

Digitalización de activos construidos bajo estándares BIM: caso de estudio pasaporte de
materiales de las envolventes del Colegio Rochester

CYGA. Emily Viviana Solano Quevedo
Estudiante Maestría en Construcción Sostenible

Trabajo de Grado

Director

Liliana Medina Campos MSc. LEED AP BD+C



Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Maestría en Construcción Sostenible

Octubre 11 de 2025

Resumen

La industria de la construcción enfrenta el desafío de la falta de trazabilidad y gestión eficiente de materiales en edificaciones existentes, lo que obstaculiza la transición hacia una economía circular. Este estudio abordó la problemática mediante un diseño de caso con enfoque mixto, centrado en el Colegio Rochester, un activo con certificación LEED Platinum. La metodología se estructuró en fases de análisis cuantitativo y cualitativo. En la fase cuantitativa, se realizó un levantamiento con escáner láser para crear un modelo digital en Revit, que funcionó exitosamente para la extracción de las cantidades de materiales de las envolventes. Posteriormente, se utilizó One Click LCA para cuantificar el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de estos materiales, y los datos de la métrica potencial de calentamiento global-GWP ($\text{KgCO}_2\text{eq/Tn}$), se organizaron en el Pasaporte de Materiales, la matriz digital principal del estudio. En la fase cualitativa, se obtuvieron narrativas de entrevistas y observaciones de campo, que se codificaron para complementar la interpretación de los datos numéricos. Los hallazgos confirmaron que la integración de un Gemelo Digital, el Pasaporte de Materiales y la información de ACV es una estrategia viable para la gestión de activos. Se concluyó que este modelo, al facilitar la trazabilidad y reincorporación de los materiales, puede ser replicado en otras edificaciones existentes para contribuir a un futuro más sostenible en el sector.

Abstract

The construction industry is facing the challenge of a lack of material traceability and efficient management in existing buildings. This is hindering the transition to a circular economy. This study addressed this issue through a mixed-methods case study design, focusing on the Rochester School, a LEED Platinum certified asset. The methodology was structured into quantitative and qualitative analysis phases. In the quantitative phase, a laser scan was performed to create a digital model in Revit. This is successfully served for the extraction of material quantities from the building envelopes. Subsequently, One Click LCA was then used to quantify the Life Cycle Assessment (LCA) of these materials, with the

global warming potential-GWP (KgCO₂eq/Tn) data organized in a Material Passport, the study's main digital matrix. The qualitative phase obtained narratives from interviews and field observations. These were coded to complement the interpretation of the numerical data. The findings confirmed that integrating a Digital Twin, Material Passport, and LCA information is a viable strategy for asset management. This model is to be replicated in other existing buildings to contribute to a more sustainable future for the industry.

Palabras clave: Palabras clave: BIM, Gemelo Digital (GD), Pasaporte de materiales (PM), Análisis de ciclo de vida (ACV), Economía circular

Keywords: BIM, Digital Twin (DT), Material Passport (MP), Life Cycle Assessment (LCA), Circular Economy

Tabla de contenido

Introducción.....	10
Planteamiento del Problema.....	12
Contexto global.....	12
Contexto regional.....	14
Contexto nacional: Colombia	15
La importancia de la evaluación de edificaciones existentes.....	16
Árbol de problemas: Análisis de causa y efecto	17
Árbol de Soluciones: Propuesta y Resultados.....	19
Problema de Investigación.....	22
Pregunta de Investigación	23
Objetivos	24
Objetivo General.....	24
Objetivos Específicos.....	24
Justificación.....	25
Contexto del Proyecto	29
Contexto Político.....	29
Contexto Económico.....	29
Contexto Social.....	30
Contexto Tecnológico	30
Contexto Ambiental y Legal	30
Descripción del activo construido caso de estudio: Colegio Rochester un Campus Sostenible	36

Fase de Diseño y Construcción del campus nuevo en el municipio de Chía y sus desafíos	40
Marco Teórico	45
Bases Teóricas	45
Marco Conceptual.....	49
Análisis de Ciclo de Vida (ACV)	49
Building Information Modeling (BIM).....	50
Economía Circular	50
Gemelo Digital (DT).....	50
Pasaporte de Materiales (MP)	50
Envolventes del Edificio.....	51
Metodología	51
Diseño de la Investigación	51
Fases de la Investigación.....	54
Fase 1: Planteamiento del Problema y Marco Teórico.....	55
Fase 2: Recolección y Digitalización de Datos	55
Fase 3 Desarrollo del Prototipo Digital.....	56
Fase 4: Análisis de Datos y Evaluación de Resultados	56
Fase 5: Presentación de Resultados y Conclusiones	57
Procedimientos de Análisis	57
Recolección de Datos, Análisis e Interpretación	58
Identificación y Cuantificación de Materiales que Constituyentes de las Envolventes del Colegio Rochester.....	69

Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y Pasaporte de Materiales.....	73
Visión y evaluación del potencial de circularidad	79
Interpretación de los Resultados	83
Síntesis de los Hallazgos Principales.....	83
Discusión a la Luz de la Literatura	83
Razones de las Diferencias	84
Contribución al Conocimiento	87
Respuesta a las Preguntas de Investigación e Hipótesis	87
Implicaciones del Estudio.....	88
Limitaciones del Estudio	89
Alcance y Enfoque del Estudio de Caso	89
Desafíos de Datos Históricos y Contexto Regional.....	90
Retos Técnicos del Modelado	91
Recomendaciones para Futuras Investigaciones	91
CONCLUSIONES Y APORTES.....	93
Aportes del Documento.....	94
Aportes Metodológicos y Digitales	94
Referencias Bibliográficas	96
Anexos	105

Lista de Tablas

Tabla 1 Abreviaciones	9
Tabla 2 Materiales que conforman las envolventes identificadas desde el manual de mantenimiento proporcionado por OIKOS.....	69
Tabla 3 Origen y propiedades técnicas de los materiales	72
Tabla 4 Evaluación del potencial de circularidad de estos materiales.....	80

Lista de ilustraciones

Ilustración 1 Árbol de Problemas	18
Ilustración 2 Árbol de Soluciones.....	20
Ilustración 3 Ciclo de vida.....	26
Ilustración 4 Línea de Tiempo Evolutiva de la Normativa en Construcción Sostenible	32
Ilustración 5 Infografía evolución de la Adopción de BIM en infraestructura	34
Ilustración 6 Fachadas Colegio Rochester	36
Ilustración 7 Localización Colegio Rochester.....	37
Ilustración 8 Colegio Rochester en el Tiempo.....	39
Ilustración 9 Colegio Rochester y los ODS	44
Ilustración 10 Fases de la investigación	54
Ilustración 11 Visita Técnica al Colegio Rochester	59
Ilustración 12 Funcionamiento del escáner.....	60
Ilustración 13 Presentación de propuesta.....	61
Ilustración 14 Información Recibida.....	61
Ilustración 15 Levantamiento fotográfico	62
Ilustración 16 Planeación de escaneo	63
Ilustración 17 Ficha técnica LEICA BLK360	64
Ilustración 18 Toma de escaneos	65
Ilustración 19 Procesamiento de datos.....	66

Ilustración 20 Visualización en Recap	66
Ilustración 21 Segregación de modelos	67
Ilustración 22 Modelo Sobrepuesto en la nube de puntos.....	67
Ilustración 23 Gemelo digital descriptivo de las envolventes del Colegio Rochester	68
Ilustración 24 Materiales y cantidades extraídas del modelo	70
Ilustración 25 Distribución porcentual de materiales	71
Ilustración 26 Contribución al Potencial de Calentamiento Global (GWP) del total de materiales de las envolventes	75
Ilustración 27 Potencial de Calentamiento Global Total de cada material de las envolventes por fase del ACV	75
Ilustración 28 Potencial de Calentamiento Global Total (KgCO ₂ e/Tn) por Material de las Envolventes del Colegio Rochester	77
Ilustración 29 Imágenes de la plantilla base	78
Ilustración 30 Pasaporte de Materiales para el ladrillo	79

Tabla 1 Abreviaciones

Abrev.	Inglés	Español
ACV	Life Cycle Assessment (LCA)	Análisis de Ciclo de Vida
AEC	Architecture, Engineering & Construction	Arquitectura, ingeniería y construcción
AECO	Architecture, Engineering, Construction and Operation	Arquitectura, ingeniería, construcción y operación
BIM	Building Information Modeling	Building Information Modeling
CO₂	Carbon Dioxide	Dióxido de carbono
CAMACOL	Cámara Colombiana de la Construcción	Cámara Colombiana de la Construcción
CCCS	Consejo Colombia de Construcción Sostenible	Consejo Colombia de Construcción Sostenible
CUAN	Quantitative	Cuantitativo
CUAL	Qualitative	Cualitativo
DAP	Environmental Product Declarations (EPD)	Declaraciones Ambientales de Producto
DNP	National Planning Department	Departamento Nacional de Planeación
DT	Digital Twin	Gemelo Digital (GD)
EC	Circular Economy	Economía Circular
E-LCA	Environmental Life Cycle Assessment	Evaluación Ambiental del Ciclo de Vida
EoL	End of Life	Fin de la vida
GBCI	Green Business Certification Inc	Green Business Certification Inc
GWP	Global Warming Potential	Potencial de Calentamiento Global
HR-ENCC	National Roadmap for Net Zero Carbon Buildings	Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Neto Cero Carbono
HRNENCC	National Roadmap for Net Zero Carbon Buildings	Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Neto Cero Carbono
ISO	International Organization for Standardization	Organización Internacional de Normalización
LCC	Life Cycle Cost	Costo del Ciclo de Vida
LCSA	Life Cycle Sustainability Assessment	Evaluación de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design	Leadership in Energy and Environmental Design
LOD	Level of Development	Nivel de Desarrollo
O&M	Operation and Maintenance	Operación y Mantenimiento
OCDE	Organization for Economic Co-operation and Development	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
ODS	Sustainable Development Goals (SDG)	Objetivos de Desarrollo Sostenible
PM	Material Passport (MP)	Pasaporte de Materiales
RCD	Construction and Demolition Waste	Residuos de Construcción y Demolición
S-LCA	Social Life Cycle Assessment	Evaluación Social del Ciclo de Vida
UE	European Union (EU)	Unión Europea
USGBC	US Green Building Council	US Green Building Council

Fuente: Propia

Introducción

El cambio climático y la creciente escasez de recursos naturales han impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles en el sector de la construcción, una industria con un impacto ambiental significativo debido a su alto consumo de materiales y energía. De acuerdo con el (United Nations Environment Programme, 2024), las emisiones de CO₂ derivadas de la construcción y operación de edificaciones alcanzaron niveles récord en 2022, representando aproximadamente el 37% del total global y acercándose a las 10 gigatoneladas. Estas emisiones provienen tanto del consumo energético de los edificios como de la fabricación de materiales clave como cemento y acero (CCCS & CAMACOL, 2021). En este contexto, la construcción sostenible se ha convertido en un tema prioritario a nivel global, impulsando a los gobiernos a implementar regulaciones alineadas con el objetivo de evitar que la temperatura global supere el umbral crítico de 1,5 °C.

En el marco de la Cuarta Revolución Industrial, han surgido herramientas digitales para mejorar la sostenibilidad en la construcción. El Building Information Modeling (BIM), definido en la ISO19650-1 (ISO, 2018) conceptos y principios; como "el uso de un entorno de datos compartido para la gestión colaborativa de la información en el ciclo de vida de un activo construido," ha demostrado su capacidad para optimizar el diseño, la construcción y la gestión (Parece, Resende, & Rato, 2024). A través de BIM, es posible desarrollar un Gemelo Digital (DT), una réplica virtual de una entidad física que, si bien se originó en la industria de la fabricación ISO 23247 (ISO, 2021), se ha expandido al sector de la construcción para facilitar la gestión en la fase de Operación y Mantenimiento O&M (Sheombar, 2024). El Gemelo Digital permite simular el comportamiento de un activo, optimizar su operación y gestionar eficientemente sus recursos, aunque su nivel de madurez puede variar desde una simple representación descriptiva hasta una réplica en tiempo real. Adicional (Parece, Resende, & Rato, 2024) afirman que la herramienta basada en BIM es efectiva para la evaluación del carbono incorporado

Complementando estas tecnologías, el Pasaporte de Materiales (MP) emerge como una herramienta clave para la EC cuyo objetivo principal es mantener el valor de los

materiales y componentes en uso durante el mayor tiempo posible desempeñando un papel crucial en el sistema regenerativo; definida como un marco de soluciones sistémicas, busca desvincular la actividad económica del consumo de recursos finitos y se enfoca en tres principios impulsados por el diseño: eliminar residuos y contaminación, hacer circular los productos y materiales (en su valor más alto), y regenerar la naturaleza. Un principio fundamental de la EC es mantener los productos y materiales en uso por el mayor tiempo posible y con el mayor valor posible (ellenmacarthurfoundation, 2022).

Un MP es un documento o registros digitales que documentan detalles sobre las características físicas de los materiales y componentes utilizados en diversos productos o sistemas (Markou, Sinnott, & Thomas, 2025), que recoge información detallada sobre los componentes de un edificio, incluyendo su composición, impacto ambiental y potencial de reutilización, lo que facilita su trazabilidad y reincorporación en nuevos ciclos productivos (Honic, Kovacic, & Rechberger, 2019). Este enfoque se alinea con el Diseño para la Deconstrucción (DfD), una estrategia que busca facilitar el desmontaje selectivo y la recuperación de componentes al finalizar la vida útil de un edificio, promoviendo la reutilización y el reciclaje (Akbarieh, Jayasinghe, Waldmann, & Norman, 2023).

La integración de BIM con otros sistemas de sostenibilidad es fundamental para un enfoque holístico. Por ejemplo, la integración de BIM con LEED es crucial para facilitar las decisiones de construcción y la optimización del ciclo de vida de los edificios, ya que las capacidades de visualización y simulación de BIM simplifican la documentación para la conformidad con los prerrequisitos y créditos de la certificación (Boje, y otros, 2023). A su vez, la integración de BIM y el Análisis de Ciclo de Vida (LCA) es vital para evaluar los impactos ambientales y la eficiencia energética a lo largo del tiempo, especialmente en proyectos de renovación (Boje, y otros, 2023).

En este contexto, la implementación de la metodología BIM en edificaciones existentes es fundamental, ya que permite un levantamiento preciso del estado actual, contribuye a la cuantificación de materiales para su reutilización y centraliza la información para la fase de O&M (Parece, Resende, & Rato, 2024). Esto optimiza la toma de decisiones,

reduce costos y apoya directamente la obtención y seguimiento de certificaciones de sostenibilidad. La capacidad de BIM para gestionar datos de materiales, su disposición al final de su vida útil y la facilidad de deconstrucción contribuye significativamente a la reducción de las emisiones de CO₂ mediante la reutilización (Andisheh, 2024); (Ostapska, Rütther, Loli, & Gradeci, 2024).

