13, clasifica el material como un suelo altamente expansivo, lo cual sugiere un elevado potencial de cambios volumétricos frente a variaciones en el contenido de humedad. La Tabla 2 corresponde a la caracterización del suelo a 18 m de profundidad. De acuerdo con la clasificación AASHTO, este material se identifica igualmente como MH (limo orgánico de alta plasticidad). Los valores de límite líquido (51,6%), límite plástico (29,2%) e índice de plasticidad (22,4%) reflejan una plasticidad considerable. En cuanto a la granulometría, se establece una composición de 6,2% de grava, 7,8% de arena y 86,0% de finos, con un tamaño máximo de 10 mm. Al igual que en el caso anterior, el ensayo de equivalente de arena determina que el suelo presenta un comportamiento de alta expansividad. Por último, la Tabla 3 muestra los resultados obtenidos para el suelo a 24 m de profundidad. En este caso, la clasificación AASHTO lo identifica como una CL (arcilla orgánica de plasticidad baja a media). Los límites de consistencia presentan valores de límite líquido de 32,8%, límite plástico de 14,2% e índice de plasticidad de 18,6, lo que refleja una plasticidad intermedia en comparación con los estratos superiores. La distribución granulométrica evidencia un contenido de 7,8% de grava, 12,0% de arena y 80,2% de finos, con un tamaño máximo de 10 mm. De acuerdo con los resultados del equivalente de arena, este material también se clasifica como altamente expansivo.

Tabla 6. Resumen de caracterización para el suelo a 5 m de profundidad.

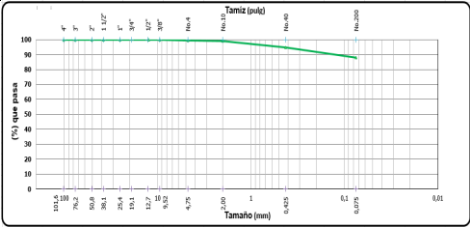
Propiedad	Valor	Referencia normativa
Límite líquido	50,0	AASHTO
Límite plástico	31,1	
Índice de plasticidad	18,9	
Índice de grupo	0 MH (Limo - Orgánico, suelos limosos o arenas)	
Distribución granulométrica		NTC 174:2018
% de grava	0,5	INV E 133-13
% de arena	11,6	
% de finos	87,9	
Tamaño máximo	100 mm	
% pasante malla No 10	99,0	INV E 133-13
Equivalente de arena	Suelo altamente expansivo	
Figura		

Tabla 2. Resumen de caracterización para el suelo a 18 m de profundidad.

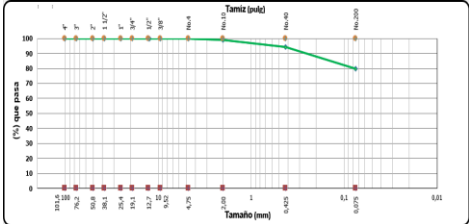
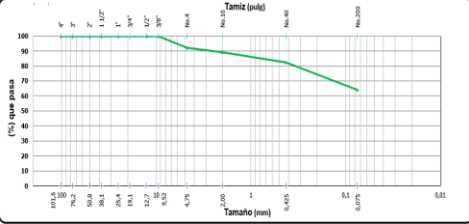
Propiedad	Valor	Referencia normativa
Límite líquido	54,0	AASHTO
Límite plástico	31,6	
Índice de plasticidad	22,4	
Índice de grupo	0 MH (Limo - Orgánico, suelos limosos o arenas)	
Distribución granulométrica		NTC 174:2018
% de grava	0,0	INV E 133-13
% de arena	20,4	
% de finos	79,6	
Tamaño máximo	100 mm	
% pasante malla No 10	99,0	INV E 133-13
Equivalente de arena	Suelo altamente expansivo	
Figura		

Tabla 3. Resumen de caracterización para el suelo a 24 m de profundidad.

Propiedad	Valor	Referencia normativa
Límite líquido	32,0	AASHTO
Límite plástico	17,8	
Índice de plasticidad	14,2	
Índice de grupo	6 CL (Arcilla - orgánica de plasticidad baja o media)	
Distribución granulométrica		NTC 174:2018
% de grava	7,8	INV E 133-13
% de arena	28,1	
% de finos	64,2	
Tamaño máximo	100 mm	
% pasante malla No 10	89,2	INV E 133-13
Equivalente de arena	Suelo altamente expansivo	
Figura		

3.2 Planteamiento de los diseños de mezclas y evaluación de propiedades.

En términos generales, los morteros compactados presentaron valores de resistencia superiores a los autocompactados, lo que se relaciona directamente con la menor cantidad de agua adicionada. Un mayor contenido de agua, como el requerido en los autocompactados, conduce a una dilución de la fase activada y a un aumento de la porosidad, disminuyendo la capacidad portante de la matriz alcalina. Los resultados más altos se alcanzaron con el suelo CL-A en condición compactada (CL-A-3,7), registrando $12,64 \pm 0,36$ MPa a 7 días y $14,44 \pm 1,29$ MPa a 28 días. En contraste, el mismo suelo bajo condición autocompactada (CL-A-3,8) mostró una disminución en la resistencia, alcanzando únicamente $10,57 \pm 0,43$ MPa a 28 días. En el caso de los suelos MH, tanto compactados como autocompactados, las resistencias fueron considerablemente menores. Para el suelo MH-V, se obtuvieron valores de $5,33 \pm 0,41$ MPa a 28 días en la condición compactada (MH-V-2,2), mientras que en autocompactación (MH-V-4,3) la resistencia descendió a $2,40 \pm 0,10$ MPa. Un patrón similar se observó con el suelo MH-A, ya que en compactación (MH-A-3,1) alcanzó $4,37 \pm 0,31$ MPa a 28 días, mientras que en autocompactación (MH-A-5,5) apenas se registraron $2,59 \pm 0,33$ MPa. Estos resultados evidencian que la elevada plasticidad y expansividad de los suelos MH generan una mayor susceptibilidad a la pérdida de cohesión y a la formación de porosidad adicional en presencia de agua. En función de la evolución temporal, el incremento de resistencia entre 7 y 28 días fue limitado en la mayoría de los casos, lo cual indica que el desarrollo de la matriz alcalina ocurre predominantemente durante la primera semana de curado.

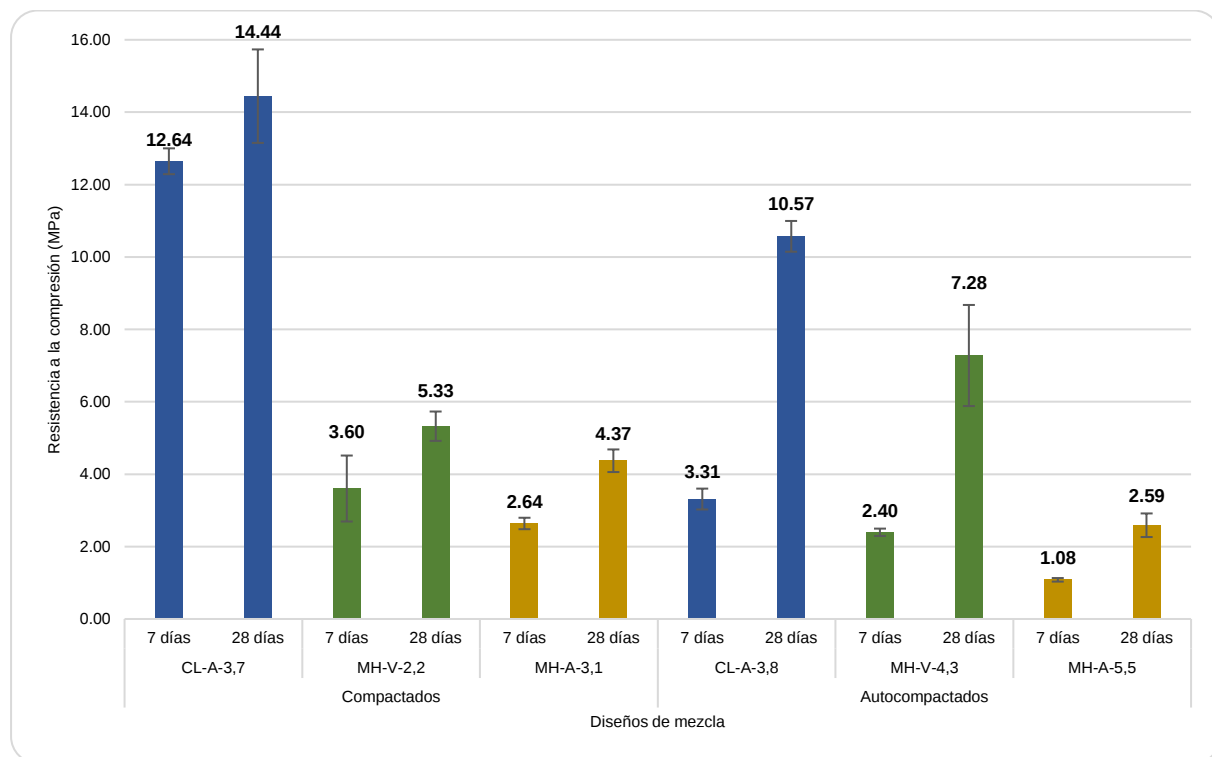


Figura 17. Resistencia a la compresión (MPa) para los diseños de mezcla con los suelos evaluados CL-A (azul), MH-V (verde) y MH-A (amarillo) a los 7 y 28 días de curado.

En términos generales, se observa que las mezclas compactadas alcanzan densidades más elevadas que las autocompactadas, lo cual está directamente relacionado con la menor cantidad

de agua adicionada. La reducción de la densidad en las condiciones de autocompactación refleja la formación de una microestructura más porosa, consecuencia del incremento en la relación agua/metacaolín. En los morteros compactados, los valores de densidad a 28 días se ubicaron en un rango de $2.221,1 \pm 21,8$ a $2.330,6 \pm 3,9$ kg/m^3 , con el suelo CL-A presentando los valores más altos. Este comportamiento es consistente con los resultados de resistencia a la compresión donde el mismo suelo alcanzó los valores más elevados. Por el contrario, los suelos MH-V y MH-A compactados presentaron densidades ligeramente inferiores ($2.319,8 \pm 86,9$ y $2.221,1 \pm 21,8$ kg/m^3 , respectivamente), lo cual sugiere que la mayor plasticidad y expansividad de los suelos MH limita la capacidad de empaquetamiento de la matriz, reduciendo la densificación. En condición autocompactada, las densidades disminuyeron. El suelo CL-A (3,8) pasó de $2.250,0 \pm 12,3$ kg/m^3 a 28 días, mientras que los suelos MH-V (4,3) y MH-A (5,5) registraron valores aún menores, de $2.258,7 \pm 10,3$ y $1.896,2 \pm 259,2$ kg/m^3 , respectivamente. Este último caso es de particular interés, ya que la disminución marcada de la densidad en MH-A-5,5 evidencia una fuerte influencia de la alta relación agua/metacaolín sobre la estructura del material, generando un aumento de la porosidad que se traduce en menores resistencias mecánicas. En cuanto a la evolución temporal, la tendencia general fue un ligero aumento de la densidad entre los 7 y 28 días en las condiciones compactadas, lo que refleja una consolidación progresiva de la matriz. En cambio, en los autocompactados se observaron variaciones menos consistentes, con incrementos en algunos casos (MH-V) y reducciones en otros (MH-A), lo que refuerza la idea de una mayor inestabilidad microestructural bajo exceso de agua.

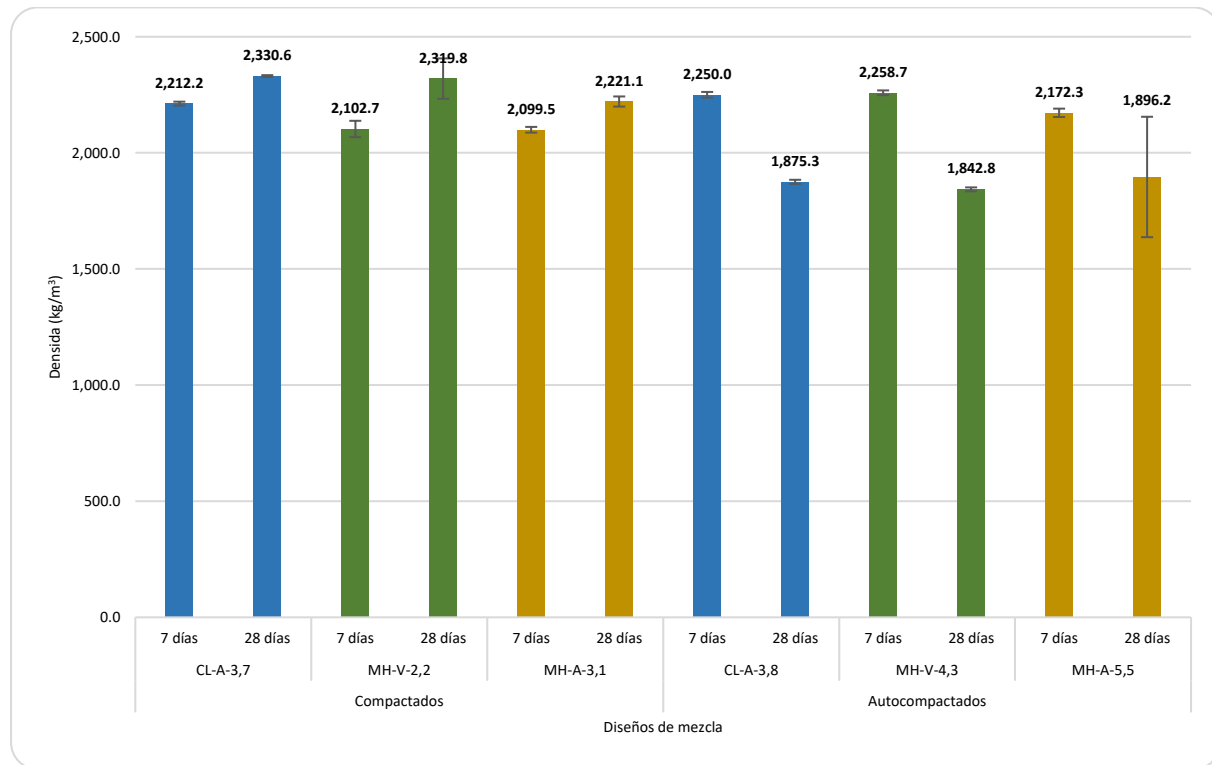


Figura 18. Cambios en la densidad (kg/m^3) para los diseños de mezcla con los suelos evaluados CL-A (azul), MH-V (verde) y MH-A (amarillo) a los 7 y 28 días de curado.

4. CONCLUSIONES

Respecto a los suelos provenientes de RCD, se confirmó que la naturaleza y la profundidad del material condicionan el comportamiento final de las mezclas activadas alcalinamente. El suelo arcilloso CL-A (24 m) presentó los mejores valores de resistencia y estabilidad, superando ampliamente a los limos MH-V y MH-A, cuyos resultados fueron más limitados. En función de la resistencia a la compresión, la compactación mecánica favoreció el desarrollo de esta propiedad, mientras que la autocompactación, al requerir mayor agua, comprometió la integridad de la matriz. Además, el tipo de suelo incide de manera determinante en el desempeño, siendo los suelos CL más adecuados que los MH para su empleo como agregado en morteros activados alcalinamente. Por otra parte, en función de la densidad, la compactación favoreció la obtención de mezclas más densas y estables, mientras que la autocompactación generó estructuras menos compactas y más porosas. Asimismo, el tipo de suelo influye de manera directa, siendo los suelos CL más adecuados para garantizar mayores densidades y, en consecuencia, mejores propiedades mecánicas en comparación con los suelos MH. Desde una perspectiva ambiental y de sostenibilidad, los resultados confirman que es posible aprovechar suelos residuales de excavaciones en la elaboración de materiales de construcción alternativos mediante activación alcalina. Esto representa una estrategia viable para reducir el impacto ambiental asociado al uso de agregados naturales y al consumo de cemento Portland, contribuyendo así a la gestión integral de residuos de construcción y demolición.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos profundamente a los docentes Nicolás Steven Pardo Álvarez y Ubany de Jesús Zuluaga de los Ríos, quienes con su paciencia, dedicación y compromiso se convirtieron en una guía invaluable durante la realización de nuestro trabajo de grado. Su conocimiento, acompañamiento y orientación fueron pilares fundamentales en cada etapa del proceso, no solo como asesores, sino también como formadores que nos inspiraron a mantener la disciplina, la rigurosidad académica y la pasión por el aprendizaje. De igual manera, expresamos nuestra gratitud a la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, al Semillero SITEC y al Grupo de Investigación Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad, por brindarnos el espacio académico y científico que hizo posible el desarrollo de esta investigación. Finalmente, extendemos un agradecimiento especial a nuestras familias y compañeros, quienes, con su apoyo constante, motivación y confianza nos impulsaron a culminar con éxito este proceso académico, que representa no solo un logro personal, sino también un aporte al fortalecimiento del conocimiento en el campo de la construcción sostenible.

6. REFERENCIAS

- Bernal, S. A., Mejía de Gutierrez, R., & Rodríguez, E. D. (2013). Materiales activados por álcali: cimentando un futuro sostenible. *Ingeniería y Competitividad*, 15(2), 211–223. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-30332013000200020
- Restrepo, J., Jaime Restrepo Baena, O., & Iván Tobón, J. (2006). Efectos de la adición de metacaolín en el cemento Pórtland. *Dyna*, 150, 131–141.
- Tonini de Araújo, M., Tonatto Ferrazzo, S., Mansur Chaves, H., Gravina da Rocha, C., & Cesar Consoli, N. (2023). Mechanical behavior, mineralogy, and microstructure of alkali-activated wastes-based binder for a clayey soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 362(January), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129757>

- Kim, G., Cho, S., Im, S., Yoon, J., Suh, H., Kanematsu, M., Machida, A., Shobu, T., & Bae, S. (2024). Evaluation of the thermal stability of metakaolin-based geopolymers according to Si/Al ratio and sodium activator. *Cement and Concrete Composites*, 150, 105562. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2024.105562>
- Narayanaswamy, A. H., Walker, P., Venkatarama Reddy, B. V., Heath, A., & Maskell, D. (2020). Mechanical and thermal properties, and comparative life-cycle impacts, of stabilised earth building products. *Construction and Building Materials*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118096>
- Rivera, J., Coelho, J., Silva, R., Miranda, T., Castro, F., & Cristelo, N. (2021). Compressed earth blocks stabilized with glass waste and fly ash activated with a recycled alkaline cleaning solution. *Journal of Cleaner Production*, 284. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124783>
- Zhang, Z., Zhang, L., Liu, H., & Yin, J. (2024). Effects of metakaolin and sodium silicate treatment on highwater content dredged clay for improved construction fill performance. *Construction and Building Materials*, 411, 134196. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.134196>

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL MORTERO FRENTE A LA EXPOSICIÓN ATAQUES QUÍMICOS: DURABILIDAD Y PROPIEDADES MECÁNICAS

Ana María Gaviria Suárez¹, Jhon Fredy García Higueta¹, Hernán Darío Cañola²

¹ Semillero de Investigación en Ciencias y Tecnología de la Construcción SITEC, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, amgaviria@est.colmayor.edu.co, jfgarcia@est.colmayor.edu.co

² Grupo de Investigación Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, hernan.canola@colmayor.edu.co

Palabras clave: Mortero; ácido nítrico; pérdida de masa; durabilidad; resistencia a la compresión.

1. INTRODUCCIÓN

El mortero es un material ampliamente utilizado en la construcción, principalmente como elemento de unión en estructuras de mampostería, recubrimiento o nivelación de superficies y reparación de elementos estructurales. Este material está compuesto por la mezcla de cemento, arena y agua, aunque en algunos casos esta composición puede variar incluyendo aditivos o cementantes suplementarios con el fin de modificar o mejorar su comportamiento (Neville et al, 2011). El mortero posee propiedades físicas, químicas y mecánicas que determinan su desempeño y estas dependen de algunos factores como la relación agua/cemento, la granulometría del agregado, las condiciones de curado y, especialmente el entorno al que está expuesto. Según la NSR-10 (Título D, 2010) los morteros se clasifican en diferentes tipos (H, M, S y N) en función de su resistencia a la compresión y su uso específico, lo que permite seleccionar el tipo de mortero más adecuado de acuerdo con las exigencias de cargas, adherencia y condiciones ambientales, y que a su vez resalta su capacidad de adaptarse a distintas condiciones de carga y entornos de exposición. En ambientes agresivos, como aquellos con presencia de sulfatos, cloruros o ambientes ácidos, el mortero puede sufrir procesos de degradación que comprometen su integridad física y sus propiedades mecánicas, reduciendo la vida útil de las estructuras (Mehta et al. 2014) y resaltando la importancia de comprender las propiedades del mortero y su comportamiento frente a distintos ambientes, con el fin de lograr un diseño de mezclas óptimo.

Diversos estudios han destacado cómo el ataque de agentes químicos compromete la resistencia y durabilidad del mortero y el concreto. Arafa et al., (2017) evidenciaron que el uso de agregados reciclados en concreto incrementa su susceptibilidad al ataque por sulfatos, reduciendo su resistencia a la compresión hasta un 26% (33,03 MPa a 24,42 MPa) tras la exposición a soluciones de $MgSO_4$ al 6% y 9%. Por su parte, Yu et al., (2016) determinaron que el ataque por sulfatos ocurre en dos fases: una inicial, durante los primeros 90 a 120 días, donde la formación de ettringita y yeso llenan los poros e incrementa la resistencia a la compresión hasta 40,3 MPa y la densidad del mortero hasta 2.332,06 kg/m³, seguida de una fase de degradación progresiva, caracterizada por la acumulación excesiva de estos productos, generando microfisuras y una expansión significativa, con cambios de longitud de hasta 0,31%, superando el límite de 0,10% establecido por la norma ASTM C1157. De manera similar, Zhang et al., (2018) analizaron las propiedades mecánicas y llevaron a cabo la estimación de la vida útil del concreto modificado mediante la incorporación de ceniza volante y fibra de polipropileno, observando que esta combinación mejoró la resistencia al ataque por sulfatos, al reducir la pérdida de la resistencia a

la compresión y tracción tras 10 ciclos de exposición a Na_2SO_4 y $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. En estas condiciones, el concreto modificado mostró un incremento del 28% en la resistencia a la compresión y del 19% en la resistencia a tracción en comparación con el concreto ordinario. Finalmente, Zhao et al., (2021) evaluaron el concreto lanzado expuesto a sulfatos y cloruros, determinando que el uso de materiales cementantes suplementarios mejoró la durabilidad, en especial con relaciones agua-cemento bajas (0,35). Las mezclas con 10% de ceniza volante presentaron la mejor pérdida de resistencia (1,83% en Na_2SO_4), mientras que aquellas con 10% de humo de sílice registraron la mayor degradación (hasta 15,26%) y daños superficiales.

Como se ha mostrado, los agentes químicos tienen un gran impacto en las patologías químicas de los morteros, ya que comprende diversos procesos de deterioro, los cuales reducen la resistencia mecánica y alteran su estabilidad estructural, es decir, la capacidad del material para conservar sus propiedades físicas y mecánicas esenciales (cohesión interna, resistencia y durabilidad) frente a factores adversos como el ataque químico. Sin embargo, las condiciones de evaluación de durabilidad generalmente se enfocan a soluciones de sulfatos y no se acostumbra a analizar el impacto de los ácidos, específicamente el ácido nítrico en los morteros, el cual es utilizado en actividades cotidianas de limpieza de elementos o espacios como limpieza de baños, pisos, lavamanos, juntas, muros, fachadas, granito, así como en la eliminación de manchas en azulejos y la remoción de depósitos minerales, afectando su durabilidad. Por lo tanto, en esta investigación se analizó el comportamiento del mortero frente a la exposición ataques químicos, mediante el estudio de la durabilidad y las propiedades mecánicas. Para esto, inicialmente se utilizó cemento y agregado fino, de los cuales se caracterizó el agregado fino mediante densidad, absorción, humedad y módulo de finura. Además, se utilizó ácido nítrico de uso general al 50% como agente agresor. Posteriormente, se elaboraron 30 muestras de mortero con resistencia de diseño de 15 MPa con proporciones 1:1 y 1:2, curadas por 7 días, para luego ser expuesta en distintas proporciones de ácido nítrico/agua. Finalmente, se evaluó la durabilidad frente al ataque químico, la resistencia a la compresión tras el secado al horno y se realizaron inspecciones visuales para observar los efectos superficiales del ataque ácido.

2. METODOLOGÍA

En la Figura 1 se presenta el diagrama metodológico, enfocado en las etapas de caracterización de la materia prima, el planteamiento del ensayo relacionado al ataque químico a los morteros y la evaluación de propiedades mecánicas y de durabilidad.

2.1 Caracterización de la materia prima

Para esta investigación se utilizó agua potable de la ciudad de Medellín, cemento gris de uso general de la marca “Argos” y agregado fino, caracterizado según la NTC 174 para el módulo de finura, NTC 1776 para la humedad, NTC 237 para la densidad y absorción. Además, se utilizó como solución ácido nítrico al 50% de uso general para mantenimiento o limpieza marca “el super poderoso”.

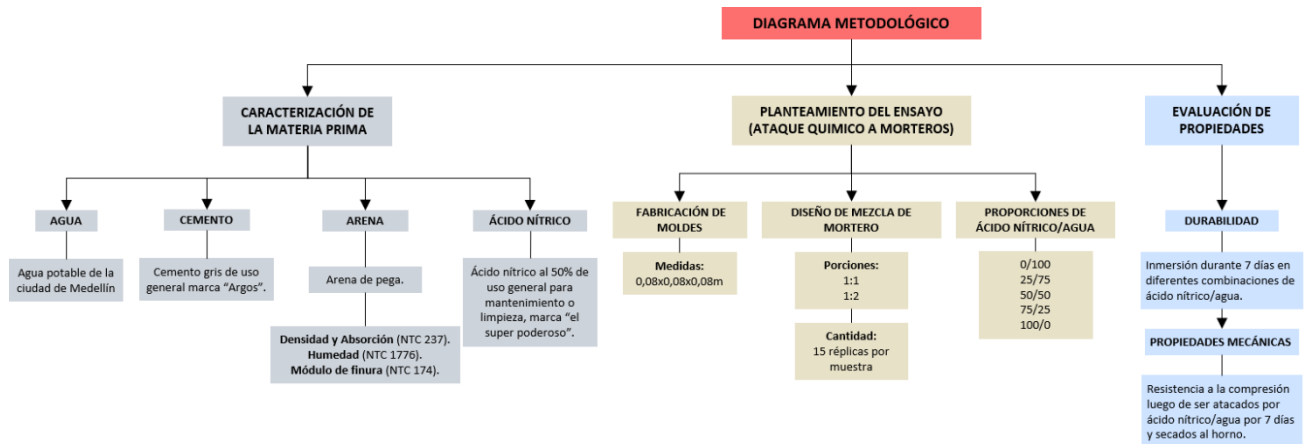


Figura 1. Diagrama metodológico.

2.2 Planteamiento del ensayo (ataque químico a morteros)

Se fabricaron moldes en madera para el desarrollo de las muestras de mortero con medidas de 0,08x0,08x0,08m por orientación del docente, lo cual se debe a que el estudio se centra en evaluar la degradación y la resistencia a la compresión bajo ataque químico y las dimensiones implementadas mejoran la presentación de los resultados. Posteriormente se realizaron diseños de mezclas para 15 MPa de resistencia a la compresión en proporciones 1:1 y 1:2, ambas proporciones con 15 réplicas. Luego de 7 días de curado, las muestras se desencofraron, se marcaron según la dosificación y se les asignó un número a cada una de ellas, con el fin de identificar y formar parejas de muestras con dosificación diferente, es decir, la pareja #1 está conformada por una muestra con dosificación 1:1 y una muestra con dosificación 1:2. Después de esto, se tomó el peso en seco (peso inicial) de cada muestra. Las proporciones de ácido nítrico/agua fueron de 100/0, 75/25, 50/50, 25/75 y 0/100. Cada pareja fue sumergida parcialmente, se les hizo un seguimiento diario, haciendo una inspección visual y una toma de peso durante 7 días.

2.3 Evaluación de propiedades mecánicas y de durabilidad

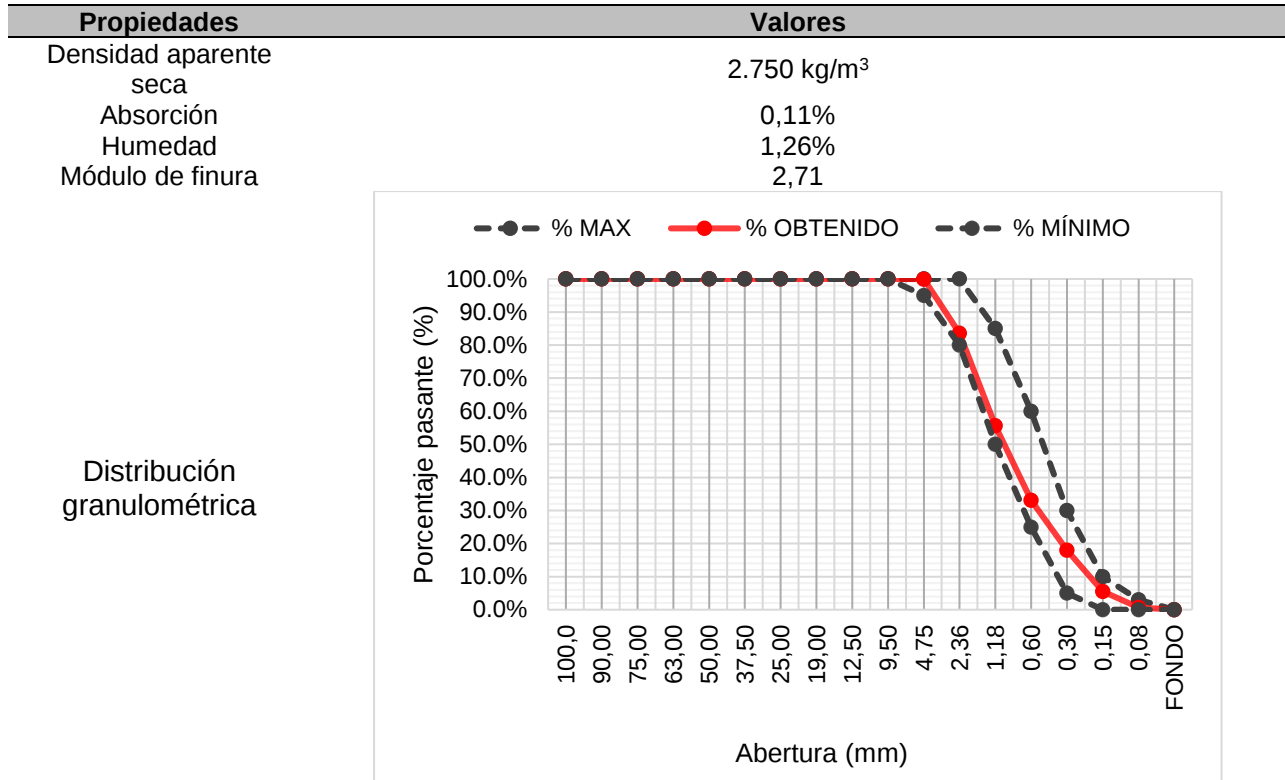
A cada muestra de mortero se le evaluó la durabilidad a la exposición del ácido nítrico/agua en diferentes proporciones por un tiempo de 7 días y la resistencia a la compresión luego de ser secados al horno y afectados por la solución. Además, se llevó a cabo una inspección visual, reportando el cambio superficial de cada una de las muestras.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de la materia prima

En la Tabla 1 se presentan los resultados de caracterización del agregado fino en donde se pudo observar que fue una arena gruesa con un módulo de finura 2,71, con una absorción de 0,11%, una humedad de 1,26% y una densidad correspondiente a valores usuales para este tipo de materiales con un valor de 2.750 kg/m³.

Tabla 7. Propiedades del agregado fino.



3.2 Diseño de mezclas del mortero y proporciones de ácido nítrico/agua.

En la Tabla 2 se presenta las cantidades de los diseños de mezclas para cada una de las dosificaciones y en la Tabla 3 se presenta las proporciones entre ácido nítrico y agua, utilizadas para los diseños. Además, en la Figura 2 se presenta la forma final en la que quedaron las muestras de las dimensiones mencionadas anteriormente.

Tabla 8. Cantidades de materiales para cada dosificación por cada prisma.

Material	Dosificación 1:1 (kg)	Dosificación 1:2 (kg)
Cemento	0,4608	0,3072
Arena	0,4608	0,6144
Agua	0,2304	0,1536

Tabla 9. Proporciones de ácido nítrico/agua.

% de Ácido	Agua (mL)	Ácido Nítrico (mL)
0	980	0
25	735	245
50	490	490
75	245	735
100	0	980

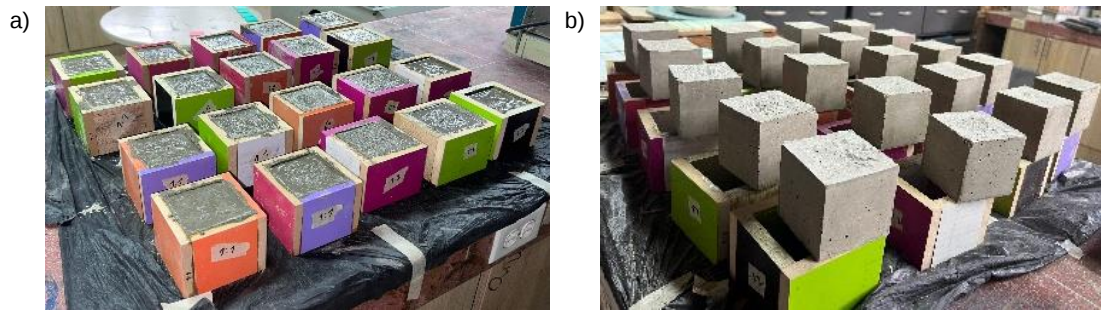


Figura 2. Elaboración de las muestras de mortero. a) Vaciado de la muestra y b) Desencofrado.

3.3 Evaluación de propiedades mecánicas y de durabilidad

a) Muestras de mortero con dosificación 1:1

La Figura 3 muestra que, en general, a mayor concentración de ácido, mayor es la pérdida de peso, alcanzando su punto máximo con 75% de ácido, que presentó una pérdida del 23,7%. Sin embargo, al utilizar un 100% de ácido, la pérdida disminuyó levemente a 19,2%, lo que evidencia un comportamiento no lineal. Esta disminución podría deberse a la menor penetración del ácido puro en comparación con las soluciones diluidas, ya que la ausencia de agua limita el ingreso del agente agresivo en los poros del material, lo que favorece la preservación de la integridad interna de las muestras y, en consecuencia, reduce la pérdida de masa. La Figura 4 presenta las muestras deterioradas de los morteros a diferentes concentraciones de ácido.

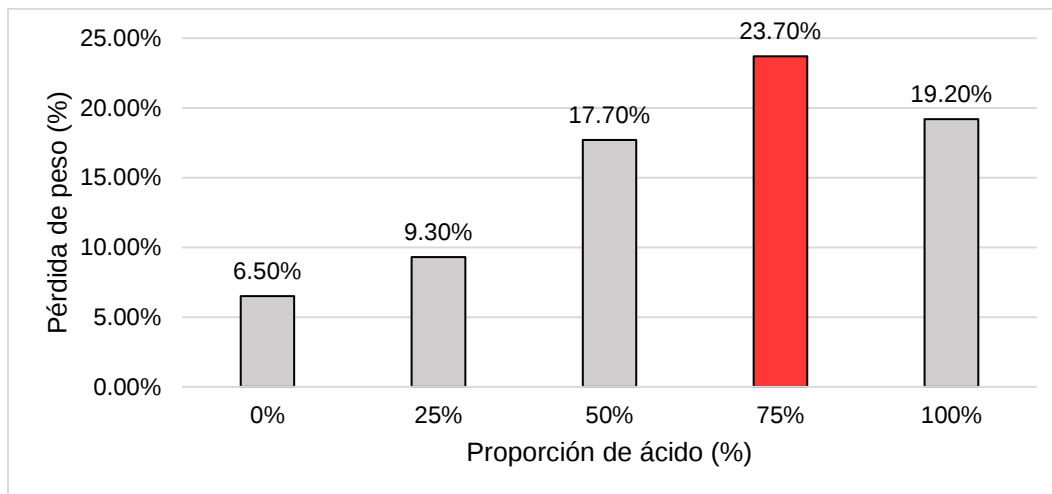


Figura 3. Pérdida de peso de muestras con dosificación 1:1.

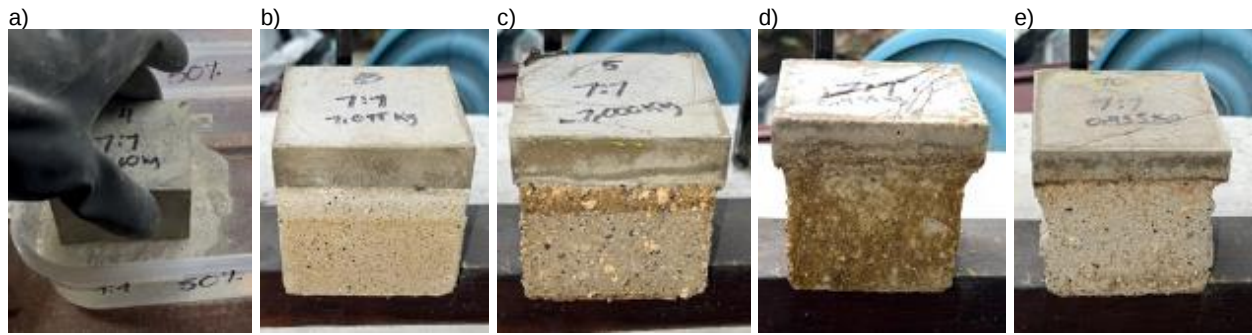


Figura 4. Apariencia superficial. a) Muestra sumergida en el ácido nítrico, b) Muestra expuesta en el 25% de ácido nítrico, c) Muestra expuesta en el 50% de ácido nítrico, d) Muestra expuesta en el 75% de ácido nítrico y e) Muestra expuesta en el 100% de ácido nítrico.

Se evaluó la resistencia a la compresión en muestras con distintas concentraciones de ácido, evidenciándose una tendencia general decreciente a medida que aumenta el porcentaje tal y como se muestra en la Figura 5. Las mayores resistencias se obtuvieron en las muestras con 0% y 25% de ácido. A partir del 50%, se observa una disminución significativa en los valores promedio, registrándose 12,27 MPa para el 50% y 11,61 MPa para el 75%, siendo esta última la más baja de todas. Finalmente, con el 100% de ácido, la resistencia muestra una leve recuperación respecto al 75%, pero sin alcanzar los valores iniciales.

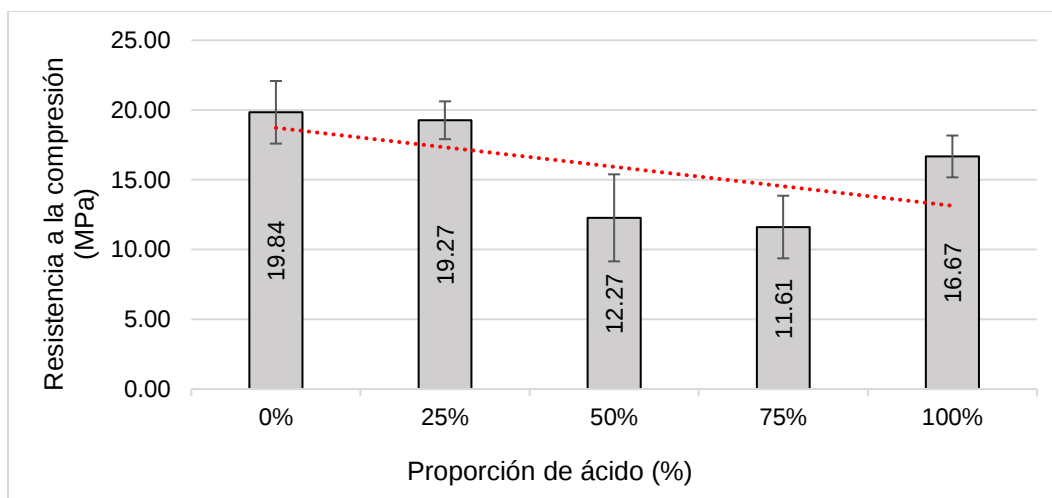


Figura 5. Resistencia a la compresión de muestras con dosificación 1:1.

b) Muestras de mortero con dosificación 1:2

La Figura 6 muestra los resultados de la dosificación con las proporciones 1:2 presentando una tendencia creciente en la pérdida de masa conforme aumenta la proporción de ácido, alcanzando su máximo con un 75% de concentración, donde se registró una pérdida del 25,3%. Este patrón refuerza la hipótesis planteada en la sección anterior. La Figura 7 presenta las muestras deterioradas de los morteros a diferentes concentraciones de ácido.

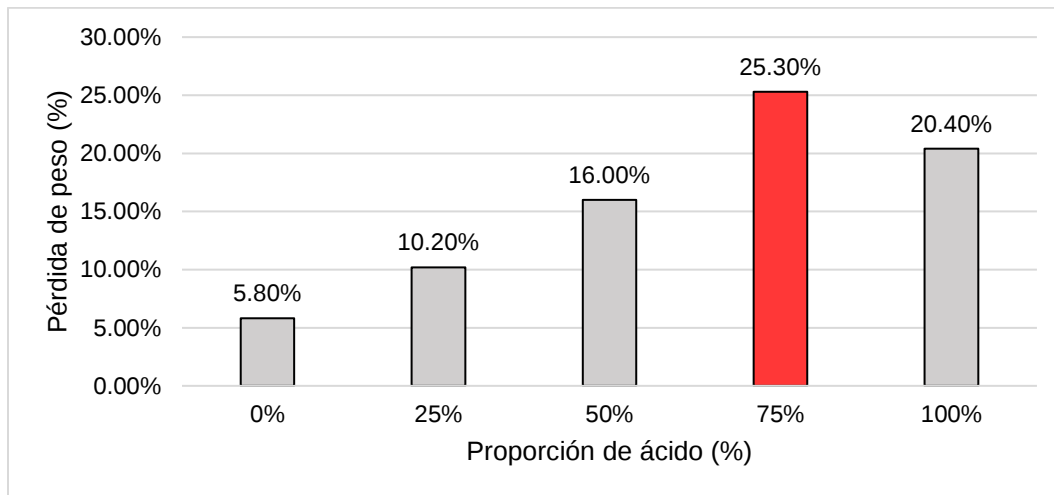


Figura 6. Pérdida de peso de muestras con dosificación 1:2.

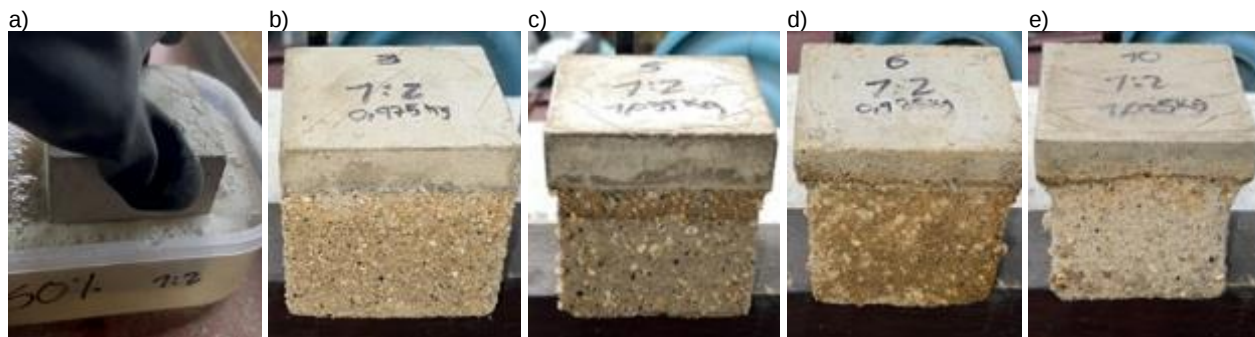


Figura 7. Apariencia superficial a) Muestra sumergida en el ácido nítrico, b) Muestra expuesta en el 25% de ácido nítrico, c) Muestra expuesta en el 50% de ácido nítrico, d) Muestra expuesta en el 75% de ácido nítrico y e) Muestra expuesta en el 100% de ácido nítrico.

Igualmente, se evaluó la resistencia a la compresión en muestras con distintas concentraciones de ácido, bajo una dosificación 1:2 representadas en la Figura 8. Las muestras con 25%, 50% y 75% de ácido alcanzaron resistencias de 12,75 MPa, 12,68 MPa y 12,54 MPa, respectivamente, mostrando una reducción en la resistencia respecto a la muestra control. La resistencia más baja se registró en la muestra con 75%.

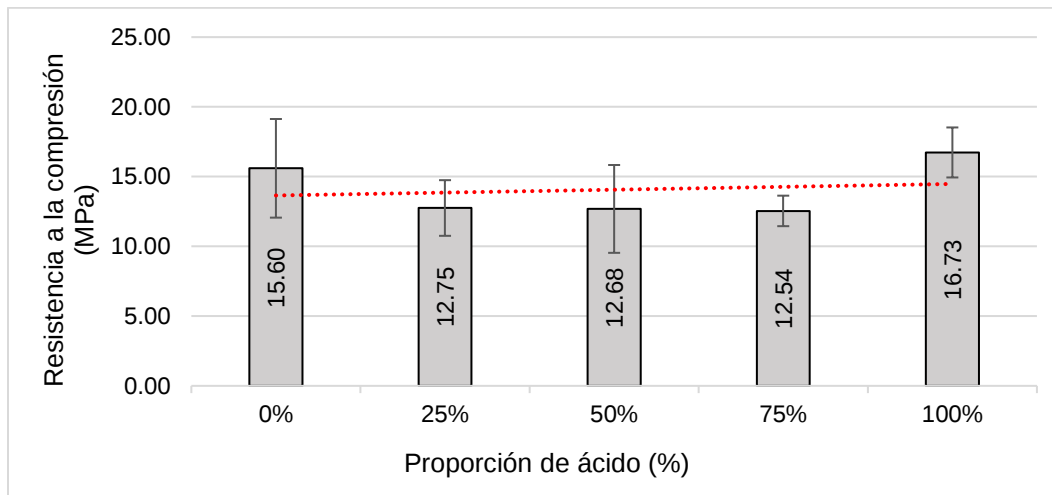


Figura 8. Resistencia a la compresión de muestras con dosificación 1:2

4. CONCLUSIONES

La mayor pérdida de masa se presentó con una concentración de ácido nítrico al 75%, alcanzando un 23,7% en la dosificación 1:1 y 25,3% en la dosificación 1:2, en comparación con las muestras control (0%), lo que evidencia un deterioro significativo por exposición al ácido nítrico diluido.

En cuanto a la resistencia a la compresión, las muestras más afectadas fueron las expuestas al 75% de ácido, registrando una disminución a 11,61 MPa para la dosificación 1:1, lo que representa una reducción del 41,5% respecto a la muestra control (0%), que alcanzó 19,84 MPa.

De acuerdo con los resultados se puede decir que al utilizar una proporción de ácido nítrico/agua del 75/25 para realizar una limpieza, los elementos podrían presentar mayores afectaciones que al limpiar con proporciones de ácido nítrico/agua del 50/50 e incluso de 100/0.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al director del proyecto, Hernán Darío Cañola, por su valiosa orientación, compromiso y acompañamiento durante todo el proceso, así como al codirector, José Reynaldo Zelaya Madariaga, por su constante apoyo, aportes técnicos y disposición para resolver dudas en los momentos clave. A cada uno de ustedes, gracias por haber sido parte esencial en este camino.

6. REFERENCIAS

- Arafa et al. (2017). Investigating the Effect of Sulfate Attack on Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete.
- Mehta et al. (2014). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Neville et al. (2011). Properties of Concrete (5th ed.). Pearson Education Limited.
- Yu et al. (2016). Study of the evolution of properties of mortar under sulfate attack at different concentrations.

Zhang et al. (2018). Mechanical Properties and Service Life Prediction of Modified Concrete Attacked by Sulfate Corrosion.

Zhao et al. (2021). Degradation of Shotcrete Materials Subjected to Sulfate and Chloride Attack in Varying Exposure Regimes.

DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA BARRERA FÍSICA FABRICADA A BASE DE FIBRA DE FIQUE Y RESINA DE POLIÉSTER EN LA IMPERMEABILIZACIÓN DE MUROS DE MAMPOSTERÍA

Félix Antonio Medina Díaz¹, Alejandro Alberto Gómez Duque¹, Juan Esteban Mejía Ríos¹, Hernán Darío Cañola²

¹ Semillero de Investigación en Ciencias y Tecnología de la Construcción SITEC, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, alejandrog@est.colmayor.edu.co, jemejia@est.colmayor.edu.co, fmedina@est.colmayor.edu.co

² Grupo de Investigación Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, hernan.canola@colmayor.edu.co

Palabras clave: Barrera impermeabilizante, resina de poliéster, fibra de fique.

1. INTRODUCCIÓN

La impermeabilización representa un método fundamental dentro de la construcción civil, cuyo objetivo está en prevenir de manera efectiva la filtración o la penetración de líquidos y otros fluidos. Esta acción preventiva es esencial, considerando que la infiltración de humedad puede iniciar una serie de problemas perjudiciales en las estructuras de las edificaciones, entre las cuales, destacan la aparición de humedades en muros y paredes, así como la formación de goteras en losas y techos, la exposición continua a la humedad puede conducir al deterioro progresivo de los materiales de construcción (T. Kubal, 2008). Las impermeabilizaciones se clasifican según su composición, resaltando los asfálticos, los cementosos, los acrílicos, de poliuretano, de látex, de caucho EPDM, de membranas líquidas y de membranas asfálticas. De forma específica, las resinas actúan como impermeabilizantes formando una película continua y flexible que bloquea la penetración de agua, gracias a su fuerte adherencia a diversas superficies, lo que asegura una protección duradera contra factores ambientales, ofreciendo resistencia química en entornos industriales o áreas expuestas a corrosivos (Skills Institute Press, 2018). Dentro de este grupo, las resinas epóxicas son excelentes impermeabilizantes debido a su alta resistencia al agua y a su capacidad de formar una barrera impermeable y duradera. En la mampostería se utilizan para crear recubrimientos continuos y sin juntas sobre diferentes superficies. Además, su estructura densa y continua bloquea el paso del agua y la humedad, protegiendo las edificaciones de daños como la corrosión, el moho y el deterioro (Walker & Felice, 2007).

Diversos autores han investigado la implementación de barreras impermeabilizantes en sistemas constructivos. Rua et al., (2021) estudiaron el comportamiento al impacto de compuestos laminados contruidos con fibras de fique y resina epóxica, encontrando que mediante pruebas con métodos de impacto Charpy con entalla y de impacto de flexión en tres puntos se mejoró el comportamiento mecánico y el trabajo de fractura evidenciando un aumento de 5 a 30 kJ/m². Por otra parte, Han et al., (2023) llevaron a cabo un estudio experimental sobre las propiedades de un material compuesto cementoso superfino modificado con polímeros para impermeabilización, encontrando que el material modificado con resina epoxi mostró un 52,2% menos de penetración de agua que el cemento y el modificado con un 3% de resina mostró un aumento en la resistencia a la flexión del 10,6%. En otro estudio, Tsukagoshi et al., (2012) estudiaron el desempeño

protector de una membrana impermeabilizante de poliuretano contra la carbonatación en zonas fisuradas de un sustrato de mortero, encontrando que el deterioro de las membranas impermeabilizantes en el área agrietada del sustrato ocurrió más rápido que en el área no agrietada del sustrato, mostrando que el rendimiento protector contra la carbonatación se deteriora a medida que disminuye el espesor de la membrana.

Como se ha mostrado, la impermeabilización es importante en las construcciones civiles, ya que protege los edificios evitando que el agua se filtre, causando problemas como humedad y goteras, que pueden deteriorar la estructura a largo plazo y alterar la durabilidad. Esta impermeabilización se logra mediante diferentes materiales como mantos asfálticos, membranas poliméricas, resinas epóxicas, etc. Sin embargo, en muros de mampostería no se ha investigado la implementación de resina de poliéster con fibra de fique como método de impermeabilización por capilaridad, debido a que tradicionalmente este proceso se ha llevado a cabo con morteros impermeabilizantes o láminas asfálticas, que no fueron diseñadas para atacar la raíz del problema, sino solo de forma correctiva. Por lo tanto, en este proyecto se determinó la influencia de la implementación de una barrera física fabricada a base de fibra de fique y resina de poliéster para la impermeabilización de muros de mampostería. Para esto, inicialmente se llevó a cabo la definición del sistema, en el cual la barrera física se fabricó a partir de resina de poliéster y fibra de fique, a partir de una revisión literaria previa. Posteriormente, para la evaluación de las propiedades mecánicas se fabricó y se realizó el fallado de dos muretes de acuerdo con la NTC 3495, sin y con barrera. Finalmente, se fabricaron nuevamente dos muretes, pero previo al fallado, se realizó una saturación en sales con el fin de determinar la capacidad impermeabilizante sin y con la barrera, y la influencia en las propiedades mecánicas.

2. METODOLOGÍA

En la Figura 1 se presenta el diagrama metodológico, enfocado en la definición del sistema, la evaluación de pruebas mecánicas y el análisis de ensayos de durabilidad.