El presente estudio aborda la integración de estas metodologías al centrarse en el Colegio Rochester, un proyecto destacable por su desempeño y por haber alcanzado la certificación LEED ORO en su diseño y construcción (2011-2012) y LEED Platinum en operación y mantenimiento (2022). Este caso de estudio permite analizar cómo la digitalización de un activo existente con altos estándares de sostenibilidad, a través de un prototipo de Gemelo Digital y el desarrollo de un Pasaporte de Materiales, puede facilitar la trazabilidad, reutilización y reincorporación de los componentes de las envolventes en nuevos ciclos productivos, bajo los fundamentos de la Economía Circular.

Planteamiento del Problema

La integración de las metodologías de Modelado de Información de la Construcción (BIM) y la Evaluación del Ciclo de Vida (LCA), para la gestión de edificaciones existentes, surge como una alternativa estratégica. Estas metodologías permiten no solo mejorar los procesos operativos, sino también proyectar futuras intervenciones mediante la evaluación de impactos ambientales potenciales, facilitando la toma de decisiones informada y la optimización de activos a lo largo de su vida útil (CCCS, 2023).

Contexto global

La industria de la construcción y la edificación es uno de los mayores contribuyentes al impacto ambiental global. Este sector es responsable de aproximadamente el 37% de las emisiones anuales de CO₂ a nivel mundial (Kathiravel & Feng, 2024); además de generar una serie de impactos ambientales y sociales significativos, a pesar de su vital contribución al desarrollo económico (Boje, y otros, 2023); (Hussien, y otros, 2023); (Serrano, Díaz, Boronat, & Mercader-Moyano, 2023).

En este contexto, la sociedad actual está explotando y transformando los recursos naturales de la Tierra a un ritmo insostenible, con efectos potencialmente irreversibles en el medio ambiente y la salud humana (Boje, y otros, 2023). Específicamente, el sector de la construcción consume cerca del 40% de las materias primas y el 36% del consumo energético global, generando a su vez el 40% de los residuos y el 40% de las emisiones de gases de efecto invernadero (Hussien, y otros, 2023).

Ante este escenario, la Evaluación de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida (LCSA) se ha consolidado como una metodología probada para evaluar los impactos ambientales, sociales y económicos de un sistema de producto a lo largo de su ciclo de vida (Boje, y otros, 2023). La LCSA integra tres perspectivas complementarias: la ambiental (E-LCA), la social (S-LCA) y la económica (LCC), con el objetivo de lograr edificios verdaderamente sostenibles a lo largo de todo su ciclo de vida (Boje, y otros, 2023). Sin embargo, su aplicación en el sector de la construcción es compleja debido a la necesidad de recopilar e integrar grandes volúmenes de datos de diversos campos. La falta de integración y la incompletitud de los datos han sido identificadas como una brecha de investigación crucial (Boje, y otros, 2023). Los desafíos inherentes a la aplicación de LCSA incluyen la disponibilidad y precisión de los datos, la limitada alineación práctica entre las tres metodologías y la falta de metodologías consolidadas para evaluar las categorías de impacto de la S-LCA (Boje, y otros, 2023)

Tradicionalmente, el foco de la sostenibilidad en la edificación se ha centrado en las emisiones y el consumo de energía durante la fase de operación de los edificios (Boje, y otros, 2023). Sin embargo, a medida que las edificaciones se vuelven más eficientes energéticamente, la contribución relativa de las otras fases del ciclo de vida, en particular la producción de materiales (impactos incorporados), se vuelve más significativa (Boje, y otros, 2023). Los impactos incorporados, liberados en un corto período, son cruciales de abordar para alcanzar los objetivos de reducción de CO₂ a corto plazo, a diferencia de los impactos operacionales que se extienden a lo largo del tiempo (Amiri, y otros, 2021).

Los sistemas de certificación de edificios ecológicos (GBCS, s.f.), como LEED y BREEAM, son herramientas esenciales para guiar el diseño y la operación hacia prácticas sostenibles (Ungureanu, 2024). No obstante, se ha criticado que estos sistemas a menudo priorizan los créditos operacionales sobre los incorporados, ya que la consideración de los impactos incorporados es limitada y pocos puntos están directamente acreditados a las emisiones incorporadas (Amiri, y otros, 2021); (Olanrewaju, 2024)). Esto subraya la necesidad de que los GBCS aumenten la ponderación de los materiales de construcción sostenibles (Amiri, y otros, 2021), (Olanrewaju, 2024).

La aparición de las Declaraciones Ambientales de Producto (EPD) ha impulsado la disponibilidad de información ambiental, fundamental para las evaluaciones a nivel de edificio (Feng, y otros, 2022) (Marsh, 2023). Sin embargo, la incertidumbre en los resultados de LCA, a menudo ignorada, puede comprometer las decisiones de sostenibilidad. Abordar esta cuestión es imperativo para garantizar la fiabilidad de las evaluaciones (Marsh, 2023)

Contexto regional

A nivel regional, la Unión Europea (UE) se ha posicionado como líder en la transición hacia una economía circular en la construcción, impulsando la relevancia de metodologías como BIM y LCA. A través de iniciativas como la "Ola de Renovación" y el marco Level(s), la UE ha establecido una dirección clara hacia la optimización de su parque edificado (Dervishaj, 2024). Si bien América Latina ha mostrado avances en la adopción de estas metodologías, aún se encuentra en una etapa de consolidación. La región ha ido alcanzando a la UE en el uso de BIM para la gestión de proyectos, pero la integración de LCA sigue siendo un desafío debido a la carencia de bases de datos locales, lo que genera una dependencia de bases de datos de otras regiones (Dervishaj, 2024). Esta realidad resalta la importancia de estudiar las experiencias de la UE, donde BIM y LCA están más consolidadas, como un modelo a seguir y a la vez, fortalecer el desarrollo de metodologías y datos propios en América Latina.

Unión Europea (UE): La UE ha priorizado la "Ola de Renovación" (Renovation Wave) como una estrategia clave para mejorar la eficiencia energética y reducir las

emisiones del parque de edificios existente (Serrano-Baena, 2023). Se estima que más de dos tercios de los edificios en la UE son energéticamente ineficientes, y el 80% de los que se ocuparán en 2050 ya han sido construidos (Hussien, y otros, 2023). Esto enfatiza la importancia de optimizar el uso del stock de edificios existente y considerar la reutilización adaptativa como alternativa a la demolición (Hussien, y otros, 2023). El marco Level(s), lanzado por la Comisión Europea, promueve una transición hacia la economía circular y el pensamiento de ciclo de vida (Olanrewaju, 2024).

América Latina: En América Latina, las ciudades son clave en la demanda de energía, las emisiones de carbono y la generación de residuos (Pomponi & Medina Campos, 2018). La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) ha recomendado la adopción de LCA en la región (Pomponi & Medina Campos, 2018). Sin embargo, existe una carencia de bases de datos disponibles sobre el carbono incorporado en la región (Pomponi & Medina Campos, 2018). La mayoría de los estudios existentes han sido realizados por académicos y utilizan bases de datos de otras regiones, comoecoinvent, lo que puede no ser representativo del contexto local (Pomponi & Medina Campos, 2018).

Contexto nacional: Colombia

El gobierno colombiano ha incluido el sector de la construcción en sus esfuerzos por reducir las emisiones de carbono (Pomponi & Medina Campos, 2018). Se están impulsando iniciativas como las "Compras Públicas Sostenibles y Eco-etiquetado," que requerirán el desarrollo de Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) (Pomponi & Medina Campos, 2018). La legislación colombiana incluye resoluciones para promover la eficiencia energética, la gestión de residuos de construcción y demolición, y la adopción de la neutralidad de carbono (Pomponi & Medina Campos, 2018).

A pesar de estas iniciativas, la disponibilidad de datos de LCA específicos para Colombia es limitada (Pomponi & Medina Campos, 2018). Estudios existentes a menudo utilizan bases de datos genéricas, lo que cuestiona la representatividad de sus resultados

(Pomponi & Medina Campos, 2018). Esto resalta la necesidad de desarrollar datos locales para la LCA en Colombia (Pomponi & Medina Campos, 2018).

En los últimos cinco años, el sector de la construcción en Colombia ha experimentado avances significativos, especialmente en el diseño y la edificación sostenible. Instituciones como el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS) y la Cámara Colombiana de la Construcción (CAMACOL), han impulsado una serie de iniciativas clave. Entre ellas destaca la Hoja de Ruta de Edificaciones Neto Cero Carbono, desarrollada por el (CCCS, 2022), que proporciona un marco claro para la descarbonización. A esto se suman documentos estratégicos como la segunda edición de la Hoja de Ruta de Sostenibilidad para Materiales de Construcción (CCCS, 2025) y la Guía Técnica de Verificación de Atributos de Sostenibilidad para Materiales de Construcción (CCCS, 2022). Un hito importante es la plataforma (SOSTENIDO, 2024), una colaboración entre el CCCS y CAMACOL que consolida información verificada sobre sostenibilidad de materiales. Todos estos esfuerzos evidencian un fortalecimiento en la oferta de datos y estrategias, lo que permite que las edificaciones en Colombia alcancen un desempeño integral más sostenible.

La importancia de la evaluación de edificaciones existentes

La evaluación de edificaciones existentes es crucial para la sostenibilidad por varias razones:

Extender la vida útil: La demolición y reconstrucción tienen un alto impacto ambiental. Estrategias como la reutilización adaptativa y la rehabilitación energética son fundamentales para preservar la energía incorporada y reducir los residuos (Olumo, 2024); (Hussien, y otros, 2023).

Comprender los impactos: La LCSA proporciona una comprensión holística de los impactos a lo largo del ciclo de vida, permitiendo identificar "puntos críticos" de impacto y dirigir los esfuerzos de mejora de manera eficiente (Boje, y otros, 2023).

Fortalecer la toma de decisiones: La integración de LCSA con tecnologías como BIM y los Gemelos Digitales facilita una toma de decisiones basada en la evidencia. Esto

permite la comparación de alternativas de diseño, reduce la brecha de rendimiento entre lo estimado y lo real, y apoya la implementación de la economía circular (Boje, y otros, 2023) (Marsh, 2023); (Serrano, Díaz, Boronat, & Mercader-Moyano, 2023).

En síntesis, la problemática central radica en la brecha entre el creciente interés en la sostenibilidad del sector de la construcción y la falta de metodologías y datos integrados, particularmente en el contexto de las edificaciones existentes. A pesar de los esfuerzos globales y regionales por migrar hacia una economía circular y considerar los impactos incorporados, la ausencia de bases de datos locales y la limitada integración de BIM y LCA obstaculizan una toma de decisiones verdaderamente informada y eficiente. Por lo tanto, se justifica la necesidad de investigar y proponer un enfoque que integre ambas metodologías para evaluar y optimizar las edificaciones existentes, contribuyendo a la reducción de su huella ambiental y al fortalecimiento de las políticas de construcción sostenible en un contexto regional y nacional específico.

Árbol de problemas: Análisis de causa y efecto

En el marco de la investigación, la identificación del problema central es un paso crítico para delimitar el alcance del estudio y enfocar las soluciones propuestas. Para este fin, se utilizó la metodología del Árbol de Problemas plasmada en la Ilustración 1 Árbol de Problemas, una herramienta de análisis que permite desglosar un problema principal en sus causas subyacentes y los efectos que genera, facilitando una comprensión holística y estructurada de la situación.

El análisis contextual, tanto a nivel global como nacional, ha revelado que la gestión de los activos construidos y sus materiales representa un desafío crítico. A partir de esta premisa, se ha identificado como problema central la "Falta de trazabilidad y gestión eficiente de los materiales en la construcción". Este problema es el epicentro de una cadena de efectos negativos que se manifiestan en la industria, y es a su vez, una consecuencia directa de múltiples causas que se exponen a continuación.

Ilustración 1 Árbol de Problemas



Fuente: propia

Causas:

Causa 1: Uso ineficiente y agotamiento de los recursos. Este factor se relaciona con la aplicación de modelos de construcción lineales, donde la extracción, producción y disposición de materiales no consideran su valor residual ni su potencial de reutilización o reciclaje.

Causa 2: Déficit en la información precisa sobre los materiales. La carencia de datos detallados sobre el origen, composición y características de los materiales de construcción dificulta su valorización y su posible reincorporación en nuevos ciclos productivos al final de la vida útil del activo.

Causa 3: Limitada adopción de herramientas tecnológicas. La escasa implementación de tecnologías avanzadas, como el Modelado de Información de la Construcción (BIM) y los Gemelos Digitales, restringe la capacidad de gestionar la información de los materiales de forma centralizada y dinámica.

Causa 4: Dependencia de metodologías de construcción lineales. La

persistencia de un enfoque de "usar y tirar" perpetúa un modelo insostenible, opuesto a los principios de la Economía Circular, lo que limita la innovación en la gestión de materiales y residuos.

Efectos:

Efecto 1: Aumento del impacto ambiental en la construcción. La falta de trazabilidad y la gestión ineficiente de los materiales contribuyen directamente a la huella de carbono del sector, incrementando las emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo de recursos naturales.

Efecto 2: Desperdicio de materiales. La incapacidad para rastrear y reutilizar los materiales a lo largo de su ciclo de vida conduce a un desperdicio significativo, generando pérdidas económicas y un consumo innecesario de materias primas.

Efecto 3: Disposición de los residuos en rellenos sanitarios. Sin una gestión adecuada, los residuos de construcción y demolición terminan en vertederos, ocupando espacio valioso y generando contaminación del suelo y el agua.

Efecto 4: Ineficiencia en la gestión operativa y energética. La falta de información detallada sobre los materiales impacta negativamente en las fases de operación y mantenimiento, ya que la gestión energética y las reparaciones se vuelven menos precisas y más costosas.

Este análisis detallado del problema central, sus causas y sus efectos, sustenta la necesidad de desarrollar una solución que aborde directamente la falta de trazabilidad y la gestión ineficiente de materiales, lo cual se alinea con la propuesta de utilizar un Gemelo Digital para generar un Pasaporte de Materiales que facilite la transición hacia un modelo de Economía Circular en la edificación.

Árbol de Soluciones: Propuesta y Resultados

Con base en el análisis detallado del árbol de problemas, se presenta el árbol de soluciones en la Ilustración 2 Árbol de Soluciones, como el enfoque metodológico propuesto para abordar el problema central identificado: la falta de trazabilidad y gestión eficiente de

los materiales en la construcción. Esta herramienta permite visualizar las acciones clave necesarias para mitigar las causas del problema y, en consecuencia, alcanzar los resultados esperados.

Esta solución se alinea directamente con la necesidad de digitalizar y sistematizar la información de los materiales a lo largo del ciclo de vida de una edificación, tal como se plantea en la literatura sobre BIM, Gemelos Digitales y Economía Circular.

Ilustración 2 *Árbol de Soluciones*



Fuente: propia

Se proponen las siguientes soluciones específicas, que buscan contrarrestar cada una de las causas del problema:

Solución 1: Optimización del uso de recursos naturales. Al implementar un modelo de trazabilidad, se facilita la identificación y valoración de los materiales existentes, promoviendo su reutilización y, por lo tanto, reduciendo la necesidad de extraer nuevas materias primas.

Solución 2: Provisión de información detallada sobre los materiales. La creación de un Pasaporte de Materiales digital proporciona una fuente de información precisa y centralizada. Esto incluye datos sobre la composición, el origen, el desempeño y el valor residual de los materiales, lo que es fundamental para una gestión eficiente.

Solución 3: Fomento de la adopción de tecnologías avanzadas. La investigación propone el uso de tecnologías como BIM y Gemelos Digitales para servir como plataforma para el modelo de trazabilidad. Esto demuestra la importancia de la digitalización para superar las limitaciones de las metodologías tradicionales.

Solución 4: Implementación de metodologías constructivas circulares. Al abordar las causas anteriores, el proyecto facilita la transición de un modelo lineal a uno circular, promoviendo la reutilización, el reciclaje y la reincorporación de los materiales al final de la vida útil de la edificación.

La correcta implementación de estas soluciones específicas llevará a los siguientes resultados, que actúan como la contraparte positiva de los efectos negativos descritos en el árbol de problemas:

Resultado 1: Reducción del impacto ambiental en la construcción. La optimización del uso de recursos y la gestión de residuos contribuyen directamente a la reducción de la huella de carbono y el consumo de energía en el sector.

Resultado 2: Minimización de residuos. Un sistema de trazabilidad y la provisión de información detallada permiten identificar y recuperar materiales valiosos, lo que minimiza la generación de residuos de construcción y demolición.

Resultado 3: Mayor eficiencia en la gestión energética y operativa. Con un Gemelo Digital y un Pasaporte de Materiales, los operadores pueden tomar decisiones más informadas, lo que conduce a una gestión más eficiente y a un mejor desempeño energético y operativo de la edificación.

Resultado 4: Fomento de la economía circular en la construcción. La implementación de todas estas soluciones facilita un cambio sistémico hacia un modelo

circular, en el que los materiales se perciben como activos valiosos que pueden ser reutilizados indefinidamente.

Problema de Investigación

El sector de la construcción enfrenta el desafío crítico de transición de un modelo lineal a uno de economía circular (Ungureanu, 2024). A pesar de los esfuerzos globales por mejorar la sostenibilidad en la edificación, persiste una brecha fundamental: la falta de trazabilidad y gestión eficiente de los materiales a lo largo de su ciclo de vida. Esta problemática se origina en la ausencia de mecanismos estandarizados que permitan monitorear de forma precisa el origen, uso y disposición final de los materiales.

La consecuencia directa de esta deficiencia es el alto volumen de residuos de construcción y demolición (RCD) que se generan. Gran parte de estos RCD terminan en vertederos sin un tratamiento adecuado, lo que no solo acelera el agotamiento de recursos naturales, sino que también contribuye significativamente a la huella de carbono del sector (UNOPS, UNEP & UN-Habitat, 2024)

Además, la carencia de información precisa sobre la composición y procedencia de los materiales se ha convertido en un obstáculo para la implementación de estrategias circulares. Los actores de la industria a menudo carecen de datos confiables para tomar decisiones informadas sobre la reutilización y el reciclaje (Atta, 2021), lo cual limita la adopción de iniciativas prometedoras como los pasaportes de materiales y el uso de modelos digitales. Aunque el marco de la (UNOPS, UNEP & UN-Habitat, 2024), ha propuesto indicadores para medir la circularidad, su aplicación sigue siendo limitada, en parte, por las barreras tecnológicas, regulatorias y económicas existentes.

Ante este panorama, surge la necesidad de investigar y desarrollar herramientas que optimicen la trazabilidad de los materiales, mejorando su gestión y facilitando su reincorporación en la cadena de valor. El presente estudio busca abordar esta problemática al explorar cómo la digitalización de activos construidos puede generar información crucial que permita superar la ineficiencia y la falta de datos que caracterizan al modelo de construcción actual.

Pregunta de Investigación

¿Qué beneficios adicionales pueden identificarse al implementar el Pasaporte de Materiales (MP), gestionado a través de un Gemelo Digital (DT) en su fase descriptiva y desarrollado con metodología BIM, que contribuyan a la toma de decisiones estratégicas en la fase operativa y al final de la vida útil de activos construidos, facilitando la Economía Circular y validando argumentos de sostenibilidad, como es el caso del Colegio Rochester?

Hipótesis

El desarrollo de un Pasaporte de Materiales (MP) para activos construidos, gestionado a través de un prototipo de Gemelo Digital (DT), cuenta con el potencial para fortalecer y validar argumentos de circularidad en sellos de certificación como LEED. La integración de estas tecnologías facilitará una gestión más eficiente, precisa y centralizada de la información sobre los materiales, optimizando la toma de decisiones con criterios de sostenibilidad durante la fase operativa y al final de la vida útil del edificio. Por lo tanto, se plantea que la metodología de desarrollo aplicada al Colegio Rochester no solo permitirá una identificación más ágil de los materiales con potencial de reutilización o reciclaje, sino que también establecerá un modelo replicable para otras edificaciones que busquen minimizar la disposición de residuos y transicionar hacia una verdadera Economía Circular en el sector de la construcción.

El gemelo digital es una tecnología emergente clave para la transformación digital y la optimización de procesos en la industria de la construcción, así como la implementación de la metodología BIM. Impulsado por datos y modelos, permiten el monitoreo, simulación, predicción y optimización de activos físicos. En este estudio, se considera el gemelo digital en su primer nivel de madurez que es descriptivo, el cual se centra en la representación precisa de la entidad física (**envolventes del Colegio Rochester**) a través del modelo digital que consolida los datos relevantes para la gestión de materiales y la toma de decisiones estratégicas resumido en el pasaporte de materiales.

Objetivos

En el marco de la transición hacia modelos constructivos sostenibles, la presente investigación propone el desarrollo de un Pasaporte de Materiales (MP) para las envolventes del Colegio Rochester. Este documento digital será gestionado a través de un prototipo de Gemelo Digital (DT), desarrollado bajo la metodología BIM, con el objetivo de impulsar la Economía Circular. La iniciativa busca establecer la trazabilidad de los materiales, desde su identificación y caracterización hasta la evaluación de su potencial de reutilización, reciclaje o reincorporación en nuevos ciclos productivos. La integración del Análisis de Ciclo de Vida (LCA) en este modelo digital, permitirá obtener información precisa y valiosa para la toma de decisiones, optimizando así el uso de recursos y minimizando el impacto ambiental.

Objetivo General

Desarrollar un Pasaporte de Materiales (MP) para las envolventes del Colegio Rochester, gestionado a través de un prototipo de Gemelo Digital (DT) descriptivo y desarrollado bajo estándares BIM, con el fin de fomentar la Economía Circular mediante la trazabilidad de los materiales y la evaluación de su potencial para su reutilización, reciclaje o reincorporación en nuevos ciclos productivos.

Objetivos Específicos

- Construir el piloto de gemelo digital del Colegio Rochester que represente fielmente las envolventes del activo construido, guiado por la metodología BIM como guía de su desarrollo.
- Identificar y catalogar los materiales de las envolventes recopilando datos detallados sobre el origen, propiedades técnicas.
- Desarrollar un Pasaporte de Materiales digital por medio de un documento digital que plasme la trazabilidad y gestión de los materiales de las envolventes, orientando su correcta disposición al final de la vida útil para su reincorporación en un ciclo circular.

- Evaluar las estrategias para la reincorporación de los materiales analizando la viabilidad y el potencial de las estrategias de reutilización, reciclaje o reincorporación de los materiales, basándose en la información desarrollada en el Pasaporte de Materiales, para fomentar la circularidad.

Justificación

La concepción tradicional o el modelo económico lineal se define como un sistema de "extraer-producir-desperdiciar" (take-make-dispose), donde se extraen recursos finitos para fabricar productos que, tras su uso, a menudo se desechan. Este sistema se considera derrochador y contaminante, y degrada los sistemas naturales (Sheombar, 2024); (Minambiente & MINCIT, 2019), siendo insostenible en el tiempo. Sin embargo, como se evidencia en la Ilustración 3 Ciclo de vida, la oportunidad de una reincorporación rompe con esta linealidad, proponiendo un enfoque circular. Esta perspectiva resalta que el valor inherente y los beneficios ambientales de un material no deberían agotarse tras su primer ciclo de uso. En cambio, mediante procesos de reutilización, reciclaje o valorización, es posible integrar estos materiales en nuevos ciclos productivos, extendiendo su vida útil y minimizando la demanda de nuevas materias primas y los impactos asociados al procesamiento y transporte (Minambiente & MINCIT, 2019). Este cambio de paradigma es esencial para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo de recursos, transformando los "residuos" en valiosos "recursos" para el futuro de la construcción sostenible.

Ilustración 3 Ciclo de vida



Fuente: propia

Históricamente, el “*status quo*” en la fase de **Fin de Vida (End-of-Life o EoL)** de los edificios ha sido la **demolición, seguida de la disposición en un relleno sanitario**. Actualmente, la fase EoL sigue siendo la **menos sostenible** del ciclo de vida de los edificios (Ungureanu, 2024); (Marijana Srećković, 2024).

El presente estudio se justifica por la necesidad de abordar la ineficiencia en la gestión de materiales en el sector de la construcción, un problema que obstaculiza la transición hacia modelos de economía circular. La implementación de pasaportes de materiales y su gestión mediante gemelos digitales representa un mecanismo clave para fortalecer este cambio, así como para cumplir con los objetivos de las taxonomías verdes. Estas herramientas mejoran la trazabilidad, transparencia y gestión de los materiales, proporcionando información esencial sobre su composición, origen y ciclo de vida (SFC, 2022).

La adopción de pasaportes de materiales facilita la transición hacia una economía circular al proveer datos sobre la reutilización, reciclaje y disposición final de los componentes al final de su vida útil. Esta estrategia promueve el uso eficiente de los recursos y la reducción de la contaminación, alineándose con los criterios de durabilidad, desmontaje y reciclaje, aspectos fundamentales en la Taxonomía Verde de Colombia (Taxonomía Verde de Colombia, 2022). Por su parte, los gemelos digitales integran la información de los pasaportes para modelar escenarios y evaluar el impacto ambiental de decisiones en el diseño y la gestión de activos. Esto no solo respalda el monitoreo de inversiones sostenibles y la asignación de recursos alineados con objetivos ambientales, sino que también ayuda a mitigar el riesgo de *greenwashing* (SFC, 2022).

Así mismo, los pasaportes de materiales permiten evaluar integralmente el ciclo de vida de los productos de construcción, fomentando la toma de decisiones basada en datos y la adopción de materiales más sostenibles. Esto impulsa la demanda de soluciones ecológicas, lo que fortalece la transición hacia una economía baja en carbono y más resiliente (SFC, 2022).

La National Circularity Assessment Framework for Buildings (UNOPS, UNEP & UN-Habitat, 2024), propone un enfoque integral para mejorar la trazabilidad y gestión de los materiales de construcción a través de indicadores cuantitativos y cualitativos. Entre los indicadores cuantitativos se destacan el consumo de materiales secundarios, la tasa de reutilización y reciclaje de RCD, y la proporción de materiales nacionales e importados. Estos datos son cruciales para medir la eficiencia en la gestión y la reducción del impacto ambiental. En cuanto a los indicadores cualitativos, el marco subraya la importancia de herramientas digitales como los pasaportes de materiales para facilitar la trazabilidad y fomentar un entorno construido más sostenible (UNOPS, UNEP & UN-Habitat, 2024).

Las edificaciones diseñadas bajo criterios de sostenibilidad, como es el caso del Colegio Rochester, pueden mejorar aún más su desempeño al utilizar herramientas como los gemelos digitales que integran pasaportes de materiales. Estos pasaportes pueden

fortalecer y validar los argumentos de certificaciones como LEED, al demostrar que los proyectos contribuyen a la reducción de impactos proyectada hacia el final de su vida útil.

Si bien la sostenibilidad debe ser un objetivo desde la fase de planeación, este estudio se enfoca en desarrollar una metodología de inventario y análisis de materiales en una edificación existente, tomando como caso de estudio el Colegio Rochester y centrándose en sus envolventes. La evaluación de estos sistemas constructivos permite identificar estrategias de reutilización y reciclaje aplicables a otros elementos. La implementación de un sistema de gestión de materiales basado en un pasaporte digital, que integre información del Análisis de Ciclo de Vida (LCA), proporcionará una visión integral de las características y usos potenciales de cada material, facilitando la toma de decisiones informadas y la optimización de los procesos.

En este contexto, la transformación digital se presenta como un pilar clave para la Cuarta Revolución Industrial. La digitalización convierte datos y procesos análogos en formatos procesables por máquinas, optimizando recursos y promoviendo la eficiencia (DNP & MINCIT, 2019). La convergencia de gemelos digitales y pasaportes de materiales dentro de este marco revoluciona la gestión de recursos en la industria de la construcción, al permitir monitorear el desempeño de los materiales en tiempo real y facilitar su reutilización y reincorporación en nuevos ciclos productivos. Esta sinergia no solo contribuye a la reducción de desperdicios, sino que también impulsa el diseño circular y fomenta prácticas sostenibles en el sector (SFC, 2022). En Colombia, esta transformación se alinea con políticas públicas y estrategias de innovación orientadas a la reducción de impactos ambientales y el fortalecimiento de la industria.

La integración del Pasaporte de Materiales en un modelo BIM, fundamentado en un LCA, permitirá registrar y consultar de forma centralizada la información clave de los materiales (origen, composición e impactos). Esto no solo mejora la trazabilidad y el mantenimiento, sino que también facilita la toma de decisiones conscientes durante todo el ciclo de vida del edificio, apoyando la transición hacia una economía circular en la construcción.

Contexto del Proyecto

El presente estudio se enmarca en un contexto global y nacional en constante evolución, donde las políticas, la economía, los factores sociales y la tecnología convergen para impulsar una transformación radical en el sector de la construcción. A continuación, se presenta un análisis sintético de estos factores, así como del contexto ambiental y legal relevante para el caso de estudio.

Contexto Político

La integración obligatoria de BIM en países en desarrollo, como Chile, refleja un compromiso creciente con la modernización y la sostenibilidad del sector (Berges-Alvarez, 2022). A nivel nacional, Colombia cuenta con la Estrategia Nacional BIM 2020-2026 (DNP, 2020), aunque persisten desafíos como la falta de estándares y la ausencia de líneas de base de emisiones de carbono (Berges-Alvarez, 2022). Se promueve la estandarización de nomenclaturas entre regulaciones, estándares BIM y bases de datos nacionales para facilitar su uso (Berges-Alvarez, 2022). La industria enfrenta desafíos ambientales de larga data, lo que subraya la necesidad de medidas gubernamentales enfocadas en la reducción de residuos y el reciclaje (Berges-Alvarez, 2022). A nivel internacional, existen estándares como la norma ISO 19650-1:2018 (ISO, 2018) para la gestión de información con BIM, y el CEN/TC 350 europeo, que trabaja en la sostenibilidad de las obras de construcción (Berges-Alvarez, 2022).