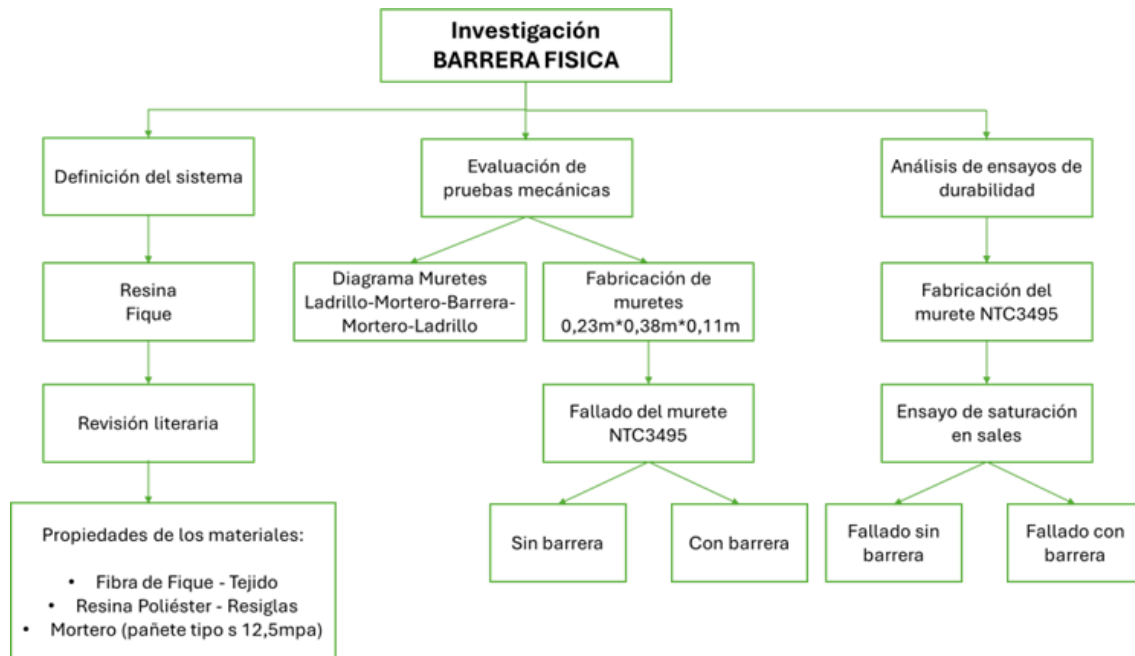


Figura 19. Diagrama metodológico.

2.1 Definición del sistema

Para la elaboración del mortero de pega se utilizó mezcla lista para pega-pañete tipo S de Argos con una cantidad de 7 kg de agua por cada bulto de 40 kg. Para la fabricación de la barrera se utilizó resina comercial marca RESIGLAS® de la empresa SUMIGLAS S.A. y fibra de fique comercial marca Duratela de compañía de Empaques. Tanto para la resina como para la fibra de fique se utilizaron las fichas técnicas suministradas por los proveedores.

2.2 Evaluación de pruebas mecánicas

La segunda etapa consistió en evaluar el comportamiento estructural mediante un modelo constructivo de mampostería, siguiendo una secuencia experimental de colocación: ladrillo – mortero – barrera – mortero – ladrillo (ver Figura 2). Para ello, se fabricaron dos muretes: uno sin la inclusión de la barrera (M.A 001) y el otro con la barrera incorporada (M.A 002). El murete sin barrera estuvo conformado por cinco unidades de ladrillo cada uno, con dimensiones de 38 cm de alto, 23 cm de largo y 11 cm de profundidad, provenientes de la ladrillera Terras de San Marino. La fabricación de los muretes se realizó conforme a lo establecido en la norma NTC 3495:2023, lo que permitió analizar el efecto de la inclusión de la barrera compuesta en la resistencia mecánica general del sistema constructivo.

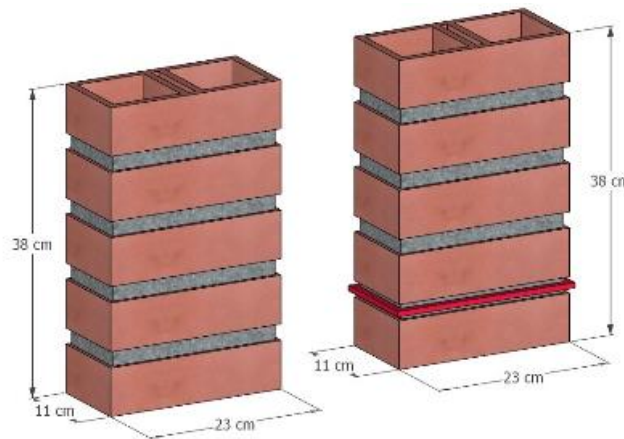


Figura 20. Dimensiones muretes para resistencia a compresión NTC 3495.

2.3 Análisis de ensayos de durabilidad

En la tercera etapa se realizó un ensayo de saturación por sales con el objetivo de recrear ambientes sumamente agresivos para la mampostería, relacionados al contacto con el suelo o la exposición directa a la intemperie. Para ello, se fabricaron nuevamente dos muretes, uno sin barrera (M.A 003) y otro con barrera (M.A 004). Luego, los muretes fueron sometidos a un proceso controlado de absorción capilar de soluciones salinas. A partir de este procedimiento, fue posible la observación de deterioros prematuros y eflorescencias sobre las juntas de mortero. El procedimiento se realizó según los lineamientos de la NTC 4017:2018, la cual establece los requisitos para evaluar la resistencia de la mampostería a la acción de agentes químicos por capilaridad (Tabla 1). Finalmente, se realizó de nuevo el fallado de los muretes de acuerdo a la NTC 3495:2023, con el fin de analizar la influencia de la saturación con sales en la resistencia a la compresión del sistema.

Tabla 10. Ensayo de durabilidad por absorción capilar (NTC 4017).

Parámetro	Descripción / Valores
Norma técnica	NTC 4017 (ICONTEC)
Nombre del ensayo	Absorción capilar en solución salina
Objetivo	Simular condiciones agresivas por humedad ascendente y evaluar deterioro químico
Tipos de sales permitidas	Cloruro de sodio (NaCl), Sulfato de sodio (Na ₂ SO ₄), Sulfato de magnesio (MgSO ₄)
Concentraciones típicas	NaCl: 3%–5% (30–50 g/L) Na ₂ SO ₄ : 5%–10% (50–100 g/L) MgSO ₄ : 5%–10% (50–100 g/L)
Preparación de solución	Disolver la sal elegida en agua destilada, medir concentración en masa
Tiempo de exposición	De 24 a 72 horas (según condiciones y propósito)
Evaluación de resultados	Presencia de eflorescencias, pérdida de masa, agrietamiento, alteración en la resistencia del mortero

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Definición del sistema

En la Tabla 2 se presenta la caracterización de mezcla lista para pega - pañete tipo S, un mortero de uso múltiple con resistencia a la compresión teórica de 12,5 MPa (asegurando la cantidad de agua sugerida por el proveedor), gran capacidad de trabajo y excelente adhesión. Al ser una mezcla lista, minimiza los residuos, respeta las normas NTC 3546:2021, NTC 4050:2023 y NTC 1032:2013, y contribuye a los créditos LEED® por su eficacia y sostenibilidad. En la Tabla 3 se presenta la caracterización de la fibra de fique, que ha sido tratada con NaOH en un porcentaje del 2%. Presenta una densidad de 0,6–1,1 g/cm³, una resistencia a la tracción de 200–600 MPa y una excelente compatibilidad con la resina de poliéster. Su textura áspera y su estabilidad térmica (hasta 345 °C) favorecen su aplicación como refuerzo en materiales compuestos. Además, en la Tabla 4 se resume la caracterización de la resina Resiglas, compuesta de poliéster tereftálico modificado, de reactividad media, apta para el moldeo manual y por aspersión. Proporciona un acabado excelente y sencillez en la aplicación. Se cataliza con un 1,0–2,5 % de MEKP, se cura a 18–35 °C y posee una vida útil de hasta 6 meses.

Tabla 11. Características y Propiedades - Mezcla Lista Pega-Pañete Tipo S.

Categoría	Especificación / Detalle
Tipo de producto	Mezcla seca para morteros multipropósito (pega y pañete)
Resistencia nominal	12,5 MPa (125 kg/cm ² o 1.800 PSI)
Ventajas / Beneficios	Fácil preparación (solo añadir agua), alta trabajabilidad y adherencia y bajo desperdicio
Retención de agua	≥ 75 % (según NTC 4050)
Contenido de aire	≤ 12 % (según NTC 1032)
Resistencia a compresión 28 días	≥ 12,5 MPa (según NTC 3546)
Sostenibilidad	Aporta a créditos LEED®

Tabla 12. Ficha técnica de caracterización de la fibra de fique (Duratela).

Atributo	Descripción
Nombre común	Fique
Nombre científico	Furcraea andina
Forma de uso	Fibras largas o hilos tejidos
Tratamiento previo	Alcalinización con NaOH (2%) para remover lignina y hemicelulosa
Densidad (g/cm ³)	1,3 – 1,5
Diámetro de la fibra (μm)	150 – 320
Resistencia a la tracción (MPa)	200 – 600
Módulo de Young (GPa)	8,0 – 24,0
Elongación máxima (%)	6,0 – 10,0
Microscopía SEM	Superficie rugosa con potencial de anclaje mecánico
FTIR	Remoción de hemicelulosa tras tratamiento alcalino
TGA	Estabilidad térmica hasta 345 °C
Compatibilidad con resina	Buena con resina poliéster mediante acoplamientos como silanos
Aplicaciones destacadas	Paneles livianos, refuerzo de concreto, barreras impermeables

Tabla 13. Ficha técnica de caracterización de la Resina Poliéster (Resiglas).

Categoría	Detalle relevante
Tipo de producto	Resina poliéster no saturada, tereftálica modificada, tixotrópica, de reactividad media
Usos principales	Piezas reforzadas con fibra de vidrio; partes automotrices
Procesos compatibles	Moldeo manual y por aspersión
Beneficios destacados	Buen acabado superficial, excelente humectación, fácil eliminación de aire, buena lijabilidad
Catalización recomendada	1,0%–2,5% de MEKP (Peróxido de Metil Etil Cetona)
Condiciones de curado	Temperatura ambiente (18–35 °C); tiempo de gel: 12–15 minutos con 1% MEKP
Recomendaciones de uso	Agitar antes de usar; lijar si han pasado más de 48 h para buena adhesión secundaria
Tiempo de vida útil	6 meses desde la fecha de fabricación
Categoría	Detalle relevante

3.2 Evaluación de pruebas mecánicas

En la Tabla 5 se presentan los resultados de resistencia a la compresión para los muretes M.A 001 y M.A 002. Se puede observar que la inclusión de la barrera no tuvo un impacto negativo significativo en el desempeño estructural de los muretes de mampostería. El murete de referencia sin barrera (M.A 001) alcanzó una resistencia de 11,5 MPa, mientras que el murete con la barrera incorporada (M.A 002) registró un valor de 11,3 MPa, lo que representó una diferencia mínima de apenas 0,2 MPa, demostrando que la barrera se integró eficazmente al sistema constructivo sin comprometer su capacidad portante. El resultado constituye la barrera como una solución factible para prevenir la humedad por capilaridad, sin generar una discontinuidad estructural crítica.

Tabla 14. Resistencia a la compresión de los muretes.

Muestra	Condición de la muestra	Resistencia (MPa)
M.A 001	Sin saturación de sales, sin barrera	11,5
M.A 002	Sin saturación de sales, con barrera	11,3

3.3 Análisis de ensayos de durabilidad

Finalmente, en la Tabla 6 se presentan los resultados de resistencia a la compresión para los muretes M.A 003 y M.A 004, sometidos al ensayo de saturación de sales. El murete sin barrera (M.A 003) experimentó una reducción en su resistencia, alcanzando un valor de 10,5 MPa. Este deterioro se atribuyó al efecto destructivo de las sales cristalizadas en los poros del material, mostrando una vulnerabilidad del sistema tradicional ante agentes degradantes. Por el contrario, el murete con la barrera incorporada (M.A 004) no solo resistió mejor el proceso de saturación,

sino que mantuvo una resistencia superior de 11,2 MPa, muy similar a la de los muretes no saturados. Este resultado demostró que la barrera cumplió su función de protección, mitigando la penetración de sales y humedad, y preservando así la integridad estructural del conjunto.

Tabla 15. Resistencia a la compresión de los muretes, posterior al ensayo de absorción capilar.

Muestra	Condición de la muestra	Resistencia (MPa)
M.A 003	Con saturación de sales, sin barrera	10,5
M.A 004	Con saturación de sales, con barrera	11,2

La comparación con los datos de la Tabla 5 mostraron que, mientras la resistencia del murete sin barrera cayó de 11,5 MPa a 10,5 MPa (una pérdida del 8,7% debido a la saturación), el murete con barrera presentó buena estabilidad, incluso ligeramente superior al valor inicial de 11,3 MPa en condiciones secas.

4. CONCLUSIONES

El estudio permitió concluir que el sistema de barrera desarrollado, compuesto por una matriz de mortero tipo S y un refuerzo de fibra de fique tratada e integrado con resina de poliéster, demostró un buen desempeño tanto en condiciones normales como bajo estrés acelerado por sales. Los ensayos de compresión en estado seco revelaron que la inclusión de la barrera no comprometió la capacidad estructural, con una diferencia mínima de 0,2 MPa entre el murete patrón y el murete con barrera, lo que indicó una integración efectiva y una transferencia de cargas adecuada. Sin embargo, la prueba más significativa fue el ensayo de saturación con sales, donde el murete con barrera mantuvo una resistencia de 11,2 MPa, mostrando incluso una ligera mejora respecto a su valor inicial, mientras que el murete sin protección sufrió una degradación del 8,7%, alcanzando solo 10,5 MPa. Este comportamiento evidenció la eficacia de la barrera para impedir la penetración de humedad y sales, evitando así las presiones de cristalización que causan microfisuras en la red porosa del mortero. Por lo tanto, se validó técnicamente que este sistema compuesto no solo preserva la integridad estructural frente a agentes externos agresivos, sino que lo hace sin afectar adversamente las propiedades mecánicas iniciales, representando una solución innovadora y confiable para la protección durable de mamposterías en ambientes susceptibles a humedad por capilaridad y contaminación salina.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, en particular a los grupos de investigación SITEC y Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad, por el apoyo académico y la guía metodológica proporcionados durante el progreso de este proyecto. Asimismo, se reconoce el apoyo logístico de los laboratorios de materiales de construcción, en los que se llevaron a cabo las pruebas mecánicas y de durabilidad. Por último, queremos expresar un agradecimiento especial a los maestros asesores y compañeros de semillero, quienes, a través de sus observaciones y recomendaciones, ayudaron a que esta investigación se fortaleciera.

6. REFERENCIAS

Han, J., Wang, J., Yang, W., Wang, X., Ma, R., Wang, W., Zhu, S., & Li, T. (2023). Experimental study on the properties of a polymer-modified superfine cementitious composite material for waterproofing and plugging. *Case Studies in Construction Materials*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02552>

- Rua, J., Buchely, M. F., Monteiro, S. N., Echeverri, G. I., & Colorado, H. A. (2021). Impact behavior of laminated composites built with fique fibers and epoxy resin: a mechanical analysis using impact and flexural behavior. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 428–438. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.068>
- Skills Institute Press. (2018). *Weatherproofing The DIY Guide to Keeping Your Home Warm in the Winter, Cool in the Summer, and Dry All Year Around* (Fox Chapel Publishing, Ed.; 1st ed.).
- T. Kubal, M. (2008). CONSTRUCTION WATERPROOFING HANDBOOK. In *McGraw-Hill* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Tsukagoshi, M., Miyauchi, H., & Tanaka, K. (2012). Protective performance of polyurethane waterproofing membrane against carbonation in cracked areas of mortar substrate. *Construction and Building Materials*, 36, 895–905. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.072>
- Walker, W., & Felice, D. (2007). *Water-Resistant Design and Construction: An Illustrated Guide to Preventing Water Intrusion, Condensation, and Mold* (McGraw Hill, Ed.; 1st ed.).
- Universidad Nacional de Colombia. (2023). *Refuerzo externo con fibras de fique en estructuras de concreto*. Facultad de Ingeniería, sede Bogotá.
- Garzón, R., & Rodríguez, M. (2019). *Desarrollo de materiales compuestos híbridos con fibras naturales para aplicaciones estructurales*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

ESTRATEGIA DE MITIGACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO A TRAVÉS DE JARDINES VERTICALES: ESTUDIO DE CASO AIANA AZUL, FLORIDA PARQUE COMERCIAL Y CENTRO COMERCIAL VIVA LAURELES EN MEDELLÍN, COLOMBIA

Natalia Clavijo Bolívar¹, María Alejandra Rico Pérez¹, Joan Amir Arroyave¹

¹ Grupo de Investigación Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, nclavijo@est.colmayor.edu.co, maria.rico@colmayor.edu.co, joan.arroyave@colmayor.edu.co

Palabras clave: Calidad del aire, contaminación, jardines verticales, estaciones de monitoreo.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire en la ciudad de Medellín, se debe al alto número de fuentes emisoras donde los vehículos obsoletos e industrias son los principales contaminantes, la principal característica de la ciudad es su configuración donde al estar rodeada de montañas su condición climática inversión térmica (fenómeno meteorológico donde la temperatura del aire aumenta con la altitud, en lugar de disminuir), esta condición favorece que el material particulado PM_{2.5} (partículas finas con un diámetro de hasta 2,5 micrómetros) y PM₁₀ (partículas inhalables con un diámetro de hasta 10 micrómetros), suelen intensificarse quedando suspendidas por largos periodos. Teniendo presente que la ciudad cuenta con factores como la falta de vientos en épocas secas, el cambio climático y los gases de efecto invernadero, provocan que en la ciudad haya crisis recurrentes de calidad del aire, con graves impactos en la salud pública, como enfermedades respiratorias. Actualmente el Acuerdo Metropolitano 04 de 2018 adopta el Protocolo para enfrentar los periodos de contingencia atmosférica-POECA (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2021) que se presentan en el valle de Aburrá durante los meses de febrero - abril y octubre - noviembre de cada año donde la calidad del aire suele empeorar haciendo necesario implementar acciones de choque para disminuir las emisiones contaminantes que se suspenden en el Valle de Aburrá y afectan la visibilidad y más importante aún la salud de los habitantes y fauna. Frente a esta problemática donde las políticas ambientales son insuficientes es de vital importancia la implementación de estrategias basadas en la naturaleza como lo son los jardines verticales en fachada, donde estos sistemas emergen como métodos transformadores a partir de infraestructuras verdes que actúan como filtros naturales capturando gran parte del material particulado a su vez transformando el paisaje urbano.

Diversos autores han abordado el tema desde diferentes puntos de vista, Anina James et al (2024) realizaron una investigación acerca de los avances en la mejora de la contaminación del aire mediante plantas y microbios asociados a una perspectiva sobre las tecnologías basadas en plantas, determinaron estrategias sustentadas en las plantas y microbios que ofrecen soluciones sostenibles para la contaminación atmosférica, especialmente en entornos urbanos, en simultaneo Monika Trojanowska (2023) en su investigación acerca la recuperación de suelos contaminados en proyectos de renovación urbana donde se hizo la revisión bibliográfica de plantas aptas para la captación de material particulado, este estudio evidencio que por el crecimiento demográfico el suelo urbano se reduce, haciendo que la renovación urbana sea clave para desarrollar ecobarrios, por otro lado Ashutosh Kumar Pandey et al (2015) en su investigación se acercaron al índice de tolerancia de la contaminación atmosférica en especies de plantas trepadoras con el fin de desarrollar sistemas de vegetación vertical en una ciudad

tropical contaminada, el estudio evaluó el índice de tolerancia a la contaminación del aire (APTI) en 28 especies de plantas trepadoras. En otro contexto Julián Bedoya et al El (2009) estudio sobre la calidad del aire en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2001-2007) donde reveló una crisis de contaminación atmosférica, donde el material particulado (PST y PM₁₀) surgió como el contaminante más crítico, con concentraciones que excedían entre un 200% y 400% los límites de la OMS, mientras que Katia Perini et al (2025) destacó en su investigación acerca de los musgos vivos, como solución efectiva, económica y de poco mantenimiento para mitigar la contaminación del aire en entornos urbanos, finalmente Katia Perini et al (2011) en su investigación compararon el ciclo de vida de las fachadas verdes y muros vivos, donde se concluyó que el reverdecimiento directo (enredaderas adheridas directamente) y el sistema indirecto con malla son sistemas sostenibles y benéficos.

Desde el año 2017, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA, 2017) ha monitoreado el material particulado PM_{2.5} y PM₁₀, los datos más relevantes se han generado en los meses febrero - abril y octubre - noviembre, donde en la ciudad se presentan picos de contaminación en la calidad de aire, en la resolución del (MinAmbiente, 2021) cuyo principal objetivo es garantizar un ambiente sano, donde se pueda minimizar el riesgo sobre la salud humana que pueda ser causado por la exposición a los contaminantes en la atmósfera, mediante esta se espera regular los niveles máximos permisibles en la concentración de partículas contaminantes. Esta investigación estudiará los históricos (agosto, septiembre, octubre y noviembre del año 2025) de las estaciones de monitoreo de calidad de aire cercanas a los jardines verticales de los 3 estudios de caso a evaluar, este análisis nos dará un indicio acerca de la calidad del aire en estas zonas donde se realizó la implantación de especies vegetales en las fachadas. Mediante esta investigación se busca demostrar la importancia de adoptar y promover diseños con jardines verticales y muros verdes en las fachadas, donde las plantas y microorganismos que a través de sus raíces pueden descontaminar suelos, aguas o aire afectados por sustancias tóxicas como metales pesados, hidrocarburos, pesticidas y otros contaminantes mejorando la calidad del aire.

2. METODOLOGÍA

La metodología de esta investigación fue un estudio de caso de 3 proyectos, el cual tuvo variables cualitativas y cuantitativas en donde se tuvo un enfoque mixto y simultáneamente se realizó un estudio descriptivo y explicativo. En la Figura 1 se presenta el diagrama metodológico, enfocado en las etapas de elección de los lugares de estudio, identificación de edificios con jardines verticales, la evaluación del método constructivo del jardín vertical en las fachadas y el análisis del material particulado PM_{2.5} y PM₁₀.

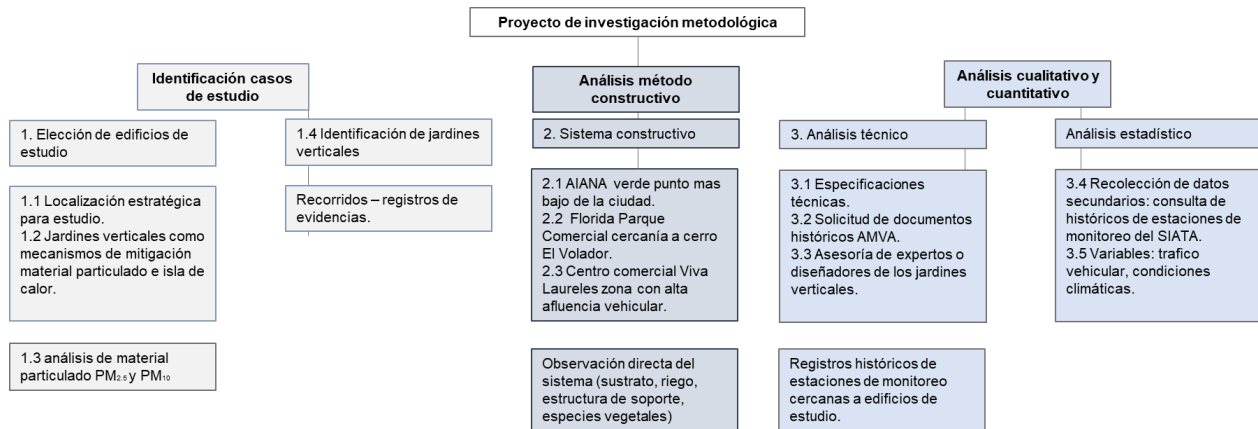


Figura 21. Diagrama metodológico.

2.1 Análisis sistema constructivo

Como lugares de estudio se identificaron: el edificio AIANA AZUL, Florida Parque Comercial y el Centro comercial Viva Laureles debido a que la implantación de los jardines verticales en su fachada se integra con el diseño constructivo, las especies vegetales, el mantenimiento, la conservación y el estado desde su implementación. Simultáneamente se plantea una observación directa de la conformación de los jardines verticales y de cómo se implementa el sistema: cual fue el sustrato elegido, como es su sistema de riego y como reduce el desperdicio de agua o si es un sistema de riego a través de la recirculación o recolección de aguas lluvia, como se desarrolló la estructura de soporte y si presenta filtraciones y humedad en el interior del edificio, que especies se sembraron, cual es el principal motivo para la elección y como estas especies vegetales contribuyen a la captación de material particulado.

2.2 Elección y análisis de la fachada de los edificios de estudio categoría fácil de analizar PM_{2.5} y PM₁₀.

La elección de estudio para estos edificios fue debido al diseño y la implementación de los jardines verticales que se encuentran instalados en sus fachadas, se eligen estos 3 edificios (ver Figura 2) debido a sus emplazamientos AIANA AZUL centro de Medellín y punto más bajo del Valle de Aburra, Florida Parque Comercial cercanía al cerro El Volador, Centro comercial Viva Laureles zona con alta afluencia vehicular, estos 3 proyectos cuentan con una diversidad urbana donde se tiene presencia de vehículos que emite una alta concentración de material particulado en su entorno inmediato, gran cantidad de peatones recurrentes en la zona, además se espera que la presencia de estos jardines verticales reducen el efecto de isla de calor persistentes debido a la densificación que hay en la ciudad.



Figura 22. Ubicación casos de estudio.

2.3 Análisis cualitativo y cuantificativo

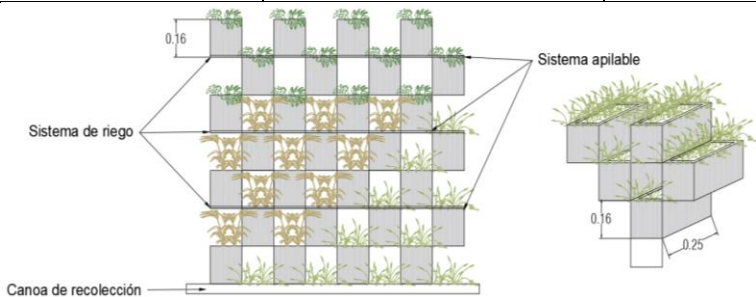
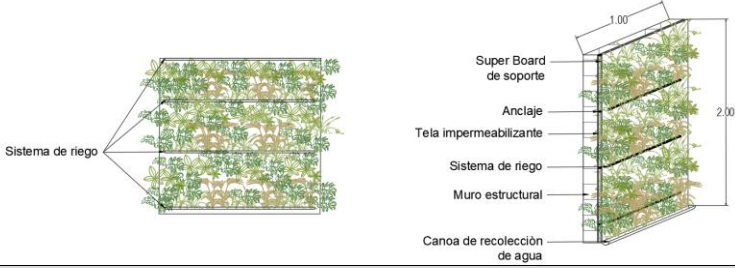
Se llevó a cabo un análisis de los sistemas constructivos entendiendo sus especificaciones técnicas, su funcionamiento, sus costos y mantenimiento, los aspectos e impactos ambientales, además se estudió los aspectos críticos al momento de ejecutar un sistema de jardín vertical, con el fin de dar algunas recomendaciones para implementaciones futuras en la ciudad. La recolección de datos secundarios se realizó en la entidad del SIATA, con la necesidad de saber cuál es la incidencia del material particulado en la zona.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis sistema constructivo

Se analizaron los 3 sistemas constructivos de cada jardín vertical, además de la modulación, el sistema estructural, el sistema de riego y las dimensiones de los módulos. Una vez estudiado cada jardín podemos observar que cada uno cuenta con varias particularidades donde el sistema de apilamiento de módulos del proyecto de AIANA AZUL presenta una mayor cantidad de vegetación por m². (24 módulos de 16 cm x 25 cm), en donde el sistema de riego es independiente y su mantenimiento se hace mas sencillo debido a su sistema de fácil manejo y cambio de modulo, por otro lado el jardín del VIVA Laureles representa mayor mantenimiento debido a su exposición solar continua, en donde su estructura es más robusta y su sistema de riego se da mediante riego en línea superior, en este jardín se presenta otra modulación paneles de 0.60 m x 1.0 m ya que cada panel cuenta 40 plantas aproximadamente, finalmente el jardín de Florida parque comercial se hace de acuerdo a la medida de la lamina estructural hecha en super board, en donde cada modulación varia de acuerdo al diseño y la especie vegetal que se quiere implantar. Por otro lado, se debe tener presente que son diferentes tipos de jardines verticales donde según su sistema, ubicación y especies vegetales se les debe realizar el sistema de riego en los cuales no se usa aguas lluvia debido al pH, y a los nutrientes que se deben aplicar a cada jardín.

Tabla 16. Sistemas constructivos casos de estudio. a) AIANA AZUL, b) FLORIDA PARQUE COMERCIAL y c) VIVA LAURELES.

a) AIANA AZUL 81 m ²			
Sistema constructivo	Tipo de modulo	Sistema de riego	Tamaño de los módulos
Sistema Europeo (módulos apilables)	Modulo en contenedor (macetas plásticas)	Línea superior, riego cada 2 líneas de módulos (32 cm)	Contenedor: -Alto 16 cm -Ancho 10 cm -Profundo 25 cm
			
b) FLORIDA PARQUE COMERCIAL 200 m ²			
Sistema constructivo	Tipo de modulo	Sistema de riego	Tamaño de los módulos
Jardín vertical Bolsillos de fieltro (estructura Pernada a la pared)	Laminado en recubrimiento de pared, capas de tela como aislante, cada 2 metros según lamina	Sistema de riego cada 2 metros Cada 40 min encendido 8 min	-Alto: 2.00 m -Ancho 1.00 m -Espesor sistema vegetal 7 cm -Espesor con planta 15 cm -Espesor anclaje 7 cm
			
c) VIVA LAURELES 140 m ²			
Sistema constructivo	Tipo de modulo	Sistema de riego	Tamaño de los módulos
Jardín vertical de fieltro	Bolsillos de fieltro	Riego hidropónico	-Alto: 1.00 m -Ancho 57 cm -Espesor sistema vegetal 10 cm -Espesor con planta 25 cm -Espesor anclaje 11 cm
			

3.2 Elección y análisis de la fachada de los edificios de estudio categoría fácil de analizar $PM_{2.5}$ y PM_{10}

La elección de los estudios de caso se tiene en cuenta debido a la localización de cada proyecto, en donde la caracteriza principal y común de los 3 es la localización en corredor vial estratégico, en donde el flujo vehicular representa una mayor concentración de emisión de gases, en la Figura 3 se observa que el sistema es completamente autosoportante donde a través de módulos de macetas plásticas se realiza un proceso limpio, rápido y eficiente.



Figura 23. Sistema constructivo jardines verticales AINA AZUL. Fuente: Efecto Verde diseñadores.

Por otro lado, en la Figura 4 el sistema constructivo es de un formato mas grande, en donde la modulación se hace de acuerdo a la lamina estructural que soporta el jardín vertical, en este caso el jardín vertical cuenta con unas especies vegetales de una mayor proporción lo que favorece su perdurabilidad en el tiempo.



Figura 24. Sistema constructivo jardines verticales Florida Parque Comercial. Fuente propia.

Finalmente, el jardín del VIVA representa mayores cuidados debido a su sistema portante en donde los bolsillos de fieltro están completamente expuestos, además que el muro estructural donde esta perñada la estructura podría presentar humedades por filtración de agua ya que no

cuenta con sistema aislante y se puede observar en las imágenes que hay presencia de musgo entre el muro estructural y jardín vertical este aspecto de poco mantenimiento podría afectar la estructura y el interior (ver Figura 5).

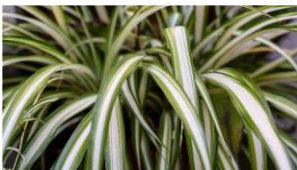


Figura 25. Sistema constructivo jardines verticales Viva Laureles. Fuente propia

3.3 Análisis cualitativo y cuantificativo

Una vez analizadas las especies vegetales y las áreas totales de los jardines verticales se determinó que las especies vegetales que tienen una mayor propiedad absorbente de material particulado son las siguientes: la hiedra Canaria que cuenta con hojas grandes y cerosas que facilitan el atrapamiento de partículas, son plantas trepadoras que se desarrollan sobre estructuras funcionando como barreras naturales, densidad en su follaje y capacidad perenne. Por otro lado, la especie Ficus Pumila tiene hojas pequeñas y densas las cuales crean un tapete foliar denso y rugoso, son plantas trepadoras que forman cortinas a modo de filtro físico finalmente su superficie es aterciopelada lo cual resulta beneficioso para atrapar partículas suspendidas en el aire, y el helecho Polypodium vulgare por su lado mediante su estructura frondosa crea un laberinto que atrapa y ralentiza el flujo del aire que circula en el ambiente, su superficie ayuda a retener material de manera constante (ver Tabla 2).

Tabla 17. Especies vegetales jardines verticales.

AIANA AZUL 81 m ²			
Especies			
Hiedra Canaria (Hedera canariensis)	Tibouchina lepidota (7 cueros)	Chlorophytum (Cinta o Mala madre)	Philodendro Narrow
			
FLORIDA PARQUE COMERCIAL 200 m ²			
Especies			
Calopogonium mucunoides (calopo)	Polypodium vulgare (helecho)	Chlorophytum (Cinta o Mala madre)	Asparagus densiflorus (helecho)
			
VIVA LAURELES 140 m ²			
Especies			
Tradescantia zebrina	Ficus pumila	Chlorophytum (Cinta o Mala madre)	Asparagus densiflorus (helecho)
			

A continuación, en las Figuras 6, 7 y 8 se muestran los promedios máximos y mínimos de las concentraciones de material particulado captado en las estaciones de monitoreo cercanas a cada caso de estudio. Finalmente, en la Figura 9 se puede observar los totales promediados de las 6 estaciones estudiadas, en donde la mayor concentración de material particulado se encuentra en la estación # 46 San Antonio que mide partículas $PM_{10} \mu/m^3$, esto se debe a su posición ya que se encuentra en un corredor vial de conectividad en donde las especies vegetales son pocas y la densidad urbana es superior a los otros estudios de caso. Estos promedios se hacen con la información obtenida a través del SIATA en los meses de septiembre, octubre y noviembre del año 2025.

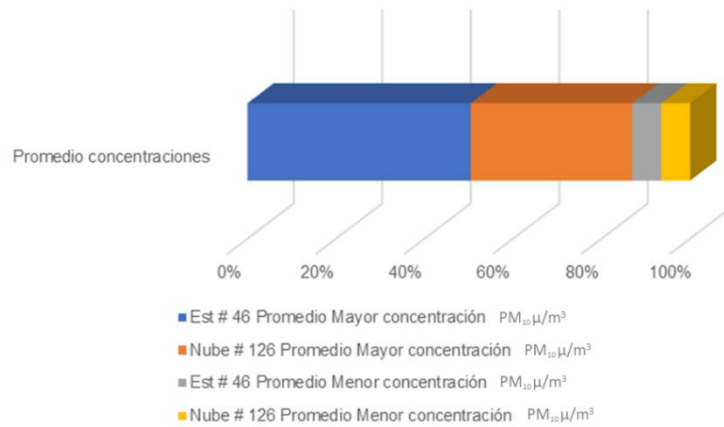


Figura 26. Promedio estaciones de monitoreo de material particulado estación # 46 $PM_{10} \mu/m^3$ AIANA AZUL. meses septiembre, octubre y noviembre.

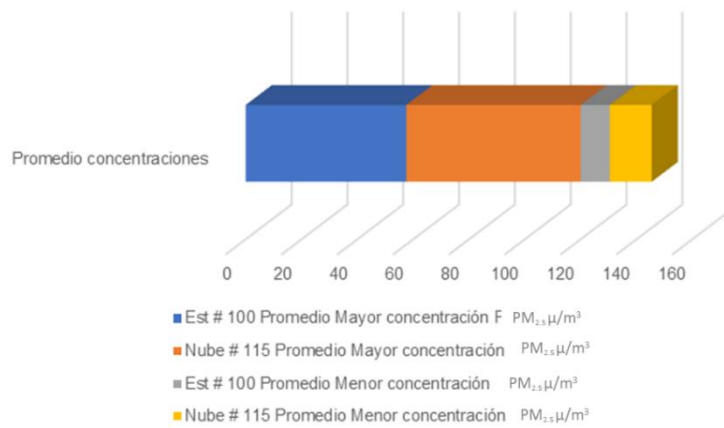


Figura 27. Promedio estaciones de monitoreo de material particulado estación # 100 fiscalía y nube 115 $PM_{2.5} \mu/m^3$ Florida Parque Comercial. Meses septiembre, octubre y noviembre

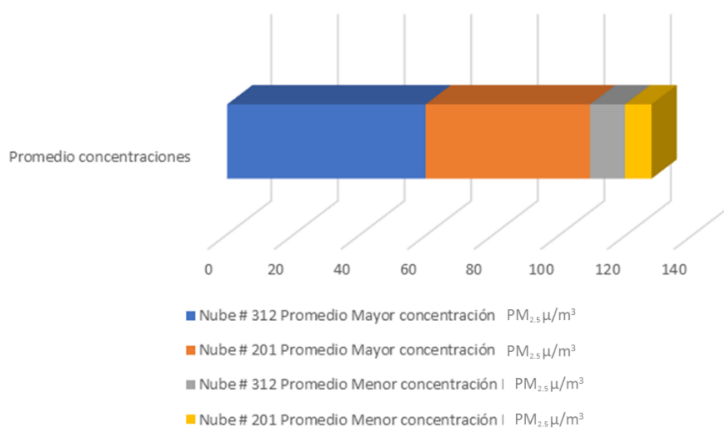


Figura 28. Promedio estaciones de monitoreo de material particulado nube 210 y nube 312 VIVA Laureles $PM_{2.5} \mu/m^3$ Meses septiembre, octubre y noviembre.

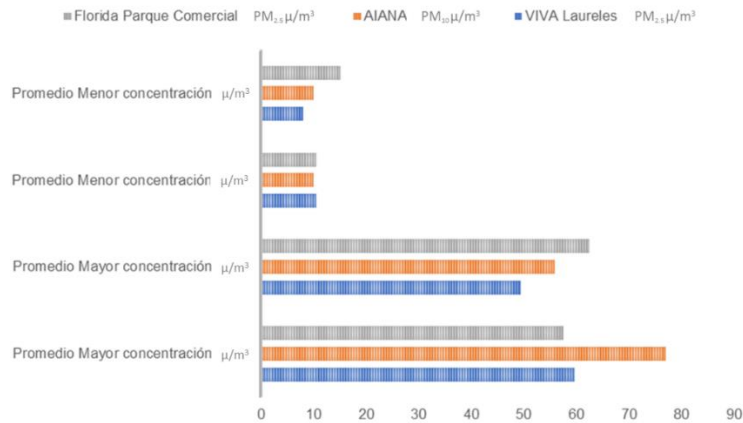


Figura 29. Promedios de mediciones en estaciones de monitoreo material particulado $\text{PM}_{2.5} \mu\text{m}^3$ y $\text{PM}_{10} \mu\text{m}^3$ meses septiembre, octubre y noviembre

4. CONCLUSIONES

El punto más contaminado entre los casos de estudios analizados fue la estación #46 San Antonio en cercanía con el proyecto AIANA AZUL 82 $\text{PM}_{10} \mu\text{m}^3$ niveles que exceden lo permisible según la Resolución 2254 2017 calidad del aire los niveles máximos permisibles en la cual se dictamina que los niveles deben ser máximo de 75 $\text{PM}_{10} \mu\text{m}^3$ en un periodo de 24h, esta estación debido a su ubicación y a la alta demanda de vehículos automotores contó con una mayor concentración de material particulado.

Las políticas ambientales que hay en la ciudad resultan ser insuficientes, ya que es de vital importancia la implementación de estrategias pasivas como lo son los jardines verticales en fachada, donde estos sistemas emergen como métodos transformadores a partir de infraestructuras verdes y soluciones basadas en la naturaleza, la modulación y la elección de las especies vegetales capaces de retener material particulado en sus hojas y sus vellosidades foliculares mitigando la presencia de partículas nocivas.

Finalmente, esta investigación si bien dio cuenta de especies vegetales capaces de retener material particulado, la condición atmosférica de la ciudad no solo requiere la implementación de jardines verticales y soluciones basadas en la naturaleza, se necesitan estrategias desde las políticas ambientales donde la circulación de vehículos que emiten gran cantidad de gases y la presencia de industrias sea regulada buscando mitigar los efectos nocivos en la salud pública.

Como recomendación futura se debe determinar cuál es el diseño de cada jardín vertical ya que su posición e incidencia a la luz solar y a factores climáticos representan grandes retos en su mantenimiento, si bien los jardines son estrategias que ayudan a mitigar los efectos de isla de calor y contaminación atmosférica se deben implementar estratégicamente evitando que se deterioren por falta de cuidado y mantenimiento.

5. AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi familia que siempre ha sido mi motor e inspiración para estudiar y ser mejor cada día, quiero agradecer a mis maestros que me acompañaron en este maravilloso camino de la especialización, a mis compañeros que hicieron que cada clase fuera especial y de enseñanza, gracias a Dios por permitirme crecer intelectualmente, y finalmente y no menos

importante a mis dos pequeños sin ellos y su compañía no habría sido tan mágico este año.

6. REFERENCIAS

- AMVA, Á. M. del V. de A. (2017). *RESOLUCIÓN METROPOLITANA N°*. https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Documents/Normatividad/Resoluci%C3%B3n%20Metropolitana%20002_2019%20-%20Modificaci%C3%B3n%2012_2017.pdf
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá, A. (2021). *Calidad del aire en el Valle de Aburrá*. https://siata.gov.co/siata_nuevo/.
- Bedoya, J., & Martínez, E. (2009). ANTIOQUIA-COLOMBIA AIR QUALITY IN THE ABURRÁ VALLEY ANTIOQUIA-COLOMBIA. *Año*, 76, 7–15.
- James, A., Rene, E. R., Bilyaminu, A. M., & Chellam, P. V. (2024). Advances in amelioration of air pollution using plants and associated microbes: An outlook on phytoremediation and other plant-based technologies. *Chemosphere*, 358. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142182>
- MinAmbiente. (2021). *Resolucion 40103 2021*. <https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/resolucion-40103-de-2021/>
- Ottelé, M., Perini, K., Fraaij, A. L. A., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2011). Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems. *Energy and Buildings*, 43(12), 3419–3429. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.010>
- Pandey, A. K., Pandey, M., & Tripathi, B. D. (2015). Air Pollution Tolerance Index of climber plant species to develop Vertical Greenery Systems in a polluted tropical city. *Landscape and Urban Planning*, 144, 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.08.014>
- Perini, K., Castellari, P., Calbi, M., Prandi, S., & Roccotello, E. (2025). Fine dust collection capacity of a moss greening system for the building envelope: An experimental approach. *Building and Environment*, 267. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112203>
- Trojanowska, M. (2023). Reclamation of polluted land in urban renewal projects. Literature review of suitable plants for phytoremediation. *Environmental Challenges*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100749>

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO - MECÁNICAS Y TÉRMICAS DE UN BTC (BLOQUE DE TIERRA COMPACTADA) REFORZADO CON FIBRA DE FIQUE

Paula Julieth Sánchez Moreno¹, Joan Amir Arroyave¹, Laura Rendón Gaviria¹

¹ Grupo de Investigación Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, pjsanchez@est.colmayor.edu.co, joan.arroyave@colmayor.edu.co, laura.rendon@colmayor.edu.co;

Palabras clave: BTC, fibra de fique, materiales naturales, resistencia a la compresión, propiedades térmicas.

1. INTRODUCCIÓN

La construcción sostenible busca minimizar el impacto negativo que se genera en el medio ambiente usando materiales eco-amigables y técnicas de bajo consumo energético (Dighe & Singh, 2025). Con este enfoque, la construcción en tierra surge como una solución viable en donde emplean recursos locales para diseñar edificaciones con un alto confort térmico. Una técnica conocida son los bloques de tierra comprimida (BTC), que es un mampuesto fabricado por medio de la compactación mecánica de tierra, en el cual mejora su durabilidad y resistencia al estabilizarse con agua y aditivos como cemento o cal en bajas proporciones (HOUBEN, 1992). Sin embargo, se puede optimizar sus propiedades mecánicas por medio de refuerzos naturales, es aquí que la fibra de fique que es un recurso natural y abundante en la zona andina de Colombia adquiere un rol protagónico, gracias a su estabilidad térmica y buenas propiedades mecánicas. Esta fibra puede ejercer como refuerzo para incrementar la resistencia a la compresión de los bloques y controlar la fisuración por contracción durante su proceso de secado (Ramírez et al., 2024). Por lo tanto, esta investigación se enfoca en la asociación de estos conceptos para explorar como la incorporación de fibra de fique en los BTC podría potencializar las construcciones en tierra, para así alinearse con los objetivos de la construcción sostenible al plantear un material más resiliente y ecológico (Walter et al., 2024).

Investigaciones a nivel mundial han analizado diversas propiedades en los BTC, mediante la adición de diversas fibras naturales, resaltan sus beneficios mecánicos y térmicos. En el aspecto mecánico, la investigación de (Paul et al., 2023) demostró que la fibra de paja de Vetiver (2-3% en peso) reduce la densidad un 22% y mejora la ductilidad un 246%, pero una limitada resistencia a la compresión (29%). En contraste (Mostafa & Uddin, 2016) indicó viabilidad al usar fibra de banano, logrando un incremento del 71% en resistencia a la compresión y evitando micro fisuras, esto lo hace óptimo para construcciones rurales de bajo costo. En el rendimiento térmico, (Laibi et al., 2018) confirmó que al añadir fibra de Kenaf (30 mm de longitud) reducen la conductividad térmica hasta un 20% (0,68 W/m·K). En cambio (Al-Jabri et al., 2022) se enfocó en la implementación de aguas residuales petroleras para la elaboración de los BTC, se descubrió un mayor retraso térmico (7 horas) y menor transmitancia térmica frente al bloque de hormigón, mientras que (Giuffrida et al., 2024) combinó los BTC con aislamiento de biomasa (cáñamo-cal y bagazo de caña) en el cual se observó que se reduce el factor de decremento a 0,05 y aumenta el retardo térmico hasta 6,9 horas. Sin embargo, las investigaciones se enfocan en una sola propiedad y no analiza en conjunto. Esta investigación se propone cerrar esa brecha, mediante la evaluación de un BTC reforzado con fibra de fique para determinar su capacidad a la

compresión y transmitancia térmica para desarrollar un material más accesible.

La investigación tiene como propósito enaltecer los BTC para que formen parte fundamental de la construcción sostenible en Colombia. Sin embargo, su implementación se encuentra obstaculizada por las limitaciones físico-mecánicas y térmicas, ya que no se encuentran investigaciones locales que respalden y certifiquen el uso de este elemento. Diversos estudios internacionales revelan un gran vacío, el cual es enfocarse en una sola característica de manera independiente y no se evalúa en conjunto para así demostrar su viabilidad para el área de la construcción. Al incorporar fibra de fique que es un recurso natural abundante del país y según (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2024) solo en el 2024 se produjo alrededor de 17.370 toneladas de fique esto demuestra que se puede convertir esta fibra en una gran oportunidad de alto valor, en donde se genera una sinergia entre los sectores de la agricultura y de la construcción. Se evaluará de manera integral como la fibra de fique puede influir en la resistencia a la compresión y en la transmitancia térmica para poder superar la barrera técnica sobre los BTC y así crear un material más accesible, que se adapte a las condiciones climáticas locales y con menor huella de carbono, para impulsar la autosuficiencia en el contexto rural en donde se contribuye de manera más tangible un avance en viviendas sostenible a lo largo del país.

2. METODOLOGÍA

La investigación tiene como hoja de ruta tres fases claves en la Figura 1 se muestra el diagrama metodológico que se enfocara en la caracterización de los materiales a usar (Tierra y fibra de fique), luego se determinara las propiedades físico-mecánicas y térmicas del BTC reforzado y por último se analizara un comparativo de los desempeños obtenidos entre un BTC tradicional y reforzado.

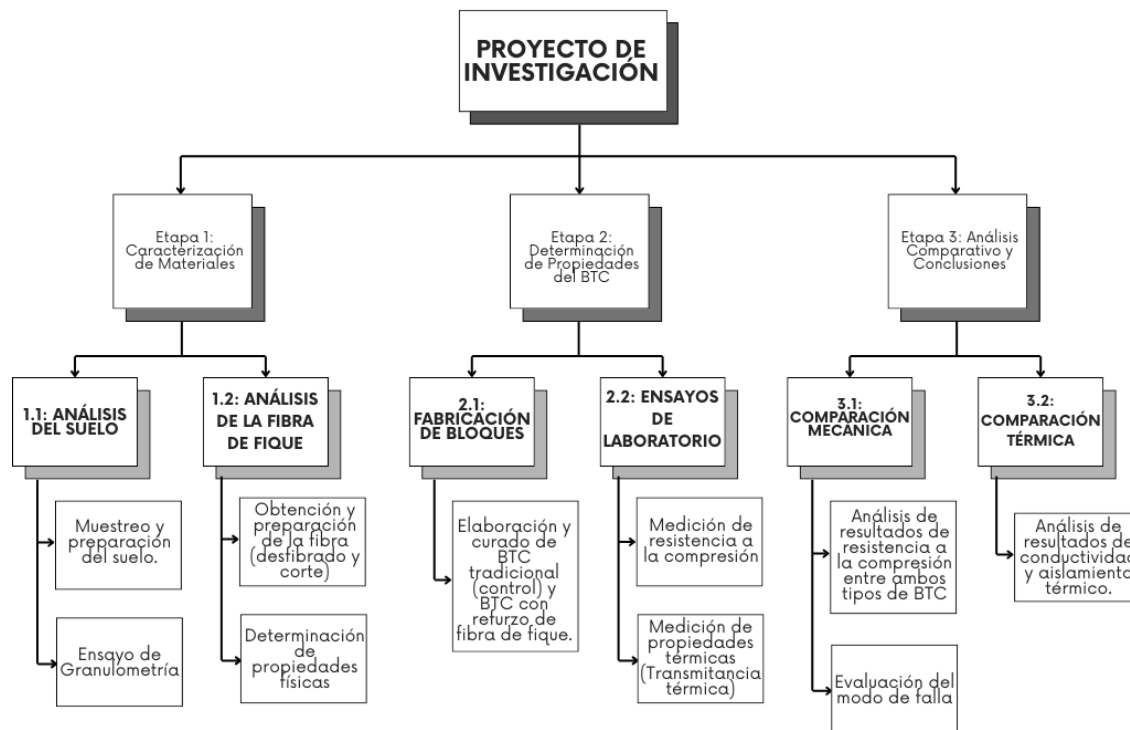


Figura 30. Diagrama metodológico. (Elaboración propia 2025).

2.1 Caracterización del material

Esta etapa se centra en el análisis de la tierra y la fibra de fique, para así asegurar una calidad en los materiales. Se inicia con el muestreo y la preparación de la tierra para hacer el ensayo granulométrico NTC 1522 (NTC 1522, 1999) que determina la distribución de las partículas. Posteriormente se calcula los límites de Atterberg (ASTM International, 1983) Norma ASTM D4318 para así determinar el índice de plasticidad que es un factor importante para la cohesión en los bloques. Con la fibra de fique, primero se obtiene la materia prima, luego se realiza el desfibrado y por último el corte a la longitud de 1 pulgada de longitud para luego determinar su densidad. La caracterización se realiza para garantizar que los materiales base sean aptos para la fabricación de los bloques y así poder evaluarlos en la siguiente fase teniendo en cuenta (NTC 5324, 2004).

2.2 Determinación de propiedades del BTC

Se elaboran los distintos Bloques (BTC) con sus variaciones de dosificaciones, incluyendo un grupo de control (tradicional) y dos series experimentales reforzadas con fibra de fique de 0.1% y 0.3% en volumen. El proceso de manufactura consistió en homogenizar los materiales (tierra, cemento, agua y fibra) para posteriormente compactarlo en una prensa CINVA-RAM para conformar bloques con dimensiones de 30x15x9 cm. Los bloques tuvieron a un periodo de curado de 28 días para garantizar el desarrollo de sus propiedades antes de realizar los ensayos pertinentes. Para el ensayo del desempeño térmico, se empleará una adaptación del método de la caja caliente (Hot Box), referenciado en la norma ASTM C1363-19 y en la investigación de (Carlos Alberto Mejía Barrera et al., 2020). Se construirán tres cámaras de ensayo con poliestireno expandido de 77x66x32.5 cm, en las cuales se les instalarán muros fabricados con los BTC de cada dosificación. Cada caja estará a la intemperie, monitorizada con termohigrómetros en cada cara del muro para así obtener datos durante 11 días. Los datos de temperatura y humedad relativa se tomarán cada 15 minutos en un rango de horas (10am a 5pm), para así poder calcular el tiempo que tarda en transmitir la temperatura externa a la cara interna del muro. La resistencia mecánica se determinará mediante un ensayo de compresión simple teniendo en cuenta la normativa (NTC 5324, 2004) que “establece las especificaciones que deben cumplir los bloques en cuanto a su resistencia a la compresión”. Previo al ensayo, se registra las dimensiones de cada bloque para el cálculo del área. Posteriormente, cada bloque se coloca en una prensa universal y es sometido a una carga axial a velocidad controlada. Se registrará la carga máxima en el instante de la falla súbita, para así obtener y poder calcular el esfuerzo de compresión último del bloque.