Contexto Económico

La construcción es un sector de alto impacto económico y ambiental, responsable del 40% de la energía global y del 38% de las emisiones de CO₂ (Berges-Alvarez, 2022). La implementación de BIM es fundamental para optimizar la eficiencia de los recursos, minimizar los residuos y reducir los costos del ciclo de vida (Berges-Alvarez, 2022); (Soust-Verdaguer J. G., 2024); (Parece, Resende, & Rato, 2024). BIM busca aumentar la eficiencia de las inversiones en los sectores público y privado (Giménez, 2025), facilitando la determinación de los impactos económicos, la huella de carbono y el consumo de energía

(Berges-Alvarez, 2022). No obstante, en países en desarrollo, la falta de estudios locales de ACV y de bases de datos ambientales representa una dificultad significativa (Berges-Alvarez, 2022).

Contexto Social

BIM contribuye a las tres dimensiones de la sostenibilidad: ambiental, económica y social (Soust-Verdaguer J. G., 2024); (Parece, Resende, & Rato, 2024). Sin embargo, la falta de estudios locales de ACV y las deficiencias educativas en BIM y ACV son desafíos en países en desarrollo, lo que resalta la necesidad de que las herramientas de aprendizaje sean accesibles para todos los profesionales del sector (Berges-Alvarez, 2022). La Evaluación de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida (LCSA) ha evolucionado para incorporar modelos de impacto social (S-LCA) (Soust-Verdaguer J. G., 2024).

Contexto Tecnológico

BIM se define como un conjunto de metodologías, tecnologías y estándares para la gestión colaborativa de edificios en un espacio virtual (Berges-Alvarez, 2022); (Soust-Verdaguer J. G., 2024). Permite la representación digital de objetos paramétricos con información detallada, mejorando la toma de decisiones desde las fases iniciales del proyecto (Berges-Alvarez, 2022); (Soust-Verdaguer J. G., 2024).

La integración de BIM con los DT facilita la Evaluación de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida (LCSA) (Boje, y otros, 2023). Los MP se están desarrollando como una tecnología digital clave para la circularidad en el entorno construido (Markou I. y., 2025), y se pueden combinar con códigos QR para un fácil acceso a los datos (Markou I. y., 2025). La integración de BIM con sensores de IoT y blockchain se explora para el monitoreo y la gestión de edificios existentes ((Wilson, 2023); (Van Capelleveen, 2023)

Contexto Ambiental y Legal

La construcción es un contribuyente significativo al impacto ambiental, siendo responsable del 40% de las emisiones globales de (World Green Building Council, 2023) y del 40% de los residuos de construcción y demolición (Berges-Alvarez, 2022). BIM

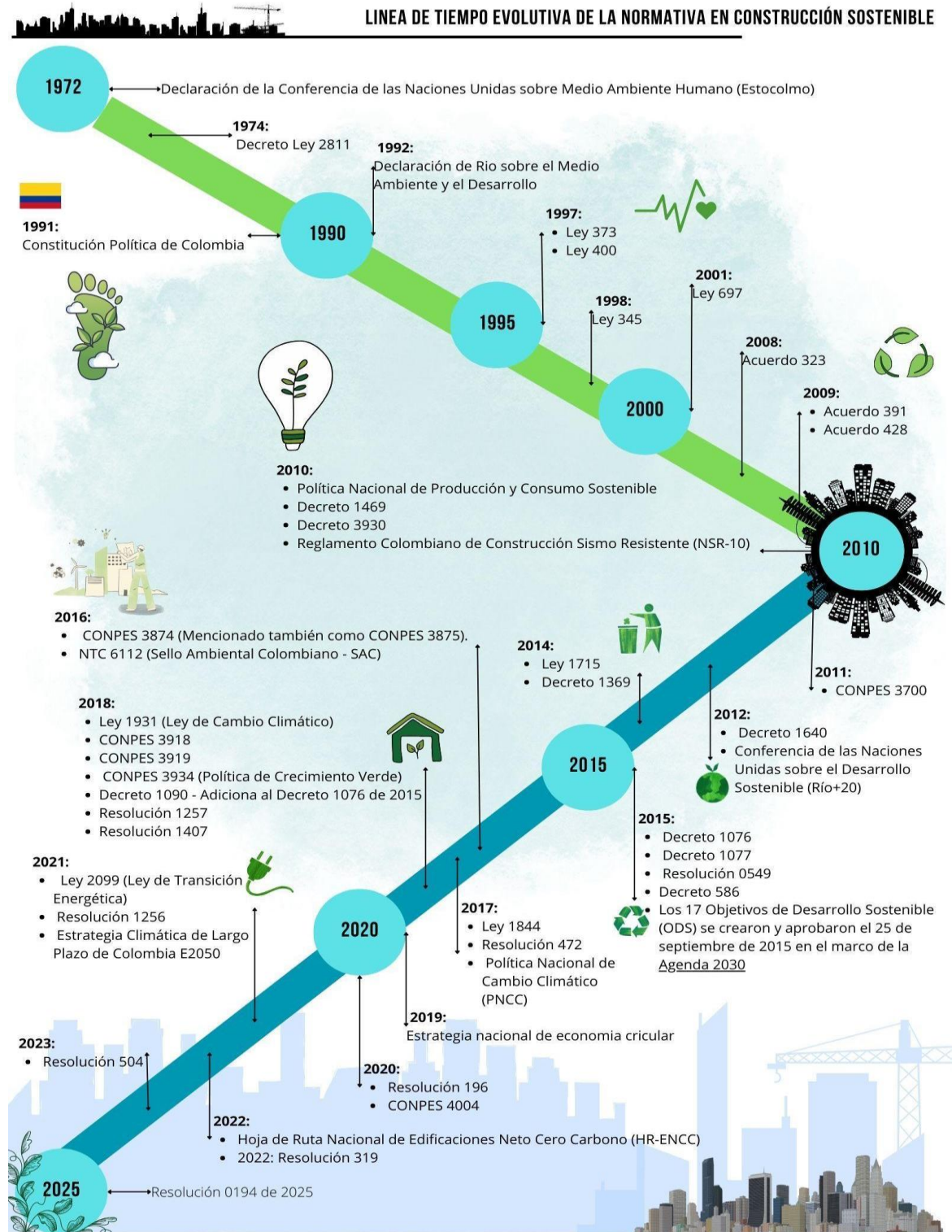
contribuye a la sostenibilidad ambiental mediante la evaluación de la energía incorporada y las emisiones, facilitando la planificación de residuos y promoviendo la reutilización y el reciclaje de materiales (Berges-Alvarez, 2022).

El marco normativo de la construcción sostenible ha evolucionado a partir de la conciencia sobre el impacto ambiental. A nivel global, los sistemas de certificación de edificios verdes, como LEED, han sido mejorados para incorporar estándares más específicos (Ungureanu, 2024). La armonización de políticas, la creación de herramientas digitales como los pasaportes de materiales (Markou, Sinnott, & Thomas, 2025) y el desarrollo de indicadores robustos son objetivos clave para el futuro (Parece, Resende, & Rato, 2024). Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU enfatizan la incorporación de principios de sostenibilidad en todo el ciclo de vida del edificio (Naciones Unidas, s.f.).

El marco normativo de la construcción sostenible en Colombia ha evolucionado significativamente a lo largo de las décadas como se puede ver en la Ilustración 4 Línea de Tiempo Evolutiva de la Normativa en Construcción Sostenible, que refleja un creciente compromiso con la agenda ambiental global. Entre 1972 y 2010, se sentaron las bases a partir de iniciativas globales como la Declaración de las Naciones Unidas en 1972 (Naciones Unidas, 1972) y la Declaración de Río en 1992 (Naciones Unidas, 1992), articulando un acerbo normativo que incluyó la Constitución Política de 1991 (Asamblea Nacional Constituyente, 1991). El año 2010 marcó un punto de inflexión, ya que, a partir de entonces, el marco normativo se volvió más específico para el sector de la construcción, impulsado por políticas como el CONPES 3874 (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2016) para la gestión de residuos sólidos, y la adhesión a la Agenda 2030 y sus Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en 2015 (Naciones Unidas, s.f.). La normativa más reciente, posterior a 2020, se ha vuelto más específica y vinculante, destacando la Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Neto Cero Carbono (HR-ENCC) de 2022 (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio., 2022) y la Resolución 0194 de 2025 (Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, 2025), que fortalecen la descarbonización y la Economía

Circular del sector. Esta trayectoria evidencia un cambio progresivo de un enfoque ambiental general a uno más especializado y estratégico, que integra la gestión de residuos, el cambio climático y la eficiencia en la cadena de valor de la construcción.

Ilustración 4 Línea de Tiempo Evolutiva de la Normativa en Construcción Sostenible



Fuente: propia

La evolución del BIM y el ACV ha cobrado un impulso significativo en los últimos años, con una notable tendencia hacia la integración de estas metodologías para mejorar la sostenibilidad en el sector de la construcción (Aragón, 2024). En Colombia, esta evolución se apoya en iniciativas nacionales lanzadas a partir de 2020, como la Estrategia Nacional BIM, que busca modernizar el sector de la construcción e infraestructura (DNP, 2020). Organizaciones como el BIM Forum Colombia han impulsado programas de capacitación para la adopción de BIM, y los proyectos del sector público ya cuentan con requisitos obligatorios, lo que demuestra un claro avance hacia una gestión digitalizada (CCCS, 2022).

Paralelamente, el país ha mostrado un creciente interés en el ACV como una acción transformadora para la consecución de edificaciones neto cero carbono (CCCS, 2022). El estudio del estado de la construcción sostenible de 2024 (CCCS, 2024) reveló que el porcentaje de fabricantes que utilizan ACV para más del 50% de sus productos aumentó al 39%, y el desconocimiento del término se redujo al 13%, lo que muestra un avance significativo desde 2021 (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, 2024). La Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Neto Cero Carbono (HRNENCC), lanzada en 2022, es la guía principal para la descarbonización del sector, estableciendo metas específicas para la reducción del carbono embebido y operacional para 2030 y 2050 (CCCS, 2022). Esta hoja de ruta subraya la importancia del uso generalizado de las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) (CCCS, 2022) (CCCS, 2022)

La integración de BIM y ACV es crucial para la toma de decisiones informadas en la construcción sostenible (CCCS, 2022); (CCCS, 2022). Aunque la tecnología para esta integración ya existe en Colombia, aún se requiere consolidar la información y posicionar BIM como una herramienta integral (CCCS, 2022). La Estrategia Nacional BIM está desarrollando estándares que incorporan aspectos de sostenibilidad en los componentes BIM, y documentos como la "Hoja de Ruta de Sostenibilidad para Materiales de Construcción" (CCCS, 2025) incluyen el ACV como un criterio central (CCCS & CAMACOL, 2021). Esto fomenta la creación de bases de datos nacionales de materiales con ACV y DAP para facilitar esta sinergia (CCCS, 2022). Se promueve que la academia apoye el

desarrollo de ACV y proyectos piloto para la integración BIM-ACV, lo que allana el camino para herramientas avanzadas como los pasaportes digitales de productos para una economía circular (CCCS, 2022). Este enfoque combinado es fundamental para la descarbonización efectiva del sector.

En la Ilustración 5 Infografía evolución de la Adopción de BIM en infraestructura, se muestra una línea de tiempo que ilustra el crecimiento constante y las proyecciones futuras de la adopción de la metodología BIM en el sector de la infraestructura presentado en la premiación BIM Women Awards, 2025 desarrollada por Naska digital, un encuentro donde se destaca la influencia y la importancia de la mujer en el crecimiento de la implementación BIM.

Ilustración 5 Infografía evolución de la Adopción de BIM en infraestructura



Fuente: Conferencia BIM Women Awards, 2025.

El camino comenzó en 2012, cuando el 30% de las empresas en Estados Unidos ya utilizaban BIM en más de la mitad de sus proyectos. Para 2017, esta tasa creció al 52% en economías clave de Estados Unidos y Europa, con una proyección de alcanzar el 61% para 2019. La línea de tiempo destaca un cambio estratégico en 2022, donde el enfoque se desplazó de la simple adopción a la madurez y calidad de la implementación de BIM. Mirando hacia el futuro, la gráfica proyecta que la adopción podría llegar al 75% en 2030, impulsada por la integración de inteligencia artificial y gemelos digitales para automatizar

procesos y mejorar la eficiencia. La visión a largo plazo para 2050 prevé una adopción casi universal del 95% a nivel global, donde la inteligencia artificial y los datos en tiempo real serán claves para optimizar el ciclo de vida completo de los proyectos.

Síntesis evolutiva LEED como sistema

El sistema de certificación LEED se ha consolidado como un programa de reconocimiento voluntario para las prácticas de construcción sostenible a nivel global (CCCS, 2022). Se le considera un sistema integral de sostenibilidad con un enfoque en la eficiencia de los recursos, la salud y el bienestar de los usuarios, cubriendo diversas aristas del diseño y la construcción (CCCS, 2021).

Actualmente, el sistema está en su versión 5 (LEED v5), mientras que las versiones 4 y 4.1 siguen siendo aplicables para proyectos (CCCS, 2021). Para las nuevas edificaciones, LEED evalúa a través de categorías que incluyen prerequisites y créditos, abarcando desde el proceso integrativo de diseño hasta la eficiencia en el uso de agua y energía, la gestión de materiales y la calidad del ambiente interior (CCCS, 2021). Por ejemplo, los proyectos que cumplen con estándares como ASHRAE 90.1 logran iluminación eficiente, lo que se traduce en una reducción de la densidad de potencia de iluminación y en ahorros energéticos significativos (CCCS, 2024).

LEED es una de las principales certificaciones vinculadas a la gestión sostenible del agua (CCCS, 2021) y contribuye a la eficiencia y al bienestar de los usuarios. La relevancia de estos sistemas se ve reforzada por instrumentos de política pública como los documentos CONPES en Colombia, que movilizan la construcción sostenible en el ámbito público (CCCS, 2021)

La integración de BIM con LEED es un aspecto crucial para la sostenibilidad, ya que facilita un enfoque colaborativo entre diseñadores, ingenieros, contratistas y administradores de instalaciones, lo que a su vez optimiza las decisiones de construcción y el ciclo de vida de los edificios (Parece, Resende, & Rato, 2024). Las capacidades de visualización y simulación energética de BIM apoyan la selección de materiales y sistemas

que cumplen con los requisitos de LEED, simplificando la documentación y el seguimiento para la conformidad con los prerrequisitos y créditos (Cascone, 2023).

Se han desarrollado metodologías automatizadas que combinan BIM y LEED para evaluar el rendimiento sostenible desde las etapas iniciales del proyecto (Cascone, 2023). Para la evaluación del ciclo de vida (LCA) que cumple con los esquemas de certificación de edificios verdes como LEED, a menudo se requiere un nivel de desarrollo (LOD) más alto en los modelos BIM (Parece, Resende, & Rato, 2024). La integración de BIM y LCA es fundamental para evaluar los impactos ambientales y la eficiencia energética a lo largo del tiempo (Mora, 2020); (Obrecht, 2020). Herramientas como el complemento Tally Autodesk Revit® (Building Transparency, 2021) y la aplicación web One-Click LCA (OneClick LCA, s.f.) permiten realizar análisis de LCA dentro del entorno BIM, conectando los objetos BIM con los datos de LCA (Bueno, 2018). Esta integración es una necesidad creciente en el sector AEC y apoya la toma de decisiones en las primeras etapas del diseño, incluso para proyectos de renovación ((Parece, Resende, & Rato, 2024); (Dauletbek, 2022); (Soust-Verdaguer B. G.).