2.3 Análisis comparativo

La última etapa consiste en analizar los datos obtenidos en los ensayos para poder generar conclusiones significativas. En la comparación mecánica se analizan los datos de la resistencia a la compresión entre los bloques de control y los reforzados con la fibra de fique para entender cómo influye la fibra en material y se contrastará con los requisitos mínimos según la normativa (NTC 5324, 2004) en el ítem “3.4 características mecánicas de los bloques” se expone en las tablas 3 de la normativa el valor de resistencia en el que se debe estar 2 a 6 MPa para garantizar que el bloque sea adecuado para la construcción. En la comparación térmica se analiza los datos de la transmitancia para así conseguir los datos de la mejora en el comportamiento térmico gracias a la inclusión de la fibra de fique, para poder dar un valor de cuál es el periodo de tiempo que tarda en traspasar el calor de la cara externa a la interna.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización del material

La etapa inicial se centró en la caracterización de la tierra y la fibra de fique para poder validar su pericia (ver Figura 2). El suelo usado fue un “Limo Arenoso”. Se analizó mediante granulometría (NTC 1522, 1979) y límites de Atterberg (ASTM D4318-17e1). Se determinó que su composición granulométrica es de un suelo que contenía un 39,4% de arena y un 60,6% de finos. Estos resultados impactaron directamente en el diseño de la mezcla, ya que el plan inicial contemplaba una mezcla de tierra 60%, arena 30% y cemento 10%. Sin embargo, dado al alto contenido de arena en el suelo a usar, se determinó que no era necesario añadir arena extra. Por lo que se ajustó la dosificación final a una mezcla de 90% de tierra y 10% de cemento. Adicionalmente el bajo índice de plasticidad (IP) de 2,1 confirmó que el suelo es apto y minimiza riesgos de retracción. En cuanto a la fibra que se empleara como refuerzo de los bloques, se preparó la fibra de fique mediante el desfibrado y corte a una longitud de 1 pulgada (2,54 cm). Con base en la revisión de antecedentes, se estableció la dosificación de la fibra para la fase de elaboración de los bloques en una proporción de 0,1% y 0,3% en volumen, además del grupo de BTC de control.



Figura 31. Recolección y tamizado de tierra / Recolección y corte de fique.

3.2 Determinación de propiedades del BTC

En la segunda etapa se realizó la manufacturación de los bloques de BTC (Control y dosificaciones con fique) con unas medidas de 30x15x9 cm, se realizaron las diferentes mezclas con sus respectivas dosificaciones para posteriormente emplear una prensa hidráulica CINVARAM donde se moldearon los tres grupos de BTC a usar. Después de 28 días de curado, se ejecutaron los ensayos pertinentes (ver Figuras 3, 4 y 5).



Figura 32. Mezcla y forma del bloque de control (Tradicional).



Figura 33. Mezcla y forma del bloque con adición de 0,1% de fique.



Figura 34. Mezcla y forma del bloque con adición de 0,3% de fique.

Para el ensayo térmico se elaboran las cajas con sus respectivos muros y par de termohigrómetros para realizar el estudio correspondiente, el cual dio como resultado que la temperatura interna es menor a la temperatura externa, con una diferencia de 5°C (ver Figuras 6 y 7).



Figura 35. Armado de las Hot Box y traslado de BTC.



Figura 36. Armado del muro de BTC de control, 0,1% y 0,3% con sus termohigrómetros correspondientes.

En la recolección de los datos se puede observar que durante el periodo de prueba (26 de octubre hasta el 5 de noviembre) se demostró que los BTC tienen una eficacia a la hora de generar aislamiento térmico, logrando mantener las temperaturas internas más bajas que las temperaturas externas. Sin embargo, no se observa una diferencia significativa entre el BTC de control y los reforzados con fique. A diferencia del comportamiento de los BTC en la temperatura, en la humedad relativa muestra que el interior es considerablemente más alto que la humedad relativa del exterior, esto indica que los materiales tienden a retener la humedad. Sin embargo, no existe una diferencia significativa en el rendimiento entre los BTC, todos gestionan la humedad relativa de forma similar (ver Figuras 8 y 9).

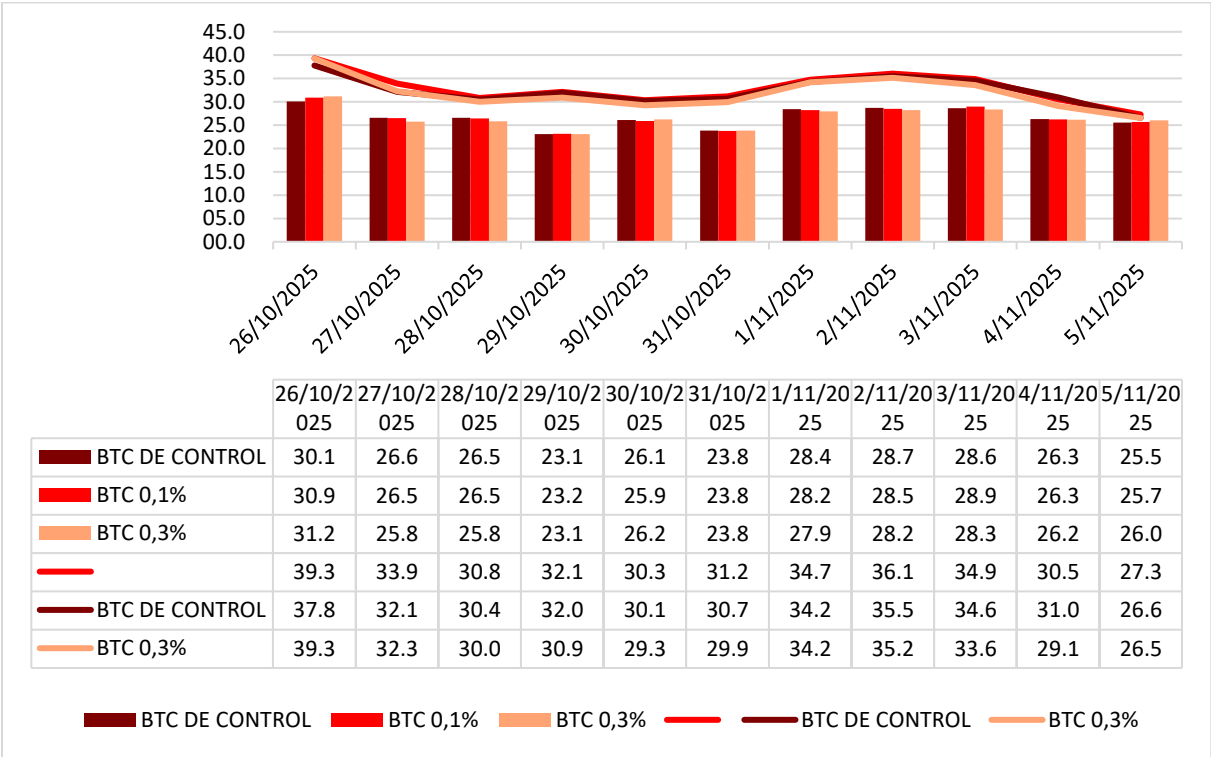


Figura 37. Datos promedios de temperatura y humedad relativa de los BTC preparados.

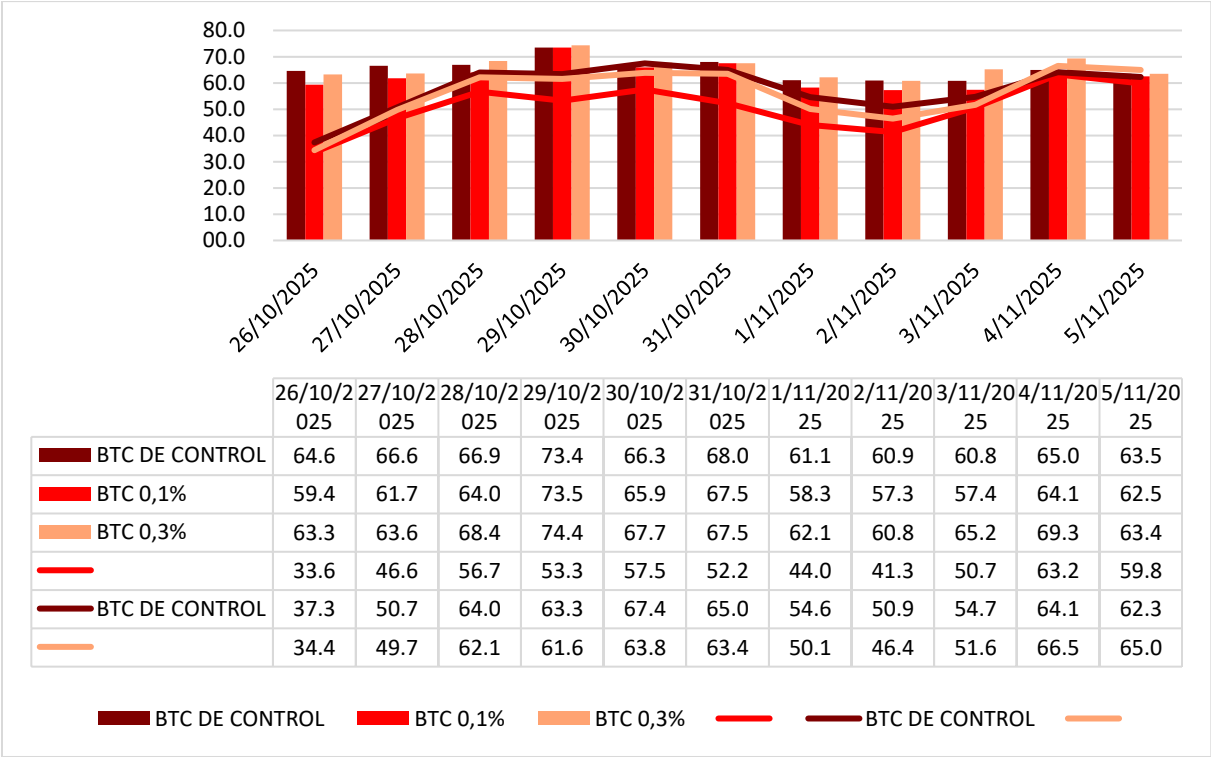


Figura 38. Datos promedios de humedad relativa durante los días de prueba de los BTC preparados.

Los BTC reforzados con fibra de fique tienen un efecto positivo en las propiedades mecánicas en comparación al BTC de control, ya que los bloques con refuerzo de fibra aumentan la resistencia (MPa) de las muestras. Además, reduce significativamente la densidad (g/cm^3) de los bloques haciéndolos más livianos y fácil de manipular (ver Figuras 10 y 11).



Figura 39. Toma de medidas de los distintos grupos de BTC y fallado en la maquina universal.



Figura 40. Toma de medidas de los distintos grupos de BTC y fallado en la maquina universal.

3.3 Análisis comparativo

En esta etapa final se precede a analizar y comparar los datos obtenidos en los ensayos realizados, para cuantificar como la adición de la fibra de fique influye en el desempeño mecánico y térmico de los BTC. Teniendo como base los datos anteriores en el ensayo termico se procede a generar un promedio unico de las temperaturas y humedad relativa exterior e interior de cada docificación para asi comparar cual es la diferencia entre cada muestra. Al analizar los datos optenidos de los bloques se indica que tienen una capacidad efectiva para reducir la temperatura interior respecto al ambiente externo (diferencia de $5-6^{\circ}\text{C}$), pero no existe una diferencia termica significativa entre ellos, ya que su temperatura interna ocila entre $26,6^{\circ}\text{C} - 26,8^{\circ}\text{C}$. De manera similar la humedad relativa de todos los BTC registran una humedad superior a la exterior, la fibra de fique en la dosificación de 0,1% mejora la capacidad de regulación en los bloques. Este muro mantuvo una humedad relativa interna más baja de 62,9% en comparación con el bloque de control 65,2% y el bloque de 0,3% de fique 66%, pero este porcentaje es superior a la humedad relativa externa de 50,8% - 57,7% lo que da a entender que no existe una mejora sustancial en la regulación de la humedad interior (ver Figuras 12 y 13).

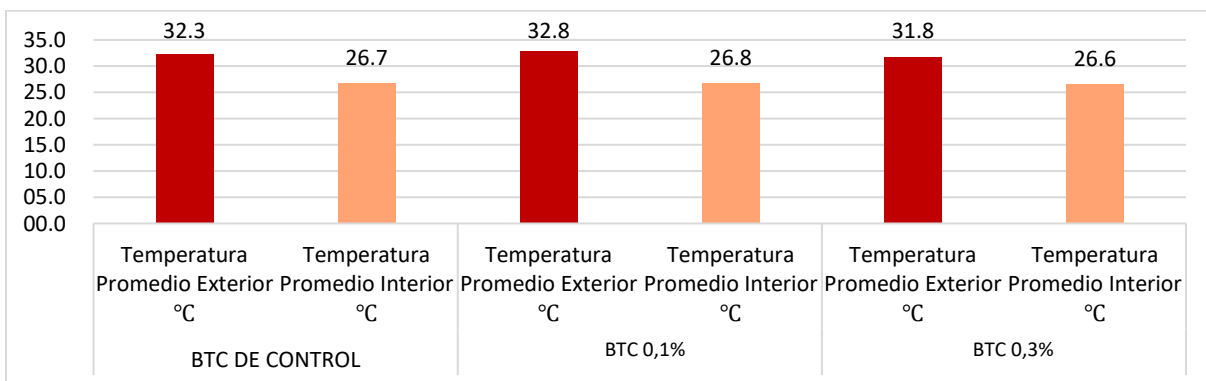


Figura 41. Promedio de las temperaturas externas e internas de los BTC.

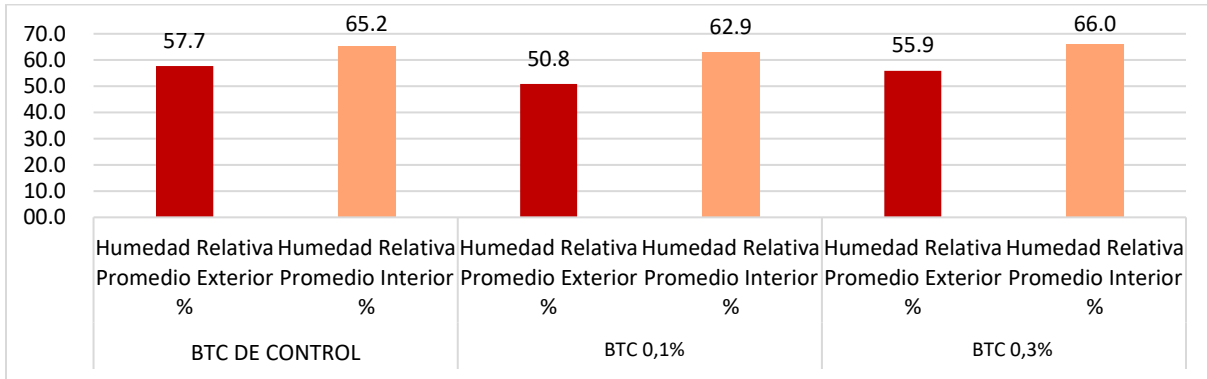


Figura 42. Promedio de las temperaturas externas e internas de los BTC.

A partir de los datos anteriores de temperaturas registradas, se procede a estimar la transmitancia térmica (Valor U) de los BTC. Para este cálculo se usó la Ecuación 1 y la información contenida en la Tabla 1:

Ecuación 1: Formula usada en la investigación Medición de la transmitancia térmica en los materiales de mayor uso en la construcción en Colombia bajo la metodología hotbox (Carlos Alberto Mejía Barrera et al., 2020)

$$U = \frac{Q}{A \cdot (t_{env,h} - t_{env,c})}$$

Tabla 1. Significado y simbología de la ecuación a emplear

Símbolo	Significado	Unidad
A	Área de medición, m ²	m ²
Q	Radiación solar (Punto de monitoreo de la Quebrada La Hueso y la estación Metro Floresta - SIATA)	W
t _{env}	La temperatura ambiental efectiva, incluidos los efectos de radiación y convección	°C
U	Transmitancia térmica	W/(m ² ·°C)

Los cálculos arrojaron los siguientes valores estimados de transmitancia térmica, según las Ecuaciones 2, 3 y 4:

Ecuación 2: Fórmula empleada para la medición de la transmitancia térmica BTC de control.

$$U_{BTC \text{ Control}} = \frac{207.5W}{269.1m^2 \cdot (32.3^{\circ}C - 26.7^{\circ}C)} = 0.137 W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$$

Ecuación 3. Fórmula empleada para la medición de la transmitancia térmica BTC de 0,1% de fique.

$$U_{\text{BTC 0.1\% Fique}} = \frac{207.5W}{269.1m^2 \cdot (32.8^{\circ}C - 26.8^{\circ}C)} = 0.128 W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$$

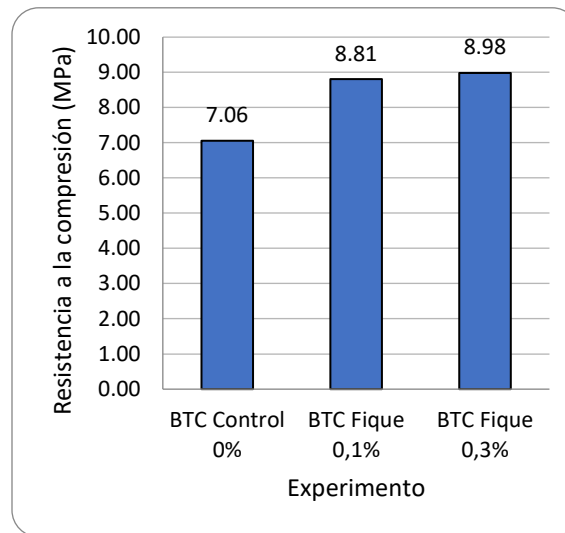
Ecuación 4. Fórmula empleada para la medición de la transmitancia térmica BTC de 0,3% de fique.

$$U_{\text{BTC 0.3\% Fique}} = \frac{207.5W}{269.1m^2 \cdot (31.8^{\circ}C - 26.6^{\circ}C)} = 0.148 W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$$

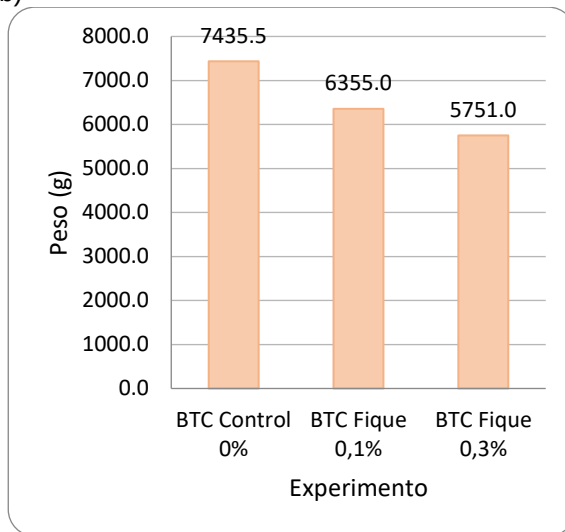
Al comparar estos resultados se observa que el BTC con 0.1% de fibra de fique presenta un valor más bajo (0,128 W/(m²·°C)) en comparación al BTC de control (0,137 W/(m²·°C)). Esto indica que la fibra de fique en bajas proporciones actúa como un aislante eficiente, reduciendo la transferencia de calor a través del muro. Por el contrario, el BTC con 0,3% de fibra muestra un valor más alto (0,148 W/(m²·°C)) en comparación al BTC de control, este comportamiento sugiere que un incremento en la dosificación genera un efecto perjudicial, posiblemente por una distribución inadecuada de la fibra, lo que pudo crear rutas de conducción de calor más eficientes dentro del bloque, aumentando así la transmitancia.

En el análisis del ensayo mecánico se demuestra que el refuerzo de fibra de fique modifica significativamente las propiedades de los BTC. La dosificación del 0,1% de fique aumentó la resistencia a 8,81 MPa que es un incremento de 24,8% vs al de control, y la dosificación del 0,3% de fique alcanzó 8,98 MPa que es un incremento del 27,3% vs al de control que solo alcanzó 7,06 MPa. Esto evidencia que la adición de fibra de fique es eficiente como refuerzo, mejorando la conexión interna de los bloques. Todos los bloques superan la resistencia a la compresión establecida en la normativa NTC 5324 (2 MPa a 6 MPa). La dosificación de los bloques de control validó la calidad de la mezcla base de 90% tierra y 10% cemento ya que generan una resistencia de 7,06 MPa. En cuanto a la densidad se nota una reducción en los bloques que se les añadió fibra de fique. El BTC de control presentó una densidad de 1,76 g/cm³, mientras que las dosificaciones de 0,1% y 0,3% de fibra se redujeron a 1,60 g/cm³ y 1,43 g/cm³. Estos resultados nos dicen que los bloques con fibra son más livianos hasta un 18,5%, lo que implica menor carga muerta en las estructuras y facilita su manipulación en obra.

a)



b)



c)

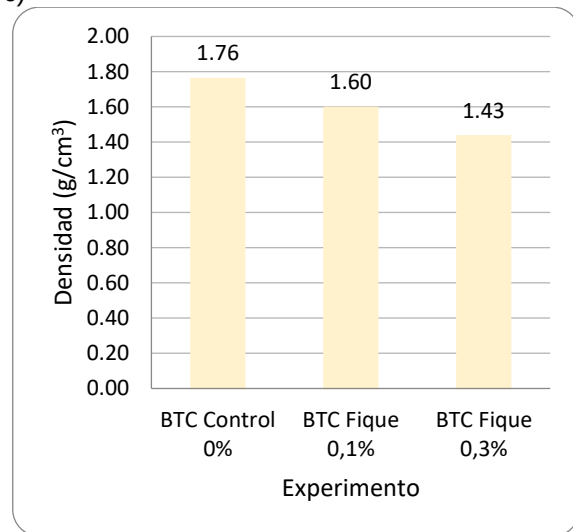


Figura 43. Comparativo de los BTC en su a) Resistencia a la compresión, b) Peso y c) Densidad.

4. CONCLUSIONES

La investigación evaluó de manera integral las propiedades físico-mecánicas y térmicas de los BTC (Control y con refuerzo de fibra de fique). El objetivo principal era determinar si la adición de fique, que es un recurso natural abundante del país, podría mejorar las propiedades de este mampuesto. Los hallazgos claves fueron:

Desempeño mecánico y físico: Al añadir fibra de fique modifica significativamente las propiedades mecánicas y físicas. El BTC de 0,1% de fibra incremento su resistencia a la compresión en un 24,8% frente al bloque de control (de 7,06 MPa a 8,81 MPa), mientras el BTC de 0,3% aumento en un 27,3% frente al de control (de 7,06 MPa a 8,98 MPa). Esta mejora es relevante ya que

demuestra la eficiencia del fique como refuerzo natural. Todos los bloques superaron la norma NTC 5324 (que exigía para estos mampuestos de 2-6MPa). Paralelamente la fibra redujo la densidad hasta un 18,5% (de 1,76% g/cm³ a 1,43% g/cm³) lo que implica una ventaja práctica ya que al aligerar los bloques se facilita la manipulación en obra y reduce la carga muerta en la estructura.

La adición de fibra de fique no demostró un impacto en el rendimiento térmico. Si bien todos los muros realizados mostraron una capacidad efectiva de aislamiento en donde se mantiene una diferencia de 5-6°C con el exterior, no se observa una diferencia concreta de temperatura interna (26,6°C – 26,8°C) ni de regulación de humedad relativa entre las dosificaciones.

La incorporación de fibra de fique es un aislante óptimo en donde la dosificación del 0,1% de fibra redujo la transmitancia a 0,128 W/(m²*°C), mejorando la capacidad del BTC para retardar el flujo de calor en comparación al BTC de control 0,137 W/(m²*°C). Sin embargo, al aumentar la proporción de fibra al 0,3% el valor U se incrementa a 0,148 W/(m²*°C) lo que indica que una saturación de fibra resulta en un efecto contraproducente, ya que favorece a la formación de puentes térmicos que comprometen el aislamiento del BTC.

Se recomienda para una futura investigación analizar el impacto de diferentes longitudes de fibra, ya que esta investigación solo tomó la longitud de 1 pulgada. También se podría evaluar la durabilidad a largo plazo de los bloques, en especial la resistencia a la erosión y la absorción de agua, ya que al realizar el ensayo térmico bajo condiciones controladas no se pudo observar el comportamiento real de un muro a escala real bajo los ciclos climáticos a la intemperie.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios por la fuerza que me dio para culminar esta nueva etapa. Este logro se lo debo al apoyo incondicional de mi familia, mi madre, tía, hermana y mis abuelos, que han sido un pilar fundamental por su amor y sacrificio. Un agradecimiento especial a mis compañeros de especialización por su valiosa colaboración y apoyo para lograr culminar este proyecto. Un reconocimiento a mi director, Joan Amir Arroyave, por su compromiso, sabiduría y acompañamiento constante que fue un gran soporte en todas las fases de esta investigación. Asimismo, agradezco a mi codirectora, Laura Rendón por su esencial direccionamiento y experticia en la metodología térmica.

6. REFERENCIAS

- Al-Jabri, K., Hago, A. W., Al-Saadi, S., Amoatey, P., & Al-Harthy, I. (2022). Structural and thermal performance of sustainable interlocking compressed earth blocks masonry units made with produced water from oilfields. *Case Studies in Construction Materials*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01186>
- ASTM International. (1983). *Los métodos estándar de ensayo para Límite Líquido, Límite de plástico, y el índice de plasticidad de los suelos*1.
- Carlos Alberto Mejía Barrera, Alejandro Ortiz Cabezas, Sergio Arboleda, & Alejandra Rico. (2020). *Medición de la transmitancia térmica en los materiales de mayor uso en la construcción en Colombia bajo la metodología hotbox*.
- Dighe, B., & Singh, M. R. (2025). From ancient practices to contemporary green building: Analyzing organic additives in Pitalkhora earthen plasters for sustainable construction. *Green Technologies and Sustainability*, 3(3). <https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100195>

- Giuffrida, G., Ibos, L., Boudenne, A., & Allam, H. (2024). Analysis of the thermal performances of uninsulated and bio-based insulated compressed earth blocks walls: from the material to the wall scale. *Journal of Building Engineering*, 90. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.109370>
- HOUBEN, H. G. H. (1992). *Earth construction technology*.
- Laibi, A. B., Poullain, P., Leklou, N., Gomina, M., & Sohounhloué, D. K. C. (2018). Influence of the kenaf fiber length on the mechanical and thermal properties of Compressed Earth Blocks (CEB). *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(2), 785–793. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1968-9>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2024, July 17). *La fibra fique es una gran alternativa de empaque para disminuir el uso de plásticos*.
- Mostafa, M., & Uddin, N. (2016). Experimental analysis of Compressed Earth Block (CEB) with banana fibers resisting flexural and compression forces. *Case Studies in Construction Materials*, 5, 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2016.07.001>
- NTC 1522. (1999). *NTC 1522: Ensayo para Determinar la Granulometría por Tamizado*. 1999.
- NTC 5324. (2004). *NTC 5324 Norma Colombiana*.
- Paul, S., Islam, M. S., & Hossain, M. I. (2023). Suitability of Vetiver straw fibers in improving the engineering characteristics of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 409. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134224>
- Ramirez, C., Agaliotis, E., & Pettarin, V. (2024). Fracture toughness and overall characterization of PLA based biocomposites with natural fibers: A comparative study. *Polymer*, 307. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2024.127309>
- Walter, L., Estevez, Y., Medjigbodo, G., Aubert, J. E., Linguet, L., & Nait-Rabah, O. (2024). Design of poured earth construction materials from the elementary characteristics of tropical soils. *Case Studies in Construction Materials*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02709>

MODERNIZACIÓN DE LA FACHADA DEL EDIFICIO VICENTE URIBE RENDÓN MEDIANTE EL AJUSTE DE LA RELACIÓN VENTANA-PARED SEGÚN LA RESOLUCIÓN 0194 DE 2025

Paula Mesa¹, Nicolás Steven Pardo Álvarez¹

¹ Grupo de Investigación Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, pamesa@est.colmayor.edu.co, nicolas.alvarez@colmayor.edu.co

Palabras clave: Fachadas, rendimiento energético, optimización, relación ventana- pared (WWR).

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los elementos arquitectónicos de mayor relevancia para el desarrollo energético de un proyecto es su fachada, la cual cumple no solo con una función estética, sino que también está directamente relacionada con los factores naturales de su entorno, lo cual la convierte en el elemento protector de los usuarios contra las condiciones climáticas del medio (Shukla et al., 2017). Un diseño efectivo de la fachada promueve la implementación de medidas de regulación energética pasivas para la infraestructura, mitigando o reduciendo la implementación de medidas activas. Una de estas estrategias consiste en la definición y cálculo de la relación ventana-pared (WWR por sus siglas en inglés), la cual expresa la proporción entre la cristalería de la fachada con los materiales pétreos tales como el concreto o los ladrillos, optimizando la eficiencia energética del diseño según la Resolución 0194 de 2025 (Minvivienda, 2025). Algunos de los factores a considerar en el planteamiento arquitectónico consisten en que una relación WWR óptima varía según el contexto climático del proyecto. En este sentido, mientras en zonas frías una proporción mayor al 40% puede aprovechar la radiación solar para calefacción pasiva, en climas cálidos y templados se requiere protección solar para evitar sobrecargas térmicas (Al-Obaidi et al., 2014). A su vez estudios demuestran que una WWR entre 30-40% maximiza la iluminación natural, reduciendo hasta 50% el uso de luz artificial en espacios de trabajo (Dubois & Blomsterberg, 2011).

Diversos autores han realizado investigaciones relacionadas con la influencia en el rendimiento energético de una adecuada renovación de fachada arquitectónica. Beneito et al., (2025) analizaron comparativamente el desempeño ambiental de fachadas industrializadas y convencionales en la renovación de edificios de consumo energético casi nulo para avanzar hacia la descarbonización del entorno construido, encontrando que las renovaciones de fachadas pueden reducir las emisiones totales de carbono en un 44% (348 kg CO₂/m²) en sistemas industrializados y un 58% (348 kg CO₂/m²) en sistemas convencionales, en comparación con el estado actual (625 kg CO₂/m²). Además, los paneles prefabricados de gran formato redujeron los residuos de construcción y demolición, mientras que las fachadas modulares con paneles fotovoltaicos integrados presentaron un alto potencial de economía circular. Por su parte, Barone et al., (2024) desarrollaron un enfoque para optimizar la renovación de edificios energéticamente eficientes, combinando fachadas de doble piel y sistemas solares adaptados al paisaje mediterráneo, encontrando que la selección de una fachada de doble piel (FDP por sus siglas en inglés) con una profundidad menor a 7,0 m generó una reducción en la demanda de calefacción que osciló entre un 5,49 % y un 0,82 %. En cambio, al analizar las cargas de refrigeración, la configuración más efectiva fue una FDP con una profundidad superior a 6,0 m, la cual logró disminuir dichas cargas. De igual manera, se comprobó que la profundidad de la cámara de aire

afectó directamente la producción eléctrica, ya que, a mayor profundidad se incrementó tanto la eficiencia eléctrica como la producción de energía, pasando de aproximadamente 18,6 kW (en la cámara más estrecha) hasta alcanzar un máximo de alrededor de 26,8 kW.

Como se ha observado, la correcta planeación de la propuesta arquitectónica asociada a la renovación de la fachada, influye directamente en el comportamiento térmico y energético de la edificación. Sin embargo, en el caso del edificio Vicente Uribe Rendón en Medellín, una construcción maciza con elementos verticales que funcionan con aleros y corta-soles, se evidencian contradicciones en su diseño inicial, asociadas a cumplimientos parciales en cuanto a su localización, orientación solar y su desempeño energético real. A pesar de sus intenciones arquitectónicas pasivas, el edificio depende completamente de sistemas mecánicos para su regulación térmica, agravado por el predominio de superficies vidriadas en sus fachadas, característico de edificaciones administrativas. Esta configuración ha generado interrogantes sobre la eficacia de sus estrategias pasivas actuales, el impacto del excesivo acristalamiento en la demanda energética, y la viabilidad de adaptar su relación WWR a estándares como la recién actualizada Resolución 0194 de 2025 (Minvivienda, 2025), sin comprometer su identidad arquitectónica. Por lo tanto, esta investigación tiene como objetivo la modernización de la fachada del edificio Vicente Uribe Rendón mediante el ajuste de la relación WWR según la Resolución 194 de 2025. Para esto se llevó a cabo una caracterización in situ de la fachada actual, identificando los módulos existentes y los materiales utilizados. Posteriormente, se generaron dos modelos en el software Revit, el primero para la fachada actual y el segundo para la propuesta ajustada a los requerimientos de la Resolución 0194 de 2025. Finalmente, se llevó a cabo un análisis de precios unitarios, con el fin de evaluar el impacto en los costos de esta renovación.

2. METODOLOGÍA

A continuación, en la Figura 1 se presenta el diagrama metodológico, enfocado en las etapas de caracterización, optimización y matriz comparativa.

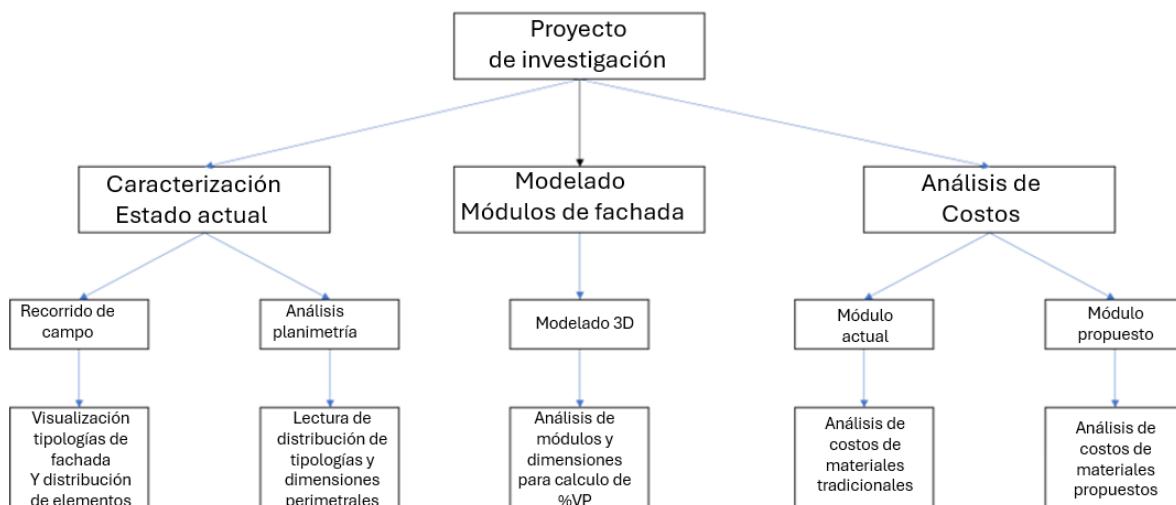


Figura 44. Diagrama metodológico.

2.1 Caracterización estado actual de la fachada

Para la caracterización del estado actual de la fachada, se llevaron a cabo visitas a la edificación,

en las cuales se identificaron los módulos actuales con sus respectivos materiales. Esta información fue complementada con la toma de medidas in situ y la revisión de planos arquitectónicos suministrados por los desarrolladores del proyecto.

2.2 Generación de modelos para la fachada

Luego de la toma de medidas y revisión de planos arquitectónicos, se generó el modelo de la fachada existen en el software Revit. En este, se incluyeron para facilidad del lector, las cotas correspondientes para el cálculo de la relación WWR actual. De igual manera, para la propuesta arquitectónica de renovación de la fachada, se generó el modelo mediante el mismo software de acuerdo a los parámetros actualizados según la Resolución 0194 de 2025 (Minvivienda, 2025). En este caso, se llevó a cabo una revisión detallada de la norma, ya que esta actualiza la Resolución 0549 de 2015 (Minvienda, 2015) y plantea parámetros más exigentes en cuando a estrategias pasivas.

2.3 Análisis de costos de implementación

Finalmente, se llevó a cabo un análisis detallado de los costos asociados a la modificación de las modulaciones de fachada, con el fin de mostrar el impacto en los costos de las implicaciones del cambio de normativa y recomendaciones de la Resolución vigente. En los costos se incluyeron tanto el vidrio, el marco de ventana y los materiales de la mampostería, como los costos de deconstrucción, conservando el lenguaje arquitectónico de fachada original.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de estado actual de la fachada mediante trabajo de campo

La caracterización compositiva de la fachada se ejecutó mediante reconocimiento in situ apoyado en registros fotogramétricos y levantamiento dimensional directo. Este proceso se complementó con entrevistas técnicas al equipo de construcción y administradores del inmueble para contrastar datos históricos y constructivos. El análisis de la planimetría arquitectónica (suministrada por los desarrolladores) confirmó la homogeneidad del lenguaje formal en el perímetro edificado, con excepciones en los núcleos de circulación vertical (accesos restringidos), las zonas húmedas (baños y cocinas) y los buitrones estructurales (elementos adosados a pilares). El levantamiento se realizó a nivel peatonal mediante recorrido perimetral completo, limitándose a la visualización de tres fachadas debido a restricciones de acceso al área posterior (ver Figura 2).



Figura 45. Identificación de fachadas. a) y b) Fachada norte. c) y d) Fachada sur. e) y f) Fachada oeste.

Tras el análisis de planimetría arquitectónica (Figura 3a-b), se identificó una disposición adicional de fachada y dos tipologías de planta predominantes, determinando la configuración modular existente. El módulo A registró 96,04 ml en la Figura 3a y 55,03 ml en la 3b, evidenciando una variabilidad dimensional del 74,6% asociada a su ubicación en fachadas principales con exigentes requerimientos lumínicos. El módulo B, exclusivo de la tipología Figura 3b, presentó 35,82 ml correspondiendo a áreas de servicio con demanda lumínica reducida, este módulo a su vez evidencia la implementación de elementos verticales representativos dentro de la composición arquitectónica del edificio, mientras el módulo C mantuvo una longitud constante de 1,20 ml en ambas configuraciones, funcionando como elemento de transición en encuentros estructurales.



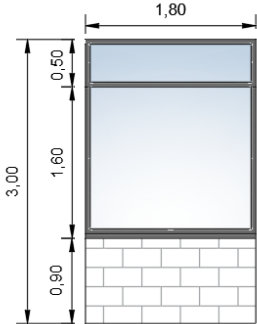
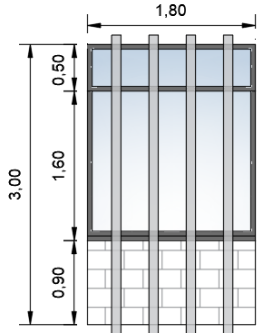
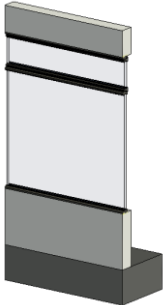
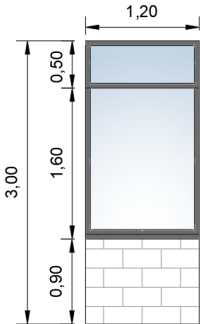
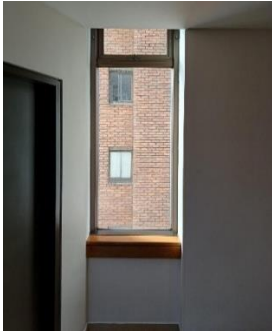
Figura 46. Localización de los módulos de fachada. a) Pisos 1 a 11 y b) Pisos 12 a 16.

3.2 Levantamiento de módulos de fachada existentes y propuesta de módulo nuevo

Para el desarrollo de la investigación, se realizó un levantamiento procesado digitalmente utilizando herramientas de diseño arquitectónico, específicamente AutoCAD y Revit, con el objetivo de representar de forma precisa los elementos de fachada, establecer las áreas y la

distribución perimetral de cada módulo, su orientación, los materiales empleados y su impacto en la relación WWR. Este porcentaje se calcula dividiendo el área de la superficie traslucida con el área total de la pared, acorde a los lineamientos de la Resolución 0194 del 2025 (Minvivienda, 2025) con la cual, se propone procurar una relación equitativa entre el vidrio y el mampuesto en las superficies de la fachada. Las relaciones WWR resultantes fueron de 70% para todos los módulos (ver Tabla 1), valor muy superior a lo que establece la Resolución 0194 del 2025 (Minvivienda, 2025), generando probablemente una sobrecarga térmica en espacios interiores debido a la excesiva transmitancia solar a través del vidrio, elevando probablemente las temperaturas interiores.

Tabla 18. Isométrico, medidas, imagen de campo y porcentaje WWR para los Módulos A, B y C.

Módulo	Isométrico	Medidas	Imagen de Campo	% WWR
A				70%
B				70%
C				70%

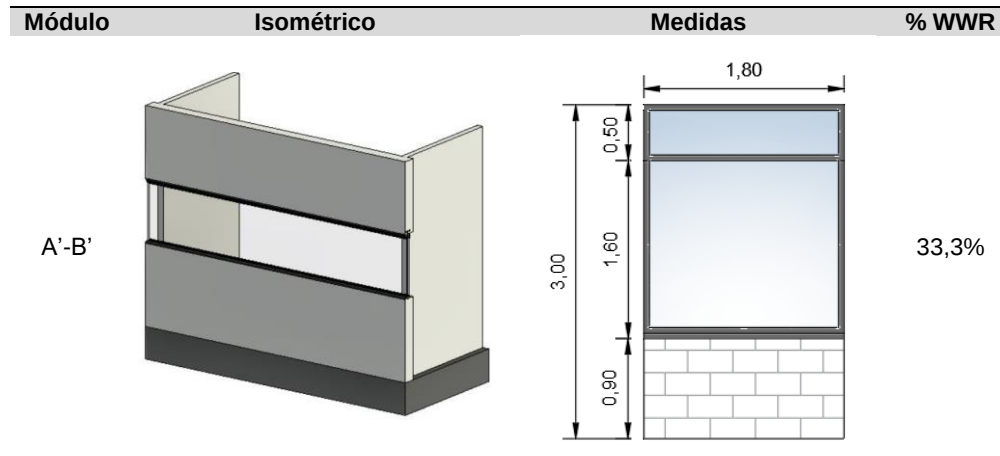
Por otra parte, se realizaron consultas a nivel administrativo con el objetivo de proponer una modulación alternativa de fachada, enfocada principalmente en reducir los materiales vidriados del edificio. Esta propuesta consistió en minimizar el área vidriada de los módulos con mayor superficie de ventana A y B. Además, para este ejercicio de viabilidad no se consideró replantear

la disposición del módulo C, debido a su posición, dimensión y optimización de costos de implementación. En la Figura 4 y la Tabla 2 se presenta la propuesta para reemplazar los módulos A y B con el módulo A'-B'. Este módulo reduce la relación WWR al 33,3%, cumpliendo con el límite máximo del 50% establecido en el Artículo 5.3 de la Resolución 0194 de 2025 (Minvivienda, 2025), reduciendo en un 52,4% el área vidriada original y minimizando la ganancia térmica en el clima de Medellín, mejorando probablemente la inercia térmica del cerramiento y disminuyendo la demanda teórica de refrigeración en un 25-30% según estándares ASHRAE 90.1.



Figura 47. Localización de la propuesta de los módulos A'- B'. a) Pisos 1 a 11 y b) Pisos 12 a 16.

Tabla 19. Isométrico, medidas, imagen de campo y porcentaje WWR para los módulos A' - B'.



3.3 APU costos de implementación

En la Tabla 3 se presenta el análisis de precios unitarios (APU) para el módulo propuesto A' - B'. En la implementación, el ítem más significativo fue la ventana de vidrio doble con cámara de aire y marco de aluminio anodizado (\$846.000 COP, 48,6% del total), esencial para reducir la transmitancia térmica y garantizar un SHGC $\leq 0,3$ en el clima de Medellín. Los costos de mampostería estructural (\$223.686 COP, 12,8%) y preparación superficial (revoque, estuco y pintura: \$110.132 COP, 6,3%) se establecieron para propender por durabilidad y baja conductividad térmica, mientras la demolición parcial (\$164.025 COP, 9,4%) y mano de obra especializada (\$397.500 COP, 22,8%) se presentaron para facilitar la instalación precisa del sistema, disminuyendo la cantidad de desperdicio.

Tabla 20. APU para la implementación del módulo A' - B'.

Item	Descripción	Unidad	Cantidad	Valor unitario (COP)	Valor total (COP)
1,1	Revoque muros, incluye filos y ranuras	m ²	3,6	\$ 16.891	\$ 60.808
1,2	Estuco sobre muros revocados	m ²	3,6	\$ 10.155	\$ 36.558
1,3	Pintura acrílica Blanco 9010 de Pintuco o similar	m ²	3,6	\$ 3.546	\$ 12.766
1,4	Muro 20 bloque concreto Indural o similar	m ²	3,60	\$ 62.135	\$ 223.686
1,5	Ventana en vidrio doble cristalamiento + cámara intermedia de 10mm , marcos de aluminio anodizado Anolock 512 (1,00 x 1,80 m) 1 cuerpo fijo + montante superior con mirilla .	un	1	\$ 846.000	\$ 846.000
1,6	Demolición parcial	m ²	5,40	\$ 30.375	\$ 164.025
1,7	Mano de obra + herramienta menor para instalación del módulo	Jor	5	\$ 79.500	\$ 397.500
				Valor total	\$ 1.741.342

4. CONCLUSIONES

Desde una perspectiva normativa, la implementación de un nuevo módulo de fachada sería

beneficioso para el rendimiento energético del edificio Vicente Uribe Rendón. Esto se debe a que la incorporación de estrategias como el control de la relación WWR resulta fundamental para mitigar los impactos asociados al uso de sistemas mecánicos de climatización.

Si bien el análisis de alternativas muestra un costo de implementación considerable, el cálculo de la relación WWR en dicha propuesta aportaría mejoras significativas en el desempeño energético de la infraestructura. Asimismo, la inclusión de materiales alternativos como un sistema de doble lámina de vidrio con cámara intermedia podría contribuir de manera positiva a una mejor sensación térmica en el interior del edificio.

Es importante destacar que, aunque un nuevo módulo de fachada puede optimizar la relación WWR conforme a la normativa vigente, estas medidas no deben implementarse de forma aislada. Es imprescindible integrarlas dentro de un análisis multicriterio que considere otros elementos técnicos, en coherencia con un enfoque integral de diseño bioclimático.

Finalmente, se hace evidente la necesidad de incorporar simulaciones de desempeño térmico en las etapas posteriores del proyecto, estas permitirán cuantificar con mayor precisión los beneficios reales de las propuestas, especialmente en lo que respecta al confort térmico del edificio, su eficiencia energética y la reducción de la carga térmica sobre los sistemas de climatización.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente a todos los que me acompañaron en este camino a nivel personal. También agradezco al profesor Sergio Arboleda, por aceptar la coordinación de la Especialización con el cariño y rigurosidad necesarias para su crecimiento. Especialmente agradezco al profesor Nicolás Pardo, por ser un salvavidas cuando me estaba ahogando, por hacer la diferencia entre varios docentes para darme los lineamientos y guía que necesitaba como estudiante, así como el respeto y dedicación que me merecía como colega. Profe Nico, este trabajo es gracias a usted y que yo siga animada para continuar mis estudios también lo es.

6. REFERENCIAS

- Al-Obaidi, K. M., Ismail, M., & Rahman, A. M. A. (2014). A review of skylight glazing materials in architectural designs for a better indoor environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 420-434. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.087>
- Barone, G., Vardopoulos, I., Attia, S., & Vassiliades, C. (2024). Optimizing energy-efficient building renovation: Integrating double-skin façades with solar systems in the Mediterranean landscape. *Energy Reports*, 12, 2933–2945.
- Beneito, L., Konstantinou, T., Torres-Ramo, J., & Sánchez-Ostiz, A. (2025). Towards decarbonisation in the built environment: A comparative analysis of conventional vs. industrialised façades in nearly zero-energy building renovations. *Energy and Buildings*, 342, 115885.
- Cabeza, L. F., Chàfer, M., & Mata, É. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394-416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>
- Dubois, M. C., & Blomsterberg, Å. (2011). Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings. *Energy and Buildings*, 43(10), 2572-2582. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.07.001>

- Freewan, A. A. (2020). Maximizing the light shelf performance by interaction between light shelf geometries and a curved ceiling. *Energy and Buildings*, 211, 109787. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109787>
- Higueras García, E. (2011). Urbanismo bioclimático. *Cuadernos de Investigación Urbanística*, (56), 45-60.
- IEA-PVPS. (2025). Building Integrated Photovoltaics (BIPV): Technical Guidebook. International Energy Agency. <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2025/02/Building-Integrated-Photovoltaics-Technical-Guidebook.pdf>
- Passivhaus Institut (PHI). (2015). Passive House Requirements. <https://passiv.de>
- Pérez, G., Coma, J., Sol, S., & de Gracia, A. (2011). Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. *Applied Energy*, 88(12), 4854-4859. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.06.032>
- Resolución 0549 de 2015. (2015). Anexo 1: Guía de construcción sostenible. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. <https://www.minvivienda.gov.co/system/files/consultasp/anexo-1-guia-de-construccion-sostenible.pdf>
- Resolución 0194 de 2025. (2025). Anexo 1: lineamientos de construcción sostenible. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. <https://www.minvivienda.gov.co/system/files/consultasp/anexo-1-guia-de-construccion-sostenible.pdf>

COMPARACIÓN ENTRE LA METODOLOGÍA BIM VS LA METODOLOGÍA TRADICIONAL EN EL MANTENIMIENTO DE FACHADAS EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN

Brayan Esteven Arroyave Lopez¹, Vanessa Salazar López¹, Edison Aldemar Hincapié Atehortua²

¹ Semillero de Investigación en Ciencias y Tecnología de la Construcción SITEC, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, barroyave@est.colmayor.edu.co, vanessas@est.colmayor.edu.co

² Grupo de Investigación Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, edison.hincapie@colmayor.edu.co

Palabras clave: Metodología BIM, mantenimiento de fachadas, control de obra, reducción de costos, método del valor ganado.

1. INTRODUCCIÓN

La ciudad de Medellín está experimentando una expansión inmobiliaria significativa, especialmente en edificaciones que requieren mantenimiento preventivo y correctivo de sus fachadas, y el sector de la construcción necesita un sistema de estandarización a nivel nacional, en ese sentido es de vital importancia garantizar la productividad y optimización de los recursos de proyectos desde su operación y mantenimiento. (Estrategia Nacional BIM, 2020), por lo anterior, se estima que “para inmuebles cuyo sistema constructivo sea muros de carga, la vida útil será de 70 años; y para los que tengan estructura en concreto, metálica o mampostería estructural, la vida útil será de 100 años” (Resolución 620 del 2008, Art. 2), sin embargo, en el proceso de desarrollo de un proyecto de construcción, la operación y mantenimiento o Facility Management (FM) del activo construido por lo general no es considerado, es decir, se concentran todos los esfuerzos en la etapa de diseño y construcción pese a que la operación y mantenimiento representa entre el 70% al 80% del costo total del proyecto (Pumasupa, 2022). Por ende, la articulación de actores y gestión del conocimiento, en torno a la digitalización del sector de la construcción, contribuirá al incremento de la productividad en las empresas y de la competitividad de la actividad edificadora en Colombia (Estrategia Nacional BIM, 2020) que permite la creación de planes de mantenimiento preventivo para prolongar la vida útil de las edificaciones y a su vez, contribuir con las organizaciones locales a aprovechar al máximo sus limitados recursos, reduciendo al mismo tiempo la inactividad de imprevistos y las costosas reparaciones.

Esta investigación se basó en el manejo Inter operacional de la empresa Interfachadas mantenimiento SAS ubicada en la ciudad de Medellín para hacer mantenimientos bajo la metodología BIM y el método tradicional, “logrando con esto el control operacional de los rendimientos de obra, control de gastos, control de caja y proyecciones presupuestales de dos (2) copropiedades analizadas y con esto, determinar los alcances, que permitan detectar bajo el método del valor ganado diferencias o similitudes entre ambas metodologías”. Así, la problemática de los mantenimientos está basada en el Artículo 21 de la ley de propiedades horizontales que establece que todos y cada uno de los propietarios tienen la obligación de contribuir a los gastos generales para el adecuado sostenimiento del inmueble, sus servicios, cargas y responsabilidades que no sean privativas (Art. 21, Ley 675 del 2001) para ejecutar los mantenimientos generales y a su vez, “la no programación ocasiona una incertidumbre entre los residentes de las propiedades horizontales porque estos dependen netamente de su capital” por ende, el uso de metodologías BIM permitirá dar una mayor claridad sobre los tiempos adecuados

que se deberán ejecutar, incentivando a los consejos administrativos y/o asambleas a la preparación de dichas actividades (Albarelo, Gutiérrez, 2016).

Por último, los controles de obra ejecutados en esta investigación permitieron tener una base más general sobre los procesos implementados por las interventorías dedicadas a este gremio en la ciudad y a su vez, analizar los diferentes mecanismos que se pueden ejecutar para el desarrollo de mantenimientos de fachadas tanto para el contratante como el contratista y además, destacar las diferencias más significativas y comparar la variación de los costos, la eficiencia y el tiempo de dos proyectos de la ciudad de Medellín, elaborados uno con los procesos tradicionales de cálculo y modelamiento (2D) y otro mediante el uso de la metodología Building Information Modeling (BIM) aplicados para su respectivo mantenimiento.