Descripción del activo construido caso de estudio: Colegio Rochester un Campus Sostenible

Ilustración 6 Fachadas Colegio Rochester



Fuente: propia

El Colegio Rochester se erige como un referente de sostenibilidad en el sector educativo, al haber sido concebido desde sus inicios con la visión de obtener la certificación LEED. Su infraestructura física refleja un diseño biofílico, saludable y resiliente que

promueve un ciclo de vida sostenible y optimiza el desempeño de sus ocupantes. Este enfoque trasciende lo constructivo, ya que cada espacio y componente del campus fue integrado con una filosofía de diseño consciente, donde se busca la coherencia entre el “qué” y el “porqué” de cada elemento. La institución se convierte así en un modelo viviente que no solo demuestra la viabilidad de la construcción sostenible, sino que también transmite a su comunidad la importancia de su entorno y el valor de las prácticas de gestión responsable.

Datos Clave del Proyecto

- **Ubicación:** Lote Olguita, Autopista Norte km 14, Chía, Cundinamarca, Colombia
- **Sistema de certificación:** LEED OM v4.1 Recertificación

Fecha de certificación: 19 de septiembre de 2022

Nivel de certificación: LEED Platinum

Área de construcción: 15.533 m²

Área del terreno: 28.500 m²

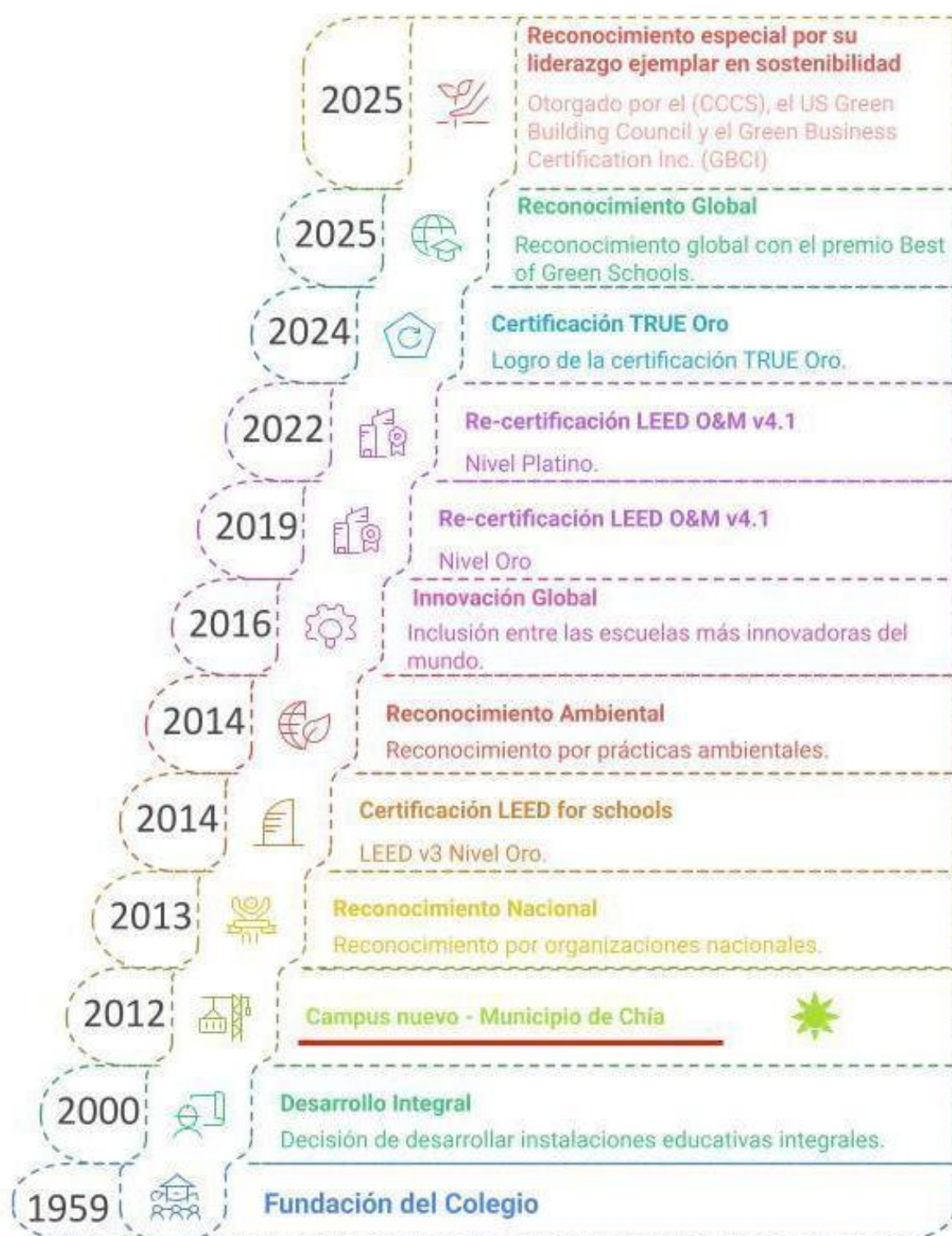
Ilustración 7 Localización Colegio Rochester



Fuente: Google Maps

La notable evolución del Colegio Rochester, desde su fundación en 1959 y el desarrollo de su campus en el municipio de Chía en 2012, hasta su consolidación como un referente global en sostenibilidad. En 2013, la institución obtuvo un reconocimiento nacional por sus prácticas, seguido de la certificación LEED for Schools v3 Nivel Oro en 2014, lo que marcó su compromiso formal con la sostenibilidad. La búsqueda de la excelencia ambiental continuó con una recertificación LEED O&M v4.1 a Nivel Oro en 2019, y un avance significativo a Nivel Platino en 2022. Además, el colegio ha sido reconocido por su innovación y ha logrado la certificación TRUE Oro en 2024. Su liderazgo ha sido premiado globalmente, destacando el premio Best of Green Schools y un reconocimiento especial en 2025, otorgado por organizaciones como el US Green Building Council (USGBC) y el Green Business Certification Inc. (GBCI, s.f.) tal como se indica y se amplía en la Ilustración 8 Colegio Rochester en el Tiempo, se tiene una mejor visión de la evolución y compromiso del Colegio Rochester con la sostenibilidad.

Ilustración 8 Colegio Rochester en el Tiempo



Fuente: propia

Según Liliana Medina Campos (Campos, 2025) en la comunicación personal el 8 de febrero de 2025; Asesora desde 2011 para las certificaciones LEED y actualmente Coordinadora de Certificaciones Ambientales del colegio, la iniciativa de sostenibilidad del

Colegio Rochester se originó alrededor de 2010 por la visión de Juan Pablo Aljure, presidente de la institución, inspirado por la certificación LEED en Estados Unidos. Aljure buscó adaptar estas estrategias en Colombia a través de una colaboración con la firma ManCo Ltda. El proyecto se centró en la creación de un campus sostenible a través de un diseño que optimiza el uso eficiente del agua, los materiales y los recursos, al tiempo que mejora la calidad ambiental interior y fomenta la innovación. Para lograr estos objetivos, el proyecto fue modelado con el software Design Builder, lo que permitió realizar ajustes arquitectónicos para maximizar la luz natural y minimizar el impacto ambiental. La iniciativa también incluyó la implementación de una planta de tratamiento de aguas residuales a estándares terciarios, para cumplir con las normativas ambientales. Como resultado de este esfuerzo integral, el colegio obtuvo el reconocimiento global como el más sostenible del mundo, galardonado con el premio Best of Green Schools 2025 en la categoría K-12. A continuación, se detallan los puntos clave de este proceso.

Fase de Diseño y Construcción del campus nuevo en el municipio de Chía y sus desafíos

La fase de diseño y construcción del Colegio Rochester se caracterizó por la adopción de un enfoque integrativo y holístico, que combinó criterios de sostenibilidad con la gestión de riesgos y la adaptación a un contexto nacional en desarrollo. El equipo de diseño del proyecto fue estructurado con profesionales que poseían conocimientos en certificación LEED, flexibilidad y un claro entendimiento del ciclo de vida y del diseño integrado. La contratación de servicios y personal para su fase de construcción también se basó en criterios de sostenibilidad, asegurando el cumplimiento de las normativas y metas establecidas.

Retos y Estrategias por Criterio.

El equipo enfrentó diversos desafíos que se abordaron con soluciones innovadoras y estratégicas para su momento:

- **Criterios Sociales:** La escasez de normativa local de sostenibilidad vigente en 2011 se superó mediante la adopción estratégica de estándares norteamericanos. A nivel social, un reto particular fue la remoción de especies no nativas, lo que generó un conflicto que requirió manejo. Para mitigar los riesgos de afectación al canal Torca (tributario del Río Bogotá) y a la vía férrea cercana, se implementó un modelo de tratamiento de escorrentías. Este modelo desvió las aguas lluvias de manera perimetral al predio, manteniendo la recarga del canal Torca, lo que, a su vez, evitó riesgos de inundación y contribuyó a prolongar la vida útil de la infraestructura del predio.
- **Criterios Económicos:** Se enfrentaron desafíos de negocio como el costo del predio y los tiempos reducidos de ejecución.
- **Criterios Ambientales:**

Ubicación y Diseño: Se realizó un análisis exhaustivo del predio para optimizar el diseño en función de la orientación, el clima y los vientos. Se llevaron a cabo estudios de salud del suelo (muestras analizadas en USA), para detectar posibles contaminantes, protegiendo a los futuros usuarios.

Gestión Hídrica: Ante la ausencia de una red municipal de desagües en 2011, se implementó una planta de tratamiento de aguas residuales con tratamiento terciario, permitiendo que el agua tratada se reutilizara para descargas sanitarias riego paisajístico y lavado de exteriores, lo que representó un importante análisis de costo-beneficio.

Eficiencia Energética y Calidad Ambiental Interior: Se evitaron los aires acondicionados y químicos perjudiciales para cumplir con los estándares de refrigerantes. El diseño garantiza una alta tasa de renovación de aire y un control de los niveles de CO₂. Se instalaron sensores de iluminación para evitar la sobrecarga lumínica y se implementó un acondicionamiento acústico para el bienestar de los usuarios. El diseño del proyecto debía cumplir con el rango de confort térmico de 18°C a 21°C establecido en la norma ASHRAE 62.1.

Gestión de Materiales y Residuos: Se seleccionaron materiales bajo criterios de durabilidad, bajo mantenimiento, mínima generación de residuos y larga vida útil. Se estableció un área específica permanente, para la segregación de residuos de al menos 26m² y fomentar una óptima gestión de residuos operativos que le facilitarían en 2024 ser el primer colegio a nivel mundial en lograr la certificación TRUE nivel Oro.

La principal dificultad durante la Fase de Construcción del proyecto radicó en la consecución de insumos que cumplieran con especificaciones de atributos de sostenibilidad verificables. Con base en el documento clave, “MANUAL DE USO Y MANTENIMIENTO NUEVA SEDE COLEGIO ROCHESTER” de la Constructora OIKOS, se evidenció que, para esa época, eran escasos los proveedores o fabricantes nacionales con capacidad para suministrar información documentada sobre los atributos de sostenibilidad de los materiales integrados a las envolventes. A pesar de esta limitación en la oferta local, se lograron integrar materiales con valor de circularidad, entre los que se destacaron:

Pinturas, Sellantes y Acabados: Se utilizaron pinturas y sellantes que cumplen con la normativa de baja emisión de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV). Esta práctica minimizó los riesgos para la salud de los ocupantes, al reducir la exposición a contaminantes del aire interior.

Acero: El proveedor DIACO suministró acero con un contenido reciclado posconsumo del 90%.

Cemento: CEMEX aportó cemento con un contenido reciclado posconsumo, gracias a la incorporación de un porcentaje de *fly-ash* (ceniza volante).

Pisos: En áreas clave como los *Hubs* y la Auditoría, **se instaló** piso de **linóleo** (Linóleo Vinílico Armstrong), un material durable y flexible fabricado a partir de aceite de lino solidificado, harina de madera o polvo de corcho.

Aunque los acabados interiores no formaron parte del alcance directo de la cuantificación de las envolventes, se destaca que el Colegio Rochester optó por una estrategia de algunos insumos importados para garantizar el desempeño especificado en el diseño. Esta decisión permitió validar atributos clave del proyecto, como el

acondicionamiento acústico y la calidad de los materiales de piso, como el linóleo, asegurando que los componentes cumplieran con los altos estándares de sostenibilidad y confort interior.

La estrategia de sostenibilidad del Colegio Rochester se **ha mantenido** en la fase operativa, desde el área de compras de los suministros del colegio en acuerdo con lo indicado y recomendado desde el “MANUAL DE USO Y MANTENIMIENTO NUEVA SEDE COLEGIO ROCHESTER” de la Constructora OIKOS. El colegio realizó una transformación en sus Socios Clave, optando por aquellos que garantizan altos estándares ambientales en sus productos. Como ejemplo, la papelería es suministrada por la Distribuidora de Papeles y proviene exclusivamente de bosques reforestados: Los suministros de limpieza se implementó una Política de Insumos de Aseo Sostenible, empleando productos que son biodegradables y que presentan baja o nula acción de irritabilidad para las personas.

Validación y Monitoreo del Desempeño.

El proyecto incorporó criterios de sostenibilidad que se validaron en la fase de operación y mantenimiento. Se implementaron criterios de sostenibilidad para la compra de nuevos materiales y para la operación diaria del colegio. La plataforma Arc Skoru del GBCI se utiliza para monitorear mensualmente los consumos y gastos, lo que permite evaluar oportunidades de mejora. El Colegio Rochester ha demostrado una eficiencia del 70% en el uso energético (LEED, 2025), superando su línea base inicial del 55.1%, lo que valida el éxito de las estrategias integrativas.

A pesar de que los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) fueron formalmente establecidos por las Naciones Unidas en 2015, el Colegio Rochester ha logrado una integración ejemplar y proactiva de sus principios a lo largo de su ciclo de vida institucional como se muestra en la ilustración 9. A través de un enfoque que abarca la totalidad de su campus, la institución ha articulado sus iniciativas con la agenda global de sostenibilidad, como se muestra en la Ilustración 9 Colegio Rochester y los ODS, donde se logra relacionar las diferentes iniciativas aunque se representa con los objetivos también se han pensado y desarrollado específicamente desde las metas que conforman los ODS.

Ilustración 9 Colegio Rochester y los ODS



Fuente: propia

La alineación del colegio con los ODS no solo demuestra su visión de largo plazo, sino que también lo consolida como un modelo que integra la sostenibilidad en su operación y en la educación de sus estudiantes.

Cabe destacarse que, en 2011, los fabricantes de insumos de construcción en Colombia, no estaban permeabilizados por las iniciativas actuales, como evaluar los impactos de sus procesos productivos, no se contaba con insumos nacionales que pudiesen demostrar una EPD o información como la métrica de carbono embebido, o los contenidos de Compuestos Orgánicos Volátiles. Sin embargo, se gestionó por parte del equipo de

proyecto, la búsqueda de materiales que pudieran demostrar al menos un mínimo de criterios de sostenibilidad, como lo refiere Liliana Medina.