2. METODOLOGÍA

La ruta metodológica de esta investigación consiste en la comparación de la metodología BIM y la metodología tradicional, analizado en dos proyectos de la ciudad de Medellín, aplicados a la etapa de mantenimiento. Esta investigación mide los resultados por medio del método del valor ganado, que nos permite de manera objetiva comparar la eficiencia de costos, tiempo de ejecución y recursos, para finalmente concluir cuál de las dos metodologías resulta ser más efectiva. Para esto se llevó a cabo 3 etapas, como se muestra en la Figura 1.

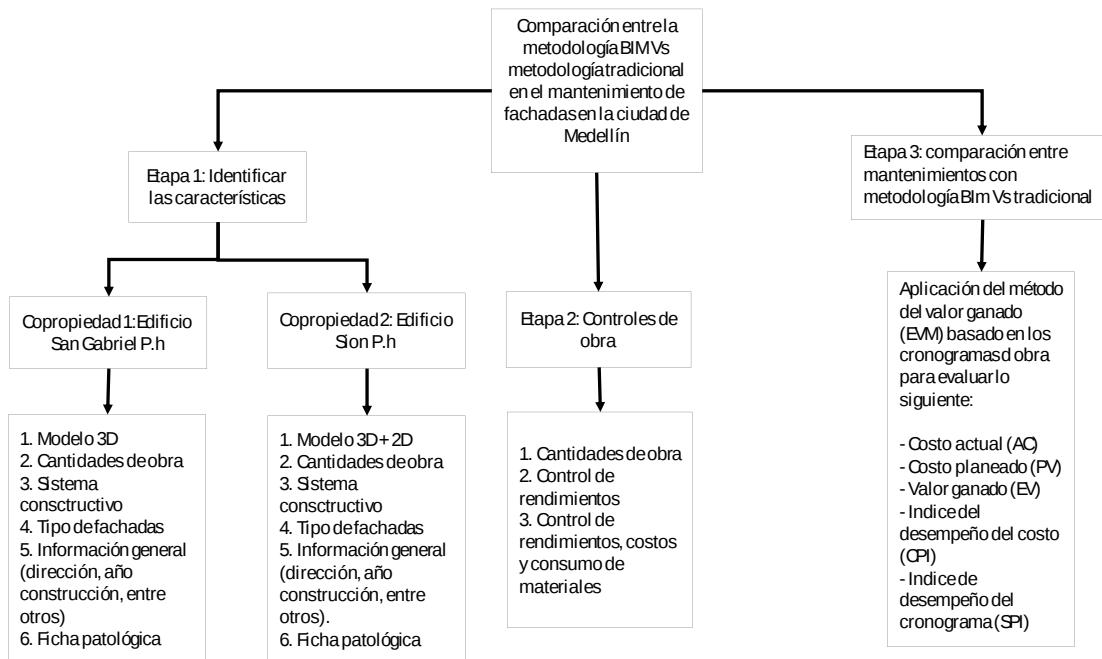


Figura 48. Diagrama metodológico.

2.1 Identificación de las principales características de las copropiedades

En esta fase de la investigación, se obtiene información de las dos copropiedades ubicadas en la ciudad de Medellín, a las cuales vamos a evaluar su mantenimiento, teniendo en cuenta que cada una tuvo su intervención con diferente metodología, para finalmente concluir cual procedimiento es más eficiente: Edificio San Gabriel PH (metodología BIM), y el edificio Sion PH. (metodología tradicional). Se recopiló la información necesaria para la investigación como: direcciones, registro

fotográfico, área del lote, número de niveles, tipos de fachadas y ubicaciones geoespaciales de cada copropiedad. A partir de esta información, se elabora un procedimiento técnico para el análisis detallado de cada una de las metodologías. La información obtenida se organiza en formatos de Excel que permiten realizar resumen de cantidades de obra, así como la planificación de cronogramas, presupuestos y rendimientos de mantenimiento. Estos datos serán esenciales para comparar los controles y procesos basados en metodología BIM Vs método tradicional empleado en la industria local, evaluando así su efectividad en la gestión de recursos, tiempos y costos en el mantenimiento de fachadas.

2.2 Controles de obra

Considerando la información de la fase anterior, logramos crear controles de obra basados en el método del valor ganado para determinar el alcance, costos y tiempo de ejecución (cronograma) de cada mantenimiento. Estos análisis tienen énfasis en las actividades que normalmente se ejecutan en la ciudad de Medellín para el mantenimiento preventivo de las fachadas. Los controles de obra fueron control de cantidades de obra, control de rendimientos – tiempo y control de rendimiento – costos. Además, se tuvieron en cuenta los cortes y avances de obra de ambas copropiedades, para poder aplicar el método del valor ganado y efectuar la optimización, ahorro o sobre costo de cada una.

2.3 Comparación entre la metodología BIM Vs método tradicional bajo los lineamientos del método del valor ganado en mantenimiento de fachadas

Por último, realizamos un comparativo con el método del valor ganado, basado en las siguientes condiciones: costos actuales (AC), valor ganado (EV), valor planificado (PV), índice de desempeño del cronograma (CPI), índice de desempeño del costo (SPI); para obtener resultados cuantitativos y comparar las eficiencias del proyecto San Gabriel Vs Edificio Sion, cuyas metodologías de desarrollo son diferentes.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Identificación de las principales características de las copropiedades

Esta investigación obtiene sus primeros resultados, conociendo las características necesarias e identificando los alcances (tipo de fachada, tipo de mantenimiento, entre otros) mediante el desarrollo de fichas técnicas. Las copropiedades analizadas fueron: Ed. San Gabriel, donde su mantenimiento fue con la metodología BIM y el edificio Sion, el cual se usó el método tradicional. Además, como primer dato esta su ubicación, ya que se localizan el mismo barrio, el Poblado, lo que es un punto a favor ya que se encontrarían en las mismas condiciones ambientales y la empresa que realizó sus respectivos mantenimientos, es la misma para ambas, solo que en una el control lo ejecutaron de manera tradicional y en la otra usaron la metodología BIM, lo que también es importante resaltar (ver Tabla 1). Para ambos edificios se efectuó un mantenimiento preventivo general de todas sus fachadas, teniendo en cuenta que las dos copropiedades cuentan con fachadas mixtas, considerando que los materiales a usar en cada uno son de las marcas Pintuco para acabados exteriores (pinturas y resanes), Metic para sellos en ventanas y juntas de dilatación y, por último, Hidro protección de Colombia para limpieza de vidrios. Además, el estado de ambas fachadas presenta fisuras en chapas de ladrillo tipo catalán, desprendimientos de sellos, deterioro de pinturas por causas ambientales y manchas parciales tipo escorrentías por falta de hidrófugos en fachadas de ladrillos.

Tabla 21. Texto descriptivo de la tabla.

	EDIFICIO SAN GABRIEL P.H	EDIFICIO SION P.H
AÑO DE CONSTRUCCIÓN	2015 a 2017	2016
DIRECCIÓN	C. 17A Sur #44-108, El Poblado	CARRERA 44 # 17 SUR 59
NÚMERO DE PISOS	14	18
CONSTRUCTORA	SANREMO	CONSTRUCTORA BORINQUEN
ÁREA DEL LOTE (m ²)	741	
SISTEMA CONSTRUCTIVO	PORTICOS DE CONCRETO	PORTICOS DE CONCRETO
TIPO DE FACHADA	Mixta (Pintura y mampostería)	Mixta (Pintura y mampostería)

3.2 Controles de obra

Para los controles de obra de cada proyecto se emplearon las programaciones bases con su respectivo presupuesto proyectado en el tiempo para determinar el porcentaje y el valor ejecutado, generando la Tabla 2.

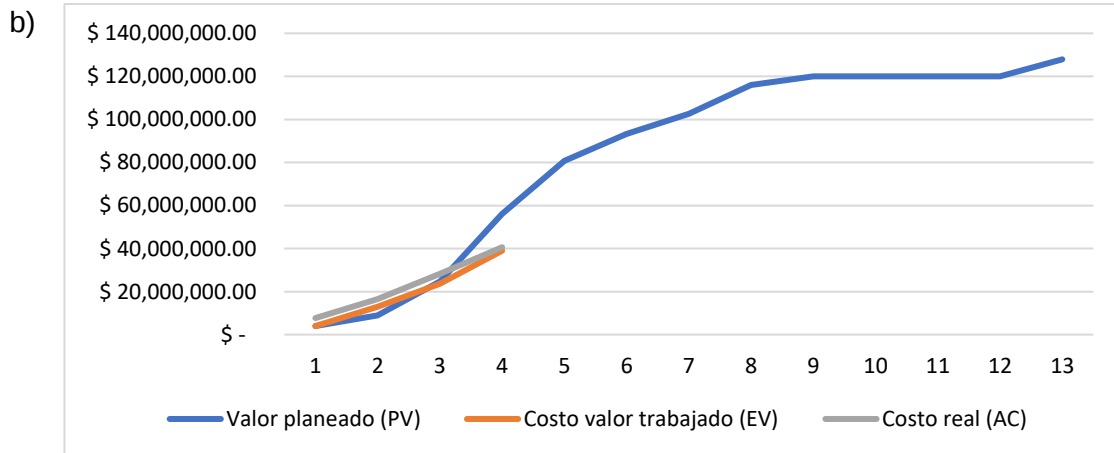
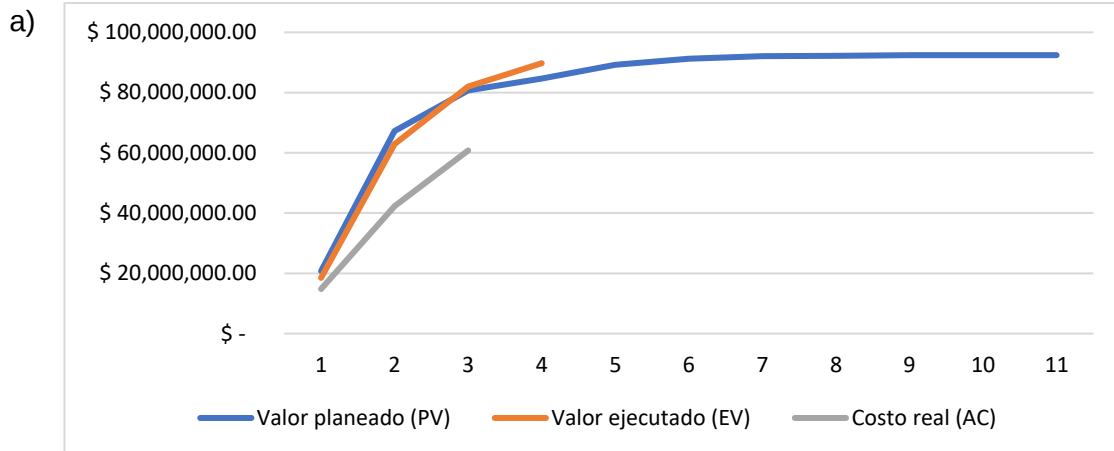
Tabla 22. Texto descriptivo de la tabla.

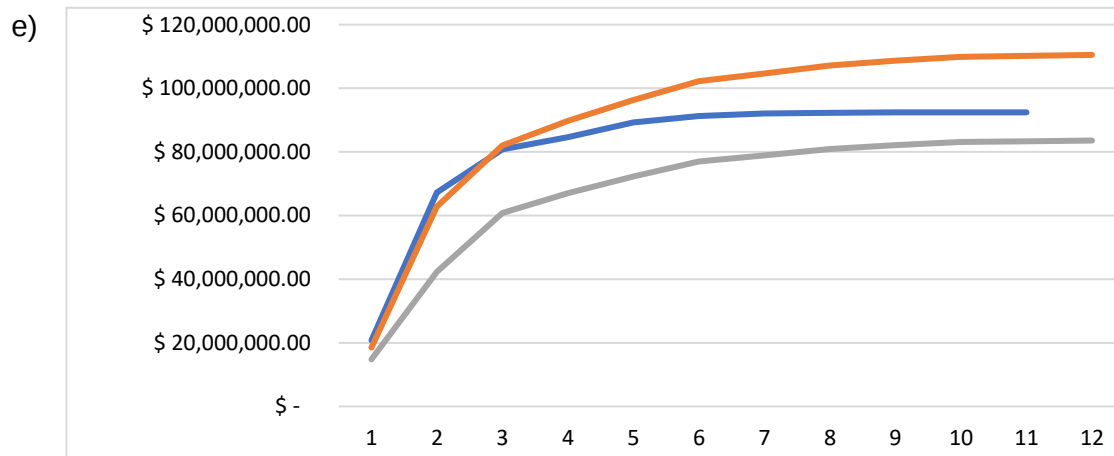
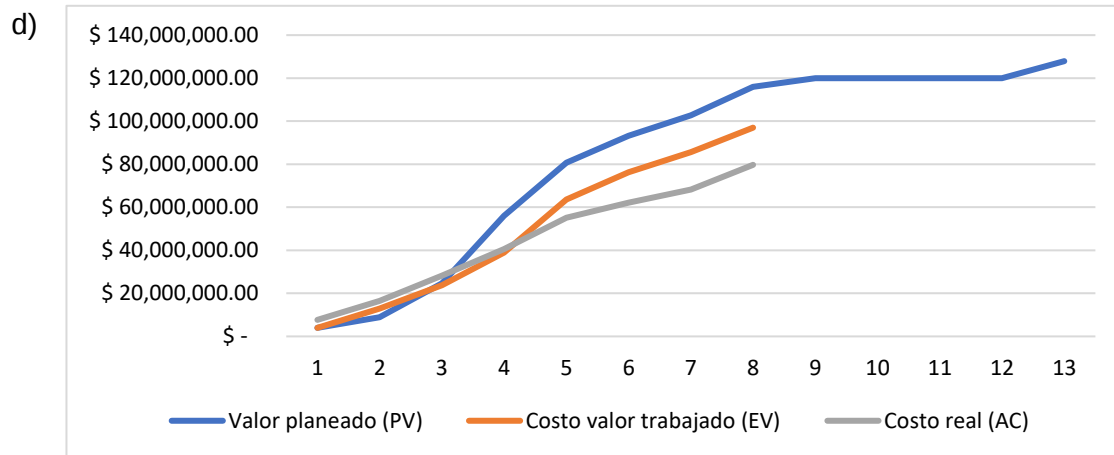
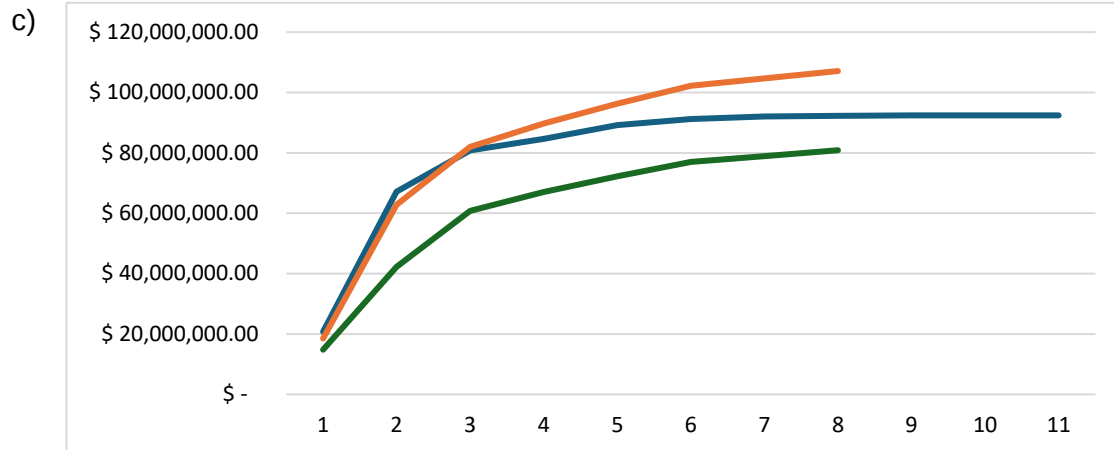
SG	\$	92.447.552,21			
SION	\$	127.807.400,00			

	SEMANA	PV	EV	EV ACUMULADO	AC	AC ACUMULADO
SION P.H	Semana 1	\$ 3.984.375,00	\$ 3.974.375,00	\$ 3.974.375,00	\$ 7.675.445,31	\$ 7.675.445,31
	semana 2	\$ 8.915.625,00	\$ 8.931.250,00	\$ 12.905.625,00	\$ 8.795.445,31	\$ 16.470.890,62
	Semana 3	\$ 24.720.857,14	\$ 10.805.232,14	\$ 23.710.857,14	\$ 11.839.191,70	\$ 28.310.082,32
	Semana 4	\$ 55.999.857,14	\$ 15.279.000,00	\$ 38.989.857,14	\$ 12.280.175,09	\$ 40.590.257,41
	Semana 5	\$ 80.710.500,00	\$ 24.710.642,86	\$ 63.700.500,00	\$ 14.535.508,32	\$ 55.125.765,73
	Semana 6	\$ 93.212.000,00	\$ 12.501.500,00	\$ 76.202.000,00	\$ 7.051.908,00	\$ 62.177.673,73
	Semana 7	\$ 102.677.540,00	\$ 9.465.540,00	\$ 85.667.540,00	\$ 6.107.423,61	\$ 68.285.097,34
	Semana 8	\$ 116.005.757,14	\$ 11.328.217,14	\$ 96.995.757,14	\$ 11.442.214,85	\$ 79.727.312,19
	Semana 9	\$ 120.058.900,00	\$ 3.953.142,86	\$ 100.948.900,00	\$ 3.953.142,86	\$ 83.680.455,05
	Semana 10	\$ 120.058.900,00	\$ 2.500.000,00	\$ 103.448.900,00	\$ 1.250.000,00	\$ 84.930.455,05
	Semana 11	\$ 120.058.900,00	\$ 2.500.000,00	\$ 105.948.900,00	\$ 1.250.000,00	\$ 86.180.455,05
	Semana 12	\$ 120.058.900,00	\$ 7.452.000,00	\$ 113.400.900,00	\$ 4.800.000,00	\$ 90.980.455,05
	Semana 13	\$ 127.907.400,00				
SAN GABRI EL P.H	Semana 1	\$ 20.756.919,73	\$ 18.509.270,82	\$ 18.509.270,82	\$ 14.807.416,66	\$ 14.807.416,66
	semana 2	\$ 67.198.216,71	\$ 44.326.066,02	\$ 62.835.336,84	\$ 27.460.852,82	\$ 42.268.269,48
	Semana 3	\$ 80.778.598,16	\$ 19.153.904,11	\$ 81.989.240,95	\$ 18.523.123,29	\$ 60.791.392,77
	Semana 4	\$ 84.638.819,87	\$ 7.765.098,00	\$ 89.754.338,95	\$ 6.212.078,40	\$ 67.003.471,17
	Semana 5	\$ 89.227.048,39	\$ 6.547.654,00	\$ 96.301.992,95	\$ 5.238.123,20	\$ 72.241.594,37
	Semana 6	\$ 91.243.863,88	\$ 5.897.650,00	\$ 102.199.642,95	\$ 4.718.120,00	\$ 76.959.714,37

Semana	\$	\$	\$	\$	\$
7	92.095.986,98	2.456.789,00	104.656.431,95	1.965.431,20	78.925.145,57
Semana	\$	\$	\$	\$	\$
8	92.220.986,98	2.456.789,00	107.113.220,95	1.949.431,20	80.874.576,77
Semana	\$	\$	\$	\$	\$
9	92.220.986,98	1.567.981,00	108.681.201,95	1.254.384,80	82.128.961,57
Semana	\$	\$	\$	\$	\$
10	92.220.986,98	1.234.765,00	109.915.966,95	987.812,00	83.116.773,57
Semana	\$	\$	\$	\$	\$
11	92.220.986,98	275.792,63	110.191.759,58	220.634,10	83.337.407,67
Semana	\$	\$	\$	\$	\$
12	26.565,23	275.792,63	110.467.552,21	220.634,10	83.558.041,77

Determinando que para el edificio Sion su ejecución tuvo un desacelere en su programación y ejecución de los costos, indicando que las pautas de desarrollo bajo la metodología tradicional fueron marcadas por factores como: toma de decisiones, verificaciones de campo e inspecciones periódicas de las medidas a ejecutar con herramientas de medición tipo metro, fotografías, entre otros. En cambio, en el edificio San Gabriel se presentó un aumento de la producción bajo la metodología BIM, haciendo uso de medios magnéticos para el desarrollo de informes bajo modelos digitales respecto al avance de obra, que mejoraron la toma de decisiones de los implicados (administración, interventoría y contratista).





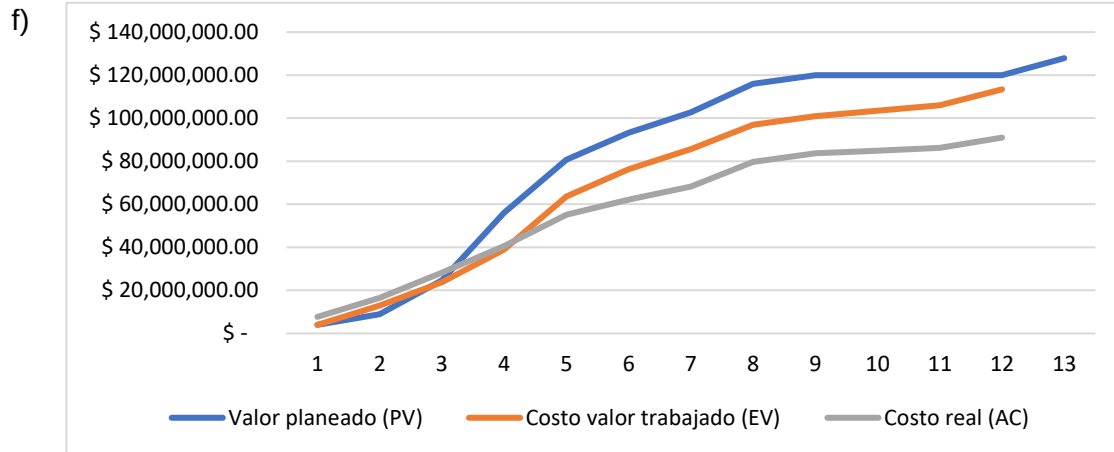


Figura 49. San Gabriel, semanas a) 3, c) 6 y e) 9. Sion, semanas b) 4, d) 8 y f) 12.

3.3 Comparación entre la metodología BIM Vs método tradicional bajo los lineamientos del método del valor ganado en mantenimiento de fachadas

Esta comparación se realizó aplicando el método del valor ganado (EVM) con la información de ambos mantenimientos basado en las siguientes características: costo actual (AC), valor ganado (EV), valor planeado (PV); y se analizaron sus respectivos indicadores.

Tabla 23. Indicadores Sion vs San Gabriel.

INDICADORES							
Descripción	Fórmula	SION			SAN GABRIEL		
		Semana 4	Semana 8	Semana 12	Semana 3	Semana 6	Semana 9
Varianza del costo (CV)	CV: EV - AC	-\$ 1.600.400,27	\$ 17.268.444,95	\$ 2.652.000,00	\$ 21.197.848,18	\$ 25.239.928,58	\$ 26.552.240,38
Varianza del cronograma (SV)	SV: EV - PV	-\$ 17.010.000,00	-\$ 19.010.000,00	-\$ 6.658.000,00	\$ 1.210.642,79	\$ 10.955.779,07	\$ 16.460.214,97
Índice de desempeño del costo (CPI)	CPI: EV/AC	0,96	0,99	1,25	1,03	1,25	1,25
Índice de desempeño del cronograma (SPI)	SPI: EV/PV	0,27	0,10	0,06	0,24	1,12	1,18
Estimación a la terminación del proyecto (EAC)	BAC/CPI	\$ 133.053.456,60	\$ 129.093.546,86	\$ 102.538.651,90	\$ 89.403.047,94	\$ 73.958.041,77	\$ 73.958.041,77
Descripción	Fórmula	SION			SAN GABRIEL		
		Semana 4	Semana 8	Semana 12	Semana 3	Semana 6	Semana 9
Varianza del costo (CV)	CV: EV - AC	CV > 0	CV > 0	CV > 0	CV > 0	CV > 0	CV > 0
Varianza del cronograma (SV)	SV: EV - PV	SV > 0	SV > 0	SV > 0	SV > 0	SV > 0	SV > 0
Índice de desempeño del costo (CPI)	CPI: EV/AC	< 1	< 1	> 1	> 1	> 1	> 1
Índice de desempeño del cronograma (SPI)	SPI: EV/PV	< 1	< 1	< 1	< 1	> 1	> 1

cronograma (SPI)							
Estimación a la terminación del proyecto (EAC)	BAC/CPI	\$ 69.433.005,24	\$ 76.396.711,84	\$ 77.752.538,37	\$ 73.958.041,78	\$ 73.958.041,78	\$ 73.941.730,12
		SION			SAN GABRIEL		
Descripción	Fórmula	Semana 4	Semana 8	Semana 12	Semana 3	Semana 6	Semana 9
Varianza del costo (CV)	CV: EV - AC	BUENO	BUENO	BUENO	BUENO	BUENO	BUENO
Varianza del cronograma (SV)	SV: EV - PV	ATRASADO	ATRASADO	ADELANTADO	ADELANTADO	ADELANTADO	ADELANTADO
Índice de desempeño del costo (CPI)	CPI: EV/AC	INEFICIENTE	INEFICIENTE	EFICIENTE	EFICIENTE	EFICIENTE	EFICIENTE
Índice de desempeño del cronograma (SPI)	SPI: EV/PV	ATRASADO	ATRASADO	ATRASADO	ATRASADO	ADELANTADO	ADELANTADO
Estimación a la terminación del proyecto (EAC)	BAC/CPI	\$ 69.433.005,24	\$ 76.396.711,84	\$ 77.752.538,37	\$ 73.958.041,78	\$ 73.958.041,78	\$ 73.941.730,12

4. CONCLUSIONES

En Sion, se observa un adelanto progresivo, donde el índice CPI parte de un valor inferior a 1 (semana 4) y alcanza 1.25 en la semana 12. Esto nos muestra que el control de costos fue inicialmente frágil, pero se logró estabilizar con el tiempo. San Gabriel mantiene un CPI de 1.25 de forma constante desde el inicio del análisis (semana 3 hasta la 9), lo cual indica una planificación y ejecución eficiente desde las primeras fases del proyecto. Ambos proyectos son eficientes económicamente, pero San Gabriel demuestra un control preventivo y estructurado, mientras que Sion aplicó correctivos sobre la marcha para mejorar su rendimiento económico.

El proyecto San Gabriel desde la semana 3 hasta la semana 9, presenta valores positivos en CV. Esto indica que se ha logrado realizar más trabajo del esperado con menos gasto del planeado, lo que indica un reflejo de eficiencia presupuestal. El CPI, constante en 1.25, ampara esta afirmación e indica una ejecución eficaz en cuanto a costos. Referente al control de costos, el proyecto Sion durante las semanas analizadas (4, 8 y 12), muestra un avance positivo en términos de control de costos. La varianza del costo (CV) permanece positiva en todas las semanas, lo que indica que el proyecto ha gastado menos de lo esperado para el trabajo realmente ejecutado.

San Gabriel presenta valores positivos y $SPI > 1$ en todos los cortes, o que significa que hay una ejecución adelantada al cronograma planeado. Esta consistencia sugiere una adecuada planificación, por temas de la metodología aplicada, buena coordinación frente a los trabajos y buen uso de los recursos. Sion refleja una situación crítica, con SV negativo y SPI por debajo de 1 en todas las semanas, incluso tan bajo como 0.06 en la semana 12. Esto indica que el proyecto a acumulado un retraso considerable, colocando en riesgo el cumplimiento de los plazos establecidos.

En San Gabriel, la EAC se mantiene estable a lo largo del tiempo. Lo que indica eficiencia, sin desviaciones relevantes, ni costos ni en tiempo, lo que da confianza en las proyecciones finales. En Sion, la EAC muestra una reducción progresiva. Esta disminución puede estar relacionada con el bajo avance físico (menor EV), por lo que debe interpretarse con cautela.

5. AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradecemos a la vida (Dios) por permitirnos llegar a la recta final de esta investigación académica para la obtención de nuestro anhelado título profesional y aporte de conocimientos para futuros colegas de la universidad y externos. También, queremos agradecer a los diferentes docentes que de alguna u otra manera aportaron ideas, guías, complementos y retos que mejoraron esta investigación; así, nombramos algunas personas que nos aportaron en nuestro camino, como Esteban López – Representante legal de Interfachadas Mantenimiento SAS y Ing. Carlos Carvajal – Asesor externo e interventor de fachadas. Por último, y no menos importante a nuestras familias quienes fueron los pilares de fe para la batalla que libramos día a día para no perecer en la búsqueda de nuestros sueños.

6. REFERENCIAS

CAMACOL, 2020. Estrategia Nacional BIM 2020 - 2026.

Resolución 620 del 2008. Artículo 2, Método de capitalización de rentas o ingresos.

Pumasupa (16 de noviembre del 2022). BIM en la operación y mantenimiento de un activo construido (BIM 7D). <https://konstruedu.com/es/blog/bim-en-la-operacion-y-mantenimiento-de-un-activo-construido-bim-7d>.

Ley 675 de 2001. Artículo 3, Definiciones: coeficientes de copropiedad.

Gutiérrez-Bucheli & Luis Ponz-Tienda, 2018. BIM para el mantenimiento: más planeación menos sobrecostos.

Albarelo, Gutierrez (2016). BIM para el mantenimiento: más planeación menos sobrecostos= BIM for maintenance: more planning less cost overruns.

PROPUESTA DE SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA LLUVIAS EN VIVIENDA RESIDENCIAL DEL MUNICIPIO DE MEDELLÍN

Yuliana Andrea Mora Chavarría¹, Luisa Fernanda Idárraga Valencia¹, Anderson Steven García², Joan Amir Arroyave Rojas²

¹ Semillero de Investigación en Ciencias y Tecnología de la Construcción SITEC, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, ymora@est.colmayor.edu.co, andersonu@est.colmayor.edu.co, lida@est.colmayor.edu.co

² Grupo de Investigación Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, joan.arroyave@colmayor.edu.co

Palabras clave: Agua lluvia, captación, sostenibilidad.

1. INTRODUCCIÓN

La implementación de sistemas de recolección de agua de lluvia en viviendas residenciales implica la instalación de infraestructura adecuada como techos, canaletas, filtros y tanques de almacenamiento (Gómez & Pérez, 2017). Teóricamente, este tipo de sistemas se apoya en principios de sostenibilidad, eficiencia en el uso del agua y minimización del impacto ambiental, abordando tanto la escasez de agua como la gestión de aguas pluviales (Ríos, 2019). Según diversos estudios, el aprovechamiento de este no solo contribuye a la reducción de la demanda de agua potable, sino también a la prevención de inundaciones urbanas, dado que disminuye la carga de las redes de drenaje (Martínez & Torres, 2020). Por lo tanto, se resalta la importancia de abordar la captación del agua lluvia como una solución efectiva y accesible para mejorar la gestión hídrica y fomentar la sostenibilidad ambiental en Medellín.

La captación de agua de lluvia en viviendas residenciales ha revelado una creciente motivación por la sostenibilidad y la gestión eficiente de los recursos hídricos en entornos urbanos; varios estudios como los de Rodríguez et al. (2017) y González & García (2019), han demostrado la viabilidad de estos sistemas en áreas con alta precipitación, destacando su potencial para reducir la presión sobre las redes de agua potable; sin embargo, aunque los sistemas de captación de agua de lluvia han sido ampliamente investigados en zonas rurales y en otros contextos, existen pocos estudios que profundicen en su aplicación específica en viviendas urbanas en Medellín. En este sentido, los estudios previos tienden a centrarse en aspectos técnicos, como el diseño de los sistemas de recolección y almacenamiento, dejando de lado aspectos sociales y económicos que podrían influir en la adopción de estos sistemas a nivel residencial (Jiménez & Sánchez, 2018); además, algunos trabajos han identificado que la falta de normativas claras y de incentivos para la implementación de estos sistemas en ciudades intermedias como Medellín constituye una barrera significativa (Torres & Castillo, 2020); por lo tanto, el vacío en el conocimiento se encuentra en la falta de estudios contextuales que aborden de manera integral los factores técnicos, sociales y normativos, lo que plantea una oportunidad para la investigación en el diseño e implementación de sistemas de captación de agua de lluvia en viviendas residenciales.

La investigación sobre la captación de agua de lluvia en viviendas residenciales del municipio de Medellín se justifica ante el vacío de conocimiento identificado en estudios previos, que han abordado principalmente los aspectos técnicos de estos sistemas en contextos rurales y no han profundizado en su aplicación en áreas urbanas intermedias; este vacío es especialmente

relevante en Medellín, una ciudad con un clima predominantemente lluvioso (IDEAM, S.F), lo que presenta una oportunidad única para optimizar el uso del recurso hídrico y reducir la presión sobre los sistemas de agua potable; Además, los estudios previos han dejado de lado factores sociales, económicos y normativos que podrían influir en la aceptación e implementación de sistemas de captación en viviendas residenciales; abordar esta problemática contribuirá al desarrollo de modelos más integrales que consideren tanto los aspectos técnicos como los socioeconómicos, lo que hará más viable la adopción de estas tecnologías en el contexto urbano de Medellín. Los beneficios de esta investigación son múltiples, tanto a nivel teórico como práctico; A nivel teórico, se espera ampliar el conocimiento sobre la implementación de sistemas de captación de agua de lluvia en entornos urbanos, proporcionando datos específicos sobre las necesidades y retos de Medellín. A nivel práctico, la investigación podría fomentar políticas públicas que promuevan la sostenibilidad hídrica, mejorar la calidad de vida de los residentes y reducir los impactos negativos del cambio climático.

2. METODOLOGÍA

Para desarrollar la propuesta planteada del sistema de captación de agua lluvia, se analizaron los registros de consumo de agua potable de la vivienda en los últimos 12 meses, los cuales fueron suministrados por los datos históricos de la factura emitida por la entidad prestadora de servicios públicos de la ciudad de Medellín (EPM), adicionalmente se llevó a cabo una revisión de la normativa técnica nacional sobre captación de agua lluvia; seguidamente, se continuó con una fase de recolección de datos técnicos en donde se incluyen, planimetrías, área aferente de la cubierta, y datos relevantes de la zona nororiental de Medellín donde se encuentra ubicada la vivienda de estudio; esta fase incluyó la recopilación de los índices de pluviosidad del sitio de manera mensual, y el caudal correspondiente que permitió determinar la capacidad de captación de agua lluvia y el posible suministro de volumen de agua que satisfaga las necesidades de la vivienda; finalmente se realizó un análisis económico para calcular los ahorros que podrían generarse al implementar el sistema de captación de aguas lluvias teniendo presente el costo por m3 de agua potable para el estrato socioeconómico de la vivienda de estrato 1. (ver Figura 1).

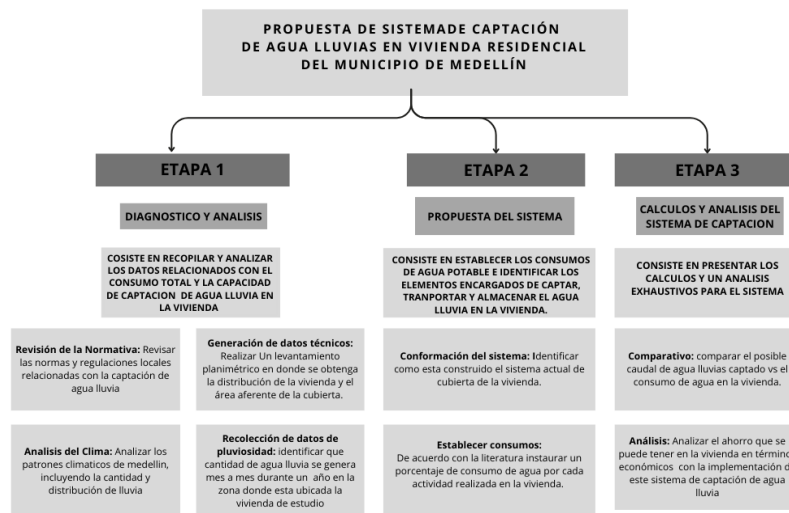


Figura 50. Diagrama metodológico.

2.1 Diagnóstico y análisis

Se identificaron las características geográficas, climáticas y socioeconómicas de la ciudad de Medellín, ubicada en una zona con una precipitación promedio de 246 mm/mes, esta zona presenta condiciones ideales para la recolección y almacenamiento del agua lluvia; Este estudio busca proponer un sistema de captación de agua lluvia, con el fin de disminuir la dependencia del agua potable de la red pública, contribuyendo al ahorro económico de las familias tanto en la factura de abasto como en la de alcantarillado; El diagnóstico inicial incluyó la evaluación del volumen de lluvia anual en la región y las necesidades de consumo de agua en la vivienda en cuestión.

2.2 Propuesta del sistema

Al proponer un sistema de captación de agua lluvia, se busca plantear un mecanismo que permita recolectar, transportar y almacenar de manera eficiente y sostenible el agua lluvia; se tuvo en cuenta la superficie de captación sobre la que se va a recolectar el agua, las canoas y bajantes que son los conductos que llevan el agua captada hasta el sistema de almacenamiento ya sea un tanque o una cisterna. Posteriormente el recurso captado pasa a ser distribuido a través de una red de abasto alternativa con derivaciones hacia el sanitario, la zona de lavado de ropa de la vivienda, limpieza del hogar y la válvula de riego plantas.

2.3 Análisis y cálculos del sistema

Los análisis y cálculos de este sistema consisten en evaluar y determinar los parámetros técnicos y operativos del sistema para garantizar su eficiencia y eficacia; se realizó un cálculo a la superficie de captación determinando el área total de la superficie que recolecta el agua (64.4 m²); se evaluó la pendiente y la forma de la superficie para determinar la velocidad y la dirección del flujo de agua; se analizó el volumen del agua lluvia utilizando datos climáticos y de precipitación, se examina la intensidad y frecuencia de las lluvias para así determinar la capacidad del sistema para manejar diferentes escenarios de precipitación; se establece el volumen total del almacenamiento necesario para satisfacer la demanda de agua durante los periodos de sequía o baja precipitación; se proyectó la demanda de agua para diferentes usos y se analiza la capacidad del sistema de distribución para determinar si es suficiente para abastecer el agua recolectada a los puntos de uso; se analiza la eficiencia del sistema para determinar si es capaz de recolectar y reservar el agua de manera efectiva; además, es fundamental analizar los costos de abastecimiento y alcantarillado suministrados por la entidad prestadora de servicios públicos y generar un comparativo en donde se evidencie el ahorro económico generado por el sistema.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis de captación y consumo

En la Tabla 1 se presenta los resultados de la captación durante el año 2023 para la zona de estudio de proyecto, ubicada en la parte nororiental de Medellín. Se observa que para el mes de enero la captación de agua tuvo un cumplimiento del 95% del objetivo, interpretándose que se captaron casi todas las unidades requeridas, aunque con un pequeño déficit; En el resto de año entre febrero y diciembre de 2023, se tuvo una captación entre el (116%) y el (223%), esta se mantuvo consistente por encima de la demanda de la vivienda, dando así un cumplimiento superior al (100%) ver en (tabla 1). En el mes de febrero se indicó que tuvo un 116% de captación, y en el mes de abril seguido del mes de mayo, se indica que obtuvo el doble de captación

esperado, obteniendo (23%) más de captación de agua lluvia, Esto significa que se captó un promedio de (159%) de agua lluvia en todo el año 2023, de acuerdo con los datos de precipitación reportados por el instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (Ideam,2023). Lo anterior indica que se puede captar y recolectar agua lluvia por encima de la demanda mensual de la vivienda; por lo tanto, se puede plantear que la misma sería autosuficiente en sus consumos mensuales, toda vez que el agua lluvia satisface la demanda determinada. En la Tabla 1 y la Figura 2 se muestra la comparación entre el volumen disponible (m^3/mes) y el consumo (m^3/mes) en la vivienda a lo largo del año 2023; este análisis es clave para evaluar la viabilidad del proyecto sobre el sistema de captación en viviendas de Medellín, nos muestra que el caudal tiene una variación considerable ya que en los meses con mayores valores fueron el mes de abril con ($22,8 m^3$), mayo con ($22,3 m^3$) y octubre con ($20,6 m^3$). En todos los meses el volumen se mostró superior al consumo, lo que indica un excedente potencial de agua que podría ser aprovechado para diferentes usos en la vivienda. El consumo de la vivienda mensual en el año 2023 fue constante $10m^3$ debido a que de acuerdo con el registro histórico de consumos de la factura de Empresas Públicas de Medellín (EPM), sin tener variaciones significativas por cada temporada del año; la estabilidad en el consumo puede deberse a que la vivienda tiene un número fijo constante de habitantes y hábitos de uso probablemente estables; se podría estimar que un consumo promedio por persona/día es de 166 litros, lo que supera la dotación recomendada por el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS,2017) de 140 litros por persona al día, implica que hay 26 litros extra por persona al día lo cual indica ineficiencias en el uso, pérdidas en el sistema o una falta de medidas para el ahorro, Puede deberse a hábitos de consumo ineficientes, fugas internas, o usos no domésticos que no están separados del consumo residencial (lavado de autos, riego de jardines, etc.

Tabla 24. Análisis de captación y consumo.

Mes	Precipitación (mm/mes)	Precipitación en (m/mes)	Área cubierta (m ²)	Caudal (m ³ /mes)	Consumo (m ³ /mes)	% de cumplimiento
Enero	147	0.1	64.4	9.5	10	95%
Febrero	180	0.2	64.4	11.6	10	116%
Marzo	277	0.3	64.4	17.8	10	178%
Abril	347	0.3	64.4	22.3	10	223%
Mayo	346	0.3	64.4	22.3	10	223%
Junio	216	0.2	64.4	13.9	10	139%
Julio	178	0.2	64.4	11.5	10	115%
Agosto	184	0.2	64.4	11.8	10	118%
Septiembre	255	0.3	64.4	16.4	10	164%
Octubre	321	0.3	64.4	20.7	10	207%
Noviembre	304	0.3	64.4	19.6	10	196%
Diciembre	203	0.2	64.4	13.1	10	131%

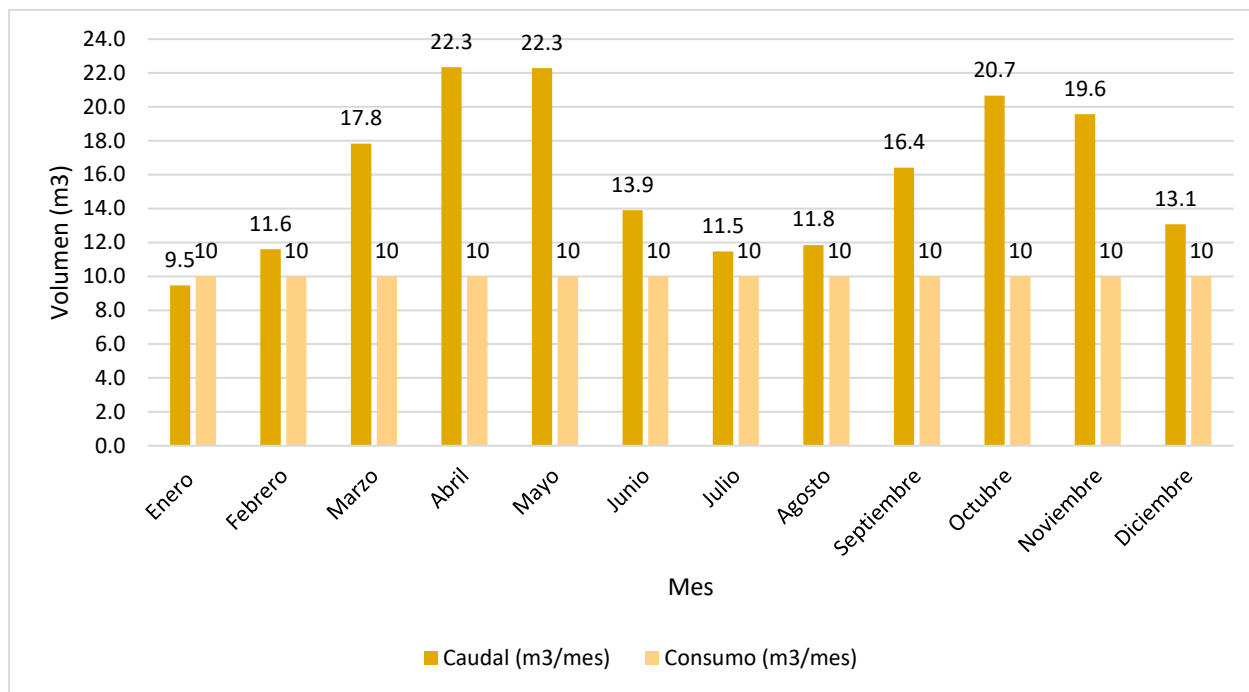


Figura 51. Análisis de captación y consumo.

En la Tabla 2 se presenta un panorama detallado del consumo de agua en diferentes actividades de la vida cotidiana; el mayor consumo proviene del aseo personal (36%) y de las descargas del inodoro (18%), el (54%) del agua se usa para actividades donde el agua lluvia podría sustituir el agua potable como (descargas de sanitarios, limpieza del hogar, y riego de plantas), (Rong Cai, 2007) con estos datos se respalda la viabilidad de un sistema de captación de agua lluvia en la vivienda, ya que permite un uso más eficiente del recurso hídrico. Esta tabla nos muestra el consumo promedio de agua por habitante día, donde las actividades que están demarcadas suman un consumo total de un 58%, pero en realidad solo el 46% estaría siendo reemplazado por fuentes no potables como el agua lluvia (Arias-Monsalve et al., 2021). Aunque el potencial técnico sería hasta el 58% de consumo diario se estaría aprovechando solo un 46%, lo cual indica un uso eficiente lo que significa que 76.36 litros diarios por habitante (46% de 166L) estarían siendo abastecidos por agua lluvia, el resto 89.64 litros siguen dependiendo del agua potable.

Tabla 25 Consumo en vivienda.

ACTIVIDAD	Consumo (L/Hab/día)	% Del consumo
DUCHA Y ASEO PERSONAL	60	36%
DESCARGA INODORO	30	18%
LAVADO DE ROPA	25	15%
COCINA Y LAVADO DE PLATOS	20	12%
LIMPIEZA DEL HOGAR	11	7%
RIEGO DE PLANTAS	10	6%
OTROS USOS	10	6%
TOTAL	166	100%

3.2 Análisis económico

En la Tabla 3 se resumen los resultados correspondientes a un año de consumo constante de agua de 10m³ mensuales, lo que nos da como resultado un consumo total anual de 120m³. Las tarifas del de agua y alcantarillado varían ligeramente con un promedio de \$3.269 por m³. El costo total anual sin aplicar las medidas de ahorro fue de \$392.254. sin embargo, mediante la implementación de sistema de captación de agua lluvias se lograría reemplazar el 46% del agua potable lo cual se lograría un ahorro acumulado de \$180.437. este ahorro representa una reducción del 46% en la facturación del gasto mensual de agua, lo que traduce que el costo final es de \$211.817, un costo significativamente inferior al monto inicial. También se puede evidenciar que los meses con las tarifas más altas (junio, noviembre y diciembre), el ahorro fue más notorio ya que superaría los \$15.439 de ahorro mensual con la implementación de la captación de agua lluvia. Lo que se traduce en una disminución de la cantidad de agua que se vierte en el sistema de alcantarillado, estos ahorros no solo benefician a la comunidad, sino que también contribuyen a la conservación del recurso hídrico. La captación de aguas lluvias es una forma de ayudar al medio ambiente; al recoger y almacenar el agua de lluvia, se reduce la cantidad de agua que se vierte en las calles, ríos y la producción de químicos utilizados en su proceso de potabilización, lo que ayuda a mantener las fuentes hídricas limpias, saludables y renovables. El estudio del sistema de aprovechamiento de agua lluvia de acuerdo con la Tabla 2 y la Figura 3, genera ahorros significativos en la factura de servicios públicos; se logra un ahorro de \$211.817 al año en el acueducto, lo que representa una reducción importante en el consumo de agua potable del acueducto. Además, se ha obtenido un ahorro de \$180.437 en el alcantarillado, lo que se traduce en una disminución de la cantidad de agua que se vierte en el sistema de alcantarillado, estos ahorros no solo benefician a la comunidad, sino que también contribuyen a la conservación del recurso hídrico asociado a las fuentes de agua de donde proviene el agua que se potabiliza en la ciudad de Medellín.

Tabla 26. Análisis económico de la captación de agua lluvia.

Mes	Consumo (m ³)	Tarifa agua + alcantarillado 0-13 (\$/m ³)	Total (\$)	Porcentaje de agua potable reemplazada (%)	Ahorro (\$) total, a pagar (\$)
Enero	10	\$ 3,151	\$ 31,513	46.00%	\$ 14,496
Febrero	10	\$ 3,253	\$ 32,529	46.00%	\$ 14,963
Marzo	10	\$ 3,253	\$ 32,529	46.00%	\$ 14,963
Abril	10	\$ 3,253	\$ 32,529	46.00%	\$ 14,963
Mayo	10	\$ 3,253	\$ 32,529	46.00%	\$ 14,963
Junio	10	\$ 3,356	\$ 33,564	46.00%	\$ 15,439
Julio	10	\$ 3,272	\$ 32,716	46.00%	\$ 15,050
Agosto	10	\$ 3,272	\$ 32,716	46.00%	\$ 15,050
Septiembre	10	\$ 3,272	\$ 32,716	46.00%	\$ 15,050
Octubre	10	\$ 3,272	\$ 32,719	46.00%	\$ 15,051
Noviembre	10	\$ 3,310	\$ 33,097	46.00%	\$ 15,225
Diciembre	10	\$ 3,310	\$ 33,097	46.00%	\$ 15,225
Total, año	120	\$ 3,269	\$ 392,254	46.00%	\$ 180,437
					\$ 211,817

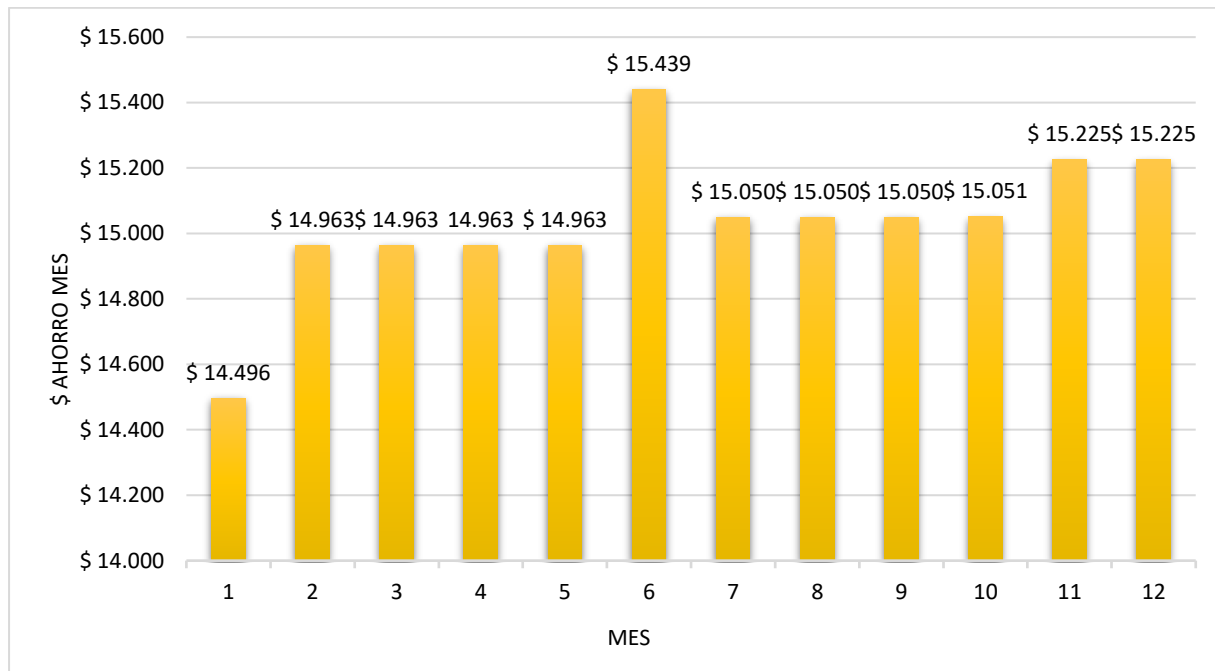


Figura 52. Análisis económico de la captación de agua lluvia.

4. CONCLUSIONES

A partir del análisis de los datos recolectados a lo largo de este estudio, se puede evidenciar que la vivienda objeto de análisis cuenta con las características ideas para reemplazar hasta un 100% del agua utilizada en actividades diferentes a la preparación de alimentos dependiendo de la frecuencia de las precipitaciones en el mes, ya que los índices de pluviosidad en la zona y el área aferente determinada edificación dan como resultado un caudal en m³/mes superior al consumo de la residencia.

Con base a los resultados obtenidos, se confirma que la familia propietaria de la vivienda puede llegar a mejorar su calidad de vida gracias a la reducción en el consumo de agua potable y a la disminución de agua vertida al alcantarillado; esta disminución de agua potable se ve reflejada en el precio a pagar en la factura de servicios públicos de cada mes y adicionalmente este decrecimiento en el consumo de agua potable impacta de manera positiva a la conservación de los ecosistemas, desarrollo de las industrias, mantenimiento de la infraestructura urbana, estrés hídrico y a suplir la demanda generada por el crecimiento poblacional.

Los datos generados y analizados a lo largo de esta investigación permitieron comprobar que la propuesta presentada puede pasar a una fase de diseño en donde factores como la ubicación del tanque de almacenamiento, localización de equipos, ruta de la red de suministro alternativa, valor del proyecto, retorno de inversión, decibeles generados por bombes y afectaciones arquitectónicas generadas a la residencia deben ser evaluados y así llegar a una etapa de implementación.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos profundamente a todas las personas que han contribuido a la realización de este proyecto de investigación. En primer lugar, queremos expresar el más sincero agradecimiento a

los docentes Joan Amir Arroyave Rojas, María Alejandra Rico Pérez y Alexander Méndez Rincón, quienes nos han guiado y apoyado durante todo el proceso de nuestra investigación. Su experiencia y conocimiento han sido fundamentales para el éxito de este proyecto. Finalmente queremos agradecer a nuestra familia por su paciencia y apoyo durante todo el proceso de investigación, en especial a la familia García, por haber puesto a nuestra disposición su vivienda para llevar a cabo nuestra investigación.

6. REFERENCIAS

- Gómez, A., & Pérez, R. (2017). Sistemas de captación de aguas lluvias: Diseño e implementación . Editorial Universitaria.
- Jiménez, P., & Sánchez, R. (2018). Implementación de sistemas de recolección de aguas lluvias: Retos y oportunidades . mi
- Rodríguez, F., Pérez, L. y Morales, D. (2017). El aprovechamiento del agua de lluvia en zonas urbanas: Un estudio de caso en Bogotá .
- Torres, J. y Castillo, M. (2020). Normativas y políticas públicas en la captación de aguas lluvias en Medellín .
- Cai, R., Kong, L., Bai, Y., Liu, J., Hu, M., & Bai, X. (2024). Hierarchy Analysis of Water Demand Among Hotel Consumers for Water Appliances. Sustainability.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2023). Boletín climatológico mensual. <https://www.ideam.gov.co/>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2017). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS 2017. <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/documentos/2022-06/ras-2017-vf.pdf>
- Empresas Públicas de Medellín (EPM). (2010.). Página principal de EPM. Recuperado de <https://www.epm.com.co>
- Gómez, L., Martínez, R., & Salazar, D. (2018). Estudio de la captación de aguas lluvias en Medellín: Implicaciones y beneficios. Ingeniería Hidráulica, 45(4), 150-162.
- Gutiérrez, J., Vargas, E., & Gómez, L. (2018). Evaluación de sistemas sostenibles para la gestión del agua en áreas urbanas. Revista de Ingenierías Ambientales, 14(3), 245-258.
- Martínez, A., Rodríguez, J., & Sánchez, L. (2021). Diseño e implementación de sistemas de recolección de aguas lluvias: Casos de estudio en Medellín. Revista Internacional de Ingeniería, 28(3), 120-135.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2015). Reglamento Técnico de Instalaciones Hidráulicas en Edificaciones. Recuperado de <https://www.minvivienda.gov.co>
- Nathalia Palacio Castañeda. (2010). Propuesta de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia, como alternativa para el ahorro de agua potable, en la institución educativa maría auxiliadora de caldas, Antioquia; Medellín
- Castillo, J., & López, P. (2022). Impacto de la captación de agua lluvia en el ahorro de agua potable en áreas urbanas. Revista de Ingeniería y Tecnología, 15(2), 54-63.

ANÁLISIS DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICA, ECONÓMICA Y AMBIENTAL DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO MODULAR DE VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL (VIS) EN COLOMBIA

Kelly Tatiana Arredondo Montoya¹; Sergio Andrés Arboleda López¹

¹ Grupo de Investigación Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, ktarredondo@est.colmayor.edu.co, sergio.arboleda@colmayor.edu.co

Palabras clave: Prefactibilidad, Vivienda de Interés Social (VIS), Construcción modular.

1. INTRODUCCIÓN

Un sistema constructivo es un conjunto de métodos, procesos, equipos y materiales que se utilizan para desarrollar y construir un proyecto de infraestructura con el fin de dar cumplimiento a sus necesidades estructurales, funcionales, ambientales y económicas (Monjo Carrió, 2005). El sistema constructivo tradicional se basa principalmente en la fabricación y ejecución de actividades in situ, lo que significa una mayor dependencia de la mano de obra, la variabilidad en las condiciones del entorno y una secuencia de actividades y procesos con resultados particulares en tiempo, costo, producción de residuos y calidad de un proyecto (Steven & Riaño, 2017). Este método, aunque ampliamente adoptado, no es lo suficientemente práctico en mayor medida en proyectos de Vivienda de Interés Social (VIS), en donde la eficiencia y el control de recursos juegan un papel crucial. Por otro lado, el sistema constructivo modular, Por otro lado, el sistema de construcción modular permite que el proceso de producción se transfiera en cierta medida a los sistemas industriales de control, promueve la estandarización, alta precisión, calidad, así como la reducción de residuos de los elementos, y reduce el tiempo y la duración de un proyecto y asegura más calidad (De La Puente Molina et al., 2018). Sin embargo, su implementación de se ve condicionada por factores técnicos y logísticos, incluida la disponibilidad de plantas de producción, el transporte especializado, la coordinación entre fabricación de elementos y ensamblaje in situ, entre otros. Son estos aspectos los que prueban su viabilidad en el entorno local y su posible uso en proyectos de infraestructura (Pineda Otálvaro & Gómez Arroyave, 2024).

La literatura reciente sobre construcción modular y prefabricada es bastante persuasiva en términos de sus beneficios potenciales y limitaciones. Desde la perspectiva global, se ha demostrado que ciertos proyectos de infraestructura, por ejemplo, hospitales y edificios residenciales modulares, se han completado mucho más rápido y con mayor eficiencia comparados con los sistemas de construcción tradicional, con tiempos de ejecución totales reducidos entre un 30% y un 50% y ahorros de costos de entre un 10% y un 20% dependiendo del grado de industrialización y el tipo de construcción (Thai et al., 2020). Sin embargo, también enfrentaron dificultades para transportar los módulos, la falta de flexibilidad en el diseño y la falta de experiencia de los contratistas (Chen, 2023). En Colombia, un estudio comparativo de (Burgos, 2023) analizó los sistemas tradicionales y modulares y mostró que el diseño modular ahorró un 25% en reprocesos y reclamaciones postventa porque hubo control de calidad en planta, pero requirió la construcción de infraestructura con una inversión de hasta un 15% más y una demora en la curva de aprendizaje de hasta un 10% durante el primer proyecto. (Mora Sánchez, 2024) analizó factores críticos para la implementación de la prefabricación, encontrando que la implementación depende de variables como la logística, la normativa vigente y la capacitación de la mano de obra, lo que permite concluir que la viabilidad de estos sistemas no está todavía

comprobada completamente.

Esta investigación está impulsada por la necesidad de llenar un vacío de conocimiento en la literatura científica, en la que se puedan probar y verificar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la construcción modular en Vivienda de Interés Social (VIS) en proyectos dentro del escenario de construcción colombiano. Aunque la discusión teórica y la revisión conceptual muestra que los sistemas constructivos modulares reducen los tiempos de ejecución en obra, disminuyen los desperdicios y mejoran los estándares de calidad, la evidencia local sigue siendo limitada y poco sistematizada (Soto Ardila, 2022). Para estos tipos de soluciones de construcción aún quedan incertidumbres sobre su desempeño estructural y su compatibilidad con la normatividad vigente, el costo de la logística en entornos urbanos y su aceptación por parte de los usuarios y del mercado inmobiliario. Este estudio ayudará a identificar cómo la construcción modular puede ser viable aplicando una dimensión técnica, económica y ambiental de datos de los proyectos, obteniendo hallazgos de investigación valiosos. Se espera que el resultado anticipado guíe las opciones de planificación e implementación para proyectos de vivienda, así como para estrategias comerciales y arreglos de ingresos e inversión del sector de vivienda VIS. En conjunto, se espera ofrecer evidencia científica y práctica para ayudar a hacer la transición a una construcción modular competitiva y accesible compatible con los objetivos de vivienda digna y sostenible en Colombia.

2. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló con un alcance descriptivo, basado en un enfoque cualitativo. La Figura 1 muestra el diagrama metodológico con las etapas que estructuran la prefactibilidad del sistema de construcción modular para vivienda VIS. El esquema se organiza en cuatro componentes principales, el primero, análisis del entorno, donde se aplica la matriz PESTEL para evaluar factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ambientales y legales; el segundo, análisis técnico, que identifica los proveedores locales, las soluciones modulares disponibles y verifica su compatibilidad con la NSR-10 y la normatividad local; el tercero y el cuarto, se evalúan mediante un caso hipotético planteado para comparar aspectos de costos y tiempos de ejecución (análisis económico), y de generación de residuos RCD (análisis ambiental), entre un sistema de construcción tradicional y un sistema de construcción modular.

2.1 Análisis del entorno

Esta etapa se llevó a cabo mediante la aplicación de la metodología PESTEL, con el fin de identificar los factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ambientales y legales que afectan la viabilidad del sistema de construcción modular aplicado a proyectos de Vivienda de Interés Social (VIS) en Colombia. Al analizar datos de fuentes oficiales (Ministerio de Vivienda, DANE, Camacol), se evaluaron las condiciones actuales del sector y los desafíos clave, obstáculos y oportunidades para la implementación en el contexto local.

Tener una comprensión del contexto ayudó a entender el impacto de las políticas y regulaciones locales, las condiciones económicas, las tendencias de sostenibilidad, las condiciones sociales y la disponibilidad de soluciones tecnológicas en la prefactibilidad técnica, económica y logística de implementar el sistema de construcción modular.

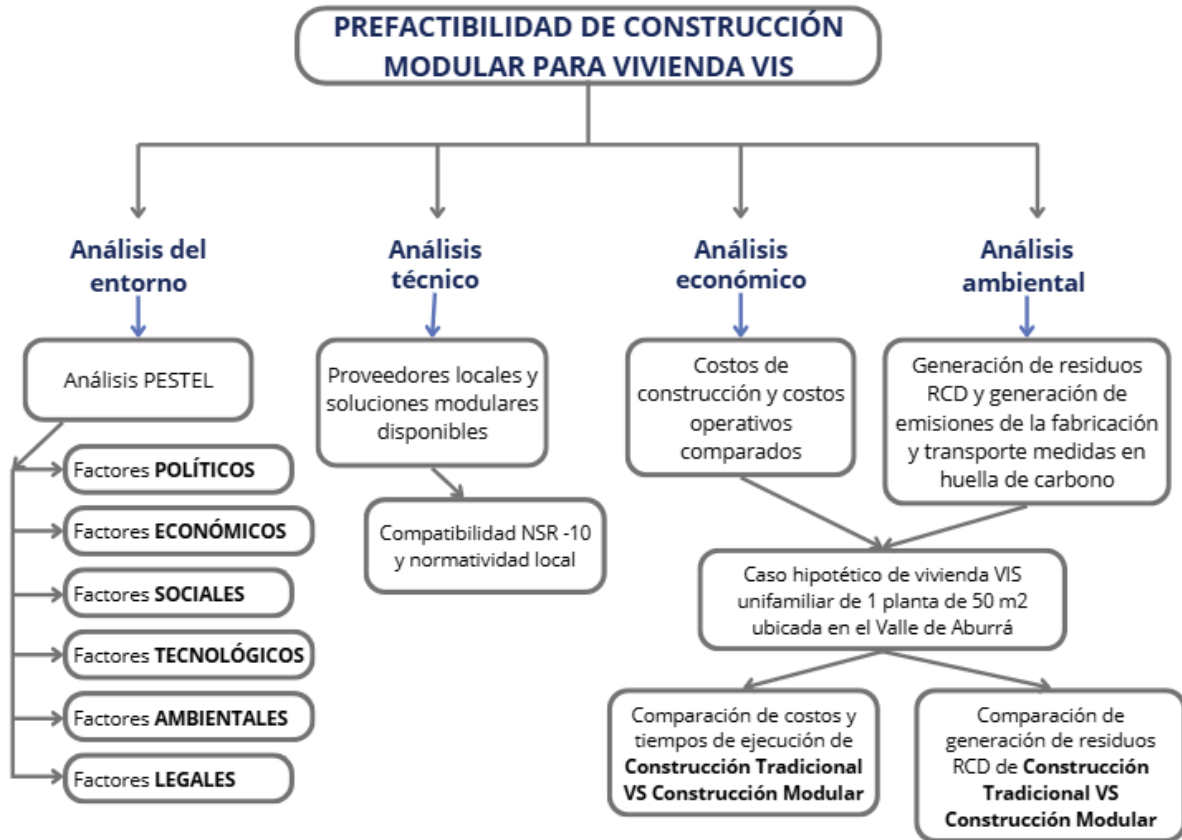


Figura 53 Diagrama metodológico.

2.2 Análisis técnico

La etapa de análisis técnico permitió evaluar la viabilidad constructiva de la construcción modular aplicada a vivienda tipo VIS en Colombia, mediante una identificación de fabricantes y proveedores locales y del tipo de soluciones modulares que ofrecen, para analizar factores como disponibilidad de plantas de producción, tipologías, fichas técnicas y requerimientos especiales en cuanto a maquinaria, sumado a datos técnicos sobre controles de calidad, sistemas de anclajes y uniones y requisitos técnicos importantes para su correcta implementación en construcción de vivienda. Adicionalmente se realizó una revisión documental que incluyó la revisión de la normativa técnica aplicable para los sistemas modulares identificados, que puedan garantizar los estándares de calidad, seguridad y desempeño requeridos en Colombia, partiendo de la NSR-10, teniendo como resultado la verificación de la posible compatibilidad de estos sistemas con la normatividad vigente.

2.3 Análisis económico

Esta etapa tuvo como objetivo evaluar la viabilidad económica del sistema constructivo modular en comparativa con el sistema constructivo tradicional, a través de un caso hipotético de construcción de vivienda de interés social (VIS) en el Valle de Aburrá de 50 m² como área representativa para este segmento. Se compararon los costos relacionados con la inversión (CAPEX), operación (OPEX) y la variable de tiempo de ejecución. Los datos utilizados fueron obtenidos a partir de información de fuentes primarias de mercado, mediante costos y cifras

reportadas en las bases de precios del sector, de las entidades como Camacol y de los estudios más recientes sobre construcción modular en el País. Con esta información se buscaba identificar los ahorros potenciales y establecer las condiciones económicas bajo las cuales el sistema modular puede resultar más competitivo y eficiente para la construcción de vivienda en el contexto de la vivienda VIS en Colombia.

2.4 Análisis ambiental

Esta etapa evaluó los impactos ambientales del sistema constructivo modular aplicado a viviendas VIS en Colombia, mediante el análisis comparativo del caso hipotético planteado para construcción tradicional y construcción modular, enfocándose en generación de residuos RCD. Se analizaron la cantidad y tipo de materiales sobrantes durante los procesos constructivos de sistemas tradicionales y sistemas modulares, y se determinó, para cada caso, la cantidad total de residuos RCD generados y su porcentaje de reutilización o reciclaje. Todos estos datos se calcularon mediante información proveniente de manuales de proveedores, fichas técnicas y estudios de casos en Colombia.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis del entorno

Como se observa en la Tabla 1, el componente político refleja la dependencia de la estabilidad y continuidad de los programas de vivienda y subsidios como Mi Casa Ya, que son esenciales para mantener la demanda en el mercado VIS y debido a la inestabilidad presupuestal, puede representar una amenaza (Ministerio de Vivienda, 2024). Mientras tanto, las políticas públicas que promueven la sostenibilidad y la eficiencia energética crean un entorno favorable para adoptar la construcción modular como una alternativa eficiente e innovadora. Desde el aspecto económico, el aumento de los precios de los materiales y la inflación inhiben las ganancias de la industria de la construcción en general, pero las soluciones modulares ofrecen beneficios en reducción de tiempos de ejecución y control de desperdicios, factores que fortalecen la competitividad y la eficiencia financiera en proyectos VIS (IDEA, 2023). En el ámbito social, el déficit habitacional de más de 1,2 millones de hogares (DANE, 2021) y la inmediatez de la necesidad de soluciones, convierten la construcción modular en una opción oportuna, sin embargo, la percepción cultural de menor calidad o durabilidad de las viviendas prefabricadas sigue siendo una barrera cultural que debe gestionarse mediante validación técnica. En la perspectiva tecnológica, la consolidación de empresas nacionales demuestra la creciente capacidad del país en procesos industrializados (Cámara Colombiana de la Construcción – Camacol, 2024). Sin embargo, la necesidad de soluciones innovadoras no ha disminuido, y el alto capital inicial sigue siendo un desafío. A nivel ambiental, el enfoque hacia la construcción sostenible refuerza la pertinencia de los sistemas modulares, que reducen residuos y emisiones, pero su sostenibilidad depende del uso responsable de materiales y de la gestión de la cadena de valor. Finalmente, en el componente legal, la aplicación de la NSR-10 garantiza la seguridad estructural, pero la falta de guías específicas para construcción modular y las interpretaciones restrictivas de las autoridades locales aún dificultan su implementación a gran escala. Los resultados en conjunto reflejan un entorno con alto potencial técnico y ambiental, pero con limitaciones institucionales, culturales y regulatorias que deben superarse para integrar la prefactibilidad de la construcción modular para vivienda VIS en Colombia.

Tabla 27 Análisis del entorno: PESTEL (Vivienda VIS y construcción modular en Colombia)

Componente	Oportunidad clave	Limitación crítica
POLÍTICO	Subsidios y programas de vivienda: La construcción modular tiene potencial de incorporación en programas VIS estatales para acceder a demanda y financiación. Además del impulso gubernamental a la industrialización del sector construcción.	Inestabilidad: Existe cierta volatilidad administrativa y presupuestal en subsidios de vivienda que pueden afectar la implementación en segmento VIS y la continuidad de incentivos o apoyos necesarios para consolidar la construcción modular en el país.
ECONÓMICO	Eficiencia y ROI: Reducción de tiempos de ejecución (mayor liquidez) haciendo más eficiente la inversión en vivienda VIS.	Presión de costos: Inflación, alza de insumos y alto costo de financiamiento (tasas de interés).
SOCIAL	Mitigación del déficit habitacional: La construcción modular es una solución rápida y escalable para la necesidad de más de 1.2 millones de hogares con déficit cuantitativo de vivienda.	Escepticismo: Existen algunos prejuicios sobre la estética, resistencia y durabilidad de los sistemas modulares, requiriendo validación técnica y comunicación adecuada sobre sus ventajas para asegurar una mejor aceptación.
TECNOLÓGICO	Digitalización: La construcción modular permite integrar tecnologías de diseño digital (BIM), fabricación automatizada y control numérico, lo que mejora la precisión, la estandarización y la eficiencia en los procesos constructivos.	Inversión y dependencia: La construcción modular tiene una alta inversión inicial en plantas de producción y generalmente, una dependencia de insumos importados.
AMBIENTAL	Sostenibilidad: La construcción modular reduce significativamente los residuos de obra RCD y mejora la eficiencia en el uso de materiales, además hay facilidad para obtener certificaciones verdes como EDGE y LEED.	Gestión de recursos: Hay riesgo de presión sobre recursos forestales y sobrecostos por planificación de la cadena ambiental para sistemas constructivos modulares que utilizan materiales alternativos como la madera.
LEGAL	Marco NSR-10: La norma permite la aprobación de sistemas no convencionales, como sistemas de construcción modular, lo que facilita la certificación y validación de este tipo de sistemas para uso en vivienda VIS sin requerir cambios normativos adicionales.	Trámites y restricciones: Interpretaciones restrictivas de normas locales para la construcción modular y que estos sistemas deben someterse a procesos adicionales de evaluación y certificación, lo que puede generar impactos en los tiempos de ejecución.

3.2 Análisis técnico

Según la Tabla 2, el análisis técnico de las soluciones modulares ofrecidas por proveedores como Soluciones Modulares Argos, VIMOB, Kasazul, Woodpecker WPC, ModularARQ y Wood House Colombia, muestra que este tipo de sistemas constructivos pueden ser aplicados en proyectos de Vivienda de Interés Social (VIS) en Colombia, siempre y cuando se cumplan las exigencias de la NSR-10. La norma mencionada establece que cualquier sistema estructural debe asegurar el desempeño adecuado frente a cargas sísmicas, estabilidad y durabilidad. En el caso de los sistemas no convencionales, como los modulares, la norma exige que el fabricante presente cálculos estructurales completos, documentación técnica y ensayos de laboratorio que demuestren el cumplimiento de los requisitos definidos en normas NTC, ASTM u otras

equivalentes (Ministerio de Ambiente, 2010). Cuando el sistema no está explícitamente contemplado en la norma, se requiere una evaluación ante la Comisión Asesora Permanente, que determina su idoneidad y emite las recomendaciones para autorizar su uso. En este contexto, Soluciones Modulares Argos utiliza concreto estructural y refuerzos certificados, lo que facilita su alineación con el Título C de la NSR-10. Por su parte, ModularARQ, al trabajar con sistemas híbridos en concreto y acero galvanizado, también se ajusta de manera directa a los Títulos C y D, apoyándose además en controles de calidad internos realizados en planta y reportados en sus fichas técnicas. Los sistemas livianos como los utilizados por VIMOB y Kasazul deben diseñarse bajo el Título D y el Título A, además de presentar ensayos que acrediten su rigidez lateral y desempeño sísmico. En el caso de Woodpecker WPC y Wood House Colombia, al emplear madera y materiales compuestos, deben cumplir lo dispuesto en el Título E, apoyándose en normas específicas como NTC 6047 y NTC 2500 para validar aspectos de resistencia, durabilidad y comportamiento frente al fuego. El cumplimiento normativo requiere certificar los materiales, realizar una revisión estructural y entregar la documentación técnica que pueda determinar la autoridad competente. Cuando se trate de sistemas no convencionales, se deben evaluar ante la CAP/CETF. Los sistemas en concreto y acero se aprueban con mayor facilidad, mientras los livianos requieren validar desempeño equivalente.

Tabla 28 Proveedores y empresas de construcción modular en Colombia

PROVEEDOR/EMPRESA	TIPO DE SOLUCIÓN MODULAR	MATERIALES PRINCIPALES	MÉTODO CONSTRUCTIVO
Soluciones Modulares ARGOS	Sistema modular volumétrico estructural en concreto prefabricado	Concreto reforzado de alta resistencia	Producción en planta (Cajicá), módulos estructurales completos, transporte y montaje en obra. Cumple estándares industriales de prefabricación.
VIMOB	Sistema modular liviano prefabricado tipo “kit”	Estructura metálica liviana y paneles OSB / madera tratada	Fabricación off-site y ensamblaje en sitio (atornillado). No requiere grúa pesada.
KASAZUL	Sistema volumétrico modular metálico	Estructura de acero galvanizado y muros livianos tipo panel	Prefabricación 60 % en planta, módulos transportables por camión estándar.
WOODPECKER WPC	Sistema modular en WPC (wood-plastic composite)	Compuesto madera-plástico y acero liviano	Prefabricación de paneles tipo “kit”. Ensamblaje manual con conectores.
MODULARARQ	Sistema modular híbrido (panelizado o volumétrico)	Concreto reforzado / acero galvanizado	Fabricación en planta, transporte en paneles o módulos; montaje por grúa o ensamblaje atornillado.
WOOD HOUSE COLOMBIA	Sistema modular liviano sostenible	Madera certificada (pino tratado)	Prefabricado y armado en sitio.

3.3 Análisis económico

Para realizar la comparación económica, se plantea un caso hipotético de una unidad de vivienda VIS de 50 m² unifamiliar de una planta como se observa en la Figura 2 y Figura 3, ubicada en una zona urbana intermedia del Valle de Aburrá. Los sistemas constructivos para comparar se establecieron así:

- Sistema tradicional: estructura en concreto armado y mampostería en bloque de arcilla, con cubierta liviana y acabados básicos.
- Sistema modular: paneles estructurales prefabricados en concreto reforzado, fabricados en planta y ensamblados mediante anclajes metálicos y juntas selladas.



Figura 54 Vista frontal fachada caso hipotético de análisis.



Figura 55 Plano en planta caso hipotético de análisis.

- **Costos base del proyecto:**
 - Costo directo promedio construcción tradicional: \$1.800.000 COP/m²
 - Costo directo promedio construcción modular: \$1.500.000 COP/m²
 - Costos indirectos construcción tradicional: 20% sobre el costo directo
 - Costos indirectos construcción modular: 10% sobre el costo directo
- **Costos financieros:**
 - Tasa de interés anual promedio: 12%
 - Horizonte de análisis: 10 años
 - Tasa de descuento: 6% anual

- **Costos logísticos:**

La planta de fabricación se encuentra a 80 km del sitio del proyecto. Transporte mediante camiones plataforma, dos viajes por vivienda.

- Costo estimado de transporte: \$20.000 COP/km,
- Costo estimado de montaje: \$4.000.000 COP (grúa telescópica).

- **Costos de operación:**

- Tiempo de ejecución construcción tradicional: 4 meses
- Tiempo de ejecución construcción modular: 2 meses
- Costos operativos y de mantenimiento anuales construcción tradicional: 2% del valor total de construcción
- Costos operativos y de mantenimiento anuales construcción modular: 1,5% del valor total de construcción

Como se observa en los resultados de las Tablas 3 y 4, el análisis económico evidencia que el sistema constructivo modular presenta una ventaja económica frente al sistema tradicional, con un ahorro total estimado del 20,57 % en valor presente. Este resultado se debe a que la construcción modular tiene menor costo total de construcción, menor costo financiero relacionado con la reducción del tiempo de ejecución y menores costos de mantenimiento. En conjunto, el sistema modular ofrece mayor eficiencia económica y ahorro sostenido durante la vida útil de la vivienda VIS con estas características. Adicionalmente se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar las variaciones en los factores más influyentes y cómo afectan la diferencia económica entre el sistema modular y el sistema tradicional. Se analizaron tres variables principales, un delta de cambio del $\pm 10\%$ en el costo por m² que modifica el ahorro total entre 11% y 25% respectivamente, un delta de cambio en el tiempo de ejecución de ± 1 mes impacta el ahorro al 16% y 18% respectivamente.

Tabla 29 Análisis de costos iniciales comparados.

	Construcción tradicional		Construcción modular	
Concepto	Costo total		Costo total	Diferencia
Costo directo	\$	90.000.000,00	\$ 75.000.000,00	\$ 15.000.000,00
Costo indirecto	\$	18.000.000,00	\$ 7.500.000,00	\$ 10.500.000,00
Transporte y montaje	\$	-	\$ 7.200.000,00	-\$ 7.200.000,00
TOTAL	\$	108.000.000,00	\$ 89.700.000,00	

$$\text{Costo financiero} = \text{CAPEX} \times \text{tasa anual} \times \frac{\text{meses de ejecución}}{12}$$

$$\text{Valor presente de los costos operativos} = \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}$$

Donde,

- C_t = costo anual de mantenimiento en el año t
- r = tasa de descuento (10%)
- n = número de años del periodo analizado (10 años)

Tabla 30 Análisis de costos financieros y operativos comparados.

Concepto	Construcción tradicional		Construcción modular	
		Costo total		Ahorro
Costo de construcción	\$	108.000.000,00	\$	89.700.000,00
Costo financiero durante construcción	\$	4.320.000,00	\$	1.794.000,00
Costos operativos	\$	2.160.000,00	\$	1.345.500,00
Valor presente costos operativos	\$	13.272.264,95	\$	8.267.515,04
				\$
Costo total presente	\$	125.592.264,95	\$	99.761.515,04
				25.830.749,91

3.4 Análisis ambiental

Para el mismo caso hipotético presentado en el numeral 3.3 se evaluaron las comparaciones entre construcción modular y construcción tradicional en cuanto a generación de residuos de construcción y demolición (RCD). Para los cálculos realizados se tuvo en cuenta que, en el Valle de Aburrá se reporta Índice de generación volumétrica de RCD de aproximadamente $0,12 \text{ m}^3/\text{m}^2$ construido en edificaciones residenciales tradicionales (Área Metropolitana del Valle de Aburrá – AMVA., 2024). Para el sistema modular propuesto, y teniendo en cuenta la información de la literatura disponible, se asume que la generación de residuos es menor debido al menor desperdicio in situ y la fabricación en planta. Se define una reducción del 30% al indicador estimado de generación de RCD para construcción tradicional. La densidad promedio de $1,37 \text{ t}/\text{m}^3$ para los RCD se basa en la información técnica más reciente del AMVA (Área Metropolitana del Valle de Aburrá – AMVA., 2024). Este valor surge de la caracterización que la entidad ha realizado sobre los materiales que suelen aparecer en los escombros de obras en la región y sirve como referencia práctica para calcular y gestionar estos residuos. Según la Tabla 5, el análisis muestra que el sistema constructivo modular reduce 33 % la generación de RCD frente al sistema tradicional, pasando de $0,12 \text{ m}^3/\text{m}^2$ a $0,08 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Para el caso hipotético analizado, de una vivienda VIS de 50 m^2 , esta diferencia representa una disminución $1,8 \text{ m}^3$ de residuos, lo que se traduce en un menor impacto ambiental y menor carga de disposición final de residuos. De manera similar, el índice ponderal de RCD disminuye de $0,16 \text{ t}/\text{m}^2$ a $0,12 \text{ t}/\text{m}^2$, para la construcción modular, lo que refleja una mejor eficiencia en el uso de materiales y una reducción de los desperdicios durante la producción y montaje de los módulos. Estos resultados representan una ventaja en términos ambientales del sistema modular y su alineación con los principios de sostenibilidad y economía circular del sector construcción.

Tabla 31 Índices volumétricos y ponderales de RCD.

Concepto	Unidad	Construcción tradicional	Construcción modular	Diferencia
Índice de generación volumétrica de RCD	m^3/m^2	0,12	0,08	0,04
Volumen de residuos para 50m^2	m^3	6,00	4,20	1,80
Índice ponderal de RCD	t/m^2	0,16	0,12	0,05

4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados de la investigación, se evidencia que el sistema constructivo modular es una opción para la vivienda de interés social con un potencial alto para ser implementado y una prefactibilidad viable, siempre que se gestionen correctamente las condiciones técnicas, económicas, logísticas y regulatorias.

En el componente técnico, las soluciones modulares basadas en concreto prefabricado o soluciones híbridas en concreto y acero, demostraron ser más factibles para cumplir los requisitos de desempeño establecidos en la NSR-10, particularmente cuando se incluyen memorias estructurales, ensayos certificados y controles de calidad internos.

El análisis económico reveló que la construcción modular presentó resultados favorables con respecto a la construcción tradicional. En una vivienda típica VIS de 50 m², la construcción modular trae consigo un ahorro en los costos del 20,57% en valor presente. Esto se debe a que no solo implica menores costos de ejecución, sino que también implica tiempos de construcción sustancialmente reducidos, ahorrando en costos indirectos y presiones financieras sobre el proyecto.

Desde el punto de vista ambiental, el sistema constructivo modular demostró beneficios en cuanto a la cantidad de residuos de construcción y demolición generados, que se redujeron considerablemente en comparación con la construcción tradicional. Se observa que el proceso de industrialización se convertirá en una alternativa más respetuosa con el medio ambiente y corresponderá a las políticas de sostenibilidad del país.

Sin embargo, la viabilidad del sistema constructivo modular, en vista del análisis del entorno, está condicionada por limitaciones para su implementación, como la percepción sobre su durabilidad y estética, problemas relacionados con el transporte de paneles prefabricados y disponibilidad de plantas productivas cercanas a los proyectos, y la falta de directrices regulatorias específicas para su implementación.

En resumen, los resultados sugieren que la construcción modular es factible y aporta ventajas específicas y deseables, sin embargo, para avanzar a la etapa de viabilidad concreta, se necesita realizar una investigación más profunda y desarrollar proyectos piloto mientras se realizan ajustes en el procedimiento logístico y la estrategia de comunicación para aumentar la confianza del mercado.

5. REFERENCIAS

- Área Metropolitana del Valle de Aburrá – AMVA. (2024). Guía regional para la gestión integral de residuos de construcción y demolición (RCD).
- Burgos, P. (2023). EVALUACIÓN A LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO MODULAR EN CONSTRUCCIONES VIS: CASO DE ESTUDIO TOCANCIPÁ.
- Cámara Colombiana de la Construcción – Camacol. (2024). La magia de las viviendas modulares. https://Camacol.Co/Actualidad/Publicaciones/Revista-Urbana/100/Innovacion/La-Magia-de-Las-Viviendas-Modulares?Utm_source=chatgpt.Com.
- Chen, C. (2023). Advantages and barriers of modular construction method in constructing buildings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Smart Infrastructure and Construction*, 176(2), 75–84. <https://doi.org/10.1680/jsmic.22.00017>
- DANE. (2021). Comunicación de prensa: Déficit habitacional 2020 – Encuesta Nacional de Calidad de Vida (ECV). Bogotá: Departamento Administrativo Nacional de Estadística.

- De La Puente Molina, S. E., Espitia Ticora, S. L., & Capera Rodriguez, O. A. (2018). LA ARQUITECTURA Y CONSTRUCCIÓN MODULAR EVALUADA DESDE EL TRIANGULO DE LA TRIPLE RESTRICCIÓN Y APLICADA AL SECTOR EDUCATIVO EN COLOMBIA.
- IDEA. (2023). Boletín sectorial vivienda: persistencia de las presiones inflacionarias en los costos para la construcción VIS. https://www.idea.gov.co/Wp-Content/Uploads/2023/09/Boletin-Sectorial-01-Vivienda.Pdf?Utm_source=chatgpt.Com.
- Ministerio de Ambiente, V. y D. Territorial. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente – NSR-10 (Decreto 926 de 2010). República de Colombia.
- Ministerio de Vivienda, C. y T. (2024). Informe de seguimiento presupuestal FONVIVIENDA (corte 31 de agosto de 2024). https://www.minvivienda.gov.co/Sites/Default/Files/Documentos/Informe-de-Seguimiento-Presupuestal-Fonvivienda.Pdf?Utm_source=chatgpt.Com.
- Monjo Carrió, J. (2005). La evolución de los sistemas constructivos en la edificación. Procedimientos para su industrialización. In *Informes de la Construcción*.
- Mora Sánchez, A. C. (2024). Análisis de factores clave a considerar en la implementación de construcción prefabricada.
- Pineda Otálvaro, P., & Gómez Arroyave, A. (2024). ANÁLISIS DE PREFACTIBILIDAD PARA LA CONSTRUCCIÓN MODULAR DE VIVIENDA DE BAJO COSTO EN MADERA EN ESTADOS UNIDOS.
- Soto Ardila, C. (2022). SISTEMA CONSTRUCTIVO PREFABRICADO (OFF SITE).
- Steven, B., & Riaño, S. (2017). ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE PROCESOS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS SISTEMAS TRADICIONAL Y PREFABRICADO DE LOSAS DE ENTREPISO PARA EDIFICACIONES DE HASTA 4 NIVELES.
- Thai, H. T., Ngo, T., & Uy, B. (2020). A review on modular construction for high-rise buildings. In *Structures* (Vol. 28, pp. 1265–1290). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.070>

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA IMPLEMENTAR BIM EN LA ETAPA CONSTRUCTIVA DE LA ESTRUCTURA DE UN PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN. CASO DE ESTUDIO: JARDÍN INFANTIL BUEN COMIENZO EN EL MACROPROYECTO PARQUES DEL RÍO NORTE EN LA CIUDAD DE MEDELLÍN

Emmanuel Roldán Hernández¹, Alejandra Suárez Henao¹, Sergio Andrés Arboleda López¹

¹ Grupo de Investigación Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, eroldanh@est.colmayor.edu.co, asuarezh@est.colmayor.edu.co, sergio.arboleda@colmayor.edu.co

Palabras clave: Jardín infantil, BIM, guía.

1. INTRODUCCIÓN

El Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de Medellín establece pautas para el desarrollo de macroproyectos orientados a desarrollar áreas estratégicas del territorio con el propósito de lograr el modelo de ciudad deseado (Alcaldía de Medellín, 2014). Dentro de este desafío, se prevén intervenciones a gran escala dirigidas a lograr la equidad territorial, mejorar la calidad de vida de las personas y fortalecer la estructura espacial del entorno. En este contexto, la práctica del urbanismo verde se centra en adaptarse y mitigar los impactos del cambio climático, especialmente a través de la consolidación de áreas protegidas, el uso eficiente de la energía y el desarrollo de redes de espacios verdes públicos dirigidas a mejorar la sostenibilidad urbana, como lo ilustra el macroproyecto Parques del Río Norte (Decreto 1113 de 2023). Adicionalmente, la metodología Building Information Modeling (BIM) constituye un modelo digital colaborativo que permite unir datos de las diferentes áreas que componen un proyecto en un mismo modelo, mejorando la planificación, la construcción y la operación de proyectos (González, 2015). El Jardín Infantil Buen Comienzo en el macroproyecto Parques del Río Norte genera una oportunidad para usar los lineamientos de la Estrategia Nacional BIM 2020-2026, buscando “incrementar la eficiencia y uniformidad en los proyectos de infraestructura pública mediante la digitalización del sector” (DNP, 2020, p. 5). del mismo modo, la implementación de la estrategia en proyectos de equipamientos públicos no sólo brinda mejorar la coordinación y reducir riesgos, sino que también aumentaría la transparencia y la trazabilidad en las decisiones tomadas.

Diversos estudios internacionales muestran que el uso de BIM en proyectos de infraestructura pública ayuda a mejorar la eficiencia, la coordinación y la gestión de la información. Sin embargo, aún persisten desafíos relacionados con la estandarización y la capacitación de los equipos de trabajo. En China, Wang et al. (2024) demostraron que el uso de BIM en proyectos a gran escala ayudó a reducir errores de diseño y mejorar la colaboración interdisciplinaria. Del mismo modo, Yang (2025) examinó el uso de simulaciones digitales basadas en BIM en proyectos de infraestructura municipal y, aunque reconoció beneficios en la gestión de la cadena de suministro y la optimización de recursos para la sostenibilidad, destacó la necesidad de tener más control. Wang y Wang (2024) demostraron en Taiwán que un mayor nivel de uso de BIM se asocia con un mejor desempeño en los proyectos, en su análisis de 66 proyectos públicos, hallaron que cada incremento en el nivel de uso mejora el desempeño en 0,645 unidades, lo que demuestra la

necesidad de capacitar a los grupos de trabajo. Además, Sampaio (2024) enfatiza que el éxito de la implementación, en gran medida, depende del gerente de BIM cuyo papel es asegurar la interoperabilidad entre plataformas y supervisar los procesos de capacitación de manera continua. Por último, Pérez et al. (2024) en España señalaron que las principales barreras para la expansión de BIM en el sector público son la falta de un marco regulatorio sólido y la baja preparación técnica de los equipos.

A pesar de los avances conceptuales y empíricos que sustentan la importancia de la metodología BIM en proyectos de infraestructura pública, hoy en día sigue sin incorporarse en gran parte de América Latina. El marco teórico muestra que instrumentos como el POT de Medellín y el urbanismo ecológico constituyen oportunidades para integrar sostenibilidad y planificación de largo plazo. Por otro lado, el estado del arte muestra los avances de BIM en diversas naciones y los retos que se tienen al estandarizar el aprendizaje de los profesionales y en la articulación de leyes y normas más robustas (Pérez et al., 2024; Sampaio, 2024; Wang Y. et al., 2024). Esta falta de investigación se catalogaría en el orden del más básico al aplicado, de donde debería abordar la literatura y los debates globales. La construcción de equipamientos sociales y educativos, como los jardines infantiles, establece una buena oportunidad para la innovación en la construcción. Sin embargo, en Medellín aún no existen propuestas metodológicas específicas para la integración de BIM en este tipo de proyectos de espacio público, lo que resulta en riesgos potenciales de sobrecostos, retrasos y mala coordinación. Por lo tanto, esta investigación tiene como objetivo formular una propuesta metodológica para la implementación de BIM en la construcción de jardines infantiles en el macroproyecto Parques del Río Norte, contribuyendo al cumplimiento de la Estrategia Nacional BIM 2020–2026 y ofreciendo un aporte académico y técnico que busca mejorar la planeación, ejecución y control de proyectos de infraestructura social en el país.

2. METODOLOGÍA

La Figura 1, muestra el diagrama metodológico con el que se desarrolló un estudio de tipo cualitativo-descriptivo en tres etapas. En la primera etapa, se realizó una revisión de documentos del caso de estudio, para establecer los procesos BIM que se están poniendo en marcha y cómo se están administrando durante el desarrollo del proyecto. A continuación, se llevó a cabo un análisis comparativo entre las implementaciones BIM en proyectos públicos de países latinoamericanos y los puntos de referencia, en el que se comparó las diferencias y/o similitudes encontradas entre las dos fuentes de información (regional y local) y se identificó las brechas que actualmente existen. Finalmente, con este Benchmarking previo, se formuló los objetivos y estrategias orientadores para responder a la propuesta metodológica de la implementación BIM del estudio de caso destinado a la construcción de la estructura de jardines infantiles públicos, con un enfoque en la gestión integrada, la transición fluida del control y la coordinación interinstitucional efectiva.

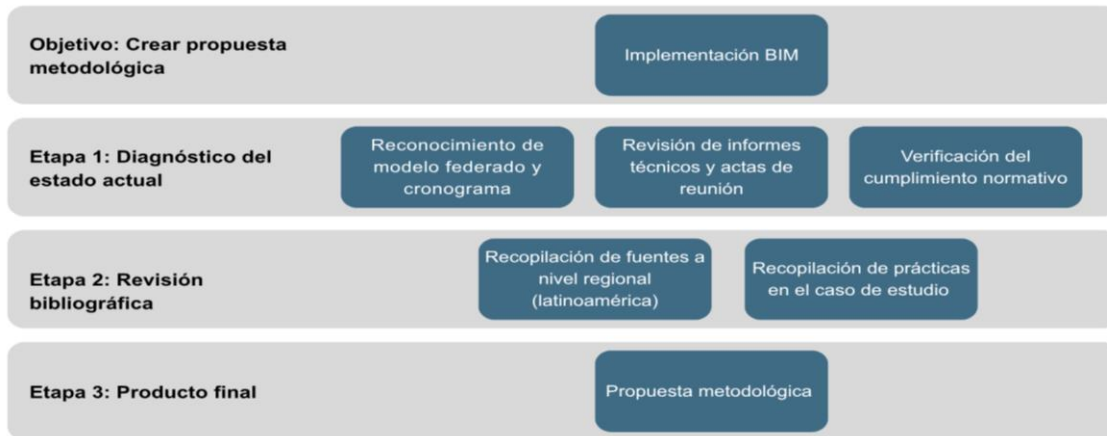


Figura 56. Diagrama metodológico.

2.1 Revisión documental y normativa

Se realizó una revisión de la documentación del proyecto Jardín Infantil Buen Comienzo, el cual pretende atender 300 niños de la comuna 02 y conformar parte de la infraestructura dentro del macroproyecto Parques del Río Norte. En esta revisión, se tuvo en cuenta los cronogramas, informes técnicos, actas de reunión, y otros documentos relevantes de la etapa de diseños. Esta primera etapa del trabajo busca mapear las condiciones actuales y posibles puntos de conflicto en la etapa constructiva.

2.2 Diagnóstico del contexto local

Se hará una recopilación de información a nivel regional y un estado del arte sobre el proceso de implementación de BIM en los escenarios de proyectos públicos en países de Latinoamérica. Esta información se contrastará con aquellas prácticas actuales ya detectadas en la fase anterior, lo que permitirá determinar aquellas brechas y aquellos espacios de mejora.

2.3 Diseño de la propuesta metodológica

A partir del análisis previo, se diseñó los lineamientos y estrategias clave para la implementación de BIM en el caso de estudio. La propuesta se estructuró en pasos prácticos que incluyen herramientas, roles, flujos de trabajo y esquemas de comunicación para asegurar una adecuada gestión colaborativa, continuidad ante cambios administrativos, y documentación eficiente del proceso.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Revisión documental y normativa

En esta primera etapa se revisaron los documentos asociados al proyecto Jardín Infantil Buen Comienzo, en el Macroproyecto Parques del Río Norte, que se encuentran en el entorno colaborativo Autodesk Construction Cloud, analizando los informes de incidencias, reportes técnicos, actas de reuniones, cronogramas y modelo federado. Como parte del ejercicio de revisión inicialmente se accedió al modelo federado del Jardín Infantil, donde se identificaron las incidencias y los detalles técnicos que aún se encuentran sin definir, allí mismo se evidenció la necesidad de articulación con otras secretarías del distrito, ya que esta obra tiene previsto destinar algunos espacios para otros usos; lo que hace de este proyecto un reto en la fase de

operatividad y mantenimiento. Continuando con la exploración de la documentación se denotó que los informes técnicos y actas de reunión no estaba siendo respaldados en la nube, lo que demuestra la falta compromiso y comunicación entre las partes, debido a que disponer de esta información incide directamente en la planeación del presupuesto y la ejecución. Adicionalmente, se revisó del estado de la licencia de construcción, permisos ante los entes de control y la versión preliminar del presupuesto. Como resultado, se identificaron los principales hallazgos y sus impactos, los cuales se presentan de manera resumida en la Tabla 1.

Tabla 32. Revisión documental.

Aspecto analizado	Hallazgo principal	Impacto identificado
Exploración del modelo federado y cronogramas	Se identificaron incidencias sin resolver y áreas del modelo con información incompleta.	Dificulta la coordinación y genera incertidumbre en la programación de actividades.
Definición técnica	Persisten ajustes pendientes en los modelos y diseños técnicos, especialmente en la integración de información estructural y arquitectónica.	Afectación en la precisión del presupuesto y en la programación de la obra.
Coordinación entre disciplinas	Se identificaron observaciones de coordinación entre arquitectura, estructura y especialidades técnicas.	Posibles interferencias durante la etapa constructiva.
Avance técnico general	La revisión permitió identificar progresos en la coordinación y actualización de diseños.	Mejora en la trazabilidad, aunque con necesidad de fortalecer la integración de información entre actores.
Actualización de información en el entorno colaborativo	Los documentos base del proyecto se encuentran actualizados hasta 2023, mientras que los informes de interventoría se mantienen al día.	Desarticulación entre la documentación técnica y los registros de supervisión.
Licencia de construcción	A la fecha no se ha emitido la licencia de construcción, quedando pendiente subsanar las observaciones puestas por la curaduría.	Retraso en la fase de inicio de obra y limitaciones para la programación.
Cumplimiento de la Estrategia Nacional BIM	Se evidencia alineación con los lineamientos nacionales mediante el uso de plataformas colaborativas y modelo federado.	Fortalece la trazabilidad y transparencia del proyecto.

3.2 Diagnóstico del contexto local

En esta etapa se investigó sobre la normativa, lineamientos y los planes de implementación del BIM en países latinoamericanos, para identificar cuáles eran los procesos que se compartían entre cada uno de ellos, los cuales consideramos que eran las actividades clave para integrar con éxito la metodología BIM en proyectos de obras públicas en contextos similares, y se compararon con el proceso que se llevó a cabo en el proyecto del caso de estudio, que se puede ver en la Tabla 2. De la investigación realizada, se evidenció que el 65% de los países latinoamericanos están implementando la metodología BIM a nivel gubernamental o se encuentran en proceso de iniciar su implementación, por lo que, se han creado lineamientos y normativas para regular y facilitar la implementación de la Metodología BIM; algunos de estas normativas han sido el decreto federal 10.306/2020 de Brasil, que establece las fases de adopción: primeros mandatos en 2021-22 para obras gubernamentales y gradual ampliación; la *Norma Técnica de Modelado de Información de la Construcción (MIC)* para licitaciones públicas en México; o el *Estándar BIM para Proyectos Públicos (Construye2025/Corfo)* y la SDI BIM del

MOP de Chile que establecen las bases de licitación, PEB y los entregables digitales requeridos en obra, siendo esta última considerada como la más completa de todas las normativas y lineamientos, y convirtiéndose en el referente de los países latinoamericanos. Durante la ejecución de obras públicas, los países más avanzados (Chile, Perú y Brasil) exigen PEB, modelos federados, control 4D/5D y entregables digitales, mientras que otros están en transición normativa y de capacitación. En el caso de Colombia, aún falta alcanzar las exigencias de los países más avanzados, sin embargo, en el caso de estudio se ha evidenciado algunos avances que han permitido mejorar el diseño para la etapa constructiva que no se habría podido lograr sin los avances que hemos obtenido con la implementación del BIM en el sector público.

Tabla 33. Texto descriptivo de la tabla.

	Literatura	Jardín Infantil Buen Comienzo
1	Diagnóstico organizacional y preparación	Identificación de Secretarías interesadas
2	Definición de requisitos de información (OIR / AIR / EIR)	Definición del alcance del proyecto
3	Diseño de contratación y pilotos	Definición de Roles
4	Establecimiento del entorno colaborativo (CDE)	Modelado, coordinación y control (fase diseño y preconstrucción)
5	Planificación del proyecto y BEP detallado	Proceso licitatorio con empresa de manejo BIM
6	Modelado, coordinación y control (fase diseño y preconstrucción)	Construcción integrada y captura de obra (fase ejecución)
7	Construcción integrada y captura de obra (fase ejecución)	
8	Handover y operación (entrega al operador)	
9	Monitoreo, auditoría y mejora continua	

3.3 Diseño de la propuesta metodológica

Con las dos etapas anteriores, se recopiló los requerimientos de gestión y control digital que se consideraron necesarios para el planteamiento de la propuesta metodológica. Se centró en aplicar la metodología BIM como herramienta de coordinación, trazabilidad y comunicación, adaptando estándares internacionales (ISO 19650, Plan BIM Chile, Plan BIM Perú) al contexto del caso de estudio. El proceso de formulación se estructuró en cuatro fases secuenciales: preparación, control 4D/5D, gestión de cambios y cierre “as built”. Teniendo como proceso consolidador la definición de las matrices de comunicación y RACI, que permitieron definir responsabilidades y canales de información. Durante la construcción de la propuesta, se establecieron criterios para:

- Garantizar el cumplimiento de roles BIM con la matriz RACI y el Plan de Ejecución BIM (PEB).
- Implementar un control de cambios y documentación digital a través del Entorno Común de Datos (CDE).
- Asegurar la actualización de la información en tiempo real o con un desfase máximo de siete días, fortaleciendo la toma de decisiones y la supervisión técnica.
- Integrar la planificación (4D) y los costos (5D) para el seguimiento físico-financiero de la obra.

Como resultado se obtuvo una guía metodológica práctica y aplicable, orientada a mejorar la preservación de la información, la custodia de la documentación y la comunicación oportuna, además, de la coordinación entre las partes involucradas, reduciendo riesgos de pérdida de información, reprocesos, sobre costo, y la toma de decisiones. La propuesta constituye una base operativa para estandarizar la implementación de BIM en la etapa constructiva, garantizando eficiencia, transparencia y trazabilidad en la gestión de obras públicas.

4. CONCLUSIONES

Luego de la revisión de la documentación del caso de estudio, Jardín Infantil Buen Comienzo en el Macroproyecto Parques del Río Norte, se evidenció el avance en la implementación de la Estrategia Nacional BIM, sin embargo, existen falencias en el manejo colaborativo de la documentación, en este punto se puede decir que es necesario establecer procesos claros, compromisos entre las partes y rutas de comunicación, las cuales reflejarían un trabajo mucho más fluido y reducirían los riesgos asociados a la pérdida de trazabilidad en futuros cambios de administración.

Durante la investigación y elaboración del documento se dio cuenta que para que la implementación de la metodología BIM sea efectiva en el sector público, se necesita involucrar a los agentes externos participantes de los procesos como la interventoría y los contratistas, debido a que, en el proceso constructivo son estos agentes los que generan la información y la manejan. Por lo que, en futuras investigaciones es necesario ajustar esos parámetros y, además, desde la licitación exigir a los concursantes el conocimiento y el manejo del BIM, pues como entidades públicas no se puede brindar capacitación a personas no vinculadas y el tiempo es un factor que juega en contra en el desarrollo de la ejecución de los proyectos.

Con la formulación de la propuesta metodológica, fundamentada en las falencias vistas en las etapas previas y desarrollada para cubrir una gestión digital de las obras públicas, al implementar la metodología BIM como el núcleo para generar control, comunicación y trazabilidad de la información, permitiendo así la estructuración de procesos eficientes, mediante la definición clara de roles, flujos de trabajos, responsabilidades y mecanismos de comunicación, todo esto para generar impactos positivos en la reducción de reprocesos, optimización de recursos y mejorar la coordinación interdisciplinaria.