Marco Teórico

El presente estudio se fundamenta en un marco teórico y conceptual que articula la sostenibilidad, la tecnología y la gestión del ciclo de vida. La integración de estos elementos es clave para abordar la problemática de la gestión de materiales en la construcción y para la transición hacia un modelo de Economía Circular.

Bases Teóricas

La Economía Circular es un paradigma fundamental que busca una transformación sistémica de los modelos de producción y consumo para conservar los recursos y mantener el valor de los materiales, componentes y productos el mayor tiempo posible (BID, 2023); (CCCS & CAMACOL, 2021). Este enfoque se basa en tres principios esenciales: la minimización de residuos desde el diseño, la prolongación del valor de los productos en uso y la regeneración de los sistemas naturales (BID, 2023); (CCCS, 2022); (SFC, 2022)

La teoría de la economía circular se basa en un conjunto de principios, a menudo resumidos en las "R" (Hasibuan, 2025). Estos principios se pueden categorizar en tres estrategias principales para gestionar el flujo de materiales:

1. **Ralentizar los ciclos de recursos (Slowing loops):** Se enfoca en extender el tiempo de utilización de un producto a través del diseño, incluyendo ciclos de "servicio" como el mantenimiento, la reparación, la prefabricación, el reacondicionamiento (o refurbish) y la reutilización. Un producto que ya existe es el más "verde" porque no requiere nuevos recursos naturales para su producción (Núñez Larios, 2021).

2. **Cerrar los ciclos de recursos (Closing loops):** Implica cerrar el ciclo entre los residuos y la producción de nuevos materiales, principalmente a través del reciclaje (Tanguturi, 2023). El reciclaje descompone los materiales de un residuo para formar nuevos materiales o componentes. El reciclaje puede ser primario (circuito cerrado, propiedades

comparables), secundario (infra-reciclaje o downcycling, propiedades inferiores) o terciario (químico).

3. Estrechar los ciclos de recursos (Narrowing loops): Consiste en la reducción del uso de materiales (Alazaiza, 2024), buscando utilizar la menor cantidad posible para crear un producto (ecoeficiencia). Esta es la mejor estrategia en la gestión de residuos por tener el menor impacto ambiental negativo.

La EC es crucial para el sector de la construcción por la alta generación de residuos que produce y se puedan recuperar de forma rápida y eficiente. Es importante que para el sector de construcción y los RCDs, se contemplen todas las fases del ciclo de vida de un proyecto edificatorio, desde el diseño hasta el final de la vida útil (Wahlström, 2020). Como concepto clave, se debe apropiar que los edificios son bancos de materiales que les facilitan la recuperación de componentes con una demolición selectiva para permitir la reutilización y el reciclaje (Hasibuan, 2025).

Considerando los actores de la cadena de valor de la construcción, aún existen barreras para la EC, como pueden ser falta de incentivos, regulación, incertidumbre en la demanda de materiales reciclados, pero también la falta de conciencia, el desconocimiento sobre la circularidad, así como temor ante la fiabilidad de materiales reciclados a ser integrados en una edificación (Sakthibala, 2025)

Para materializar estos principios en el sector de la construcción, se requiere la integración de tres conceptos clave: el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), los pasaportes de materiales (MP) y la metodología Building Information Modeling (BIM). Esta sinergia establece un marco sistemático y digital para la gestión de la información ambiental (CCCS, 2022).

El ACV es una metodología estandarizada (ISO 14040, ISO 14044) que cuantifica los impactos ambientales potenciales de un producto a lo largo de todas las etapas de su existencia, desde la adquisición de la materia prima hasta su disposición final (CCCS, 2021). Para las edificaciones, estas etapas se organizan en las fases de Producto, Construcción, Uso y Fin de Vida, siguiendo estándares como la norma EN 15978 (CCCS &

CAMACOL, 2021); (CCCS, 2022). El ACV proporciona métricas cruciales, como el Potencial de Calentamiento Global (GWP), para evaluar la huella ambiental.

El ACV es considerado un método muy aplicable para el análisis de residuos y reciclaje (Gherman, 2023), cuyo objetivo es cuantificar los impactos económicos, sociales y ambientales de un producto, servicio o actividad a lo largo de su ciclo de vida completo (Tighnavard Balasbaneh, Sher, Li, & Ashour, 2024).

El ACV valida la integración de RCDs proveyendo información de los impactos, así como información específica de las emisiones generadas en el proceso de fabricación del material que se convierte al final de la vida útil en RCD y que, al seguir una ruta circular, reducirá emisiones al material en el que se recicle (Gherman, 2023) (Tighnavard Balasbaneh, Sher, Li, & Ashour, 2024).

El ACV que integrado a herramientas como el Modelado de Información de Construcción (BIM), los Pasaportes de Materiales, se convierte en sus resultantes de valoración ambiental en aliado para la optimización de la gestión de RCDs que se generarán al final de la vida útil de una edificación. (Gherman, 2023)

Debe considerarse que el ACV con fines de un desarrollo de MP, requiere de información sobre los (Fin de Vida) y D (Beneficios y Cargas Más Allá del Sistema), aspecto que requiere un mejor desarrollo de las DAP, para una evaluación holística de un material (Holland Circular Hotspot, 2022)

Los pasaportes de materiales son documentos digitales que ofrecen información detallada sobre los componentes de un edificio (Madaster, 2020). Actúan como herramientas clave para almacenar y rastrear la información de sostenibilidad, documentando la composición, atributos y potencial de reincorporación (circularidad) de los materiales al finalizar su vida útil inicial (CCCS, 2022). Este enfoque es fundamental para la transición a una economía circular, ya que transforma los edificios en "bancos de materiales" y facilita el diseño para la deconstrucción (Honic, Kovacic, & Rechberger, 2019). La creación de un MP requiere información precisa sobre la composición y geometría del

edificio, que puede ser obtenida a través de escaneos láser e inspecciones (Akbarieh, Jayasinghe, Waldmann, & Norman, 2023).

El MP, como herramienta, promueve la eficiencia de los recursos minimizando en el sector de construcción los RCDs, proveyendo información validada a través de evaluación de impactos (ACV), así como las especificaciones de la composición de un material procedente de un edificio (Wahlström, 2020), pero especialmente la evaluación del impacto ambiental (como el carbono incorporado) y la desmontabilidad (detachability) del material (Wahlström, 2020) (Holland Circular Hotspot, 2022)

El MP, facilita la integración de estrategias circulares a lo largo del ciclo de vida de una edificación, pero especialmente para el fin de vida útil, cierra una brecha de información para la cadena de valor, permite una trazabilidad de materiales para la implementación de los principios de la economía circular y promueve escenarios de logística inversa y la recuperación (take-back) de los productos para ser reintegrados en un ciclo tecnológico de EC. (Wahlström, 2020).

Idealmente los MP se integran en un modelo BIM, facilitando la información necesaria para una deconstrucción selectiva de una edificación. Los MP al facilitar la información (comunicación), fortalece la interacción de los actores de la cadena de valor pudiendo ser requeridos y usados por fabricantes, propietarios/usuarios de una edificación, contratistas de demolición y proveedores de materiales. (Wahlström, 2020)

La metodología BIM actúa como el catalizador digital de esta integración. Al ser un proceso colaborativo, BIM crea, comparte y usa información estandarizada en un entorno digital a lo largo de todo el ciclo de vida de un proyecto (INABIM-BSSP, 2024; (CCCS, 2022). BIM facilita la centralización de datos detallados sobre materiales, lo cual es crucial para realizar cálculos de ACV precisos (CCCS, 2022) y para la implementación de los protocolos de los MP en las bibliotecas BIM.

Un modelo BIM como representación digital, es altamente valorada en la trazabilidad y ciclo de vida de una edificación, por su capacidad para almacenar y gestionar datos a lo largo del ciclo de vida de un activo (Wahlström, 2020), considerando las etapas de operación

y mantenimiento, así como fin de la vida útil, BIM al integrar información de los insumos utilizados en la operación, ayuda a los activos en la selección de materiales e insumos saludables, sostenibles y circulares (Swarnakar, 2024)

BIM como herramienta, proyectándose el fin de la vida útil de una edificación, facilita la integración de pasaporte de materiales y la información de un ACV, que, de forma integral, proveen un estimado de RCDs (Sharma, 2022), facilitando la planificación de las actividades de pre y post-deconstrucción, minimizando la generación de los residuos, así como los impactos ambientales asociados (Wahlström, 2020)

Un Gemelo Digital (DT), una representación virtual dinámica de un activo físico, extiende la utilidad de esta información más allá de la fase de diseño. A partir de un modelo BIM, un DT descriptivo se enfoca en proporcionar una representación precisa del activo (Deng et al., 2021). La integración del MP dentro del Gemelo Digital permite gestionar las envolventes de un edificio, como el Colegio Rochester, a lo largo de su ciclo de vida, complementando la información estática del MP con datos dinámicos de rendimiento y facilitando el mantenimiento predictivo (Honic, Kovacic, & Rechberger, 2019)

Marco Conceptual

Esta sección define y relaciona los conceptos clave que dan sustento a la investigación, proporcionando un marco científico para abordar la problemática de la gestión de materiales.

Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El ACV es una metodología estandarizada que evalúa los impactos ambientales asociados a todas las etapas del ciclo de vida de un producto. Su enfoque sistémico permite identificar posibles desplazamientos de carga ambiental entre las diferentes fases, evitando soluciones parciales que no reduzcan el impacto global del sistema analizado (ISO, 2006). En el contexto de la construcción, la integración del ACV con tecnologías digitales como BIM permite un análisis más preciso y dinámico, lo que facilita la toma de decisiones orientadas a minimizar los impactos ambientales (ISO, 2006).

Building Information Modeling (BIM)

BIM es una metodología colaborativa que gestiona la información de un proyecto a lo largo de todo su ciclo de vida a través de modelos digitales tridimensionales (ISO, 2018). Su capacidad para centralizar la información de materiales, componentes y sistemas lo convierte en una herramienta fundamental para la implementación de estrategias de Economía Circular y para la interoperabilidad con otros conceptos como los pasaportes de materiales y los gemelos digitales.

Economía Circular

La Economía Circular busca reducir el consumo de recursos vírgenes y la generación de residuos mediante estrategias de reutilización, reciclaje y optimización de materiales. En la construcción, esto implica disminuir la cantidad de residuos y fomentar la gestión eficiente de los materiales, promoviendo su reincorporación en nuevos proyectos (CAMACOL, 2023). Para alcanzar estos objetivos, es esencial implementar herramientas tecnológicas que permitan la trazabilidad de los materiales.

Gemelo Digital (DT)

Un Gemelo Digital es una réplica virtual de un activo físico que permite modelar y monitorear su desempeño en tiempo real (ISO, 2021). En la industria de la construcción, esta tecnología posibilita simular y optimizar la operación, mantenimiento y rehabilitación de un edificio a lo largo de su ciclo de vida. La combinación del DT con BIM y los MP permite no solo gestionar los materiales de forma eficiente, sino también prever su reutilización en futuros proyectos.

Pasaporte de Materiales (MP)

El Pasaporte de Materiales es un sistema de documentación que registra la composición, cantidad, ubicación y potencial de reciclaje de los materiales en una edificación. Su propósito es mejorar la trazabilidad y optimizar la reutilización de los materiales al final de la vida útil del edificio (Honic, Kovacic, & Rechberger, 2019). Cuando se gestiona mediante BIM, el MP se transforma en una herramienta integral que facilita la

creación de catastros de materias primas secundarias y fomenta la Economía Circular en el sector.

Envolventes del Edificio

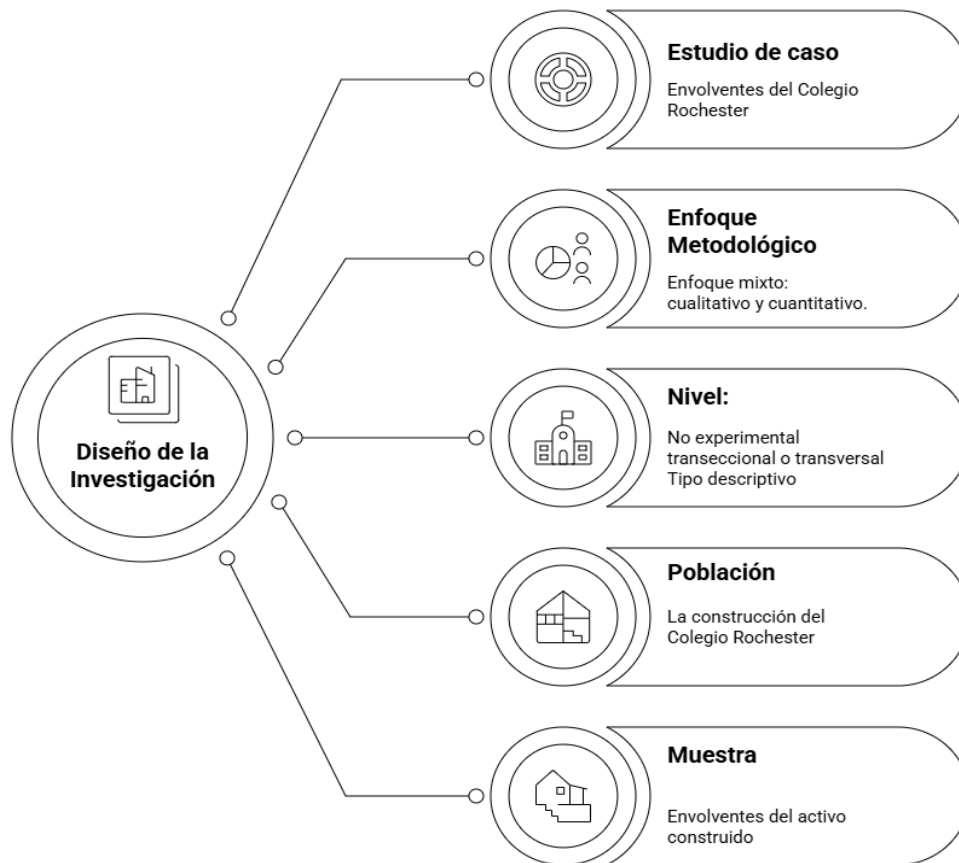
Las envolventes desempeñan un papel crucial en la eficiencia energética y la sostenibilidad de las construcciones (CCCS, 2022), ya que representan una parte significativa de los materiales y, por ende, una fuente importante de residuos. La implementación de estrategias de Economía Circular en las envolventes implica documentar sus componentes a través de pasaportes de materiales, gestionarlos con BIM y monitorearlos mediante gemelos digitales. Esto permite una mejor planificación para su reutilización o reciclaje, reduciendo la demanda de nuevas materias primas y la huella ambiental del sector.

Metodología

Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación es crucial para el éxito de cualquier estudio científico, ya que representa la estrategia concebida para obtener la información necesaria y responder a las preguntas del problema de investigación (Hernández-Sampieri, 2014). El diseño de la presente investigación se plasma en la ilustración 10.

Ilustración 10 Diseño de la investigación



Fuente: propia

La presente tesis de maestría adoptó un diseño de investigación de Estudio de Caso con Enfoque Mixto. Esta metodología fue ideal para abordar la naturaleza compleja del problema, que involucró tanto aspectos técnicos y cuantificables como elementos subjetivos. El enfoque mixto no buscó sustituir un método por otro, sino fusionar las fortalezas de las aproximaciones cuantitativa y cualitativa para obtener una visión más completa y profunda del fenómeno (Hernández-Sampieri, 2014).

La investigación se clasificó como no experimental, ya que las variables no fueron manipuladas deliberadamente, permitiendo observar el fenómeno tal como ocurrió en su contexto natural. Se utilizó un diseño transeccional (o transversal), recopilando datos en un único momento. Se empleó un diseño anidado o incrustado concurrente de modelo dominante (DIAC) con énfasis cuantitativo (CUAN/cual), donde los datos sobre los materiales y la metodología BIM fueron el eje central, mientras que la evidencia cualitativa,

obtenida a través de la exploración de experiencias y percepciones, enriqueció la interpretación.

El Colegio Rochester se configuró como la "unidad holística" de análisis. La elección de este diseño fue estratégica, ya que su flexibilidad permitió el uso de múltiples herramientas para una comprensión detallada del proyecto. La importancia de este diseño radicó en la oportunidad de analizar una unidad de difícil acceso, siendo lo "revelador del caso" su valor fundamental (Hernández-Sampieri, 2014). Este enfoque se centró en la descripción profunda del colegio y su contexto de manera sistémica, lo que garantizó un análisis riguroso de las causas y los efectos del fenómeno estudiado. A continuación, se presentan algunas técnicas de recolección de datos que se implementaron en esta investigación según lo que nos presenta Hernández-Sampieri en su libro metodología de la investigación; Se combinaron dos fases principales de análisis para obtener una perspectiva completa del activo construido.

- **Entrevistas semiestructuradas:** Se realizaron entrevistas semiestructuradas, así como la presentación del proyecto de tesis con personal clave del colegio, incluyendo al Director de Infraestructura, al Director de Sostenibilidad y la Coordinadora de Certificaciones Ambientales, quien ha liderado desde 2011 la certificación LEED del colegio. Estas entrevistas combinaron preguntas abiertas y cerradas para capturar datos cuantitativos y, al mismo tiempo, obtener una comprensión profunda de las percepciones, experiencias y desafíos relacionados con el activo construido, sus envolventes y materiales.
- **Observación:** A través de múltiples visitas de campo al colegio, se llevó a cabo una observación directa y detallada. Esta técnica permitió documentar las características del activo construido y las dinámicas de su operación, enriqueciendo la comprensión del caso de estudio, las envolventes del colegio Rochester por medio del levantamiento fotográfico, nube de puntos y videos.
- **Análisis de contenido mixto:** Se realizó un análisis exhaustivo de los documentos proporcionados por el colegio. Esta técnica combinó el análisis de datos

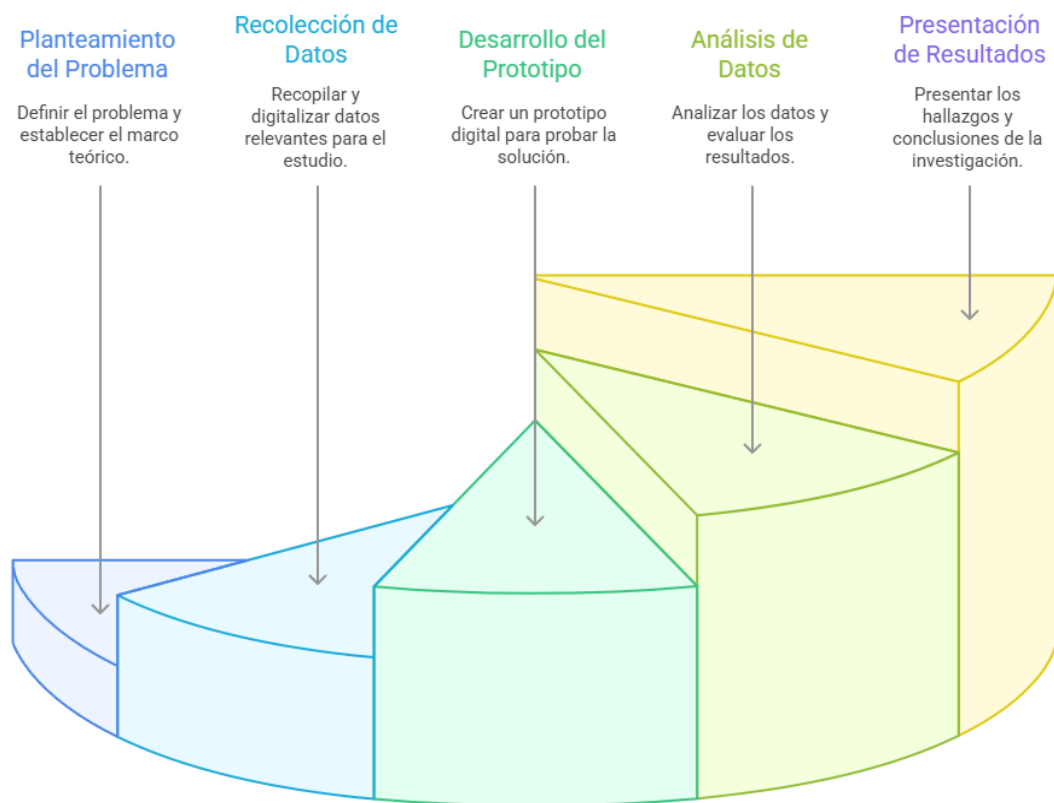
cuantitativos (como la frecuencia de ciertos términos en la documentación del proyecto) con el análisis cualitativo (la interpretación de estrategias y significados).

- **Datos secundarios:** Se recopiló información secundaria relevante a través de una revisión bibliográfica de fuentes confiables. Adicionalmente, se analizaron los datos técnicos y registros de operación suministrados directamente por el colegio, los cuales sirvieron para validar y complementar la información obtenida a través de las otras técnicas.

La integración de estas técnicas permitió una recolección de datos robusta, proporcionando una visión integral del caso de estudio y fortaleciendo la validez y el rigor de los resultados obtenidos.

Fases de la Investigación

Ilustración 10 Fases de la investigación



Fuente: propia

La presente investigación se desarrolló en un enfoque de cinco fases, articuladas para dar cumplimiento a los objetivos específicos y, en última instancia, al objetivo general

del estudio. Cada fase contribuyó de manera progresiva a la creación del MP para las envolventes del Colegio Rochester y a la evaluación de su potencial para la Economía Circular.

Fase 1: Planteamiento del Problema y Marco Teórico

Esta fase tuvo como objetivo definir el problema de investigación y establecer la base teórica que guio el estudio.

- Se formuló la pregunta de investigación, así como los objetivos generales y específicos de la tesis, alineándose con el caso de estudio y el enfoque mixto (Hernández-Sampieri, 2014).
- Se justificó la relevancia del estudio, destacando la necesidad de digitalizar activos construidos.
- Se realizó una revisión analítica de la literatura sobre BIM, pasaportes de materiales y sostenibilidad, lo que permitió identificar investigaciones previas relevantes.
- Se construyó el marco teórico, exponiendo y analizando las teorías y conceptos que sustentaron la investigación.

Fase 2: Recolección y Digitalización de Datos

En esta fase se recopiló la información necesaria para el desarrollo del Pasaporte de Materiales. Se implementó un enfoque mixto que incluyó:

- Se recopilaron datos cuantitativos de las envolventes del colegio, como planos y especificaciones técnicas.
- Se realizó un levantamiento exhaustivo mediante escáner láser para generar una nube de puntos que permitió un modelo 3D preciso. Este modelo funcionó exitosamente como la base para la extracción de las cantidades de materiales y sus propiedades.
- Se obtuvieron datos de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) a partir de Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) y otras bases de datos, utilizando el software One Click LCA para su análisis.

- Se recopiló información cualitativa a través de entrevistas con personal clave, observación directa durante las visitas de campo y análisis de documentos internos, lo que permitió entender el contexto de la gestión de activos del colegio.

Fase 3 Desarrollo del Prototipo Digital

El objetivo de esta fase fue construir las herramientas digitales que **permitieron** la gestión de la información del caso de estudio.

- Se construyó un modelo BIM de las envolventes, sirviendo como guía para el desarrollo de un prototipo de Gemelo Digital (DT) descriptivo.
- Se desarrolló el Pasaporte de Materiales digital, integrando los datos cuantitativos y cualitativos recopilados, lo que facilitó la trazabilidad y gestión de los materiales de las envolventes.

Fase 4: Análisis de Datos y Evaluación de Resultados

En esta fase se procesaron e interpretaron los datos de manera integrada para generar conocimiento.

- Se realizó un análisis cuantitativo, que incluyó la organización de los datos de materiales. Se evaluó el impacto ambiental de los materiales a través del ACV.
- Se llevó a cabo un análisis cualitativo, donde se codificaron y analizaron las entrevistas y observaciones para identificar temas y percepciones sobre la gestión de activos.
- Se realizó una triangulación de datos, comparando los hallazgos de ambos enfoques para construir una comprensión holística del fenómeno y validar la hipótesis.
- Se evaluaron las estrategias de reincorporación de los materiales, analizando su viabilidad para fomentar la circularidad, a partir de la información consolidada en el Pasaporte de Materiales

Fase 5: Presentación de Resultados y Conclusiones

El objetivo final de esta fase fue comunicar los hallazgos de la investigación de manera clara y argumentada. Los resultados y análisis se presentan detalladamente en la sección de Recolección de Datos, Análisis e Interpretación de este documento.

Como parte de los anexos del trabajo, se incluyó el prototipo del gemelo digital en Revit y el documento del pasaporte de materiales. Esta información en su conjunto fue entregada al Colegio Rochester para su uso como una herramienta de gestión y planificación de la sostenibilidad.

Finalmente, se elaboró el presente informe de tesis, en el cual se discutieron los hallazgos a la luz del marco teórico, se respondieron las preguntas de investigación y se validó la hipótesis. Se formularon conclusiones significativas respecto a los objetivos planteados.

Procedimientos de Análisis

El análisis de los datos se realizó mediante un enfoque de métodos mixtos que permitió una comprensión integral del caso de estudio. En la fase cuantitativa, los datos de los materiales de las envolventes fueron organizados directamente en el Pasaporte de Materiales, que sirvió como la matriz digital principal del estudio. A partir de esta matriz, se realizó un análisis estadístico descriptivo para caracterizar las cantidades y atributos de sostenibilidad de los materiales. La extracción de estas cantidades fue posible al establecer los materiales en el modelo de Revit, mientras que, para la cuantificación del impacto ambiental, como la huella de carbono incorporada, se utilizó el software especializado en ACV (One Click LCA), siguiendo metodologías estándar (CCCS, 2022)

Por su parte, la fase cualitativa se centró en la obtención de descripciones detalladas de las envolventes. Estas narrativas fueron el resultado de entrevistas semiestructuradas con personal clave del colegio y de las notas de las visitas de campo. Posteriormente, estas observaciones y narrativas fueron sometidas a un proceso de codificación para identificar y categorizar los temas relevantes. La integración de ambos tipos de análisis permitió una

comprensión holística del fenómeno, uniendo los datos numéricos con el contexto de su implementación.

Recolección de Datos, Análisis e Interpretación

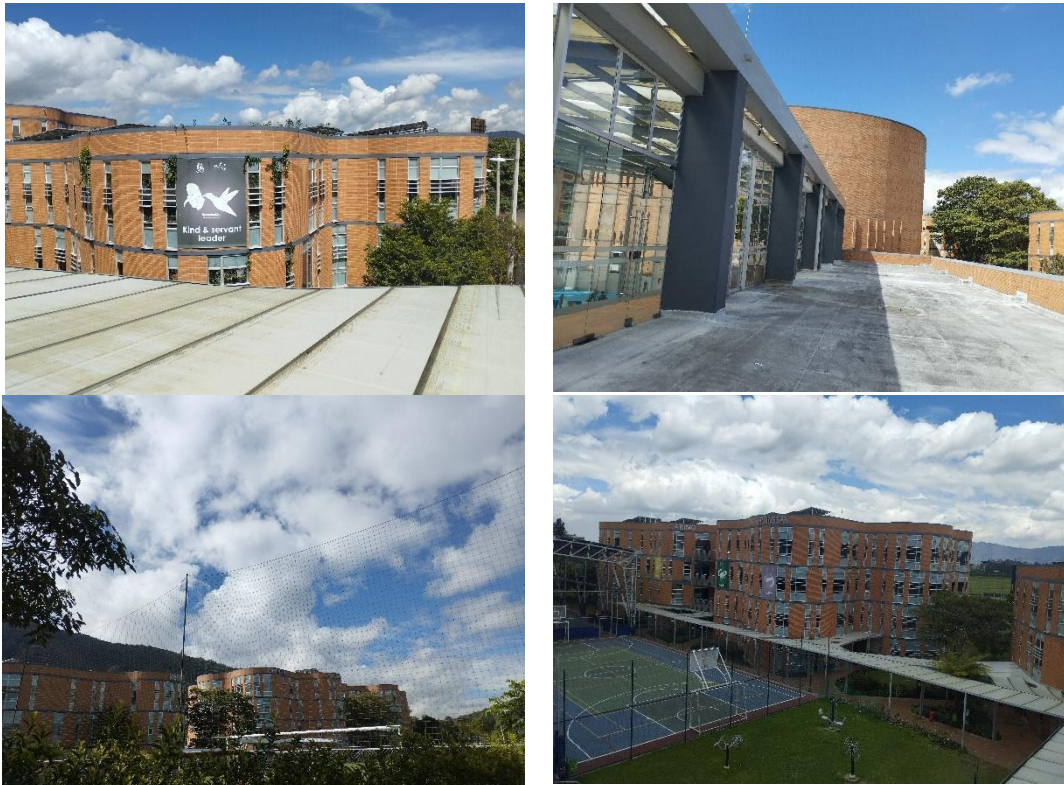
La integración de las metodologías BIM y ACV ha sido objeto de estudio en la literatura reciente, con diversos proyectos que han explorado su potencial para mejorar el rendimiento ambiental de los activos construidos. Mientras algunos estudios han confirmado resultados positivos en la reducción de la huella de carbono y la optimización de recursos, otros han destacado desafíos en la recopilación de datos y la interoperabilidad (Boje, y otros, 2023); (CCCS, 2022).

La presente investigación se sumó a este cuerpo de conocimiento, abordando su objetivo general de desarrollar un Pasaporte de Materiales para las envolventes del Colegio Rochester y contribuir a la economía circular. Para ello, se desarrolló un modelo digital del activo que sirvió como la base para el análisis, la recolección y la interpretación de los datos.