5. REFERENCIAS

- Acuerdo 48 de 2014 [Concejo de Medellín] Por medio del cual se adopta la revisión y ajuste de largo plazo del Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Medellín y se dictan otras disposiciones complementarias. 17 de diciembre de 2014.
- Alcaldía de Medellín Distrito de Ciencia, Tecnología e Innovación. (s.f.). *Expediente Distrital | Plan de Ordenamiento Territorial de Medellín*.
<https://www.medellin.gov.co/es/transparencia/plan-de-ordenamiento-territorial-de-medellin/>
- Alcaldía de Medellín Distrito de Ciencia, Tecnología e Innovación. (s.f.). *Expediente Distrital | Macroproyectos del Plan de Ordenamiento Territorial de Medellín*.
<https://www.medellin.gov.co/es/transparencia/plan-de-ordenamiento-territorial-de-medellin/macroproyectos-del-plan-de-ordenamiento-territorial-de-medellin/>
- Decreto 1113 de 2023 [Alcaldía de Medellín]. Por medio del cual se revisa y ajusta el Macroproyecto para el Área de Intervención Estratégica MEDRío, Zona Río Norte, se deroga el Decreto Municipal 2077 de 2015, modificado por el Decreto Municipal 2480 de 2019, que lo adoptaron y modificaron, y se dictan otras disposiciones. 19 de diciembre de 2023.
- Departamento Nacional de Planeación (2020). *Estrategia Nacional BIM 2020-2026*.
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Estrategia-Nacional-BIM-2020-2026.pdf>
- González, C. (2015). *Building Information Modeling: Metodología, aplicaciones y ventajas. Casos prácticos en gestión de proyectos*. (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Valencia. <https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/56357/TFM%202015%20CARLOS%20GONZALEZ.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Pérez-García, A., Martín-Dorta, N., & Aranda, J. Á. (2024). Enhancing BIM implementation in Spanish public procurement: A framework approach. *Heliyon*, 10(9), e30650. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30650>
- Sampaio, A. Z. (2024). BIM multitask project manager: Responsibility, organization and interoperability. *Procedia Computer Science*, 239, 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.06.146>
- Wang, Y., & Wang, J. (2024). Impact of BIM usage levels on project performance: Public construction projects in Taiwan. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28(3), 1234-1245. <https://doi.org/10.1016/j.kscej.2024.100142>
- Wang, S., Chong, H.-Y., & Zhang, W. (2024). The impact of BIM-based integration management on megaproject performance in China. *Alexandria Engineering Journal*, 94, 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.03.036>
- Yang, L. (2025). Digital management method of municipal infrastructure engineering construction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction*, 178(1), 62–73. <https://doi.org/10.1680/JSMIC.22.00038>

ANÁLISIS DEL IMPACTO DE LA METODOLOGÍA BIM EN LA FASE DE EJECUCIÓN DE UN PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN DEL SECTOR PÚBLICO: CASO DE ESTUDIO PROYECTO “CONSTRUCCION DEL CENTRO ADMINISTRATIVO MUNICIPAL DE ENVIGADO CAM”.

Juan Camilo Jaramillo¹, Sandra Marcela Arango Muñoz¹, Sergio Andrés Arboleda López¹

¹ Grupo de Investigación Gerencia de la Construcción, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, juancamilo2097@hotmail.com, sandraarango1981@gmail.com, sergio.arboleda@colmayor.edu.co

Palabras clave: Trabajo Colaborativo, gestión de la información, modelo digital, productividad, innovación.

1. INTRODUCCIÓN

La metodología BIM (Building Information Modeling) es un nuevo enfoque para gestionar proyectos de construcción. BIM se basa en crear un modelo digital compartido entre los participantes del proyecto, facilitando la colaboración e interacción en tiempo real, proceso mejora la eficiencia y la comunicación en todas las etapas del proyecto (Estrategia Nacional BIM 2020-2026.) En BIM el diseño de los proyectos se realiza en 3D obteniendo una visión completa. Esto permite un diseño eficiente, al tiempo facilita las actualizaciones y modificaciones de este. A diferencia del diseño tradicional basado en elementos geométricos, BIM trabaja con objetos de ingeniería y arquitectura. Que incluyen mediciones, presupuestos y control de plazo. (Construyendo el éxito, 2023). El uso de BIM, aunque es reconocido, no cuenta con normas a nivel global. En Colombia la aplicación de buenas prácticas es muy útil al de desarrollar proyectos. De hecho, se creó el BIM Fórum basado en una serie de pilares y la creación de bim forum colombia. (2020). que permiten la implementación, incluyen desarrollo de políticas, estándares y procesos para la gestión de datos durante todo el ciclo de vida del proyecto. A nivel global, países como Reino Unido, Singapur y Chile han logrado la estandarización y normativas BIM, basados en marcos como la ISO 19650 y entidades como Building Smart. Pero aun, existen desafíos como la falta de formación, marcos regulatorios y apoyo a la industria. BIM trae beneficios desde la etapa de diseño hasta la operación del proyecto, aportando a la coordinación lo cual reduce riesgos y promueve la sostenibilidad.

La metodología BIM data entre las décadas de 1970 y 1980 como una transformación del diseño asistido por computadora en 2D, ofreciendo la generación de modelos de visualización en 3D con información completa de cada elemento del proyecto. Este cambio mejoró definitivamente la etapa de diseño y planificación, permitiendo la toma de decisiones. Países como Estados Unidos y Reino Unido son pioneros en usarlo, mientras que en Latinoamérica sobresalen Chile, México, Colombia y Perú (ibrahim karatas, 2023). BIM brinda beneficios como mayor precisión, disminución de costos, incrementa la calidad y acortamiento de plazos. adicional, ofrece una colaboración más efectiva entre disciplinas, lo que minimiza conflictos y reprocesos. La productividad laboral, que representa entre el 30 % y 60 % del costo total de un proyecto, se ve beneficiada con el uso de BIM y metodologías como Lean Construction, dirigida a disminuir desperdicios y aumentar valor. La mezcla de Lean y BIM ha demostrado sinergias positivas en proyectos internacionales, como el metro de Estambul, aumentando la eficiencia en la ejecución. Por otro lado, aún permanecen barreras, como la falta de evolución técnica y las diferencias entre el modelo y las condiciones reales, que producen sobrecostos y retrasos. Estudios recientes,

como los de Fernández-Mora et al. (2022) y Sampaio (2024), han demostrado la integración de BIM con el análisis estructural y la gestión multitarea, resaltando la importancia del rol del administrador BIM para garantizar la interoperabilidad y coordinación entre disciplinas, asegurando así la calidad del diseño y del producto final en proyectos constructivos.

En Colombia, la industria de la construcción presenta una alta variabilidad en costos y tiempos de ejecución, ocasionada por elementos como la inflación de los precios de materiales (acero, cemento, energía), normatividad y dificultades en la cadena de suministro. Estos factores entorpecen la planificación y ejecución eficiente de los proyectos, enfáticamente en el sector público. La clave de variabilidad de costos permite supervisar si un proyecto está acorde al presupuesto, desbordado al plan. Ante a esta perspectiva, la metodología BIM se plantea como alternativa para mejorar la productividad y eficiencia a través de la digitalización y gestión completa de la información durante todo el ciclo de vida del proyecto. La implementación en etapas iniciales mejora la planificación, minimiza errores, detecta problemas y optimiza recursos. No obstante, la revolución digital enfrenta paradigmas como la resistencia al cambio, poca cultura, poco talento humano capacitado, financiación tecnológica costosa y carencia de infraestructura digital. Adicional a la gestión de procesos manuales y la falta de estrategias precisas. Las ventajas de BIM se prueban en indicadores clave de rendimiento (KPI) como disminución de costos, aumento de rentabilidad, optimización de recursos y cumplimiento de programación. Adicional potencia la colaboración y comunicación entre las disciplinas mediante modelos centralizados en la nube, dialogo entre softwares, y herramientas de detección de conflictos (clash detection). En síntesis, la implementación de BIM en los proyectos públicos y privada no solo aporta eficiencia operativa, sino que adicional fomenta el crecimiento económico del país mediante una gestión más efectiva de la infraestructura.

2. METODOLOGÍA

El diseño metodológico en el cual se marca el proceso de investigación a desarrollar es el método descriptivo no experimental, en el cual se realizará un número de actividades y procesos necesarios para la recolección de la información, la gestión del análisis de esta y finalmente se busca obtener las conclusiones y resultados asociados a la finalidad de la investigación. Históricamente, la investigación descriptiva ha desempeñado un papel fundamental en numerosas disciplinas académicas. Los antropólogos, por ejemplo, han utilizado este enfoque para documentar culturas y sociedades. Los psicólogos la han empleado para captar comportamientos, emociones y reacciones. Con el tiempo, el método ha evolucionado, incorporando avances tecnológicos y adaptándose a las necesidades contemporáneas, pero su esencia sigue estando arraigada en la descripción de un fenómeno o un entorno tal y como es. La investigación descriptiva es una piedra angular en el panorama de la investigación por su capacidad de ofrecer una fotografía instantánea detallada de la vida. Sus cualidades y métodos únicos la convierten en un método inestimable para diversos fines de investigación. La investigación descriptiva capta el estado actual de los fenómenos, ofreciendo a los investigadores un reflejo detallado de las situaciones. Esta representación inalterada es crucial para sectores como el marketing, donde la comprensión del comportamiento actual de los consumidores puede dar forma a las estrategias futuras. (Bernal, 2016) manifiesta que, en síntesis, el proceso de investigación se define como un sistema constituido por varios componentes que a medida que van desarrollándose, cada elemento este recibe influencia del anterior, pero, a la vez, es seguido e influido por otro. En cada fase o etapa se desarrolla un componente, aunque no todos ellos siguen una secuencia de etapas. Dada su naturaleza directa, la investigación descriptiva puede proporcionar datos más fáciles de interpretar, tanto para los investigadores como para su público.

En lugar de analizar complejas relaciones estadísticas entre variables, los investigadores presentan descripciones detalladas de sus observaciones cualitativas. Los investigadores pueden realizar un análisis en profundidad relacionado con su pregunta de investigación, pero el público también puede extraer ideas de sus propias interpretaciones o reflexiones sobre posibles patrones subyacentes. Por el tipo de investigación esta se cataloga como básica, según el tipo de datos se define como investigación de campo, según su enfoque de datos es mixto y según su alcance es descriptiva. Los datos de la encuesta serán llevados a un archivo de análisis de datos y gestión de informes en el software Power Bi, con el fin de poder tener un panorama más amplio y visualización de la información, al igual que haciendo uso de las herramientas tecnológicas aplicadas a la gestión de los proyectos. A continuación, en la Figura 1, se muestra un diagrama con la metodología a desarrollar en el proyecto de investigación.

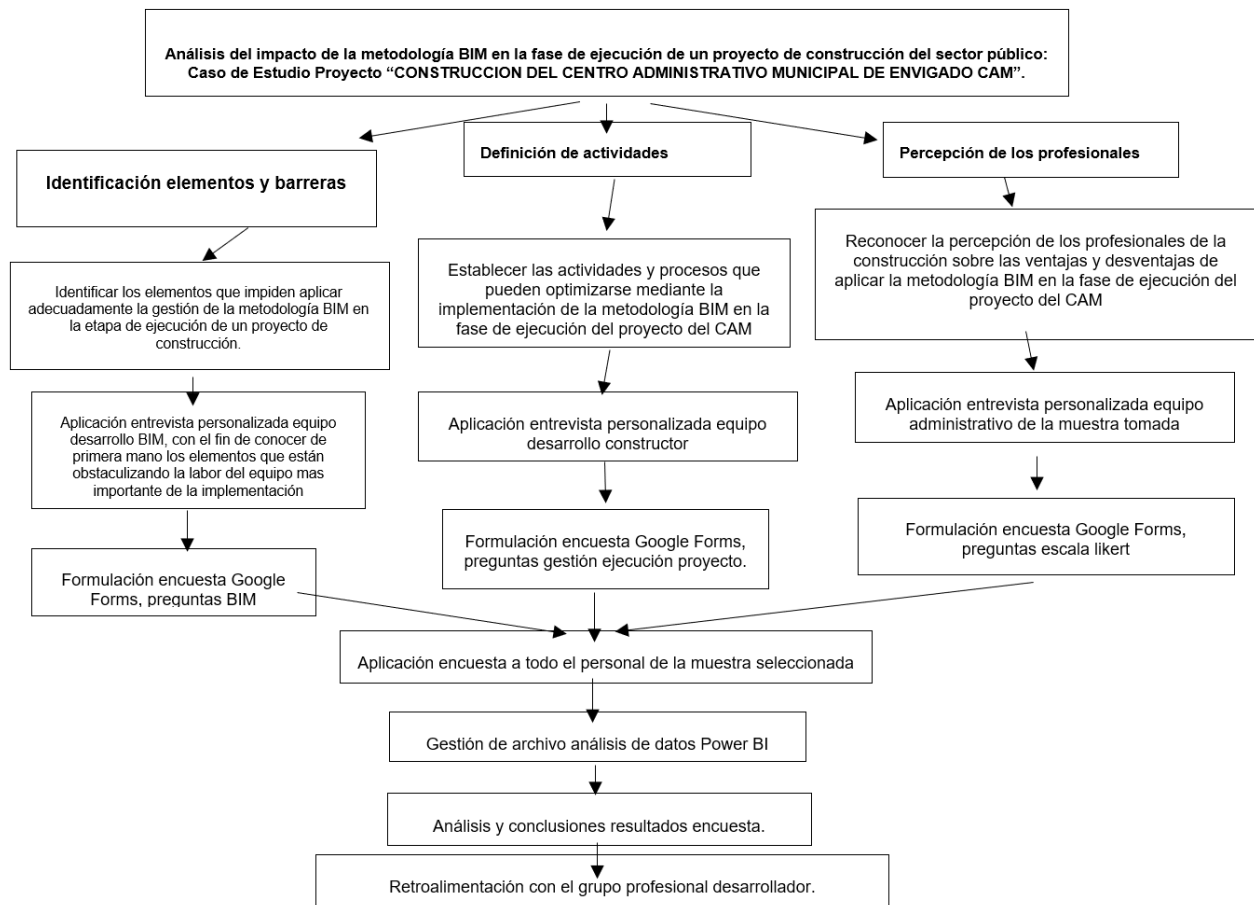


Figura 57. Diagrama metodológico.

2.1 Exploración de la información en la implementación BIM

Al realizar la implementación de la metodología BIM en la etapa de ejecución en un proyecto de construcción más aun en el sector público se presentan una cantidad de enigmas y barreras las cuales han sido mencionadas en mucha investigaciones realizadas a nivel nacional e internacional, por tal motivo se requiere realizar el análisis e identificación de dichos elementos en el proyecto de estudio ya que cada proyecto es entendido y visto como un mundo diferente por así decirlo, adicional que se tienen condiciones diferentes tanto de equipo de trabajo como tipo de proyecto a desarrollar y más aún la complejidad del mismo, es por esta razón que en esta

etapa se aplicara una técnica de recolección de información a nivel investigativo y de gran poder como es el la entrevista grupal y entrevista individual , esta será aplicada inicialmente a las personas y profesionales que se encargan netamente de la gestión de la implementación BIM para este caso el equipo BIM, una vez se tenga esta información es analizada para continuar con el siguiente grupo que sería entrevistado es el equipo constructor o desarrollador ya que son los directamente involucrados en la consecución de mucha información y datos que complementan la gestión , con la información de ambos grupos se gestionara unas encuestas por medio de un formulario del Google Forms o microsoft a cada uno de las personas involucradas en el proceso de la gestión de la metodología lo cual incluye todo el equipo técnico desarrollador por parte del constructor, el equipo de supervisión técnica representado por la interventoría y más aún los diferentes personales externos y que interactúan día a día con el proceso de gestión en el proyecto desde el equipo de diseño, contemplando los parámetros necesarios para obtener la información necesaria y poder realizar un mejor análisis estadístico de la misma.

2.2 Eficiencia en la implementación de la metodología BIM

En el proceso de la implementación de la metodología BIM en la etapa de ejecución, existen una cantidad de actividades y procesos a realizar, estos a su vez desencadenan en una cantidad determinada de personas y dependencias, los cuales son parte fundamental de la gestión, razón por la cual es de vital importancia conocer y poder identificar cuál de estas están siendo afectados negativa o positivamente, todo esto con el fin de para poder ejecutar planes de acción necesarios y de esta manera entender el proyecto como un todo y más aún para que se pueda configurar como un trabajo colaborativo lo cual suma a toda la experiencia de implementación, ya que este es uno de los pilares más fuertes para el entendimiento y el buen desarrollo de la metodología BIM en la gestión del proyecto, en este caso se formula la encuesta con las preguntas bajo los parámetros necesarios para identificar dichos factores y actividades, los cuales provienen de las entrevistas previas realizadas a los profesionales directamente relacionados con la ejecución, en la encuesta se mide el nivel de afectación de cada una de las actividades desarrolladas en el día a día y que interfieren con la implementación en el proyecto de caso de estudio.

2.3 Percepción frente a la metodología BIM

El desarrollo y la implementación de la metodología BIM en la etapa de ejecución en un proyecto de construcción , trae consigo una serie de actividades y procesos necesarios a realizar para poder tener un enfoque según la rugosidad que se requiere y según la solicitud del cliente o el ente gubernamental, estos son ejecutados por profesionales de cada área en específico según su nivel de responsabilidad y más aún el equipo desarrollador del BIM en el proyecto, por lo cual se hace necesario identificar la forma en que cada uno de estos entiende y percibe la implementación en el proyecto de estudio a fin de poder analizar y comprender las necesidades, el objetivo, su roll aplicado, por lo cual en esta etapa se aplicara una encuesta con parámetros identificados en las entrevistas previas al personal, esta encuesta estará fundamentada también en poder entender dicha percepción, para este caso se realiza la entrevista inicial seleccionando los grupos por separado tanto el constructor, como los interventores, equipo BIM, adicional los terceros que también hacen parte de la implementación, luego de dicho paso procedemos a la gestión de la encuesta la cual trae preguntas tipo escalas Likert ya que esta es una forma estructurada para recopilar las diversas opiniones y actitudes. Permiten que los encuestados seleccionados expresen si están de acuerdo, en desacuerdo o si tienen una postura neutral frente a ciertas afirmaciones o preguntas, estas escalas se usan ampliamente en disciplinas como la psicología, la sociología y la investigación de mercado. Una escala de encuesta Likert representa un conjunto de opciones de respuesta las cuales pueden ser numéricas o verbales y que incluyen un rango de opiniones sobre un tema en específico adicional siempre forma parte de una

pregunta cerrada (una pregunta que presenta a las personas encuestadas opciones de respuesta completadas previamente).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Exploración de la información en la implementación BIM

3.1.1 INSTRUMENTOS O HERRAMIENTAS UTILIZADAS

El instrumento principal por el cual se realizara la obtención de los datos son las entrevistas abiertas iniciales a los profesionales para luego proceder con la identificación de variables y datos, el proceso de cuestionario iniciara con las personas involucradas en la gestión de la metodología BIM , con el fin de identificar los primeros factores para posteriormente continuar con la gestión del cuestionario final el cual será por medio de la técnica de la conformación y aplicación de una encuesta mixta con preguntas abiertas y otras cerradas en formato digital tipo Google Forms o Microsoft la cual incluirá los diferentes parámetros necesarios para abordar cada uno de los objetivos específicos definidos y será aplicada al personal administrativo del proyecto ejecutor y terceros que hacen parte integral del proceso, en cuanto a los elementos físicos se requiere de un equipo de cómputo con características de buen desempeño y rendimiento con el software de AutoCAD Revit 2024 y Microsoft Project, que actualmente es en el que se trabaja el modelo del proyecto, por lo cual el equipo de cómputo también contara con el hardware dado las condiciones de gráficos que exige el programa para su adecuado uso.

Adicional a la técnica de las entrevistas y la aplicación encuestas se tiene acceso a toda la información técnica del proyecto tales como:

- Planos en 2D de todo el proyecto y espacios especiales.
- Modelos 3D (Estructural, Arquitectónico, Redes eléctricas, Redes de aire acondicionado, Redes húmedas).
- Detalles constructivos de elementos representativos.
- Plan de implementación BIM del proyecto.
- Acceso a la plataforma 360revit.
- Acceso base de datos entorno común información BIM.
- Especificaciones técnicas y especiales.
- Documentos contractuales, contrato, actas.
- Contratos de suministros, subcontratistas y actividades especiales.
- Presupuesto de obra Contractual en digital (formato Excel).
- Programación de obra actualizada en formato digital (Microsoft Project).
- Planes de Ejecución BIM (BEP).
- Requisitos de Información del Cliente (EIR).
- Modelos BIM en formato IFC u otros.
- Manuales y guías de procedimientos BIM.
- Informes de coordinación y colisiones.

3.1.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

La población se define como el conjunto de elementos a los cuales se relaciona la investigación ,los individuos que manifiestan características similares, para de esta manera realizar un análisis

en este caso la muestra elegida es el equipo del personal administrativo que ejecuta el proceso de la construcción del proyecto comprendido entre constructor, los terceros y la interventoría designando su par por cada una de las disciplinas principales, ya que son los actores principales que convergen en el uso de las herramientas y procesos que desarrolla la metodología a los largo del ciclo de vida del proceso de ejecución, a continuación, se enumeran y detallan en la tabla:

Tabla 34. Población, Personal Administrativo Proyecto CAM. Fuente propia.

N°	Cargo	Entidad o Dependencia
1	Gerente general	Constructor
2	Gerente técnico	Constructor
3	Director de obra	Constructor
4	Director operaciones	Constructor
5	Diseñador estructural	Terceros
6	Diseñador arquitectónico	Terceros
7	Diseñador redes húmedas	Terceros
8	Diseñador eléctrico	Terceros
9	Diseñador Instalaciones Especiales	Terceros
10	BIM Manager	Constructor
11	Coordinador BIM	Constructor
12	Modelador BIM	Constructor
13	Residente de estructura torre sur	Constructor
14	Auxiliar Residente estructura torre sur	Constructor
15	Residente de estructura torre norte	Constructor
16	Auxiliar Residente estructura torre norte	Constructor
17	Residente de acabados torre sur	Constructor
18	Auxiliar Residente acabados torre sur	Constructor
19	Residente de acabados torre norte	Constructor
20	Auxiliar Residente acabados torre norte	Constructor
21	Residente Redes húmedas	Constructor
22	Auxiliar Residente Redes húmedas	Constructor
23	Residente eléctrico	Constructor
24	Auxiliar Residente Redes eléctrico	Constructor
25	Residente Inst. Esp.	Constructor
26	Auxiliar Residente Inst. Esp.	Constructor
27	Residente de control de costos	Constructor
28	Residente oficina técnica	Constructor
29	Residente de calidad	Constructor
30	Residente ambiental	Constructor
31	Residente SST	Constructor
32	Gestor social	Constructor
33	Director de obra	Interventoría
34	Residente de estructura	Interventoría
35	Residente de acabados Torre sur	Interventoría
36	Residente de acabados Torre norte	Interventoría
37	Residente Redes húmedas	Interventoría
38	Residente eléctrico	Interventoría
39	Residente Inst. Esp.	Interventoría
40	Residente de control de costos	Interventoría
41	Residente de calidad	Interventoría
42	Residente ambiental interventoría	Interventoría
43	Residente SST	Interventoría

3.1.3 ALCANCE

El alcance de esta investigación está centrado y enfocado en el análisis de la gestión y la implementación de la metodología BIM propiamente en la fase de ejecución de un proyecto de construcción del sector público: Caso de Estudio Proyecto “CONSTRUCCION DEL CENTRO ADMINISTRATIVO MUNICIPAL DE ENVIGADO CAM”. Ubicado en el municipio de envigado Antioquia, el cual actualmente se encuentra en un 70% de avance en su construcción, a continuación, se detalla datos técnicos e información relevante del proyecto.

3.1.4 DATOS DEL PROYECTO

- **LOCALIZACIÓN GENERAL**

El proyecto CAM “CONSTRUCCION DEL CENTRO ADMINISTRATIVO MUNICIPAL DE ENVIGADO CAM”, se encuentra ubicado en la esquina de la carrera 43A Avenida el poblado y la calle 38A sur, en un lote de 3087 m2 en el municipio de envigado zona centro sector parque principal en el departamento de Antioquia, Colombia.

- **DESCRIPCIÓN ARQUITECTÓNICA**

Es un proyecto de construcción vertical de oficinas y uso público que consta de dos torres, la torre norte de 16 pisos (15 útiles) contiene en piso 1 el lobby de todo el proyecto y en los siguientes pisos: Cuartos de data center, dependencias gubernamentales como son: contraloría, secretarías de salud, planeación, educación, gestión del riesgo, medio ambiente, talento humano y tesorería, Secretaría General y en piso 15 Despacho alcaldía. En cubierta se encuentran ubicados los equipos técnicos y zona de esparcimiento.

La torre sur de 15 pisos (14 útiles) contiene En piso 1 el teatro, en piso 2 Apoyo de teatro y elementos técnicos, y en los demás pisos: secretaría de obras públicas, salud, planeación, educación, salones múltiples y gimnasio, control interno y comedor principal, secretaría de hacienda, piso 13 y 14 Secretaría general y en cubierta una terraza habitable para eventos internos y zonas de descanso.

En la zona del sótano están conectadas las dos torres, se accede desde la Av. El Poblado a nivel de la vía principal. Se ubican 81 celdas de parqueo para vehículos tipo carro, 65 para bicicletas, 35 parqueo de motos y un edificio con conexión al edificio de la alcaldía actual.

- **DESCRIPCIÓN SUB-ESTRUCTURA Y ESTRUCTURA**

La subestructura está conformada por pilas de concreto de diámetros variables de 1.20 mt a 1.60 mt y profundidades entre 10 mt a 25 mt; con su respectivo cabezal las cuales están confinadas con un sistema de vigas de fundación.

En los sótanos se encuentran muros de contención en concreto de espesores variables en todo el perímetro del lote (hacia edificaciones existentes costado norte y oriental y hacia vías sur y occidental).

La estructura es en concreto a la vista con sistema de pórticos conformada por columnas de dimensiones y secciones variables y losas unidireccionales con casetón de madera recuperable.

Se tienen estructuras metálicas en pasarelas perimetrales, puentes que comunican torre norte con torre sur y la alcaldía existente, adicionalmente una estructura para cubierta de torre sur tipo

pérgola.

• ESPECIFICACIONES GENERALES

El proyecto está especificado con materiales de alta calidad y acabados industriales y de fácil mantenimiento ya que es un edificio para el uso público y oficinas a continuación se detallan los principales:

- Fachadas (Piedra royal dorada, Ventanera en aluminio con vidrio de seguridad y antruido, pasarelas perimetrales metálicas y sistema de corta soles en la fachada para minimizar el consumo de energía; muro verde en el costado del lobby.
- Muros en mampostería tradicional (bloque, ladrillo) más revoque, estucos plásticos y pintura. Además, muros divisorios y de cerramiento secos en fibrocemento y drywall con mejoramientos acústicos o aislante térmicos según el uso del espacio arquitectónico.
- Pisos en porcelanato 60x60 cm, duro piso, pisos en spc y alfombras de alto tráfico.
- Cielos falsos en algunas zonas en drywall, acústicos o térmicos según los usos del espacio arquitectónico.
- Pasamanos metálicos y en vidrio.
- Carpintería en madera y metálica en puertas.
- Cocinetas en madera fenólica y mesones en granito pulido.
- Divisiones de baños en acero inoxidable.
- Equipos especiales (ascensores, AA, talanqueras, torniquetes, tanques).
- Zonas urbanísticas con plazoletas en piedra royal beta y dorado.

• REDES TÉCNICAS

Para el funcionamiento integral del proyecto se cuentan con las siguientes redes técnicas:

- Hidrosanitarias.
- Gas.
- Energía normal y regulada.
- Telecomunicaciones.
- Control de accesos.
- Audio.
- Video.
- Integración.
- Red Contra Incendios.
- Aire Acondicionado.

• INFORMACION CONTRACTUAL

- **CONTRATANTE:** DEsur
- **CONTRATISTA:** Andina de construcciones y asociados S.A.S.
- **VALOR INICIAL DEL CONTRATO:** \$86.626.648.060
- **ADICION N1:** \$11.361.000.000
- **ADICION N2:** \$15.605.000.000

- **VALOR TOTAL CONTRATO:** \$113.592.648.060
- **FECHA DE INICIO:** 22 de marzo de 2022
- **PLAZO INICIAL:** 638 días calendario
- **Prórroga No1:** 102 días calendario
- **Prórroga No2:** 274 días calendario
- **PLAZO TOTAL** 1.014 días calendario
- **AREA TOTAL CONSTRUIDA:** 20.808.25 m²

3.1.5 CRONOGRAMA

El tiempo estipulado para el desarrollo de las diferentes actividades que comprenden el proceso de investigación está determinado en cuatro meses, en los cuales se enumeraron mes por mes las actividades principales a ejecutar, las cuales se describen en la siguiente tabla:

Tabla 35. Cronograma de actividades. Fuente propia.

	Mes 1				Mes 2				Mes 3				Mes 4			
Actividad	S 1	S 2	S 3	S 4	S 1	S 2	S 3	S 4	S 1	S 2	S 3	S 4	S 1	S 2	S 3	S 4
Levantamiento y análisis de la información existente sobre la implementación BIM en el proyecto.																
Revisión de la información y formulación del método de encuesta a aplicar																
Aplicación de encuesta al personal administrativo del proyecto																
Desarrollo de conclusiones de los resultados obtenidos																

El proceso y desarrollo de la investigación se ejecutó acorde a la metodología planeada, siguiendo cada uno de los pasos y procesos para aplicar las técnicas de entrevista y recolección de datos de los datos necesarios para el análisis y el alcance de los objetivos planteados al inicio del proceso investigativo, arrancando desde la identificación de los grupos focales para cada uno de estos, adicional seleccionando muy bien los datos que se representaban de forma reiterativa para de esta manera generar las encuestas para cada etapa del proceso, se aplicaron las debidas encuestas y se tabularon para poder obtener los parámetros y aspectos analizar los cuales se relacionan a continuación:

3.2 Identificación elementos y barreras

Esta etapa se centró en analizar los factores que afectaban una adecuada aplicación de la metodología BIM , por medio de entrevistas focales individuales inicialmente al personal desarrollador BIM del proyecto, el cual está conformado por 7 profesionales, 4 diseñadores de

las diferentes disciplinas (arquitectónico, estructural, hidrosanitario y eléctrico) y 3 profesionales BIM (BIM manager, Profesional BIM y Modelador BIM), identificando los siguientes elementos como las mayores barreras en la etapa de ejecución del proyecto (ver Figura 2). Una vez computarizada la información y los datos se obtiene con un mayor porcentaje el factor denominado POCA INVERSIÓN ECONOMICA EN LA INNOVACION DIGITAL, lo cual demuestra que los profesionales enfocados o directamente relacionados con la gestión de la metodología aun sienten que en su área y más aún en la infraestructura necesaria para la correcta gestión sienten que faltan elementos que complementan y apoyan dichas actividades, por lo cual es de vital importancia poder de obtener todas las herramientas necesarias y equipos a fin de poder cumplir con el requisito y la gestión, en según lugar se identificó la RESISTENCIA AL CAMBIO, la implementación trae consigo una serie de nuevos conocimientos y el manejo de herramientas ofimáticas necesarias para el entendimiento de la metodología y la adecuada gestión de la información en los modelos lo que hace necesario que cada uno de los profesionales del proyecto pueda estar acorde de manejarlos e interpretarlos más aun cuando estamos en las plataformas o los entornos de datos comunes, adicional venimos de trabajar de una forma tradicional y no digitalizada por lo cual estos debe ir cambiando para poder que los profesionales puedan usar la metodología como una herramienta acorde para el desarrollo de los proyectos. En cuanto a el factor de FALTA DE CAPACITACION, se identifica que si bien se tienen los equipos y software necesarios en el proyecto según el nivel requerido de implementación de la metodología definido para el proyecto es necesario reforzar al personal que no solo hace parte de la alimentación y gestión del modelo, sino que también se hace de vital importancia la capacitación de todos los involucrados en el proyecto y que tienen convergencia con el entorno común de datos, adicional para que se puedan interpretar y aprovechar todas las ventajas de la implementación y uso de los módulos necesarios para su completo entendimiento en el proyecto. Por último se identificó el factor de ACTUALIZACION DE HERRAMIENTAS OFIMATICAS, si bien en el proyecto se tienen los equipos para la gestión de la información y el desarrollo de los modelos, estos no son los adecuados ya que aún carecen de características específicas para el manejo de gráficos y renderizados necesarios, aun así, se puede gestionar la información y los modelos, pero esto podría mejorarse lo que ayudaría a un mejor rendimiento y eficiencia de todo el grupo de trabajo y más aún optimizar los tiempos.

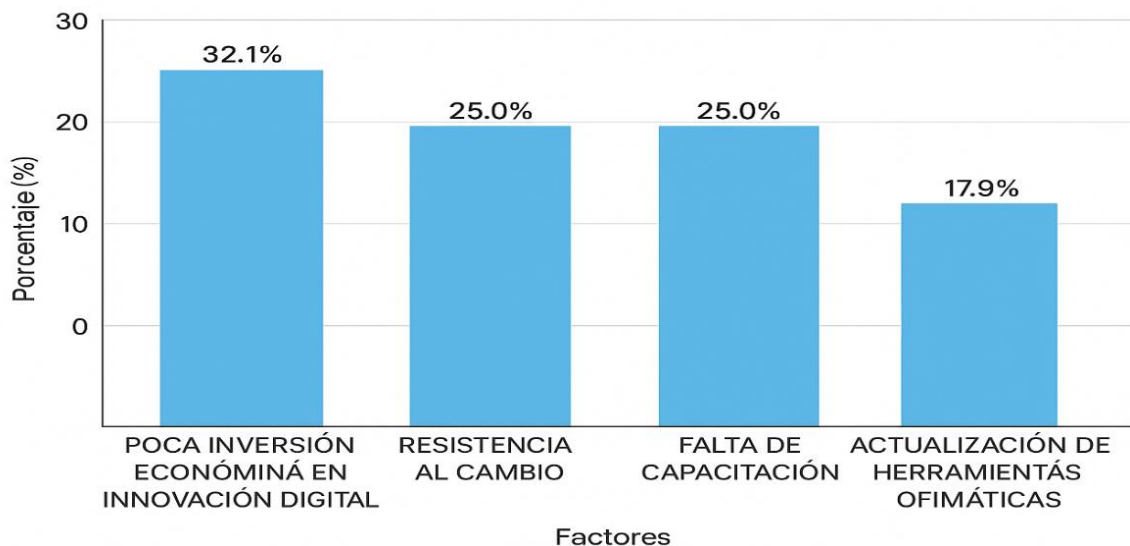


Figura 58. Factores y barreras implementación BIM.

3.3 Definición actividades

Con el fin de poder conocer las actividades que han mejorado significativamente las labores realizadas del día a día y la gestión de cada uno de los profesionales del equipo constructor, interventoría y diseñadores, se aplicó una entrevista focal a cada miembro del equipo se analizaron los principales aspectos y luego se aplicó una encuesta a un total de 40 profesionales de destacándose preguntas como (ver Figura 3):

8. Al usar la metodología BIM, ¿Qué tan útil te ha sido su implementación en las actividades diarias

* ☐

	EXCELENTE	BUENO	REGULAR	MALO
TIEMPO	☐	☐	☐	☐
COSTO	☐	☐	☐	☐
RECURSOS	☐	☐	☐	☐

Figura 59. Encuesta personal constructor, interventoría y diseñadores.

Entre los datos e información se definió priorizar las actividades o procesos que más tenían aspectos en común de los cuales salió la pregunta que se muestra en la Figura 4. Donde se pidió a los profesionales definir el proceso que se ha visto más afectado de forma positiva con la aplicación de la metodología BIM en dicha etapa del proyecto.

9. ¿Qué actividad considera usted que es primordial en su día a día y que se pueda mejorar al implementar la Metodología BIM? *

☐

Escoja solo una opción

- ☐ RUTA DE GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN
- ☐ NIVELES DE COMUNICACIÓN
- ☐ INTERACCIÓN DE LOS PROFESIONALES DEL PROYECTO
- ☐ CONTROL DE PROCESOS
- ☐ RETROALIMENTACIÓN

Figura 60. Encuesta personal constructor, interventoría y diseñadores.

La actividad o proceso que más se ha visto beneficiada por la implementación de la metodología BIM, ha sido INTERACCION DE LOS PROFESIONALES DEL PROYECTO, con este resultado se consolida una de las ventajas de la implementación como lo es el trabajo colaborativo y la comunicación de los equipos de trabajo, lo que está aportando directamente a mejorar los tiempos de respuesta en cuanto a consultas y actualizaciones del modelo en tiempo real, en segundo lugar, se destaca CONTROL DE PROCESOS, ya que se tiene definido las líneas de ingreso de información, de consulta y más un de tiempos de respuesta frente a los diferentes participantes del proyecto y la gestión administrativa, en tercer lugar se presenta RUTA DE GESTION DE LA INFORMACION, otra de las ventajas que nos sigue mostrando la implementación de la metodología en el proyecto es poder tener claro las fuentes de información y el entorno común de datos, ya que se ha podido concentrar toda la gestión de las diferentes áreas que intervienen de una forma organizada y precisa , lo cual garantiza una fuente confiable de consulta y reduce tiempos de gestión de archivo, en último lugar se mejoró la RETROALIMENTACION, uno de los

principales aspectos que se tiene que tener en cuenta cuando se realiza la implementación se presenta al momento de analizar los cambios y las mejoras de los procesos los cuales son de vital importancia para poder tener una curva de aprendizaje cada vez mejor en las diferentes áreas. El modelo que desarrolla el proyecto en cuanto a la implementación de la metodología BIM abarca hasta la 7D dimensión donde ya se está cargando un modelo actualizado de información y datos que permite el mantenimiento y operación del edificio, permitiendo tener fichas técnicas de productos instalados, características de los tipos de elementos instalados, tiempos en los cuales se deben aplicar los diferentes tipos de mantenimientos (ver Figura 5).

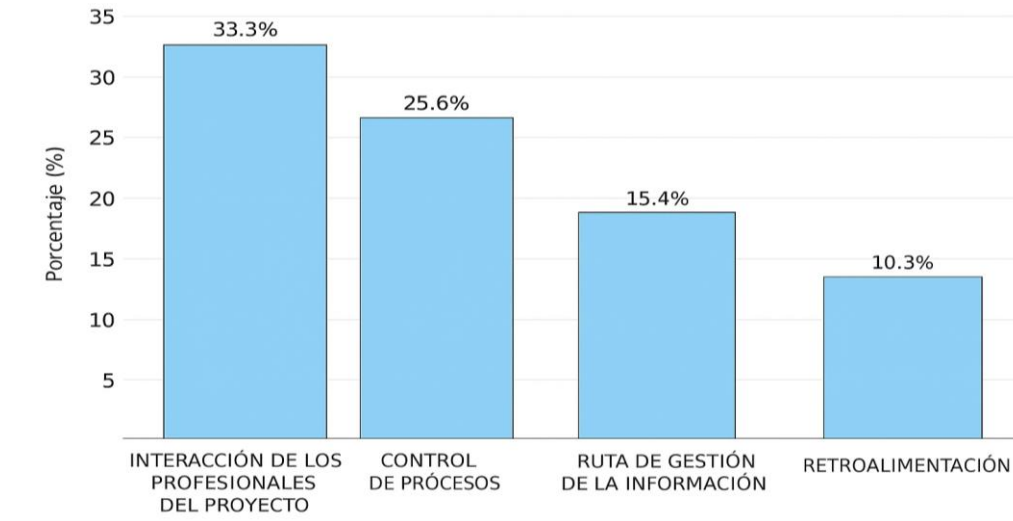


Figura 61. Actividades que destacan de la implementación BIM.

En la Figura 6, se muestra los componentes de cada una de las dimensiones aplicadas de la metodología BIM en el modelo del proyecto, destacándose adicional del componente volumétrico y dimensional, características adicionales como lo son las cantidades de materiales instalados, el valor de cada elemento, simulaciones de tiempos de ejecución de elementos principales, simulación de instalaciones de redes y los elementos mecánicos. Todo esto cumpliendo con la Estrategia Nacional BIM en Colombia que es un plan detallado de implementación gradual de la metodología a lo largo de 7 años, el cual inicio desde el año 2020 y culmina en el 2026, con el objetivo de digitalizar y capacitar al sector de la construcción y las operaciones en el país. Inicialmente, se enfoca en el sector público teniendo como motor principal para la adopción de la metodología, todo esto con el fin de poder motivar la demanda y facilitar la capacitación progresiva de todos los actores de la cadena de suministro.

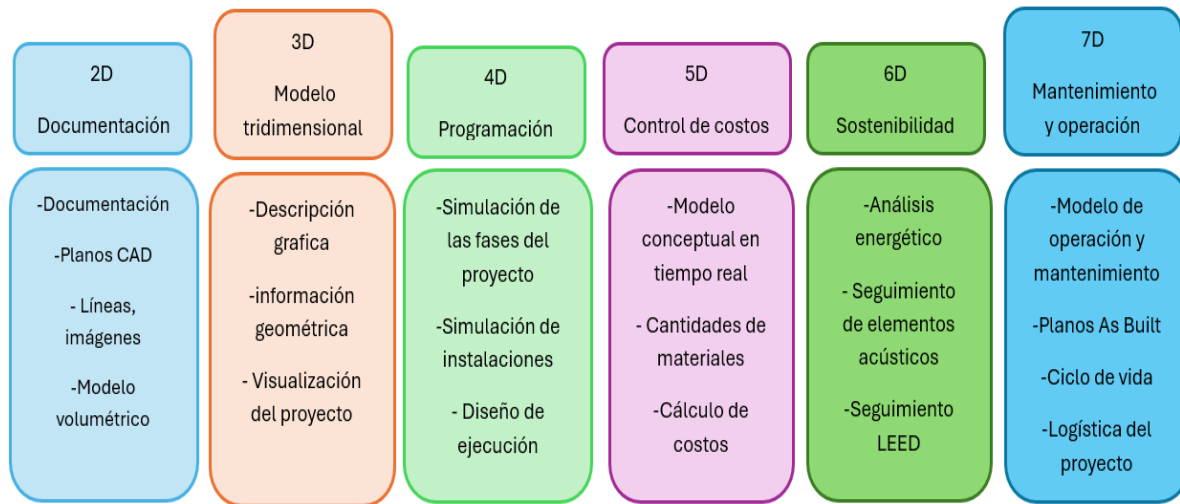


Figura 62. Dimensiones BIM. Fuente propia.

3.4. Percepción de los profesionales

Teniendo como una factor importante el componente de recursos humanos del proyecto, ya que para una adecuada implementación y gestión de la metodología BIM se requiere un equipo de trabajo que entienda la importancia y los diferentes niveles de información que se requieren recolectar en cada etapa del proyecto, por lo cual se hace importante también conocer la percepción de dicho personal frente a las ventajas que ofrece la metodología, se aplicó la encuesta a un total 43 profesionales los cuales son el total de la población y se definió una escala de Likert numérica con puntaje de 0 a 10 midiendo el nivel de satisfacción (ver Figura 7). Los datos obtenidos en el proceso de tabulación de la información dieron como resultado un porcentaje de 34,88% al nivel 10 de satisfacción calificando como excelente la implementación de la metodología en el proyecto lo cual muestra que el personal considera que ha sido muy útil el uso de todo el entorno colaborativo y la gestión de los modelos para el desarrollo del proyecto y más aún su compromiso con seguir cumpliendo con todos los requisitos y demás procesos necesarios para continuar con una adecuada implementación, el segundo porcentaje más alto fue de 25.58% dando una calificación de 9 lo que representa que también están de acuerdo con el uso de todo el componente BIM, durante el análisis de la información se evidencio que ninguno de los encuestados califico su nivel de satisfacción de 0 a 5 lo que indica que la gran mayoría están de acuerdo con el uso y la implementación de la metodología en el la etapa del proyecto de análisis, lo que demuestra significativamente una aceptación por todo el grupo de trabajo y permite seguir consolidando el buen uso de la metodología.

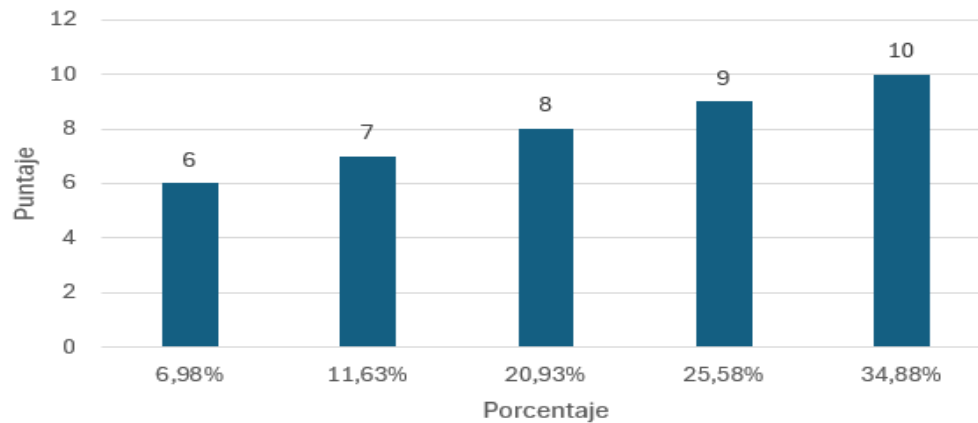


Figura 63. Nivel de satisfacción uso BIM.

En la Figura 8, se muestra una imagen del render del modelo del proyecto con la integración de todas las disciplinas tanto las redes eléctricas, hidrosanitarias, aire acondicionado y más aún el componente arquitectónico el cual se encuentra en la plataforma autores 360, es el modelo de consulta de todo el proyecto, esta alimentado con la información recopilada hasta el momento de ejecución, a medida que se van realizando actividades este a su vez es actualizado por el equipo BIM, por lo cual se convierte en una herramienta eficaz para la toma de decisiones y más aún para la resolución de dudas.



Figura 64. Renders CAM, Fuente modelo Autodesk 360.

Adicional al componente arquitectónico también se tiene todo el desarrollo de las estructuras del proyecto en el modelo identificando los elementos que componen cada parte del sistema, como se observa en la Figura 9, al igual que espacialmente se pueden identificar de en el modelo rutas de acceso, rutas de evacuación por medio de simulaciones en tiempo real, todo estas ventajas de visualización y de información son las que mejoran la logística y gestión del proyecto en cada una de las áreas que se complementan, en cuanto al seguimiento de ejecución gracias a la dimensión 4D podemos tener integrada la programación del proyecto en tiempo real, mostrando el avance real de esta manera observar los avances semanales o con la periodicidad que se

requiera, al momento de analizar colisiones e interferencias permite gestionar a tiempo los cambios necesarios para no afectar la programación general tal cual como se presenta en la Figura 10.



Figura 65. Renders CAM, Fuente modelo Autodesk 360

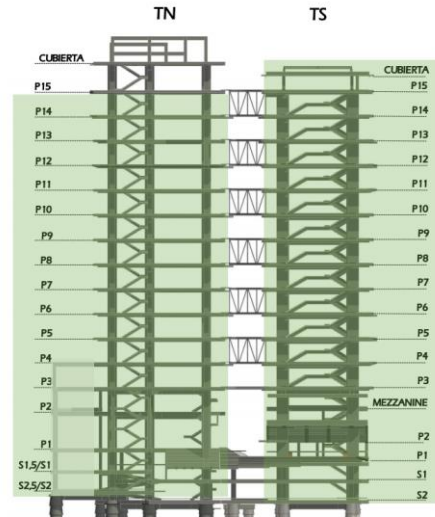


Figura 66. Renders CAM, Fuente modelo Autodesk 360

En cuanto a la representación gráfica y dimensional de las etapas o hitos del proyecto se complementa con la dimensión 5D donde ya tenemos la integración del presupuesto del proyecto a el modelo permitiendo también realizar el seguimiento de cada elemento, piso, nivel, espacio, torre y demás unidad funcional que se quiera controlar y gestionar tal cual como se muestra en la Figura 11. Teniendo la integración de todos los modelos y la información de cada proceso y elemento desarrollado en el proyecto garantizamos una conformación de una maqueta digital capaz de poder gestionar la operación y la logística de esta etapa de vida del proyecto.

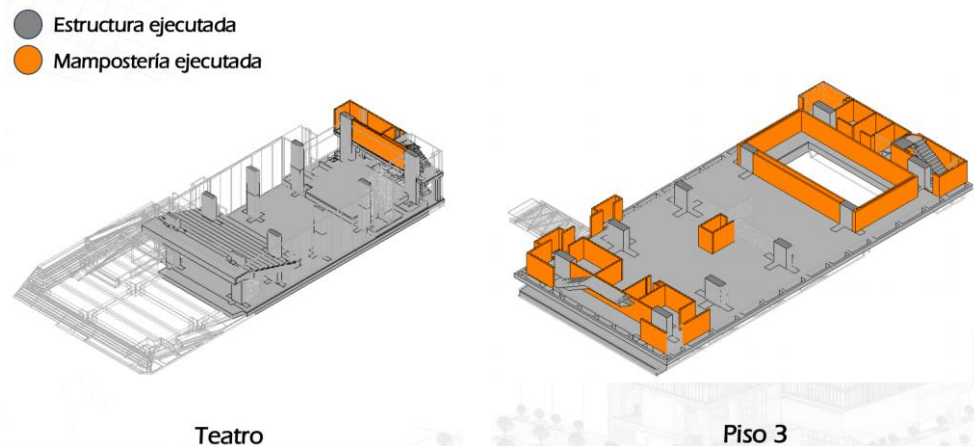


Figura 67. Teatro y piso 3 analizados.

4. CONCLUSIONES

La metodología BIM presenta ventajas significativas para la colaboración, gestión de proyectos y eficiencia energética en la construcción, aunque hay un gran potencial para mejorar la eficiencia, reducir costos y optimizar la gestión de proyectos públicos como en nuestro caso de estudio en el proyecto “CONSTRUCCION DEL CENTRO ADMINISTRATIVO MUNICIPAL DE ENVIGADO CAM, su implementación enfrenta desafíos como la resistencia al cambio y la falta de dominio del tema. A pesar de esto, en el sector público se ha notado un gran proceso de adopción gradual a través de la Estrategia BIM 2020-2026, con el objetivo de lograr un mandato nacional en 2026 para aumentar la consistencia y lograr ahorros significativos en proyectos de infraestructura.

A partir de los resultados obtenidos, en nuestro trabajo investigativo, se identifica que actualmente existen ventajas en la implementación de la metodología BIM como lo es el trabajo colaborativo y la comunicación de los equipos de trabajo, en segundo lugar, se destaca el control de procesos, ya que se tiene definido las líneas de ingreso de información; otra de las ventajas que nos sigue mostrando la implementación de la metodología en el proyecto es poder tener claro las fuentes de información y el entorno común de datos.

La metodología BIM es una herramienta que puede minimizar la brecha de productividad y costos en comparación con otras industrias, como la automotriz y la aeronáutica. Una de las razones de los sobrecostos en la construcción es la falta de precisión en los presupuestos, que no consideran todas las variables. BIM puede mejorar la precisión de los presupuestos, ayudando a reducir sobrecostos y proporcionando una base sólida para evaluar el desempeño de los proyectos.

Durante la ejecución, BIM se convierte en un elemento central para coordinar disciplinas, controlar tiempos y costos. Su eficacia depende de una buena planificación y del compromiso de todos los involucrados, así como de la infraestructura tecnológica adecuada. Cuando se cumplen estos requisitos, BIM mejora la calidad del proceso constructivo y evita problemas, facilitando la entrega del proyecto según lo planeado.

5. REFERENCIAS

- Bernal, C. A. (2016). Metodología de la investigación administración, economía, humanidades y ciencias sociales.
- bim forum colombia. (2020). BIM FORUM COLOMBIA.
- Construyendo el éxito, structuralia. (2023). La implantación de BIM en organizaciones, paso a paso.
- Enhancing BIM implementation in Spanish public procurement: A framework approach. (2024). Enhancing BIM implementation in Spanish public procurement: A framework approach.
- Fernández-Mora, V., Navarro, I. J., & Yepes, V. (2022). Integration of the structural project into the BIM paradigm: A literature review. *Journal of Building Engineering*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104318>
- gobierno de colombia. (2020). Estrategia Nacional BIM.
- ibrahim karatas. (2023). Investigating the impact of lean-BIM synergy on labor productivity in the construction execution phase.
- Pancca Rojo, M. E. (2022). La metodología BIM en el diseño de proyectos de edificación en una empresa constructora, Juliaca - 2022.
- Sampaio, A. Z. (2024). BIM multitask project manager: Responsibility, organization and interoperability. *Procedia Computer Science*, 239, 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.06.146>

Vallejo, U. C., Marín, N., Correa, L., Marín, R., & Para Correspondencia, A. (2020). Implementación de la metodología BIM en el Perú: Una Revisión Implementation of BIM Methodology in Peru: A Review. <https://doi.org/10.37787/pakamuros-unj.v9i2.180>

PROPUESTAS METODOLÓGICAS EN LA LOGÍSTICA DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Heidy Katherine Martínez Galvis¹, Daniel Esteban Piedrahita López¹, Daniela Vásquez Cano¹, Edison Aldemar Hincapié Atehortúa¹

¹ Grupo de Investigación Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, hkmartinez@est.colmayor.edu.co, dpiedrahita@est.colmayor.edu.co, danielavc@est.colmayor.edu.co, edison.hincapie@colmayor.edu.co,

Palabras clave: Metodologías ágiles, Scrum, Kanban, Lean, JIT.

1. INTRODUCCIÓN

La logística ha sido un pilar esencial en el desarrollo de la humanidad desde sus orígenes, en efecto desde los primeros grupos nómadas que trasladaban sus asentamientos en busca de alimento y refugio, con el tiempo las grandes civilizaciones potenciaron la logística en los ámbitos militares y comerciales, un punto de inflexión se presentó durante la revolución industrial, cuando el ferrocarril y el barco redujeron los tiempos y costos de transporte, este avance no solo amplió el comercio global, sino que también se tuvo acceso a bienes manufacturados (Universal Cargo, 2021). Actualmente, la logística se consolida como un factor estratégico para la competitividad empresarial y en el desarrollo del comercio, el alcance está en el transporte, la distribución, almacenamiento, inventarios, y gestión de la información. Sin embargo, con el tiempo surgen nuevas técnicas que buscan optimizar las entregas de resultados por medio de metodologías ágiles que pretenden hacer las cadenas de suministro más flexibles, rápidas y adaptables a las necesidades del sector de la construcción, siendo las más utilizadas Lean Construction, Kanban o Scrum. De esta forma la logística se perfila como un proceso cada vez más eficiente, sostenible y rentable (Universal Cargo, 2021). Por esta razón al ejecutar un proyecto de construcción se debe tener en cuenta su dinámica, complejidad y que puede presentar cambios en diferentes fases del proceso, la baja productividad en la industria, afectada por los retrasos y los sobrecostos debido a la deficiencia en la planificación y gestión de proyectos, para ello se identificaron y categorizaron herramientas de gestión de proyectos, con el fin de tener herramientas informáticas que permitan optimizar las diferentes iteraciones necesarias en la etapa de planificación del proyecto. (Hincapié Atehortúa, 2022)

Adicionalmente, contando un enfoque más aplicado, ha sido posible identificar casos reales donde la gestión logística ha contado con deficiencias, logrando afectar de forma negativa la eficiencia general del proyecto, como es el caso de la investigación desarrollada por Romero Alhuay & González Vásquez (2024) quienes analizan el modo en que una empresa constructora presento sobrecostos debido a la mala gestión de su inventario. Aplicando encuestas al personal y analizando estadísticamente la información recolectada, se pudo identificar la necesidad de establecer una mejor articulación entre las áreas y la definición de estrategias que mejoren la planificación logística, logrando un mayor aprovechamiento del espacio destinado para inventario y logrando una rotación eficiente de los diferentes insumos. En cuento al sistema propuesto por Basheer et al. (2024) que emplea Blockchain para la gestión de materiales en proyectos de construcción, representa sin duda un avance importante al otorgar mayor control a los participantes al acceso a la información de los materiales, facilitando la toma de decisiones y reduciendo el riesgo de que se presenten retrasos en el suministro de insumos claves. Aun

cuando no corresponde a una metodología ágil, este sistema para la gestión de materiales logra la integración de principios de blockchain para permitir una mejor administración del inventario en proyectos complejos. Es enfoque permite se obtenga mayor eficiencia, transparencia en la información e incluso rentabilidad dentro de la cadena de suministro de materiales de construcción, destacando así la relevancia que tiene al asegurar que el proyecto pueda ser ejecutado según esté planeado. Lo establecido por Basheer et al. (2024) logró ser evaluado en contextos reales de construcción, demostrando importantes beneficios para el desarrollo de este tipo de proyectos como fue la reducción de los costos relacionados con la obtención de los materiales, menor conflicto legal entre los actores relacionados con el proyecto, y en general mayor capacidad para tomar decisiones dado el acceso continuo sobre la información. Aun cuando no reemplaza un enfoque ágil que integre todos los aspectos del proyecto, el uso de este tipo de soluciones como es blockchain o similares, representan un complemento de utilidad para otorgar mayor flexibilidad a los proyectos, dado que según menciona Seppänen & Peltokorpi (2016), este tipo de integración logra agilizar considerablemente el flujo de la información, facilitando que se cumplan plazos y contribuyendo también a que la obra mejore continuamente conforme a las necesidades o requerimientos existentes.

Por su parte, Safa et al. (2014) propone el desarrollo de un modelo integrado para la gestión de materiales de construcción, fundamentado en distintas técnicas multicriterio para la adecuada selección de proveedores y el control en general del proceso logístico, destacando que, a través de estas condiciones de adquisición, seguimiento a pedidos y manejo en general de los inventarios, se logra una mayor eficiencia en toda la cadena de suministro. Por lo tanto, el uso de este enfoque en un escenario práctico, específicamente en el análisis de casos industriales relacionados con la selección y gestión de proveedores, demostró ser de gran utilidad en condiciones reales de operación dado que incluso ratifica la necesidad hacia sistemas más adaptativos en la gestión de materiales dentro del sector de la construcción que permita una oportuna adaptación a las condiciones del entorno. En la actualidad, uno de los factores que más inciden en los retrasos y sobrecostos en proyectos de construcción es la inadecuada planificación logística. Entre los problemas más frecuentes se encuentran el almacenamiento deficiente, donde los materiales se deterioran fácilmente generando una pérdida económica, debido a la limitada comunicación entre los profesionales del equipo de trabajo, lo cual a su vez perjudica negativamente en la eficiencia del proyecto (Ballard & Howell, 2003). La logística de materiales de construcción requiere de una adecuada planificación y gestión a través de diferentes tipos de metodologías que permitan un almacenamiento y entrega eficientes de los materiales y equipos requeridos en un proyecto de construcción. Esta investigación se enmarca en un enfoque cualitativo que busca comprender, describir y analizar la implementación de metodologías ágiles en la logística de materiales para la construcción desde una perspectiva interpretativa que permita disminuir los sobrecostos y tiempos de ejecución de un proyecto.

2. METODOLOGÍA

La Figura 1 muestra el diagrama metodológico del proyecto de investigación, donde se plantea la identificación de metodologías ágiles en la gestión de la logística de materiales, realizar el análisis de las causas más comunes que generan sobrecostos relacionados con la logística de materiales a través de un diagrama de causa efecto que permite clasificar y visualizar los principales factores involucrados, y finalmente, establecer condiciones de evaluación de las metodologías híbridas existentes aplicadas a la logística de materiales en la construcción como justo a tiempo, lean Construction, entre otros.

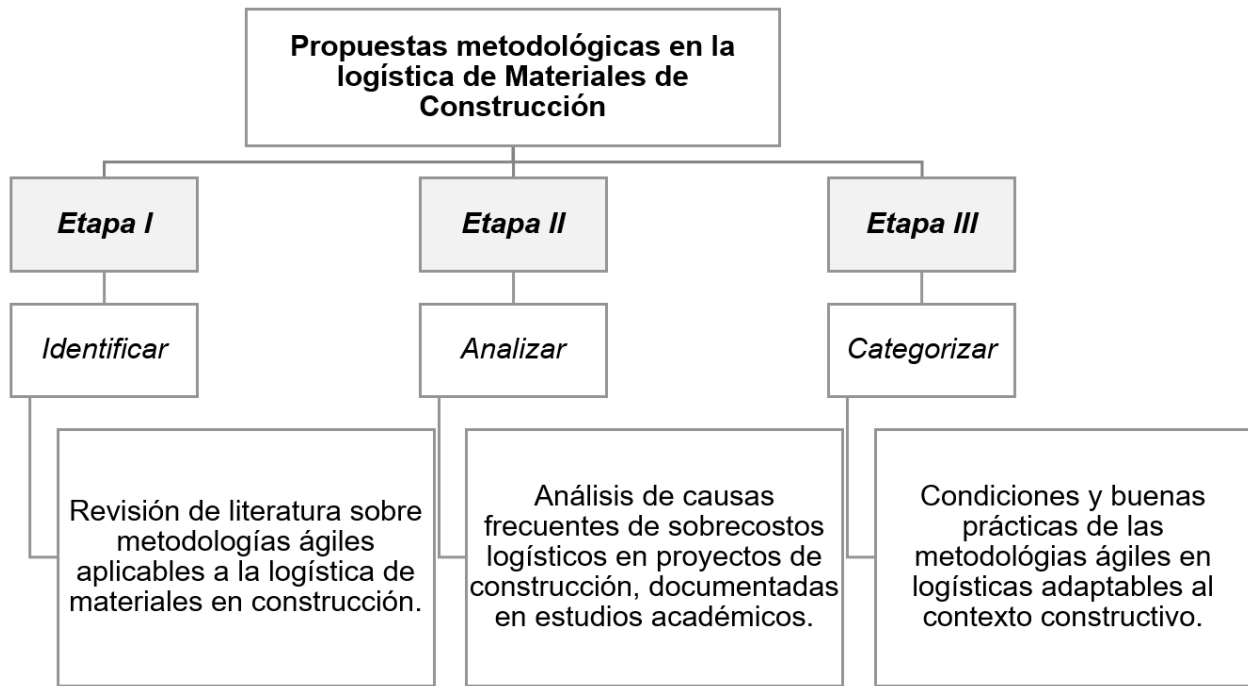


Figura 68. Diagrama metodológico.

2.1 Identificar

Se identificaron las diferentes metodologías que pueden ser aplicadas en la logística de materiales de construcción, a través de una revisión sistemática de literatura (RSL) enfocada al uso de distintas fuentes académicas como puedan ser libros, tesis o trabajos de grado, artículos científicos relacionadas con el enfoque de la investigación, buscando de este modo determinar los enfoques existentes actuales que combinan las principales metodologías ágiles para el sector de la construcción.

2.2 Analizar

Se analizaron los factores más frecuentes que generan sobrecostos en el desarrollo de procesos logísticos, tomando como referencia casos documentados dentro de la literatura académica disponible, como son artículos, tesis, pudiendo así generar un mayor contexto sobre las situaciones más comunes que se presentan en proyectos de construcción, especialmente aquellos donde las fallas logísticas logran comprometer el desempeño del proyecto, plasmando esto en un diagrama de causa efecto para facilidad de comprensión de los resultados obtenidos. Adicionalmente, se contemplan estudios que contemplan el uso de metodologías ágiles en proyectos de construcción a fin de establecer su contribución en sobrecostos generados o si se presentan limitaciones en contextos puntuales dentro del sector.

2.3 Categorizar

La última etapa se centra en comparar las metodologías identificadas y analizadas anteriormente, revisando los casos de aplicación concretos en contextos de construcción, así como las prácticas logísticas que hayan destacado en cada caso. De este modo, es posible identificar elementos comunes que podrían adaptarse a proyectos con limitaciones comunes tales como la falta de espacio, disponibilidad limitada de recursos o la necesidad de realizar entregas coordinadas, por lo que adicional de validar la pertinencia de alguna metodología, es necesario validar las

condiciones en que ha sido aplicada y la posibilidad de aportar para reducir o incluso eliminar los sobrecostos que pueden presentarse en el desarrollo de proyectos de construcción.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Identificación de metodologías

A continuación, se presentan algunas de las metodologías identificadas, junto con se descripción y formas comunes de aplicación en entornos de obra o que dispongan del potencial para ser implementadas en este contexto. Cabe destacar que para la elaboración de este trabajo se analizaron más de 40 artículos relacionados con el tema, lo que permitió identificar tendencias, enfoques y buenas prácticas documentadas.

Tabla 36. Metodologías ágiles aplicables a la logística de materiales en obra

Metodología	Qué es	Aplicación
Lean Construction	Según Porras Díaz et al. (2014) y Rojas López et al. (2017), corresponde a la gestión colaborativa que permite eliminar desperdicios o actividades sin valor, generando procesos de construcción sin pérdidas.	• Incluye principios como JIT (Just InTime) y TQM (Total Quality Management), planificación y control de las operaciones, así como el análisis de pérdidas del proyecto. • Se realizan reuniones cortas semanales con los diferentes actores relacionados con el proyecto. • Evita la existencia de inventarios excesivos, así como de desarrollar cualquier actividad que no aporte realmente valor al desarrollo general del proyecto.
Kanban	Fierro & Peñaloza López (2023) así como Castillo Anzules & Guaña Moya (2024), coinciden en que se trata de un sistema visual ágil para el control de flujo empleando recursos como tableros y tarjetas.	• Tableros físicos o digitales que ayudan a definir el estado en que se encuentra una tarea o proceso en general. • Se pueden asignar distintos colores para pedidos, como pueden ser pendientes, en tránsito, entregados. • Es posible su integración en organizaciones de cualquier tamaño o independiente del sector al que esté vinculado.
Scrum	Corresponde a un método ágil con equipos autoorganizados y sprints, y aun cuando su uso recurrente es el desarrollo de software, sus principios pueden ser replicados en distintos contextos (Estrada Velasco et al., 2021; Navarro Cadavid et al., 2013).	• Se definen distintos equipos para el desarrollo general del proyecto, teniendo cada uno autonomía para la ejecución de un rol específico que haya sido asignado. • Determina un Product Backlog de materiales priorizado, según las condiciones requeridas por el cliente, siendo la base para el desarrollo de operaciones u obtención de recursos. • Se realizan Sprints recurrentes que corresponde a una ventana de tiempo, donde se deben hacer entregas puntuales, por lo que su duración varía según se requiera, implicando cada Sprint de planificación, desarrollo y revisión. • Es posible realizar reuniones diarias para resolver bloqueos o resolver situaciones que hayan emergido o comprometan el desarrollo del proyecto.
Just inTime	Corresponde a un método de gestión en donde las entregas de materiales se	• Se evita realizar pedidos innecesarios que impliquen posteriormente aumentar los niveles de inventario de materiales.

	hacen solo cuando se necesitan, asegurando un nivel de inventario adaptado a la necesidad (Bravo Aguilar, 2023).	• Se opta por el desarrollo de entregas parciales programadas que respondan a la demanda de determinado producto o proceso. • Se requiere de una sincronización precisa entre el cronograma de obra y suministro a fin de presentar desabastecimiento que incurra en retrasos para el desarrollo del proyecto.
BIM	Según mencionan Pérez Gómez Martínez et al. (2019), el modelado BIM permite diseñar en tres dimensiones el desarrollo del proyecto, incluyendo costos, tiempo y todo tipo de recurso requerido. Se destacan los enfoques BIM 4D enfocado a la gestión del tiempo y 5D respecto al proceso y costos relacionados.	• Saca provecho del uso de la tecnología para ofrecer una representación precisa del proyecto, llegando a anticipar las cantidades requeridas por cada una de las fases. • Cuenta con la capacidad de simular retrasos y costos en el desarrollo del proyecto, sumado a que es posible realizar ajustes conforme se vaya desarrollando el proyecto y evaluar nuevos panoramas. • Permite la integración en tiempo real con proveedores, aplicando el principio JIT, a fin de que los insumos sean entregados en el momento realmente requerido.

3.2 Análisis de causas que generan sobrecostos y retrasos

Para iniciar, se destaca lo indagado por Romero Alhuay & González Vásquez (2024) quienes lograron evidenciar el modo en que la falta de integración entre las áreas o equipos de trabajo, una eficiente gestión de inventarios y la baja trazabilidad de los materiales empleados, generó el aumento considerable de los costos totales de la ejecución del proyecto, mientras que Rudeli Ametrano (2019) evidencia y clasifica los materiales por grupos en donde logra reunir las causas que genera los retrasos en obra, siendo estos subgrupos conformados por la calidad de los materiales, el cambio de materiales según requerimiento del proyecto, la entrega de los materiales y el uso inapropiado de estos. Por su parte, Peiris et al. (2023) indagó acerca de la coordinación logística en el desarrollo de proyectos modulares, los cuales se vieron afectados por variables externas como las restricciones urbanas o la presencia de eventos imprevistos, reforzando así la necesidad de contar con estrategias más flexibles y mejor integradas que permitan responder de una forma eficiente a contextos no esperados, evitando incurrir en estos costos o esfuerzos complementarios. En cuanto a lo indagado por parte de Grondona Pastrana et al. (2023), estos lograron identificar que durante el desarrollo de obras civiles es frecuente se presenten fallas en aspectos como el almacenamiento de materiales y el control de inventarios, incluyendo el mal recibo de mercancías o la falta de seguimiento adecuado sobre los distintos insumos requeridos, generando en ocasiones pérdidas de material por causa de robos o deterioros, afectando de forma directa la disponibilidad suficiente de presupuesto para lograr el oportuno desarrollo del proyecto. Adicionalmente, es posible destacar la ausencia de tecnologías para el seguimiento y control de los insumos, así como la poca planificación del uso del espacio disponible, por lo que se termina incurriendo en sobrecostos logísticos. Por otro lado, lo indagado por Castell Bermúdez et al. (2020) permite analizar con mayor precisión las causas más comunes que generan el desabastecimiento por parte de las empresas y el desarrollo de proyectos logísticos, destacando de forma particular la falta de integración con las condiciones de servicio de los proveedores, la presencia de errores recurrentes en la planificación de las condiciones de demanda, así como una baja precisión en la gestión de los inventarios, logrando de este modo llegar a impactar de forma negativa sobre la promesa de entrega y por consiguiente, sobre la capacidad de poder garantizar la satisfacción final del cliente. Lo anterior se sintetiza en la Figura 2 referente al análisis causa efecto de los sobrecostos logísticos presentes, determinando las principales categorías de causas. En general y ratificado a partir del análisis realizado, las causas identificadas coinciden en que los sobrecostos logísticos se generan a partir de la combinación de múltiples deficiencias en acciones como la planificación y control del proyecto, junto con algunos factores externos difíciles de anticipar o gestionar, por lo que se

destaca esta situación evidencia la importancia y necesidad de lograr integrar mejores prácticas de gestión y tecnologías disponibles a fin de poder anticiparse a este tipo de escenarios.



Figura 69. Análisis de causa – efecto de sobrecostos en proyectos.

3.3 Elementos comunes y condiciones de aplicación

A partir de la revisión realizada en los apartados anteriores, fue posible identificar que algunas metodologías como lo son Lean Construction, Kanban y Just in Time comparten un enfoque centrado principalmente en la reducción de desperdicios durante el desarrollo de proyectos, incluyendo aquellos enfocados al sector de la construcción, empleando el control visual de procesos y la sincronización entre el suministro y la ejecución, buscando en general un uso óptimo de los recursos disponibles. En cada uno de los casos, se hace especial énfasis en la necesidad de haber realizado una planificación realista, reuniones periódicas para el seguimiento a las diferentes etapas del proyecto y la colaboración constante entre cada uno de los actores involucrados, siendo aspectos fundamentales para que estas metodologías puedan implementarse de forma favorable, según lo mencionan estudios como los de Porras Díaz et al. (2014) y Fierro & Peñaloza López (2023). Adicionalmente, la información analizada muestra que para que una metodología ágil logre adaptarse a un proyecto y brindar los resultados esperados, debe poder adaptarse a las restricciones de las que disponga el proyecto, como puede ser el espacio disponible para el almacenamiento de insumos, la variación en la demanda de materiales o los tiempos implicados en el desarrollo del estudio. Por ello se presentan enfoques como Just in Time o BIM 4D/5D, según Pérez Gómez Martínez et al. (2019), los cuales se han enfocado a brindar soluciones a partir de estos restos, enfocándose en una entrega programada y controlada de materiales según se vayan desarrollando las distintas fases del proyecto, ayudando a evitar situaciones de desabastecimiento o caso contrario, la acumulación innecesaria de insumos. Para finalizar, es posible observar que la integración entre herramientas ágiles y el uso de tecnologías que facilitan la gestión de la información, incluyendo el uso de plataformas digitales, permite obtener una mejora importante en las condiciones de trazabilidad, las condiciones de comunicación entre los equipos y un control más eficiente de los niveles de inventario, contribuyendo de este modo a la reducción de sobrecostos y en general desperdicios que puedan

generarse, según lo mencionan Seppänen & Peltokorpi (2016).

Tabla 37. Metodologías ágiles aplicables a la logística de materiales en obra.

Metodología	Enfoque principal	Tipo de empresa donde aplicar	Beneficio principal
Lean Construction	Eliminación de desperdicios	Grandes constructoras	Mayor eficiencia y productividad
Kanban	Control visual de flujo	PYMES y contratistas	Organización y trazabilidad
Scrum	Equipos ágiles por fases	Empresas innovadoras	Flexibilidad y trabajo colaborativo
Just in Time (JIT)	Entrega según demanda	Constructoras con cadena logística madura	Reducción de inventarios y costos
BIM 4D/5D	Planificación digital	Empresas con enfoque tecnológico	Control de tiempo y costos

4. CONCLUSIONES

El desarrollo de la investigación permitió evidenciar que los sobre costos asociados a la logística de materiales en proyectos de construcción provienen, en gran medida, de fallas en la etapa de planificación, al no encontrarse esta alineada con las condiciones reales del proyecto. Asimismo, se identificaron falencias en la gestión de los parámetros de almacenamiento, lo que conlleva a una administración ineficiente de inventarios, reflejada tanto en la insuficiencia de insumos como en su acumulación excesiva.

Estas problemáticas inciden directamente en el desempeño general del proyecto, generando retrasos en la ejecución, reprocesos y aumentos en los costos previstos. En este sentido, se destaca la necesidad de fortalecer la capacidad de coordinación entre las distintas áreas involucradas y mejorar la trazabilidad de los materiales mediante una gestión logística externa más eficiente, que contemple la adecuada programación de contratos, suministros y entregas parciales en obra conforme a las necesidades definidas en el diseño de ejecución. También fue posible identificar que el uso de metodologías como Lean Construction, Kanban y Just in Time, al igual que herramientas como BIM, pueden contar con la capacidad de aportar significativamente una adecuada planificación que impacta la reducción de desperdicios generados en el desarrollo de proyectos, así como la mejora general en los flujos de trabajo. Aun así, su éxito dependerá en gran medida de la forma en que logren adaptarse las condiciones específicas del proyecto y del entorno en que será desarrollado.

Como limitación encontrada durante la ejecución de la investigación, el análisis fue desarrollado a partir de la revisión únicamente de fuentes documentales, por lo que sería pertinente para futuros estudios incluir validaciones en campo o estudios de caso puntuales que permitan evaluar con mayor precisión la efectividad de las metodologías durante la planificación y ejecución de obras reales, contando a la vez con la posibilidad de identificar y considerar restricciones operativas que puedan influir en el desarrollo del proyecto.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia por brindar el contexto académico en el cual se desarrolló esta investigación. De igual manera, se reconoce el acompañamiento de los docentes y compañeros del programa, cuyos aportes, comentarios y

apoyo constante fueron esenciales durante todo el proceso. Su orientación y compromiso académico resultaron fundamentales para la consolidación de los resultados presentados en este trabajo.

6. REFERENCIAS

- Ballard, G., & Howell, G. (2003). Lean project management. *Building Research & Information*, 31(2), 119–133. <https://doi.org/10.1080/09613210301997>
- Basheer, M., Elghaish, F., Brooks, T., Pour Rahimian, F., & Park, C. (2024). Blockchain-based decentralised material management system for construction projects. *Journal of Building Engineering*, 82, 108263. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.108263>
- Bravo Aguilar, V. M. (2023). Just inTime para optimizar la productividad en las empresas. *Horizonte Empresarial*, 10(1), 138–146. <https://doi.org/10.26495/rce.v10i1.2479>
- Castell Bermúdez, J., Villarreal, L. C., Fernández, L., Acosta León, O., Mojica Herazo, J., & Rojas Millán, R. (2020). Principales causas que provoca el desabastecimiento en las operaciones logísticas y su impacto en la promesa de entrega. *Boletín de Innovación, Logística y Operaciones*, 2(2), 17–22. <https://doi.org/10.17981/bilo.02.02.2020.03>
- Castillo Anzules, M., & Guaña Moya, J. (2024). Kanban: Una metodología ágil para la gestión eficiente del flujo de trabajo en el desarrollo de software, una revisión sistemática. *Revista Ingenio Global*, 3(1), 17–30. <https://doi.org/10.62943/rig.v3i1.68>
- Estrada Velasco, M. V., Núñez Villacis, J. A., Saltos Chávez, P. R., & Cunuhay Cuchipe, W. C. (2021). Revisión Sistemática de la Metodología Scrum para el Desarrollo de Software. *Dominio de Las Ciencias*, 7(4), 434–447.
- Fierro, C., & Peñaloza López, V. (2023). Metodología Kanban para procesos internos de la cadena de valor en pequeñas y medianas empresas. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(3). <https://doi.org/10.56712/latam.v4i3.1085>
- Grondona Pastrana, M. Á., Ramos Saltaín, T. H., Ahumada Serrano, C. A., & Jassir Ufre, E. (2023). Incidencia de los procesos logísticos y la cadena de abastecimiento en las obras civiles como mecanismo de mejora en el almacenamiento de la construcción. *INVENTUM*, 18(35), 50–59. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.18.35.2023.50-59>
- Hincapié Atehortúa, E. A. (2022). *La iteración como herramienta de gestión y planificación en el diseño de ejecución en proyectos de construcción* [Tesis Maestría]. Universidad Nacional de Colombia.
- Navarro Cadavid, A., Fernández Martínez, J. D., & Morales Vélez, J. (2013). Revisión de metodologías ágiles para el desarrollo de software. *Prospectiva*, 11(2), 30–39.
- Peiris, P. A. N., Hui, F. K. P., Ngo, T., Duffield, C., & García, M. G. (2023). Challenges in Transport Logistics for Modular Construction: A Case Study. In R. Dissanayake, P. Mendis, K. Weerasekera, S. De Silva, S. Fernando, & C. Konthesingha (Eds.), *Lecture Notes in Civil Engineering* (pp. 501–510). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2886-4_35
- Pérez Gómez Martínez, G. J. F., Del Toro Botello, H. Y., & López Montelongo, A. M. (2019). Mejora en la construcción por medio de lean construction y building information modeling: caso estudio. *Revista de Investigación En Tecnologías de La Información*, 7(14), 110–121. <https://doi.org/10.36825/RITI.07.14.010>
- Porras Díaz, H., Sánchez Rivera, O. G., & Galvis Guerra, J. A. (2014). Filosofía Lean Construction para la gestión de proyectos de construcción. *Avances Investigación En Ingeniería*, 11(1), 32–53. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.298>
- Rojas López, M. D., Henao Grajales, M., & Valencia Corrales, M. E. (2017). Lean construction – LC bajo pensamiento Lean. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 16(30), 115–128. <https://doi.org/10.22395/rium.v16n30a6>

- Romero Alhuay, M., & González Vásquez, S. L. (2024). *Gestión logística y los proyectos de construcción, Unidad Ejecutora Pasco Selva Central - 2023* [Tesis Pregrado]. Universidad Peruana Los Andes.
- Rudeli Ametrano, N. C. (2019). *Proyectos de construcción determinación de causas principales de retraso y desarrollo de modelos estadísticos para la mejora* [Tesis Doctorado]. Universidad de Navarra.
- Safa, M., Shahi, A., Haas, C. T., & Hipel, K. W. (2014). Supplier selection process in an integrated construction materials management model. *Automation in Construction*, 48, 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.08.008>
- Seppänen, O., & Peltokorpi, A. (2016). A New Model for Construction Material Logistics: From Local Optimization of Logistics Towards Global Optimization of on-Site Production System. *24th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, 73–82.
- Universal Cargo. (2021, April 27). *A Brief History of Logistics*. International Business, Logistics, Shipping. <https://www.universalcargo.com/a-brief-history-of-logistics/>

GUÍA METODOLÓGICA TÉCNICA Y NORMATIVA PARA LA INCORPORACIÓN DE CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD EN ETAPA DE PREFACTIBILIDAD PARA PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN EN LOS MUNICIPIOS DE ENVIGADO Y LA ESTRELLA

German Darío Peña García¹, Kevin Aldair Márquez Cortes¹, Sebastián Morales Chica¹, Pablo Andrés Pérez López

¹ Grupo de Investigación Ambiente, Hábitat y Sostenibilidad, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, gpenna@est.colmayor.edu.co, kamarquez@est.colmayor.edu.co, smoralesc@est.colmayor.edu.co, pablo.perez@colmayor.edu.co

Palabras clave: Construcción sostenible, normativa urbana, prefactibilidad, incentivos, guía metodológica.

1. INTRODUCCIÓN

La sostenibilidad se ha consolidado como una práctica imprescindible para el desarrollo y crecimiento urbano contemporáneo, en el cual se busca la adaptación del entorno de los seres humanos a un factor limitante; la capacidad de asumir la presión humana de manera que sus recursos naturales no se degraden irreversiblemente garantizando una mayor conservación para las futuras generaciones (Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo, 1987). La industria de la construcción es uno de los principales sectores que afecta el calentamiento global, responsable del 40% del consumo de energía asociado a edificaciones y el 11% de emisiones de gases de efecto invernadero asociados a la manufactura de los materiales usados en la construcción de edificaciones. Representa un volumen de empleo que se refleja en la economía a nivel mundial y es uno de los principales consumidores de recursos naturales y generadora de diferentes tipos de residuos (Bautista Gordillo et al., 2018). Debido a esto, surge el término “construcción sostenible” aplicable a las edificaciones que en su conjunto conforman ciudades, el cual supone un ejercicio profesional desde la responsabilidad con el medio ambiente, promoviendo alternativas en los procesos de construcción para minimizar el agotamiento de recursos, previniendo la degradación ambiental y proporcionando un ambiente saludable (Bedoya C.M., 2011). En consecuencia, diferentes entidades gubernamentales mundiales y locales, han incorporado marcos normativos que transversalizan los principios de sostenibilidad en procesos de desarrollo territorial (García Henao, 2003).

La incorporación de normativas urbanas referentes a sostenibilidad ha ganado fuerza en las regulaciones, sin embargo persisten vacíos que dificultan el proceso de aplicación para los actores involucrados, aunque se reconocen avances en los procesos, aún se evidencian problemas de coordinación entre los sectores público y privado, lo que genera medidas insuficientes y fragmentación institucional, impidiendo contar con guías claras y actualizadas sobre procedimientos normativos (Rodríguez Murcia, 2021), éste panorama se contrasta con información del Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS), que indica que para 2023 sólo el 19% de las construcciones fueron registradas como sostenibles a pesar de que el 85% de las personas percibe el desarrollo de políticas y normativas de sostenibilidad como un movilizador para el sector y reconoce los incentivos tributarios asociados a este tipo de proyectos, sin embargo el 50% de los desarrolladores no solicita dichos beneficios principalmente por la percepción en la complejidad de los trámites y porque los tiempos de respuesta institucional no

se ajustan a los tiempos de ejecución en obra (CCCS, 2024). En este contexto, estudios jurídicos identifican que los instrumentos de ordenamiento basados en uso del suelo poseen un potencial limitado por la débil articulación entre políticas urbanísticas y ambientales (De La Sala et al 2019), de manera similar, investigaciones como la de Holguín Ortiz (2023), sobre la incorporación de políticas de sostenibilidad al POT de Envigado, evidencia avances graduales, pero también limitaciones en la implementación de herramientas técnicas, resaltando la necesidad de fortalecer la articulación entre planificación territorial y estrategias de construcción sostenible.

En función de lo anterior, la investigación adquiere relevancia al construirse como una oportunidad de mejora frente a las limitaciones identificadas al incorporar criterios de sostenibilidad en los procesos de este tipo de construcciones, dificultad ocasionada por un vacío de información y guía técnica, obstaculizando la iniciativa de que sea un tema tratado desde la etapa de prefactibilidad de los proyectos, la cual es considerada como un momento clave para anticipar impactos, mitigar riesgos metodológicos y optimizar procesos operativos. En este sentido la propuesta metodológica busca generar insumos conceptuales que fortalezcan la aplicación de lineamientos técnicos y normativos en los procesos del sector de la construcción sostenible. De este modo se contribuirá tanto al ámbito académico como al práctico ofreciendo insumos para la ejecución e implementación eficiente de las políticas urbanas vigentes, las cuales, en su mayoría, son de reciente adopción como los municipios de Envigado y La Estrella que buscan actualizarse a medida que los desafíos de cada territorio avancen para mejorar los incentivos urbanísticos, tributarios y financieros a quienes se interesen por ejecutar su proyecto bajo los lineamientos establecidos por las respectivas entidades competentes en el tema.

2. METODOLOGÍA

En la Figura 1 se presenta el diagrama metodológico realizado a partir del análisis comparativo de la normativa que regula la construcción sostenible y los incentivos que fomentan su ejecución, mediante la sistematización de criterios técnico-normativos según su incidencia en proyectos de construcción de acuerdo a los marcos regulatorios.

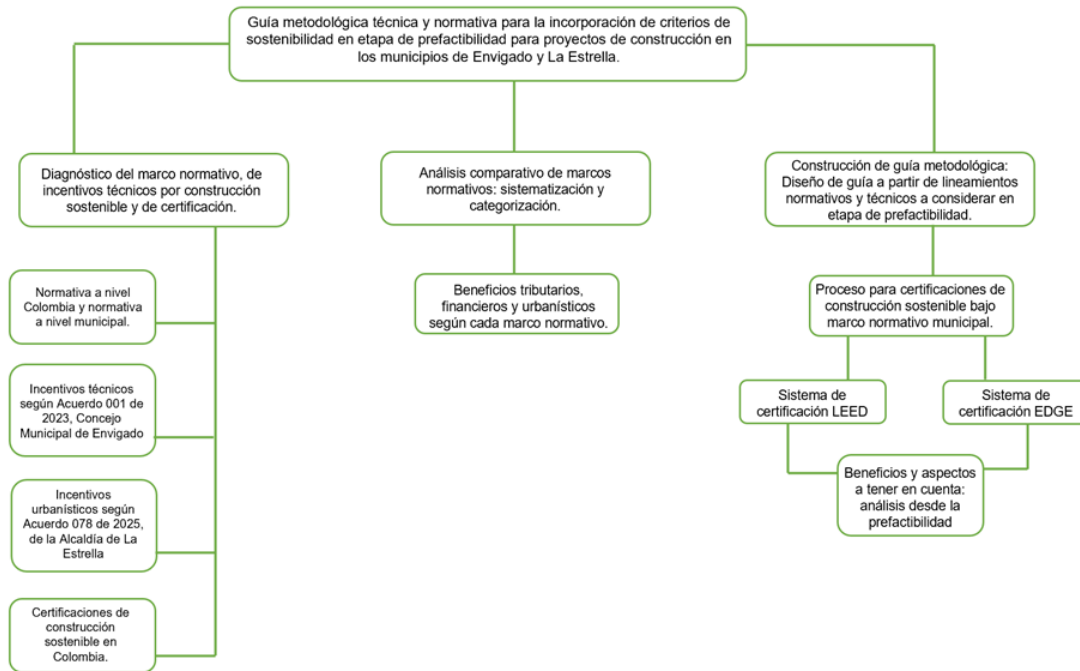


Figura 70. Diagrama metodológico.

2.1 Diagnóstico del marco normativo, de incentivos técnicos por construcción sostenible y de certificación

En esta etapa se realizó una revisión de la normativa urbana vigente a nivel nacional como municipal, con el objetivo de obtener el panorama completo sobre las disposiciones de construcción sostenible a las que se enfrentan los desarrolladores inmobiliarios en su ejercicio profesional. Finalmente se buscó identificar y sistematizar las determinantes establecidas por el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS), para la obtención de certificaciones, considerando la tipología del edificio, su uso y el nivel certificado, con el fin de generar un marco comparativo que facilite la toma de decisiones estratégicas y la formulación de lineamientos para su implementación.

2.2 Análisis comparativo de marcos normativos: sistematización y categorización

La segunda etapa se centra en la comprensión sistemática y estructurada de los marcos normativos relacionados con la construcción sostenible, tanto en el ámbito nacional como en el municipal, con el propósito de identificar las particularidades de cada regulación urbana, sus aportes específicos en cada caso y las correspondencias y/o divergencias que se presentan entre ellas, con el fin de establecer un panorama comparativo que permita orientar la aplicación de los lineamientos en proyectos de construcción. Para esto se realizará una categorización organizada según criterios temáticos fundamentales para el proceso de prefactibilidad, los cuales giran en torno a lo urbano, ambiental y económico. En el componente urbano se abordarán los instrumentos relacionados con el ordenamiento territorial, el uso del suelo y aprovechamientos urbanos que inciden directamente en la estructuración temprana de los proyectos, en lo ambiental se revisarán las disposiciones enfocadas a la gestión eficiente de recursos naturales, mitigación de impactos ambientales y compensación por uso de recursos, finalmente en lo económico se analizarán los incentivos financieros, tributarios y de gestión que promueven la incorporación de prácticas sostenibles en la construcción.

2.3 Construcción de propuesta metodológica

En la etapa final, el objetivo es desarrollar una propuesta metodológica que funcione como instrumento para los desarrolladores inmobiliarios, orientado a la implementación de criterios de sostenibilidad a partir de los lineamientos normativos en la etapa de prefactibilidad de un proyecto de construcción en base a los incentivos identificados en los marcos normativos nacionales y municipales planteados según la política pública para el desarrollo del país.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Diagnóstico del marco normativo, de incentivos técnicos por construcción sostenible y de certificación

Marco normativo colombiano

El marco normativo sobre lineamientos de sostenibilidad se ha implementado en el país desde el 2015, inicialmente de forma generalizada al plantear la búsqueda de la eficiencia y eficacia en el uso de recursos naturales utilizados para el desarrollo del ordenamiento territorial en todos sus frentes, es así como el Decreto 1285 de 2015, establece el principio “La función social y ecológica de la propiedad” y la urgencia por empezar a implementar políticas de construcción y urbanismo sostenible a partir del acompañamiento de las entidades territoriales para el desarrollo de incentivos locales, definición de estándares y de sellos ambientales con el fin máximo de determinar un precedente en el gremio sobre las prácticas sostenibles que generen impacto positivo en el mejoramiento de calidad de vida de los habitantes y el ejercicio profesional desde la responsabilidad y ética ambiental. Es así cómo se constituyen los primeros lineamientos para la construcción sostenible, enmarcados en los parámetros técnicos de ahorro de agua y energía, sistemas de aplicación gradual desde lo local, procedimientos para la certificación, seguimiento, control y aplicación de incentivos. Posteriormente, en las resoluciones No. 0549 de 2015 y No. 0194 de 2025 del ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, se desarrollan de manera más detallada los parámetros anteriormente nombrados, estableciendo un segundo precedente que ha sido utilizado por los diferentes municipios para exigir los mínimos de aporte de ahorro en los trámites de licenciamiento urbano para proyectos de construcción. Estos lineamientos se encuentran determinados por la búsqueda de la economía carbono neutral para 2050 y el compromiso en reducción del 51% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). De acuerdo a esto y a la importancia que se le da al porcentaje de ahorro de agua y energía, se detallan las exigencias para cada tipo de edificación según su uso, área, zonificación climática y categorización económica estableciendo referencias para las medidas activas y pasivas de consumo de los recursos. Se exponen también los plazos temporales de aplicación gradual, la obligación para aplicar herramientas de verificación y evaluación y la responsabilidad de suministrar información trimestral sobre la aplicación de medidas en la construcción sostenible en fases de diseño y construcción. Finalmente se hace referencia a la facultad autónoma que tiene cada municipio para la aplicación de incentivos técnicos en proyectos que demuestren porcentajes de ahorro adicionales a los parámetros mínimos exigidos en las resoluciones anteriormente nombradas, esto se convirtió en el punto de partida con el que los municipios empezaron a acoger con más fuerza la implementación de prácticas sostenibles, adaptando la normativa a la complejidad de cada sistema y ordenamiento territorial, teniendo en cuenta la densidad habitacional, el desarrollo de infraestructura, la capacidad económica y el aumento del conocimiento sobre la construcción sostenible. Por otro lado, también se encuentran regulados los beneficios tributarios que surgen de las iniciativas de sostenibilidad en el sector de la construcción con los proyectos que logren eficiencia energética a partir de la reducción del

consumo y el aprovechamiento óptimo de la energía, los cuales son establecidos por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) mediante la resolución 135 de 2025, vinculada a la ley 1715 de 2025. Los beneficios incluyen la exclusión del IVA para la compra de equipos y materiales, la deducción de renta en la inversión general del proyecto, la exención arancelaria para la importación de maquinaria con depreciación acelerada generando un beneficio fiscal. Adicional a esto también se han establecido beneficios financieros para constructores que se basan en líneas de crédito verde con descuentos importantes en la tasa de interés, bajando un punto porcentual al interés tradicional, actualmente existen seis entidades bancarias que manejan esta metodología y el Fondo Nacional del Ahorro destinado a la vivienda VIS y VIP. Adicionalmente, Seguros Sura también aporta en la formulación de incentivos, proporcionando apoyo técnico especializado en Edge para el proceso de certificación y el retorno del 10% del valor de la póliza por cumplimiento y construcción del proyecto.

Marco normativo Municipio de Envigado

La normatividad urbana del municipio para su gestión territorial, se rige por la implementación de los lineamientos establecidos en el Acuerdo No. 010-2011, Plan de Ordenamiento Territorial (POT) 2011-2023, en el cual se concreta el modelo de ocupación a partir de objetivos y estrategias enfocadas a la conservación ambiental, protegiendo la estructura ecológica para garantizar la estabilidad y sostenibilidad de la estructura territorial, incentivando el crecimiento de la ciudad hacia adentro para aprovechar la infraestructura construida. En este acuerdo se delimitan las clasificaciones del suelo y la categorización de polígonos de tratamientos urbanos, los cuales orientan la forma de intervenir el territorio a partir de los parámetros de construcción que regulan el uso, la tipología, la altura edificada, los aprovechamientos y las cesiones urbanas. Esto se relaciona directamente con el interés particular de los desarrolladores inmobiliarios en cada proyecto ya que define las posibilidades proyectuales y por lo tanto la inversión económica con su respectivo retorno. A partir de lo planteado en el POT, el municipio también se ha encargado de generar incentivos técnicos para estimular la ejecución de proyectos de construcción sostenible, en el Acuerdo 001 de 2023 se establece que todas las prácticas y mecanismos efectuados bajo la lógica de sostenibilidad para la construcción, se convierten en un instrumento de gestión y financiación del Plan de Ordenamiento Territorial, que pueden ser aplicadas a obras nuevas o existentes siempre y cuando sean verificadas por una institución competente en el tema, encargada de certificar que la construcción evaluada supera los límites de ahorro de recursos establecidos en la normatividad nacional vigente. La obtención de certificaciones (EDGE, LEED, CASA y las demás que entren dentro de los parámetros exigidos), garantizan que en sus diferentes niveles se está cumpliendo lo exigido particularmente por el municipio de Envigado y que son edificaciones aptas para acceder a los incentivos urbanísticos, los cuales también están regidos por el área mínima del predio (137m²), por los tipos de vivienda a construir (unifamiliar, bifamiliar, trifamiliar, entre medianeros, conjunto multifamiliar, multifamiliar aislado) y por el nivel de certificación, el cual determina el aumento de beneficios otorgados que se traducen en bonificación de altura, aumento de densidad habitacional, aumento en el índice de ocupación y construcción. Finalmente, el acuerdo plantea el procedimiento a seguir para la obtención de los incentivos, el cual incluye el proceso de precertificación, acto administrativo, trámite de licencia, liquidación de obligaciones urbanas y prenda de garantía mientras se aprueba el cumplimiento de certificación final.

Marco normativo Municipio de La Estrella

La regulación para ocupación del suelo en La Estrella se rige bajo el Acuerdo Municipal 003 de 2023, en el que se delimitan las clasificaciones del suelo, tratamientos urbanos para regular el

uso, la tipología, la altura edificada, aprovechamientos y cesiones urbanas, que además, en su última revisión se acoge al reto Race to Zero desde el 2021 para fortalecer las metas de carbono neutro, impulsando acciones urbanísticas concretas para la estructura ecológica principal, la defensa del paisaje, la renaturalización de hábitats urbanos y estableciendo en el artículo 16, la política de construcción sostenible, como objetivo necesario para el desarrollo territorial a través de la implementación de las buenas prácticas en el uso de recursos naturales durante las etapas de los procesos constructivos, esto mediante el uso de mecanismos institucionales para la aplicación de normas vigentes, la regulación de actuaciones urbanísticas a partir de criterios técnicos establecidos por la CONPES 3919 DE 2018 y la política de construcción sostenible del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA). A partir de esto, se implementó el Acuerdo 078 de 2025, donde se establecen los incentivos urbanísticos con el fin de promover e incrementar el desarrollo de construcciones sostenibles del Municipio, esto mediante la certificación en alguno de los sistemas acreditados como LEED, EDGE y CASA, los cuales al ser aprobados durante el proceso de licenciamiento pueden otorgar beneficios como bonificación de altura, mayor índice de construcción, ocupación e incremento en la densidad habitacional de acuerdo al polígono de tratamiento en el que se desarrollen, una particularidad es que en el Acuerdo se ha decidido que la aplicación será apta únicamente para edificaciones de tipo residencial en modalidad de obra nueva, ampliación o existente regidas por el área mínima de la unidad habitacional según su tipo (36m² o 45m²). Así mismo se han establecido obligaciones como cumplimientos regulatorios para la implementación, relacionados a mecanismos de conservación de las medidas de sostenibilidad incorporadas al proyecto, esto con el objetivo de mantener el estatus con el que fueron certificados inicialmente, para esto, una de las estrategias más relevantes a aplicar es aportar la información de los proyectos al usuario final, entregando una cartilla o manual detallado al propietario de cada unidad habitacional haciendo referencia a lo que el proyecto debe conservar para seguir cumpliendo como sostenible.

Tabla 1. Alcances de criterios técnicos según sistemas de certificación sostenible.

CONPES 3919	Planeación incluyente	Equidad y accesibilidad	Localización	Movilidad	Gestión ambiental	Eficiencia en agua	Eficiencia energética	Manejo de materiales	Calidad ambiente interior
LEED	●	●	●	●	●	●	●	●	●
EDGE	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Dentro de estos dos grandes sistemas de certificación hay unos subsistemas o niveles que se determinan de acuerdo al porcentaje de cumplimiento de cada criterio a evaluar, como se detalla a continuación:

Tabla 2. Criterios según niveles de certificación Edge.

EDGE			
CRITERIO	Green (diseño y construcción) % de ahorro	Advanced (diseño y construcción) % de ahorro	Zero Carbón (operación) % de ahorro
Energía	20%	40%	100%
Agua	20%	20%	20%

Materiales	20%	20%	20%
BENEFICIOS			
Visibilidad y reputación con respaldo acreditado nacionalmente, mejoras en tasa de interés para crédito constructor, exclusión de IVA para equipos y maquinaria, menores costos operativos y de mantenimiento, mayores precios de venta ahorrando eficientemente los recursos, certificación más rápida, facilita herramienta digital accesible para realizar simulaciones, es más aplicable a proyectos de escala baja a media.			
Inversión adicional promedio		Aproximadamente 1.4% del costo total del proyecto. Nota: normalmente el ahorro que se logra con el crédito constructor alcanza a cubrir el gasto adicional para certificación.	
Tiempo recuperación de inversión promedio		Inferior a 1 año	
Encargado de certificación en Colombia		Cámara Colombiana de la Construcción CAMACOL	

Tabla 3. Criterios según niveles de certificación Edge.

LEED				
CATEGORÍAS	LEED BD+C (diseño y construcción de edificios), LEED ID+C (diseño y construcción de interiores), LEED O+M (operaciones y mantenimiento).			
NIVELES	Certificado	Plata	Oro	Platino
CRÉDITOS	40-49 puntos obtenidos	50-59 puntos ganados	60-79 puntos ganados	80-110 puntos ganados
BENEFICIOS				
Visibilidad y reputación con respaldo acreditado internacionalmente, menores costos operativos y de mantenimiento a lo largo de la vida de la edificación, mayor valor y prestigio global del inmueble, mayor bienestar y salud de los ocupantes obteniendo un enfoque integral en calidad de aire y confort, es más aplicable a proyectos de gran escala.				
Inversión adicional promedio			Entre 2 a 3% del costo total del proyecto dependiendo del nivel de certificación y la etapa de implementación. Nota: normalmente el ahorro que se logra con el crédito constructor alcanza a cubrir el gasto adicional para certificación.	

Tiempo recuperación de inversión promedio	Entre 1 a 2 años
Encargado de certificación internacional	Green Business Certification Inc. (GBCI), bajo los estándares del U.S Green Building Council (USGBC).

3.2 Análisis comparativo de marcos normativos: sistematización y categorización

De acuerdo a la información anterior, se evidencia que la normativa urbana nacional ha determinado los criterios fundamentales para la incorporación de sostenibilidad en los procesos de desarrollo urbano del país. Estos lineamientos parten de una mirada multiescalar, que además de fijar un marco general de referencia, funciona como base orientativa para que cada municipio (a los cuales se les ha dado la potestad para este tema en particular), adapte y defina sus propias regulaciones siempre y cuando vayan en coherencia con la regulación nacional vigente. Es así como los municipios de Envigado y La Estrella han desarrollado los Acuerdos complementarios al POT y PBOT respectivamente, los cuales hacen referencia especialmente a los beneficios e incentivos urbanísticos otorgados por construcción sostenible, incluyendo sus condicionantes específicas y el enfoque práctico de cada caso. Este modelo de gobernanza permite que las autoridades locales cuenten con un margen de autonomía normativa, al tiempo que se garantiza la articulación con los objetivos nacionales en materia de sostenibilidad, planificación y desarrollo urbano. La comparación entre ambos municipios permite identificar cómo, a partir de una misma directriz nacional, las regulaciones locales diversifican su enfoque en función de las prioridades territoriales, pero también se evidencian los puntos de convergencia en la forma de implementación de los incentivos urbanísticos, sirviendo a la vez, de referente aplicado para que otros municipios del Valle de Aburrá puedan empezar a gestionar la misma iniciativa, adaptando los componentes a sus territorios particulares y aportando así a la construcción de país desde una mirada sostenible.

Tabla 4. Categorización de normativa nacional y municipal.

URBANA	AMBIENTAL	ECONÓMICA
• Base normativa con la que empieza a regir el tema de construcción sostenible en el país. • Establece los parámetros mínimos de ahorro de agua y energía según uso, área, zonificación y categoría económica del proyecto a desarrollar. • Se otorga autonomía a cada municipio para aplicar incentivos técnicos y urbanísticos adicionales, según sea pertinente. • Se determina que la aplicación de estos mecanismos se realiza de forma gradual con seguimiento y verificación.	• Compromiso de carbono neutro 2050 y reducción del 51% de GEI. • Se establecen los estándares de ahorro de agua y energía según medidas pasivas y activas. • Se exige la obligatoriedad de reportar trimestralmente la información sobre las implementaciones de sostenibilidad.	• Se incluyen los beneficios tributarios: exclusión de IVA en equipos, deducción de renta, exención arancelaria, depreciación acelerada. • Beneficios financieros: líneas de crédito verde (descuentos en tasas de interés, FNA para VIS y VIP). • Incentivos privados: seguros con apoyo técnico y retorno de parte de la póliza por cumplimiento.
Normativa nivel Colombia		
PREFACTIBILIDAD		
Normativa nivel Municipio - Envigado		
• A partir de la normativa base a nivel país, se genera el modelo de ocupación municipal, enfocado en la conservación ambiental. • Clasificación del suelo para definir polígonos de tratamiento urbano según su uso, tipología, altura, aprovechamientos y cesiones. • Se implementa el acuerdo referente a las prácticas sostenibles como instrumento de gestión y financiación del territorio. • Se determina que los incentivos urbanísticos están condicionados a certificaciones (LEED, EDGE, CASA).	• Verificación de ahorro de recursos mediante certificación reconocida y acreditada. • Incentivos ligados a superar mínimos de sostenibilidad definidos por normativa nacional.	• Se adoptan los incentivos urbanísticos condicionados a certificación y características físicas y técnicas del predio. • Se determina la obtención de mayores beneficios según nivel de certificación, polígono de tratamiento y tipo. • Se fortalece el aumento del potencial constructivo generando plusvalía y mayor retorno económico para el desarrollador.
Normativa nivel Municipio – La Estrella		
• A partir de la normativa base a nivel país, se genera el modelo de ocupación municipal, enfocado en la conservación ambiental, clasificación del suelo, tratamientos urbanos, aprovechamientos y cesiones. • Se implementa el acuerdo para fortalecer la implementación de proyectos sostenibles a partir de incentivos urbanísticos que promuevan la construcción verde. • Se determina que los incentivos urbanísticos están condicionados a certificaciones (LEED, EDGE, CASA) y son aplicables únicamente a proyectos residenciales.	• Verificación de ahorro de recursos mediante certificación reconocida y acreditada. • Incentivos ligados fortalecer las competencias municipales de sostenibilidad en el modelo de ocupación proyectado en el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT).	

3.3 Construcción de propuesta metodológica

Esta guía se concibe como una herramienta operativa y metodológica, diseñada para orientar el cumplimiento normativo, promoviendo la implementación de prácticas de construcción sostenible que respondan de forma integral a los retos ambientales y socio-económicos del territorio, en coherencia con las metas nacionales e internacionales para la protección y uso responsable de los recursos, avanzando así, hacia un sector inmobiliario más responsable, competitivo y resiliente. De esta manera este documento y particularmente los diagramas de guía, no se idean como un producto estático, sino como un instrumento dinámico y adaptable, que puede evolucionar en función de la actualización normativa, de las tendencias locales e internacionales y de las nuevas demandas del mercado inmobiliario. Su carácter flexible permite que se consolide a largo plazo como una referencia práctica y vigente para la planeación en la gestión de proyectos de construcción sostenible en Colombia al permitir conocer un panorama claro sobre las implicaciones de desarrollar proyectos de este tipo, como de los beneficios que se pueden adquirir al hacerlo. En particular, los diagramas metodológicos sistematizan y simplifican procesos que pueden llegar a percibirse como complejos por la cantidad de información relacionada, tales como la aplicación de incentivos, los procedimientos de certificación para acceder a ellos y el paso a paso adecuado para solicitud de licencias bajo esta modalidad, de este modo, la guía no sólo aporta claridad a los actores del sector, sino que también contribuye al fortalecimiento de la articulación entre la planeación territorial, la normativa vigente y la gestión operativa de proyectos.

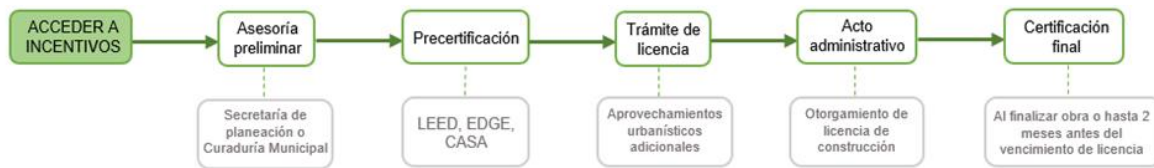


Figura 71. Guía para obtención de incentivos por aplicación de criterios de sostenibilidad (trámite en curaduría o planeación municipal).

4. CONCLUSIONES

Con la información estudiada a lo largo de la investigación, se encuentra que si bien la regulación nacional ha representado un parámetro orientador para la implementación inicial de criterios de sostenibilidad en Colombia, presenta limitaciones significativas frente al potencial real que pueden alcanzar hoy las edificaciones, ya que dicha regulación establece porcentajes de ahorro en mínimos niveles, los cuales, en lugar de fomentar una evolución progresiva, han permanecido estáticos y sin actualización desde su implementación, esto ha trasladado gran parte de la responsabilidad a las regulaciones que decide adoptar cada municipio.

En este contexto, los casos de estudio de la investigación han ido teniendo mayor éxito en cuanto a los aportes generados y beneficios otorgados, demostrando que cuando existe voluntad institucional, es posible generar políticas locales efectivas que incentiven la sostenibilidad, sin embargo, al no ser de carácter obligatorio, muchos otros municipios del Valle de Aburrá no acogen este tipo de regulaciones, ocasionando estancamiento y retrocesos en la oportunidad de lograr un mejor aprovechamiento de recursos naturales en las etapas de prefactibilidad, diseño y construcción y por lo tanto en el desarrollo territorial.

De acuerdo a esto, es viable y necesario que los municipios que conforman el Valle de Aburrá, tomen como referencia las regulaciones implementadas por los municipios de Envigado y La Estrella para aplicarlas en sus territorios correspondientes, ya que el replicar estas experiencias no sólo permitiría avanzar en el cumplimiento de las metas de sostenibilidad nacional, sino también aportar ganancias tangibles e intangibles a todos los actores involucrados en estos procesos, mientras que se aumenta la cantidad de proyectos referentes ejecutados bajo lineamientos de sostenibilidad, se genera mayor confianza en el sector y se contribuye a superar el problema identificado sobre la percepción de complejidad en los trámites y el retorno de inversión, bajo una guía y metodología más clara.

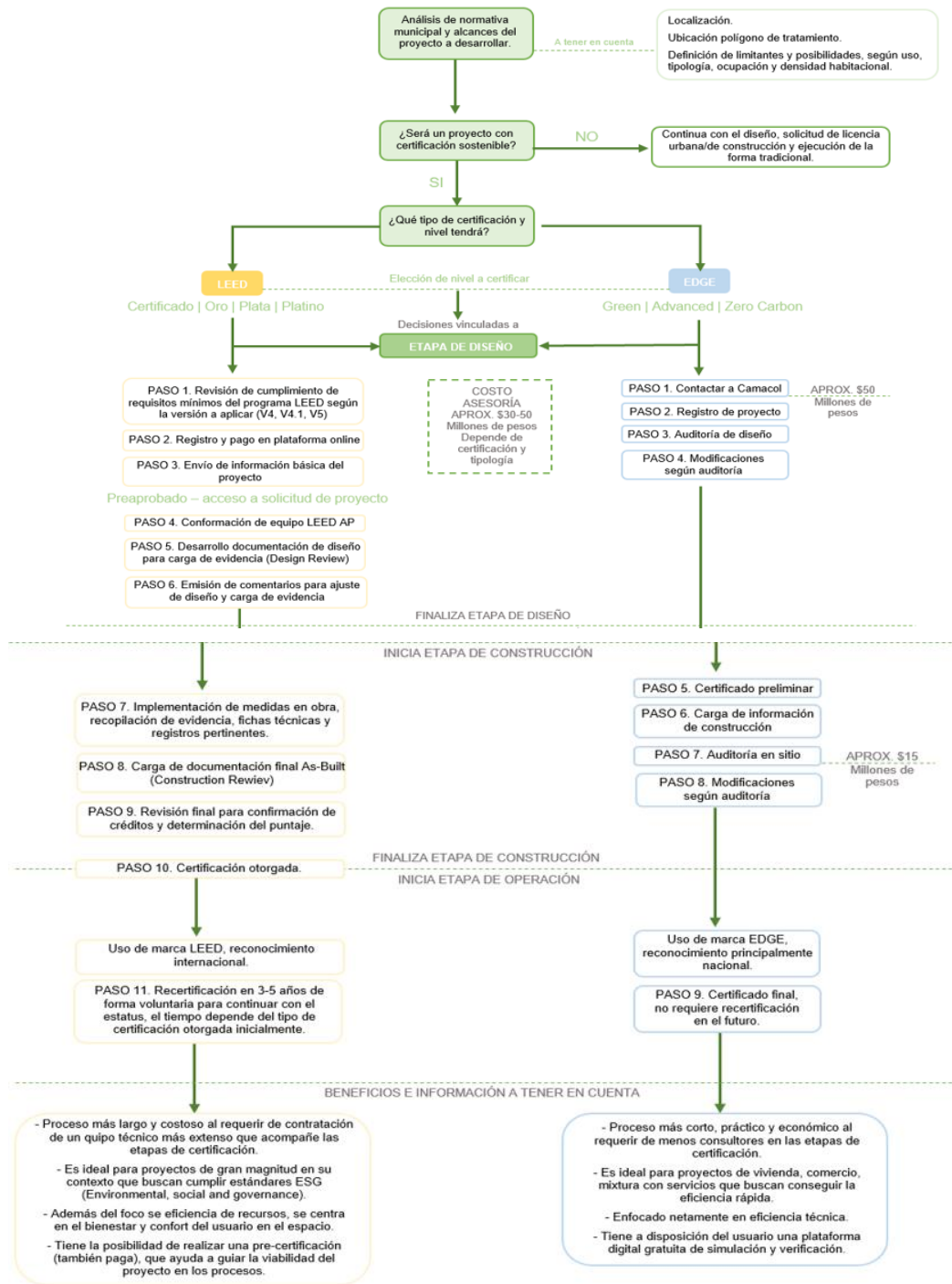


Figura 3. Propuesta metodológica para aplicación de criterios de sostenibilidad y obtención de beneficios técnicos y urbanísticos en proyectos de construcción.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Institución Colegio Mayor de Antioquia por permitirme el espacio, las conexiones y los recursos de conocimiento para desarrollar esta investigación, de igual forma a los asesores académicos José Reynaldo Zelaya Maradiaga y Vladimir Alonso Gaviria Gonzales por su entrega y guía en cada etapa de este proceso, a los demás docentes vinculados a lo largo de la especialización por su tiempo y asesoría, a mis compañeros de especialización, quienes aportaron a la construcción colectiva de conocimiento desde sus experiencias profesionales, y finalmente, a nuestras familias quienes apoyaron nuestro proceso de aprendizaje desde el día hasta su día final con nuestra especialización.

6. REFERENCIAS

- Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo. (1987). Nuestro futuro común. Alianza Editorial. <https://www.are.admin.ch/are/en/home/media/publications/sustainable-development/brundtland-report.html>
- Bautista Gordillo, J. D., & Loaiza Elizalde, N.F., (2018). Impactos de la construcción sostenible y tradicional a nivel ambiental. Semillero de Competitividad Económica Ambiental (CEA), Proyecto Curricular Administración Ambiental. (Artículo académico). <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/bsa/article/view/13613/13959>
- Bedoya Montoya, C. M. (2011). Construcción sostenible: Para volver al camino (reimpresión). Biblioteca Jurídica Diké / MARES Consultoría Sostenible. <https://bffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/96e1a144-6765-4e01-a6b4-d5fbb194bb80/content>
- García Henao, L. (2003). Teoría del desarrollo sostenible y legislación ambiental colombiana: una reflexión cultural. Revista de Derecho, (20), 198-215. Universidad del Norte. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=85102008>
- Rodríguez Murcia, S. L. (2021). Barreras e impulsores de la construcción sostenible en Colombia: Un enfoque en Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y estrategias organizacionales (EO) (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia. <https://bffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/b559a6ea-1803-4877-b8a1-9d8bc9a2d8f3/content>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2025, abril 11). Resolución 0194 de 2025: Por medio de la cual se definen los parámetros y lineamientos de construcción sostenible, se adopta la guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones, se sustituye la Resolución 0549 de 2015 y se dictan otras disposiciones. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2015, julio 10). Resolución 0549 de 2015: Por la cual se establecen medidas de construcción sostenible y se adopta la Guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.
- Departamento Administrativo de la Función Pública. (2015, junio 12). Decreto 1285 de 2015: Por el cual se modifica el Decreto 1077 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, en lo relacionado con los lineamientos de construcción sostenible para edificaciones. Diario Oficial de la República de Colombia.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, & Corporación Financiera Internacional (IFC). (2013). Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones (Anexo técnico de la Resolución 0549 de 2015). Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

- Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS). (2024). Estado de la construcción sostenible 2024. https://www.cccs.org.co/wp-content/uploads/2024/07/Estado_de_la_Construccion_Sostenible_2024pdf.pdf
- De La Sala, S., Maldonado, M., & Alterman, R. (2019). Políticas de suelo, derecho urbanístico y cambio climático: Instrumentos urbanísticos-tributarios como medidas para enfrentar al cambio climático (Working Paper WP19SD1SP). Lincoln Institute of Land Policy.
- Holguín Ortiz, M. (2023). Incorporación de los componentes de la gestión del cambio climático desde la construcción sostenible en el plan de ordenamiento territorial de Envigado. Tesis de grado, Universidad Externado de Colombia. <https://bdigital.uexternado.edu.co/server/api/core/bitstreams/bb294809-9d71-4624-9850-cfe1d2564ee4/content>.

ANÁLISIS DE APLICABILIDAD DE LA TEORÍA DE RESTRICCIÓN Y LA METODOLOGÍA DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE CRONOGRAMAS DE OBRA EN CONTRATOS PÚBLICOS: CASO DE ESTUDIO MANTENIMIENTO DE CUBIERTAS DE ENTIDADES UBICADAS EN EL DISTRITO ESPECIAL DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN DE MEDELLÍN

Maria Alejandra Argumedo López¹, Jaime Andrés Úsuga Salas¹, Edison Aldemar Hincapié Atehortua¹

¹ Grupo de Investigación Gerencia en Proyectos de Construcción, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, margumedo@est.colmayor.edu.co, jaimeu@est.colmayor.edu.co, edison.hincapie@colmayor.edu.co

Palabras clave: Lean Construction, Teoría de Restricción, Cronograma, Ejecución, Ruta Crítica

1. INTRODUCCIÓN

La investigación se basa en un marco que reúne teorías y metodologías efectivas para la gestión de proyectos de construcción, mezclando enfoques tradicionales y ágiles que permiten englobar los desafíos de planificación y control. El cronograma de obra es resaltado como herramienta para organizar y predecir actividades con precisión, disminuyendo la incertidumbre de las actividades en ejecución. Para esto, se suma la Teoría de las Restricciones (TOC), que proyecta un enfoque sistémico encaminado a identificar y gestionar cuellos de botella que ralentizan el rendimiento, catapultando la mejora continua. asimismo, la filosofía Lean Construction, promueve la reducción de actividades que no generan valor, la estandarización de procesos y el uso de principios como just in time para optimizar recursos. Se distinguen herramientas como el Diagrama de Gantt, el Método de la Ruta Crítica (CPM) y la Cadena Crítica (CCPM), que permiten obtener una jerarquía, sincronizar y controlar las actividades en proyectos. El estado del arte complementa estos fundamentos al incluir investigaciones actuales sobre la optimización de la mano de obra por medio de modelos de evolución diferencial (Hoang, 2015), la gestión de riesgos de costos y cronogramas a través de simulaciones como Monte Carlo o análisis de probabilidades dinámicas (Xu, 2014), y los desafíos de los megaproyectos en Latinoamérica (Moreno, 2023), donde las circunstancias económicas, políticas y contractuales atañen la productividad. Este cúmulo de aportes teóricos y empíricos afianzan un marco congruente que argumenta la investigación, manifestando la necesidad de metodologías integrales que contemplen la planificación, control y productividad para consolidar la eficiencia en los proyectos constructivos.

La exploración de la literatura demuestra numerosos esfuerzos por optimizar la planificación y ejecución de proyectos constructivos. No obstante, persisten vacíos que justifican la presente investigación. (Hoang, 2015) enuncian el uso del Modelo de Evolución Diferencial para vencer las limitaciones del Método de la Ruta Crítica en la gestión de mano de obra, menguando las oscilaciones en la demanda laboral; pero, su empleo en la práctica aún es restringida en contextos de alta versatilidad de recursos. Por otra parte, (Melaku, 2021) observa en Etiopía Los sobrecostos y retrasos extremos en proyectos de infraestructura, atribuyéndolos a consideraciones deficientes y a la escasez de metodologías de control de riesgos, por lo cual resalta la necesidad de herramientas más completas para la programación. (Zhang, 2021) incorpora el Análisis de probabilidad dinámica con simulación de subconjuntos, demostrando

avances en la especulación de fallas de cronogramas, a pesar de su implementación se delimita a entornos con datos altamente complejos. (Xu, 2014) desarrolla un modelo integrado de análisis de riesgos costo–cronograma mediante herramientas avanzadas como GERT “Graphical Evaluation and Review Technique” que es una técnica de evaluación y revisión gráfica además de implementar la simulación de Monte Carlo, sumando mayor certeza, pero con una complejidad que dificulta su uso en obras de menor escala. Finalmente, (Moreno, 2023) destaca la Paradoja de los megaproyectos y su gestión financiera, subrayando cómo decisiones políticas estropean las programaciones y ejecuciones. A su vez, estos estudios evidencian adelantos metodológicos significativos, pero también limitaciones en su aplicabilidad, lo que genera la oportunidad de enunciar enfoques integrales que reúnan planificación, control de recursos y gestión de riesgos en entornos reales de construcción.

El análisis del marco teórico y del estado del arte exponen que, a pesar de que existan metodologías acreditadas para la planificación y control de proyectos de construcción, como la Teoría de las Restricciones, Lean Construction, el Método de la Ruta Crítica (CPM) y la Cadena Crítica (CCPM), aún se evidencian vacíos al momento de la implementación colaborativa y contextualizada a proyectos de infraestructura específicos. Investigaciones anteriores han evidenciado adelantos en la optimización de la mano de obra, la disminución de riesgos en los cronogramas y la gestión financiera de megaproyectos, pero también limitaciones en cuanto a su aplicabilidad, en especial en ambientes institucionales con recursos limitados y alta inestabilidad. La coyuntura identificada radica en la falta de incorporación entre metodologías de productividad y planificación, lo que acarrea dificultades en el control de tiempos, sobrecostos y retrasos frecuentes en proyectos de construcción. En este sentido, la investigación “Implementación de metodologías integrales de planificación y productividad en cronogramas de obra: Estudio de caso enfocado mantenimiento de cubiertas” indaga responder a mencionados vacíos mediante un análisis comparativo en dos situaciones institucionales (administrativo y educativo). La metodología planteada relaciona un enfoque cualitativo y cuantitativo, basado en observación documental, análisis comparativo, identificación visual directa y sistematización de datos. La investigación no solo consolida el conocimiento académico sobre gestión de proyectos, también ofrece privilegios prácticos al formular lineamientos estratégicos desarrollables que modernicen la eficiencia, el control y la productividad en la ejecución de obras de mantenimiento, aportando tanto a la teoría como a la práctica del sector.

2. METODOLOGÍA

En la Figura 1 se exhibe el diagrama metodológico, analizando las etapas de rastreo documental y análisis comparativo de metodologías, planteamiento de soluciones cualitativas y cuantitativas frente a restricciones, y establecimiento de lineamientos, integrando la Teoría de Restricciones y Lean Construction para maximizar la planificación y control del cronograma de obra.

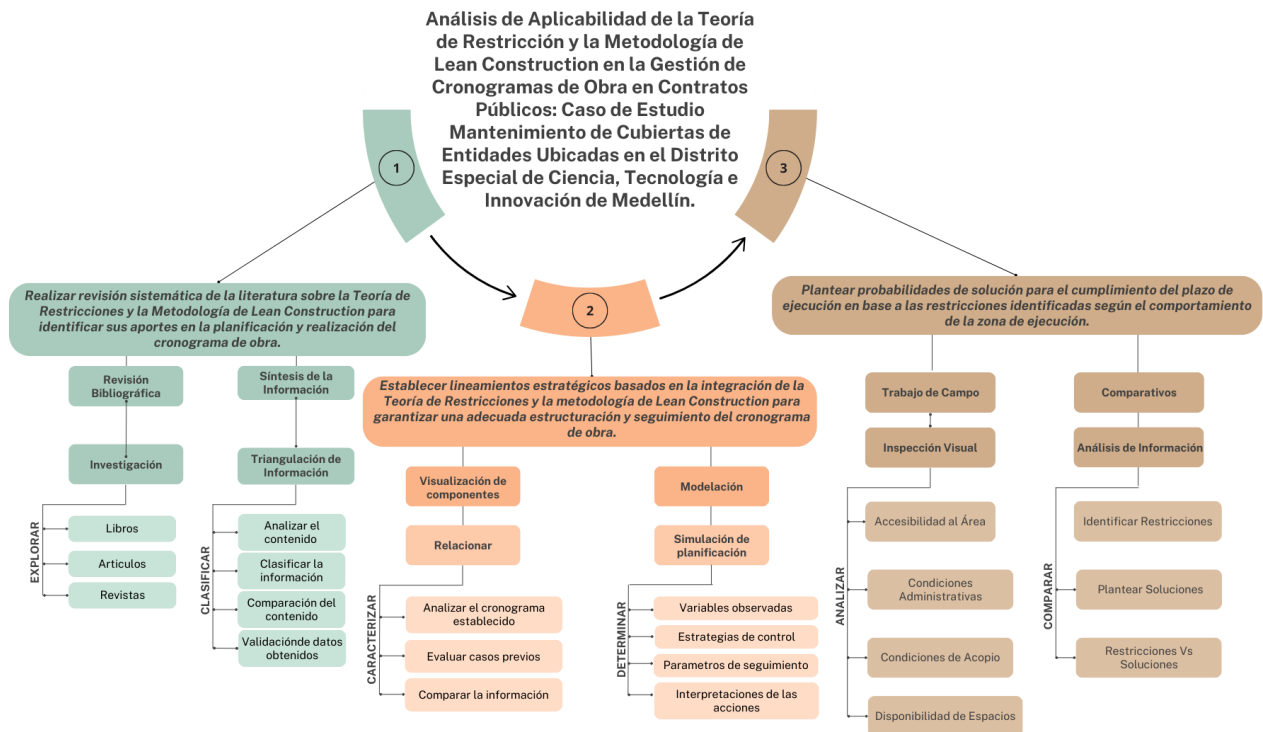


Figura 1. Diagrama metodológico.

2.1 Realizar revisión sistemática de la literatura en Teoría de Restricciones y Metodología de Lean Construction para identificar sus aportes en la planificación y realización del cronograma de obra

La investigación adaptará una dirección cualitativo-documental, enfocados en analizar los conceptos teóricos y su aplicación en la planificación y ejecución de cronogramas de obra. Para lo cual, se inspeccionará bibliografías y documentos de libros, artículos científicos, normativas y casos prácticos vinculados con la Teoría de Restricciones y Lean Construction. Seguidamente, se realizará un análisis sobre las estrategias que se tomaron para lograr un cronograma óptimo, además de un compilado de problemas identificados en las investigaciones y como se pueden solucionar con las metodologías, todo esto se realizará con el objetivo de apreciar diferencias y similitudes en su implementación para la gestión de cronogramas y gestión de los proyectos. Por último, se utilizarán técnicas como análisis de contenido, codificación temática y conexión de fuentes garantizando la validez y pertinencia de los hallazgos.

2.2 Establecer lineamientos estratégicos basados en la integración de la Teoría de Restricciones y la metodología de Lean Construction para garantizar una adecuada estructuración y seguimiento del cronograma de obra

Para el desarrollo de este objetivo se proponen dos etapas complementarias. La primera, de carácter cualitativo, permitirá entender las condiciones del entorno considerando factores sociales, geográficos y logísticos que pueden afectar en el proyecto. La segunda, de enfoque cuantitativo, por medio de un diagrama de Flujo de Trabajo se identificará el comportamiento de las restricciones sobre el plazo de ejecución de las actividades calculadas. En el procedimiento técnico, se aplicará un trabajo de campo y la observación en el sitio, mediante visitas a la zona a intervenir para analizar aspectos de accesibilidad, infraestructura y disponibilidad de recursos. La

información encontrada se digitalizará en el sistema de datos cuantitativos, realizando cronogramas por medio de Gantt para estimar los tiempos de ejecución y la ruta crítica. En la culminación de esta fase, se aplicará la técnica de análisis FODA, con la intención de caracterizar fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas que afectan la eficiencia del proyecto.

2.3 Plantear probabilidades de solución para el cumplimiento del plazo de ejecución en base a las restricciones identificadas según el comportamiento de la zona de ejecución

Para la realización de este objetivo se observan procedimientos que se basan en el análisis comparativo de metodologías y el modelado de circunstancias aleatorias “Problemáticas/Retrasos”. En primera instancia, se aplicará el análisis obtenido de la documentación de estudios previos en los que se aplicaron Lean Construction y la Teoría de Restricciones, entre las acciones realizadas por los autores y cómo se relaciona dentro de este estudio de caso. Del mismo modo, se seleccionarán actividades clave de mencionados artículos que puedan ser incorporados con el criterio de establecer una estrategia para el control del cronograma de obra. Después, se realizará el modelado de escenarios, realizando tablas de planificación “Diagrama de Gantt” combinando las dos metodologías, donde se simulen retrasos, rutas críticas y se propongan cambios estratégicos para cumplir con el tiempo de ejecución. El proceso de recolección abordará la sistematización cualitativa y cuantitativa de la información, efectuando gráficos y tablas comparativas que permitan analizar patrones, tendencias y el impacto de los lineamientos estratégicos en el desempeño del cronograma.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Realizar revisión sistemática de la literatura en Teoría de Restricciones y Metodología de Lean Construction para identificar sus aportes en la planificación y realización del cronograma de obra.

A partir de la recolección y análisis de la información, se realizó una tabla comparativa en la que se muestra que el CPM “Camino Crítico” y el CCPM “Cadena Crítica” ofrecen una estructura robusta para la secuenciación de actividades, por otro lado, Lean Construction añade flexibilidad al incorporar principios de mejora continua. Los resultados indicaron que, aunque estas herramientas son complementarias, en la práctica aún existen dificultades para integrarlas debido a la resistencia cultural y la falta de estandarización en los procesos (ver Tabla 1). Se confirma que estas metodologías todavía enfrentan barreras en contextos latinoamericanos, donde las condiciones contractuales y administrativas limitan su implementación completa. Se procede con un comparativo entre las características de las metodologías a ejecutar, de manera en que se establezcan sus respectivas formas/aspectos de implementación (ver Tabla 2).

Tabla 1. Tabulación de investigaciones.

Investigación	Título / Fuente	Estrategias para un cronograma óptimo	Aportes para la gestión de proyectos
Zhang & Wang (2021)	Dynamic Probability Analysis for Construction Schedule Using Subset Simulation (Advances in Civil Engineering)	Integración del Probabilistic Critical Path Method (PCPM) con simulación por subconjuntos. Uso de aprendizaje estadístico para estimar automáticamente duraciones en tiempo real. Aplicación de datos históricos y retroalimentación dinámica del avance.	Permite cronogramas adaptativos basados en datos reales y predicción probabilística. Mejora la precisión en la estimación de riesgos de atraso. Promueve el uso de inteligencia artificial en control de obras.
Moreno Parra (2023)	Paradoja de los megaproyectos y gestión presupuestaria vial en Ecuador (Revista Infraestructura Vial, LanammeUCR)	Enfatiza la presupuestación plurianual para evitar retrasos y sobrecostos. Propone priorización de proyectos de arrastre y continuidad de inversión. Analiza el impacto de la planificación política en los cronogramas.	Destaca la planificación financiera como pilar del cronograma realista. Advierte sobre el efecto de decisiones políticas. Promueve la alineación entre planificación técnica y fiscal.
Melaku et al. (2021)	Analysis of Cost Overrun and Schedule Delays in Low-Income Economies (Advances in Civil Engineering)	Identificación de factores críticos de retraso (variaciones, inflación, mala estimación de costos). Uso de encuestas estructuradas para evaluar causas. Recomendaciones de gestión del riesgo y control de costos y tiempo.	Sugiere evaluación continua del desempeño del cronograma. Introduce prácticas preventivas: estimación realista, seguimiento y comunicación. Promueve enfoque local en optimización de resultados.
Xu, Yu & Li (2014)	Analyzing Integrated Cost Schedule Risk for Complex Product Systems (Journal of Applied Mathematics)	Modelo integrado de riesgo costo-tiempo usando GERT y simulación Monte Carlo. Evaluación probabilística conjunta del cumplimiento de tiempo y presupuesto. Análisis de regresión para correlacionar costos y plazos.	Fomenta planificación integral de costo y tiempo. Mejora la confiabilidad de las predicciones del cronograma. Permite priorizar decisiones basadas en riesgo combinado.
Hoang et al. (2015)	Optimizing Construction Project Labor Utilization Using Differential Evolution (Advances in Civil Engineering)	Aplicación del algoritmo Differential Evolution (DE) para optimizar uso de mano de obra. Ajuste dinámico de tamaños de cuadrilla y tiempos de inicio. Minimización de picos de demanda laboral y nivelación de recursos.	Favorece cronogramas eficientes y balanceados en recursos. Reduce costos indirectos y mejora la seguridad. Introduce metaheurísticas computacionales para planificación avanzada.

Tabla 2. Comparativo de Lean Construction vs Teoría de la Ruta Crítica.

Aspecto	Lean Construction	Teoría de la ruta crítica
Enfoque principal	Maximizar valor y eliminar desperdicios en los procesos de construcción.	Identificar y gestionar las actividades críticas que determinan la duración total del proyecto.
Origen	Deriva del sistema de producción Toyota (Lean Manufacturing).	Desarrollada en los años 50 por DuPont para planificar proyectos complejos.
Objetivo	Aumentar la eficiencia global del proyecto, mejorando la colaboración y reduciendo pérdidas de tiempo, recursos y costos.	Optimizar la programación del proyecto asegurando que las actividades críticas se completen a tiempo.
Estrategia de planificación	Planificación colaborativa y continua (Last Planner System).	Planificación determinista basada en secuencia lógica y tiempos estimados.
Herramientas clave	Last Planner System (LPS), Value Stream Mapping, Pull Planning, Kaizen (mejora continua).	Diagrama de red (PERT/CPM), cronogramas, cálculo de holguras y rutas críticas.
Gestión del tiempo	Enfocada en flujos de trabajo confiables y estables, reduciendo variabilidad.	Controla tiempos totales del proyecto mediante la identificación de tareas sin holgura.
Control de proyecto	Basado en compromisos semanales, revisiones diarias y retroalimentación del equipo.	Basado en seguimiento del cronograma y cumplimiento de fechas críticas.
Gestión de recursos	Busca optimizar el uso de recursos en todo el flujo de valor.	Asigna recursos a las tareas según prioridad en la ruta crítica.
Gestión de riesgos	Se mitigan mediante la participación temprana y la comunicación constante.	Se mitigan ajustando la programación y redistribuyendo recursos.
Relación entre actores	Altamente colaborativa; promueve el trabajo en equipo y la toma de decisiones compartida.	Jerárquica; las decisiones fluyen desde la dirección hacia los equipos de trabajo.
Medición del desempeño	Por cumplimiento de promesas y mejora continua (PPC – Percent Plan Complete).	Por cumplimiento de hitos y tiempos planificados.
Flexibilidad	Alta: se adapta constantemente a cambios y aprendizaje continuo.	Baja: cambios requieren recalcular la red y afectar la ruta crítica.
Resultados esperados	Reducción de desperdicios, mayor productividad, calidad y satisfacción del cliente.	Control preciso del tiempo total del proyecto y detección de retrasos críticos.

Por otro lado, se realiza una identificación de los problemas hallados en las fuentes consultadas, estos nos muestran que aplicar la Teoría de Restricciones (TOC) y la metodología Lean Construction puede ofrecer contribuciones significativas para mejorar la planificación y el control en la ejecución de cronogramas de obra. Esta revisión permitió identificar similitudes entre los conceptos teóricos y su aplicación práctica, resaltando que ambas metodologías buscan

optimizar tiempos y recursos al eliminar cuellos de botella y reducir desperdicios (ver Tabla 3). El análisis crítico de los datos permitió responder a las preguntas de investigación, confirmando que la integración de metodologías aumenta la eficiencia en la gestión del cronograma, aunque requiere ajustes según el contexto. Como limitaciones, se identificó que la información recopilada dependió en gran medida de estudios de caso documentados, lo que restringe la generalización de los resultados. Finalmente, se sugiere como área futura de investigación el desarrollo de modelos híbridos de planificación que combinen enfoques cualitativos y cuantitativos, para asegurar la aplicabilidad de TOC y Lean.

Tabla 3. Tabulación de Lean Construction vs Teoría de la Ruta Crítica.

Problema	Lean Construction + Teoría de Restricciones
Sobrecostos + Retrasos Simultáneos	Identificación de desperdicios
	Identificación de restricciones
	Eliminar desperdicios en cadena crítica primero
Variabilidad Extrema	Reducir variabilidad en proceso
	Absorber variabilidad inevitable en buffers
	Integración de sistemas robustos y ágiles
Disponibilidad de Maquinaria	Reservas anticipadas
	Mantenimientos preventivos
	Identificar el equipo crítico que nunca debe de estar inactivo
	Mantener los equipos importantes en holguras
	Planes de contingencia
Métodos de Construcción Inadecuados	Prefabricación y modularización / Construcción industrializada
	Prototipos antes de construcción
	Mejora de métodos sobre la marcha
	Optimizar métodos de actividades críticas
	Identificar proceso de restricción
Baja Calidad de Materiales	Anticipar consumos por re-trabajos
	Alertas tempranas
	Prevenir uso de materiales incorrectos
	Tolerancia 0 en materiales de la ruta crítica
	Auditorías de calidad

3.2 Establecer lineamientos estratégicos basados en la integración de la Teoría de Restricciones y la metodología de Lean Construction para garantizar una adecuada estructuración y seguimiento del cronograma de obra

Los resultados del trabajo de campo y el análisis documental muestran que la implementación de la metodología Lean Construction enfrenta varias limitaciones en la empresa de estudio. Uno de los instrumentos a utilizar para la identificación temprana de posibles retrasos es la matriz FODA, con esta se logró identificar las condiciones socio-espaciales de los frentes de estudio (Entidad 1 y 2), además de debilidades que se pueden presentar de carácter administrativo / contractual (ver Figura 2).

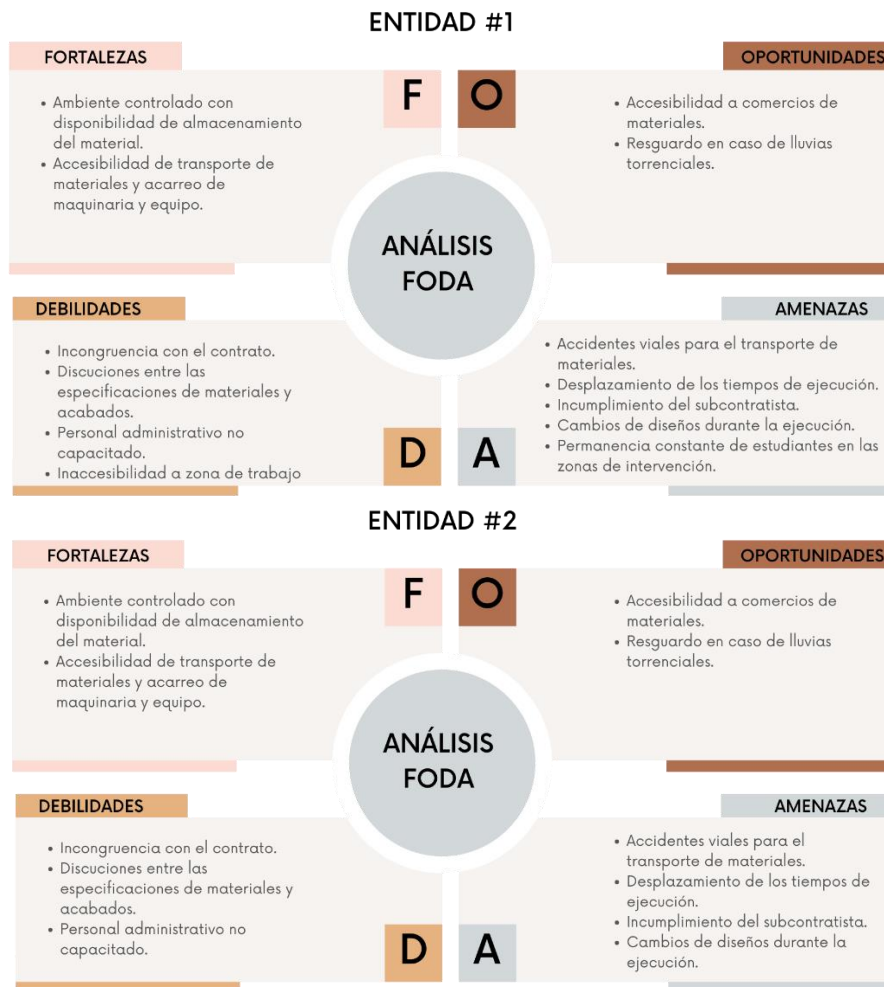


Figura 2. Análisis FODA.

También se logró identificar que, para el tema de los proveedores, no se registraron inconvenientes debido a las cercanías que presentaban con el frente de trabajo, así mismo, tampoco se observan futuros inconvenientes que pudieran restringir la circulación vehicular de las zonas aledañas al proyecto; es por esto por lo que el análisis se centró en los criterios internos correspondientes a las actividades de ejecución que realiza la mano de obra contratada. El análisis cualitativo reveló que había resistencia al cambio tanto entre los contratistas como entre los supervisores. Los contratistas priorizaban la ejecución basada en su experiencia personal, ignorando las técnicas constructivas formales (ver Figura 3); mientras que los supervisores ajustaban los diseños según sus propios criterios, lo que afectaba la eficiencia y generaba presión en la ejecución. A pesar de que se formaron comités semanales para identificar actividades y resolver retrasos, la organización seguía operando bajo un modelo de actividades “empujadas”, sin una planificación adecuada en los tiempos de ejecución. Esto llevó a una pérdida de control sobre los contratistas, tensiones constantes con el área administrativa y una falta de trazabilidad en las reuniones, ya que se discutían temas de otros proyectos al mismo tiempo, desviando la atención de los puntos de estudio.

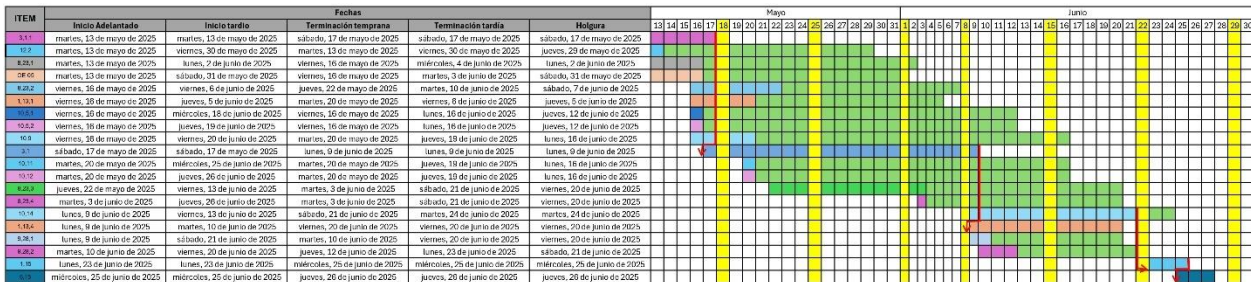
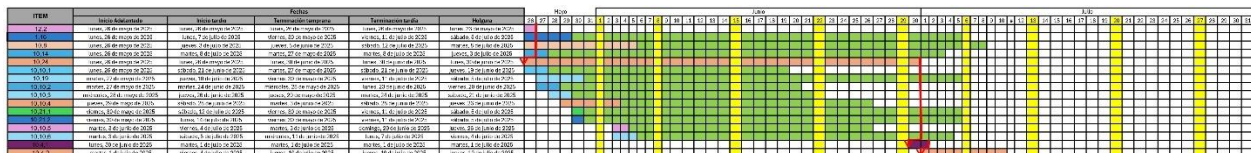


Figura 3. Flujo de Trabajo Aplicado.

3.3 Plantear probabilidades de solución para el cumplimiento del plazo de ejecución en base a las restricciones identificadas según el comportamiento de la zona de ejecución

En el ámbito cuantitativo, la sistematización de datos demostró que estas prácticas (Caso de contratistas y supervisores) causaron retrasos en las actividades críticas, lo que impactó en el cumplimiento de los plazos contractuales y dando como resultado conflictos con los subcontratistas, quienes, al no poder cumplir con las cláusulas acordadas, abandonaron actividades sin finalizar. Las tablas comparativas que se elaboraron mostraron patrones significativos: la falta de planificación incrementó los tiempos en un promedio superior al estimado, y los cambios administrativos generaron sobrecostos no previstos. Estos hallazgos respaldan lo que se ha planteado en estudios anteriores sobre la resistencia cultural y la limitada implementación de metodologías de productividad en Latinoamérica, lo que subraya la necesidad de integrar enfoques cualitativos y cuantitativos para entender y medir su impacto. Los resultados obtenidos en la comparativa del cronograma ejecutado vs el teórico (Tablas 4 y 5) indican que la implementación de la metodología de ruta crítica en el proyecto se vió obstaculizada por la falta de información, la ambigüedad en la definición de actividades y alteraciones administrativas/mano de obra. Esto resalta una debilidad estructural en el sector de la construcción o en este caso con contratos públicos, en comparación con industrias que cuentan con procesos más estandarizados

Tabla 4. Cronograma de Ejecución Vs Teórico Entidad #1.

[illegible]

188

Tabla 6. Observaciones y Retrasos Según los Cronogramas de Ejecución.

[illegible]

- 1.13.4: Retiro de cielo raso: El análisis temporal reveló que esta actividad experimentó una desviación significativa respecto a su programación inicial. La duración real de ejecución fue de 36 días, superando en 32 días el plazo establecido de 4 días, lo que representa un incremento del 800% sobre el tiempo originalmente programado.

- 1.15: Retiro de canoas: Esta actividad registró la desviación más crítica del conjunto analizado. Con una duración efectiva de 51 días frente a los 3 días programados, se observó un retraso de 48 días, equivalente a un incremento del 1,600% respecto al tiempo base.

- 3.1: Construcción y montaje de estructura metálica: El período de ejecución de esta actividad se extendió a 48 días, excediendo en 28 días los 20 días inicialmente asignados, lo que representa un incremento del 140% en el tiempo de ejecución.

- 8.23: Suministro e instalación de membrana de PVC: Esta actividad presentó una duración real de 27 días, superando en 7 días los 20 días programados, con un incremento del 35% sobre el tiempo base.

189

- 9.28: Suministro y aplicación de pintura en elementos metálicos: Esta actividad mostró una desviación menor, con una duración de 11 días frente a los 9 días programados, registrando un retraso de 2 días que representa un incremento del 22%.
- Causa identificada: La investigación determinó que la ejecución simultánea de dos actividades en el mismo espacio de trabajo limitó la posibilidad de incorporar una tercera tarea de manera concurrente. Esta restricción, fundamentada en criterios de seguridad laboral y prevención de riesgos para el personal, generó la necesidad de secuenciar actividades que inicialmente se consideraban compatibles.
- 10.14: Suministro e instalación de cubierta alveolar: La actividad registró una duración efectiva de 30 días, excediendo en 18 días los 12 días inicialmente programados, lo que equivale a un incremento del 150%.
- Causa identificada: Se identificaron dos factores causales convergentes: (1) intervenciones administrativas por parte de la supervisión, y (2) afectaciones presupuestales que limitaron la disponibilidad de recursos en los momentos críticos de ejecución. Esta combinación de factores administrativos y financieros generó interrupciones en el flujo de trabajo.

El análisis integrado de las desviaciones temporales individuales permitió cuantificar el impacto acumulativo sobre el cronograma general del proyecto. Los hallazgos revelan que:

- Duración programada inicial: 90 días
- Duración real de ejecución: 225 días
- Retraso total acumulado: 135 días
- Incremento porcentual global: 150%

Entidad #2

- 10.4: Mantenimiento de canoas y ruanas: El registro temporal de esta actividad evidenció una duración real de 25 días, superando en 13 días el plazo programado de 12 días, lo que representa un incremento del 108.33% respecto al tiempo base establecido.
- Causas identificadas: El análisis reveló dos factores convergentes responsables de esta desviación: (1) intervenciones administrativas ejecutadas por el equipo de supervisión, que requirieron tiempos adicionales para revisiones y aprobaciones no contempladas en la planificación inicial; y (2) programación simultánea de otra actividad en el mismo espacio de trabajo, situación que generó restricciones operativas. Por criterios de seguridad laboral y prevención de riesgos para el personal, no fue posible mantener la simultaneidad de tareas, obligando a la secuenciación de actividades y extendiendo consecuentemente los plazos de ejecución.
- 10.10: Reparación de techo en teja de barro: Esta actividad registró una duración efectiva de 28 días, excediendo en 8 días los 20 días inicialmente asignados, equivalente a un incremento del 40% sobre el tiempo programado.
- Causas identificadas: La investigación determinó dos factores principales que contribuyeron a esta desviación temporal: (1) tiempos de espera técnicamente necesarios para el proceso de secado de la cubierta, los cuales, aunque inherentes al procedimiento constructivo, no fueron adecuadamente dimensionados en la planificación inicial; y (2) eventos públicos programados por la entidad contratante, que restringieron el acceso a las zonas de trabajo durante períodos específicos. Esta segunda variable, de carácter externo al proceso constructivo, generó interrupciones no previstas que afectaron la continuidad de las labores.
- 10.19: Suministro e instalación de teja Standing Seam: Esta actividad presentó una de las desviaciones más significativas del conjunto analizado, con una duración real de 39 días frente a

los 4 días programados, registrando un retraso de 35 días que representa un incremento del 875% respecto al tiempo base.

- **Causas identificadas:** Se identificaron dos factores causales primarios operando de manera concurrente: (1) intervenciones administrativas por parte del equipo de supervisión, que incluyeron procesos de revisión, ajustes técnicos y aprobaciones que extendieron significativamente los plazos; y (2) afectaciones presupuestales que limitaron la disponibilidad de recursos financieros en momentos críticos de la ejecución. Esta combinación de factores administrativos y financieros generó interrupciones sustanciales en el flujo de trabajo, alterando dramáticamente el cumplimiento del cronograma establecido.

- **10.24: Mantenimiento de cubierta teja Standing Seam:** El período de ejecución de esta actividad se extendió a 67 días, superando en 36 días los 31 días inicialmente programados, lo que constituye un incremento del 116.13% en el tiempo de ejecución.

- **Causas identificadas:** Al igual que en la actividad 10.19, se constató la concurrencia de dos factores principales: (1) intervenciones administrativas de supervisión, que requirieron tiempos adicionales para procesos de control de calidad, verificación de especificaciones técnicas y aprobaciones sucesivas; y (2) afectaciones presupuestales que impactaron la disponibilidad de recursos materiales y humanos necesarios para mantener el ritmo de trabajo proyectado. La interacción de estos factores generó un efecto multiplicador sobre los retrasos individuales.

El análisis integrado de las desviaciones temporales documentadas permite cuantificar el impacto acumulativo sobre el cronograma general del proyecto. Los resultados obtenidos indican:

- Duración programada inicial: 90 días
- Duración real de ejecución: 182 días
- Retraso total acumulado: 92 días
- Incremento porcentual global: 102.22%

Este aumento del 102.22% en la prolongación del tiempo total de la ejecución del proyecto evidencia los factores no observados durante la planificación inicial; esto debido a la determinación y disponibilidad de los recursos que las entidades dispongan en el momento. Las múltiples alteraciones de autorizaciones y los cambios de actividad sin fundamento claro, aportaron a los retrasos observados durante el proyecto. A esto también se le suma la falta de control por parte de los contratistas, junto con la ausencia de información actualizada en tiempo real, llevó a decisiones especulativas sobre actividades de ejecución, las cuales afectaron directamente el progreso de la obra. También se sumó la carga administrativa que resultó de supervisar simultáneamente catorce proyectos con solo cuatro profesionales, lo que debilitó el control y provocó la creación de formatos de seguimiento personalizados que complicaron la sistematización de datos y la gestión del tiempo y los recursos. Los asesoramientos que se aportaron al desarrollo de la obra, no fueron adoptados por la administración de obra, la cual tomaba decisiones pensando sin realizar un análisis detallado, ni planificación óptima de las futuras actividades a ejecutar, pero a su vez, se tenía al inconveniente que algunas actividades contaron con retrasos debido a la responsabilidad del mismo ente público, el cual delimitaba los recursos que ya contaban con un destino específico y autorizaba el inicio de otras actividades de manera desordenada y sin oportunidad de tiempo de planificación, dando así como resultado, retrasos significativos que no podían ser analizados desde la gestión. A pesar de estas limitaciones, la gestión de los cronogramas de obra mediante la integración de Lean Construction y la Teoría de Restricciones mostró el control de ejecución que se puede llegar a tener cuando se permite la aplicación y adaptación en el entorno, permitiendo así anticipar retrasos, identificar

cuellos de botella y eliminar actividades que no aportan valor, logrando de esta manera una mejor sincronización en los cronogramas. Sin embargo, los hallazgos también revelan que los problemas internos de la empresa, las tensiones contractuales y la mala comunicación entre las partes limitaron el impacto real de estas metodologías, impidiendo alcanzar los niveles de productividad que se programan desde el cronograma teórico.

4. CONCLUSIONES

La investigación permitió reunir hallazgos sobre la aplicabilidad de la Teoría de Restricciones (TOC), Lean Construction y la metodología de ruta crítica en la planificación y control de cronogramas de obra. Los resultados mostraron que, aunque estas metodologías pueden hacer una gran diferencia al optimizar tiempos, anticipar retrasos y reducir desperdicios, su implementación se vio obstaculizada por la falta de información, la confusión en la definición de actividades y la carencia de una planificación estandarizada. Estas limitaciones llevaron a una pérdida de control sobre los contratistas, tensiones administrativas y problemas en el seguimiento de datos, lo que afectó la eficiencia en la gestión de los proyectos.

El análisis cualitativo reveló que la resistencia cultural al cambio se convirtió en un obstáculo clave: tanto contratistas como supervisores optaron por seguir prácticas empíricas o criterios personales, dejando de lado los lineamientos técnicos. En el ámbito cuantitativo, las tablas comparativas y la sistematización de datos mostraron retrasos que superaron las estimaciones, costos imprevistos y conflictos contractuales que incluso llevaron a algunos subcontratistas a abandonar sus actividades. Además, la carga administrativa de supervisar catorce proyectos con solo cuatro profesionales limitó la capacidad de control y seguimiento, lo que confirma la precariedad estructural del sector frente a procesos industriales más organizados.

Las problemáticas que se hallaron durante la ejecución de la investigación reflejan que sin importar la planificación que se tenga en este tipo de proyectos (o en este caso mantenimiento de cubiertas) del sector público, es necesario que las partes que intervienen en este proyecto tengan una clara visión de cómo se va a realizar el contrato, tanto en temas técnicos explicados por parte del componente Civil, como la asignación de recursos por parte de la Entidad Contratante. El llevar a cabo un control en lapsos de tiempo donde el personal Supervisor, Administrativo y Contratista puedan exponer las diferentes circunstancias que puedan presentarse durante el proyecto, esto con el fin de adelantarse a la solución de la restricción.

En cuanto a los objetivos iniciales, los resultados abordan la pregunta de investigación al mostrar que la aplicación de las herramientas contiene el potencial de mejorar la sincronización de cronogramas y aumentar la productividad, aunque es necesario hacer ajustes según el contexto local. Desde una perspectiva teórica, este estudio refuerza la importancia de combinar metodologías de gestión con enfoques tanto cualitativos como cuantitativos para entender mejor las dinámicas culturales y estructurales del sector. Como limitaciones, se señala la dependencia de información interna, lo que limita la posibilidad de generalizar los hallazgos. Se sugiere que futuras investigaciones indaguen en modelos híbridos de planificación y herramientas de gestión de riesgos que fortalezcan la sostenibilidad y la eficiencia en los proyectos de construcción.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos profundamente a nuestros padres, quienes con su esfuerzo, dedicación y apoyo incondicional hicieron posible que pudiéramos realizar esta especialización. Su confianza y los sacrificios asumidos para brindarnos esta oportunidad han sido fundamentales en nuestro

proceso de formación y crecimiento profesional. Extendemos también nuestro agradecimiento a los docentes Sergio Andrés Arboleda y Edison Aldemar Hincapié, cuyo acompañamiento como asesores nos guió de manera constante durante la ejecución de esta investigación. De igual manera, expresamos nuestra gratitud a la empresa contratista que nos permitió desarrollar este estudio en uno de sus contratos, brindándonos el espacio y las condiciones necesarias para llevar a cabo este trabajo.

6. REFERENCIAS

- Zhang, S., & Wang, X. (2021). "Dynamic probability analysis for construction schedule using subset simulation". *Advances in Civil Engineering*, 2021, Article ID 1567261. Hindawi. <https://doi.org/10.1155/2021/1567261>
- Moreno Parra, I. (2023). "Paradoja de los megaproyectos y gestión presupuestaria vial en Ecuador 2002–2006". *Revista Infraestructura Vial*, 25(44), 44–57. LanammeUCR. <https://doi.org/10.15517/iv.v25i44.55544>
- Melaku Belay, S., Tilahun, S., Yehualaw, M. D., Matos, J., Sousa, H., & Workneh, E. T. (2021). "Analysis of cost overrun and schedule delays of infrastructure projects in low income economies: Case studies in Ethiopia". *Advances in Civil Engineering*, 2021, Article ID 4991204. Hindawi. <https://doi.org/10.1155/2021/4991204>
- Hoang, N.-D., Nguyen, Q.-L., & Pham, Q.-N. (2015). "Optimizing construction project labor utilization using differential evolution: A comparative study of mutation strategies". *Advances in Civil Engineering*, 2015, Article ID 108780. Hindawi. <https://doi.org/10.1155/2015/108780>
- Xu, Z., Yu, J., & Li, H. (2014). "Analyzing integrated cost-schedule risk for complex product systems R&D projects". *Journal of Applied Mathematics*, 2014, Article ID 472640. Hindawi Publishing Corporation. <https://doi.org/10.1155/2014/472640>
- Chura Marca, A. (2020). "Optimización de la gestión de proyectos con la aplicación de teoría de restricciones, en proyectos de construcción multidisciplinarios en el sur del Perú". *Repositorio Institucional Continental*. <https://hdl.handle.net/20.500.12394/8186>
- Zambrano Silva, & Soto Chávez, . (2021). "Teoría de las restricciones y su impacto en las mejoras de la productividad". *Polo del conocimiento* <https://doi.org/10.23857/pc.v6i11.3277>
- Santos, J. Torres, J. M.; Wysk, R. A (2015). "Mejorando la producción con lean thinking. 2. Ed". Madrid: Difusora Larousse - Ediciones Pirámide <https://elibro.net/es/ereader/colmayor/115255?page=1>.
- Yang Li, & Xiyu Li (2022). "An efficient critical path based method for permutation flow shop scheduling problem: Critical path with related theorems proving". Elsevier. ScienceDirect <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.04.005>
- Nermeen Bahnas, , & Kareem Adel, . (2024). "Automation in Construction: Monitoring and controlling engineering projects with blockchain-based critical chain project management". Elsevier. ScienceDirect <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105484>

Sobre los Trabajos de Investigación

**Noviembre de 2025
Medellín, Colombia**

Sinopsis

El Volumen 2 de la publicación Construcciones Civiles Tendencias y Sostenibilidad, organizado por el Programa de Construcciones Civiles de la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, se llevó a cabo en noviembre de 2025 en la ciudad de Medellín, Colombia. Para esta segunda edición, las líneas temáticas continuaron siendo las mismas de su versión anterior, reafirmando el enfoque de la publicación en las áreas de Administración y gestión de la construcción, Construcción sostenible, Patología en la edificación y Materiales de construcción. Los trabajos abordaron temas de actualidad, mostrando avances en la investigación y el desarrollo de soluciones para el sector, organizándose nuevamente en dos categorías: proyectos de pregrado y de posgrado, lo que refleja la consolidación del compromiso con la innovación y la sostenibilidad en la construcción.

La inclusión de trabajos de pregrado y posgrado fue fundamental para fomentar el desarrollo académico en distintos niveles de formación. En el pregrado, la presentación de investigaciones permitió a los estudiantes adquirir experiencia en la divulgación científica y en el análisis crítico de problemáticas del sector, mientras que en el posgrado, la participación en el evento propició la consolidación de conocimientos especializados y el fortalecimiento de redes de colaboración entre investigadores y profesionales del sector. Ambas categorías evidenciaron de manera integrada la importancia de la formación académica en la generación de soluciones innovadoras para los desafíos del sector constructor.

Finalmente, el evento permitió generar un espacio de intercambio de conocimiento entre estudiantes, docentes e investigadores, promoviendo el debate académico y la colaboración interinstitucional en la búsqueda de soluciones innovadoras para los desafíos del sector constructor.