Recolección de datos y resultados

Este capítulo presenta los resultados obtenidos del caso de estudio del Colegio Rochester, siguiendo la secuencia metodológica propuesta. La investigación inició con la idea de trabajar con el colegio como caso de estudio ideal, debido a su compromiso con la sostenibilidad y su disposición a contribuir al conocimiento lo cual se evidenció desde la primera visita al colegio Rochester, como recorrido guiado para conocer sus instalaciones y funcionamiento integral con la sostenibilidad.

Ilustración 11 Visita Técnica al Colegio Rochester



Fuente: Elaboración propia visuales colegio Rochester, visita técnica con el grupo de la Cohorte II de la Maestría en Construcción Sostenible, 11 de mayo 2024

Esta aproximación llevó a una propuesta inicial, que se basó en el hecho de que, para el año de su diseño (2011) y construcción, (2011-2012), no se empleó la metodología BIM ni se contó con las DAPs de los materiales, debido a la escasa apropiación de estas estrategias, así como a la falta de normativa en construcción sostenible y normativa o estándares BIM para la época y aun así, se ha convertido en un ejemplo de que la construcción a partir de criterios de sostenibilidad es posible, de que se puede mantener en el tiempo y mejorar su desempeño.

Así, la *Fase 1: Planteamiento del Problema y Marco Teórico*, se centró en la definición de la problemática central y el desarrollo de la base teórica necesaria para el estudio con soporte de bibliografía relevante. Esto culminó en una propuesta al colegio para el desarrollo de un Pasaporte de Materiales (MP) y un piloto de Gemelo Digital (DT) de las envolventes del Colegio Rochester, con el fin de subsanar la falta de información de sus

activos. La propuesta buscó no solo aprovechar la información en caso de remodelaciones o demoliciones futuras y fomentar la economía circular, sino también servir de apoyo a los datos de sostenibilidad presentados para las certificaciones del colegio como LEED o TRUE.

Para obtener la información requerida sobre el equipo de escaneo, se realizaron visitas al Laboratorio LaTi 4.0 de la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. Con el apoyo de la profesional Leidy García, se recibió la capacitación necesaria para el uso del escáner Leica, lo cual fue fundamental para el préstamo del equipo. Gracias a esta colaboración, se pudo llevar a cabo el levantamiento de las condiciones existentes del activo construido (ver Ilustración 12 Funcionamiento del escáner), lo que permitió cumplir con el objetivo de digitalizar la edificación.

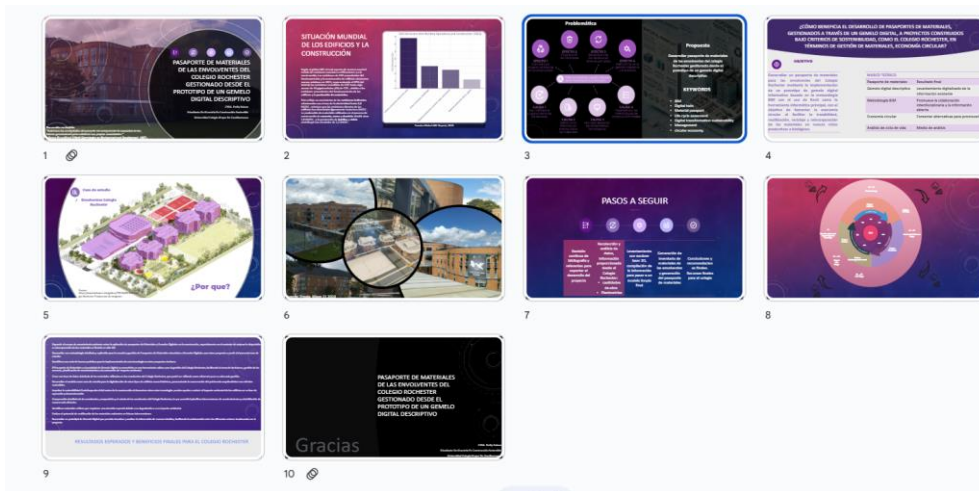
Ilustración 12 Funcionamiento del escáner



Fuente: Elaboración propia visita al laboratorio LaTi 4.0 20 de febrero 2025: a. componentes del escáner b. Escáner iniciando

La propuesta de investigación se presentó ante el Director de Sostenibilidad y el Director de Infraestructura del Colegio Rochester (ver Ilustración 13 Presentación de propuesta). El objetivo de esta reunión fue obtener su aprobación para acceder a la recolección de los datos necesarios, así como para realizar las visitas de campo que permitirían el levantamiento de la nube de puntos y complementar la investigación.

Ilustración 13 Presentación de propuesta



Fuente: Elaboración propia propuesta de investigación presentada el 03 de marzo del 2025

El éxito de esta fase permitió el paso a la *Fase 2: Recolección y Digitalización de Datos*. En esta etapa, gracias a la colaboración del Director de Infraestructura del colegio, se obtuvo información clave como planos, listados de proveedores y el “MANUAL DE USO Y MANTENIMIENTO NUEVA SEDE COLEGIO ROCHESTER” desarrollado por la constructora OIKOS plasmada en la ilustración 12. Como parte clave de la recolección de datos, lo que dio inicio al desarrollo de los objetivos específicos de la tesis.

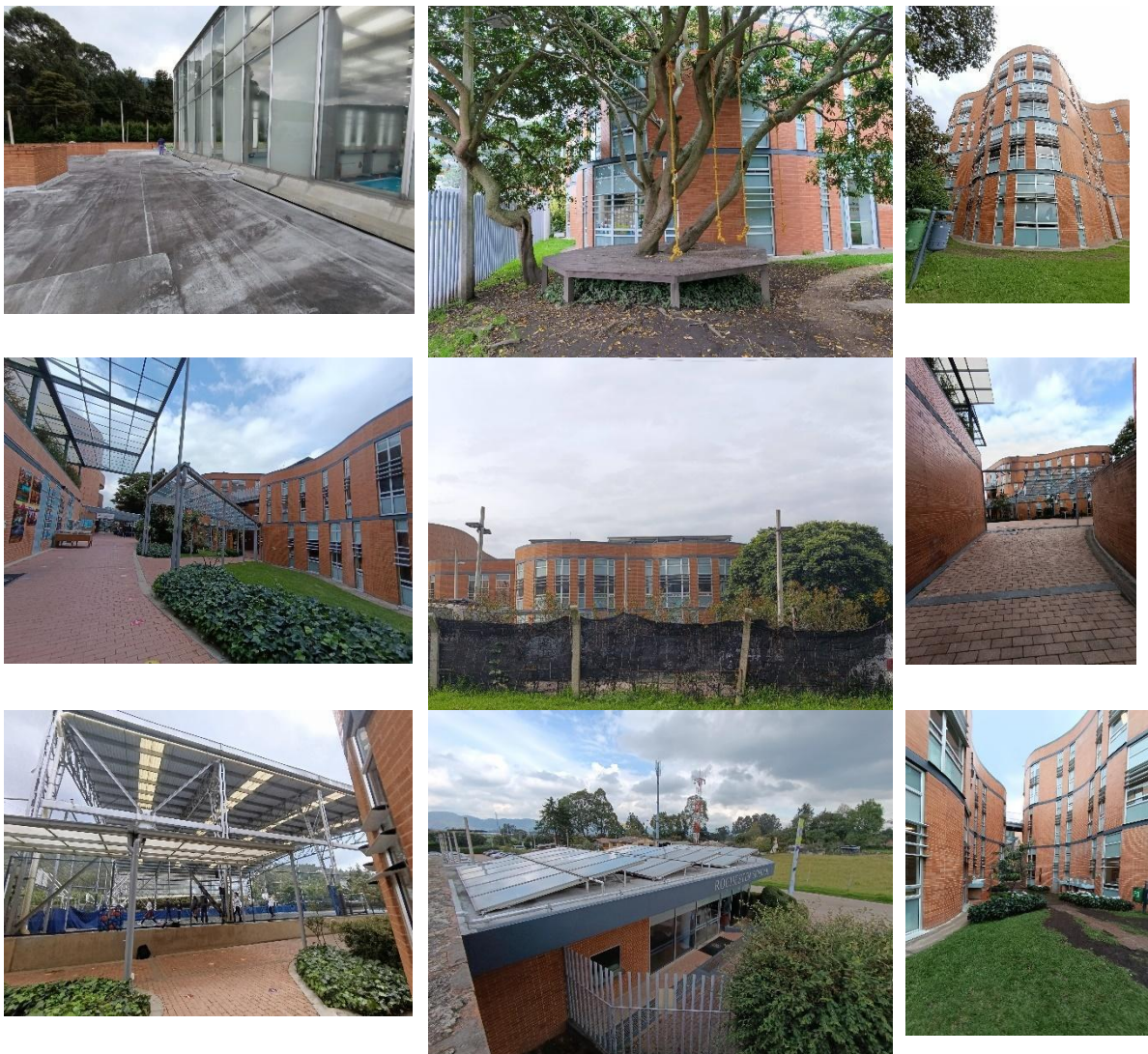
Ilustración 14 Información Recibida

Name	Date modified	Type	Size
B1 - B2	8/18/2025 9:20 PM	File folder	
B3	8/18/2025 9:20 PM	File folder	
B4 - B5	8/24/2025 6:34 PM	File folder	
B6	8/27/2025 7:56 PM	File folder	
B7 - B8	8/18/2025 7:56 PM	File folder	
B9 - B10	8/18/2025 7:55 PM	File folder	
B11	8/18/2025 9:20 PM	File folder	
Zip_Planos	9/25/2025 4:28 PM	File folder	
1.MASTERPLAN V202310	8/19/2025 6:37 PM	DWG File	6,911 KB
attachment E1-1 manual oikos	1/17/2025 9:33 PM	Documento de Mi...	5,406 KB
attachment E1-1 manual oikos	9/21/2025 5:42 PM	Documento Adob...	4,065 KB
Directorio Contratistas de Obra - OIKOS	8/30/2017 10:08 AM	Hoja de cálculo d...	16 KB
Directorio Proveedores Obra - OIKOS	9/9/2025 8:28 PM	Hoja de cálculo d...	44 KB

Fuente: Elaboración propia con la información recibida por parte del Colegio Rochester el 03 de marzo del 2025

Como parte de la recolección de datos, se inició con una serie de levantamientos fotográficos sistemáticos del activo construido. Esta técnica fue un componente crucial para complementar el escaneo láser y el modelado digital, pues permitió crear un registro visual detallado de las envolventes y sus materiales. Las fotografías sirvieron como evidencia y referencia para documentar con precisión las características, condiciones y estado de los componentes del edificio. Se complementó el registro fotográfico con sobrevuelos con Dron (facilitado por el colegio), para integrar la información de cubiertas. La información cualitativa facilitó la identificación y catalogación de los materiales, y funcionó como un apoyo visual indispensable para la construcción del gemelo digital y la integración de los datos en el pasaporte de materiales (ver Ilustración 15 Levantamiento fotográfico).

Ilustración 15 Levantamiento fotográfico



Fuente: Elaboración propia tomadas el 03 de marzo del 2025

Construcción del Gemelo Digital Descriptivo del Activo Construido

Como respuesta del primer objetivo específico “Construir el piloto de gemelo digital del Colegio Rochester que represente fielmente las envolventes del proyecto existente, guiado bajo los estándares de la metodología BIM como guía para su desarrollo.” La recolección de datos se **inició** con la planeación detallada del escaneo láser. Para ello, se **utilizó** el plano arquitectónico suministrado por el colegio para definir la estrategia de escaneo, estableciendo la ubicación de **45 puntos** para ubicar el escáner (ver Ilustración 16 Planeación de escaneo).

Ilustración 16 Planeación de escaneo



Fuente: Elaboración propia a partir de la información recibida

Aprovechando el rango de alcance de 45 m del escáner, según su ficha técnica (ver Ilustración 17 Ficha técnica LEICA BLK360), se **pudieron** ubicar los **45 puntos** estratégicamente para cubrir la totalidad de las envolventes.

Ilustración 17 Ficha técnica LEICA BLK360

LEICA BLK360

ESCÁNER LÁSER CON CÁMARAS HDR



GENERAL

Escáner láser con cámaras HDR

Escáner 3D con cámaras de alta velocidad integradas que capturan imágenes esféricas HDR y alimentan el Sistema Inercial Visual (VIS) para pre-registro en tiempo real

DISEÑO Y CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Carcasa	Aluminio anodizado negro
Dimensiones	Altura: 155 mm Diámetro: 80 mm
Peso	0,75 kg (0,85 kg incluida batería)
Cápsula de transporte	Cápsula de transporte GVP739
Mecanismo de montaje	Liberación rápida pulsando un botón

OPERACIÓN

Independiente	Operación con un botón
Dispositivos móviles	Aplicación BLK Live para smartphones iOS y Android Aplicación Leica Cyclone FIELD 360 para tablets y smartphones iOS e Android
Comunicación inalámbrica	Wireless LAN (802.11 b/g/n) integrada
Memoria interna	Almacena hasta 1500 estacionamientos
Orientación del instrumento	Normal e invertida

ALIMENTACIÓN

Tipo de batería	Batería de ion de litio interna y recargable (Leica GEB825)
Duración	Hasta 70 estacionamientos por batería

ESCANEÓ

Sistema de medición de distancias	Tiempo de vuelo a alta velocidad mejorado con la tecnología Waveform Digitising (WFD)
Clase de láser	1 (de acuerdo con IEC 60825-1:2014)
Longitud de onda	830 nm
Campo visual	360° (horizontal) / 270° (vertical)
Alcance*	Mín. 0,5 m - hasta 45 m
Frecuencia de medición	Hasta 680 000 puntos/segundo
Modos de medición	4 ajustes de resolución (6/12/25/30 mm @ 10 m)

IMÁGENES

Sistema de cámara	4 cámaras de 13 MP que capturan datos brutos de 104 MP para una imagen esférica calibrada de 360° x 270°
Velocidad	< 8 seg. para una imagen esférica LDR completa en cualquier condición luminica < 20 seg. para una imagen esférica HDR completa de 5 exposiciones en cualquier condición luminica
Modos de imagen	<ul style="list-style-type: none"> • LDR exposición automática • HDR de 5 exposiciones • Off - sólo escaneo

RENDIMIENTO

Captura de datos	< 20 seg. para un escaneo de cúpula completa a una resolución de 50 mm @ 10 m con mediciones automáticas de inclinación e imagen esférica LDR
Precisión de puntos 3D*	4 mm a 10 m
Prerregistro en tiempo real	Alineación automática de la nube de puntos basada en el seguimiento en tiempo real del movimiento del escáner entre estacionamientos basado en el Sistema Inercial Visual (VIS) con Unidad de Medición Inercial (IMU) mejorada mediante vídeo

MEDIO AMBIENTE

Resistencia	Diseñado para su uso interior y exterior
Temperatura de funcionamiento	0 °C a +40 °C
Polvo/humedad	Protección frente a polvo y humedad IP54 (CEI 60529)

PROCESAMIENTO DE DATOS

Transferencia de datos	Inalámbrica y USB 3.0
Software de escritorio	Leica Cyclone REGISTER 360 y Cyclone REGISTER 360 (BLK Edition)
Software en la nube	HxDR Digital Reality: plataforma de realidad digital basada en la nube

* Con un albedo del 78%.
 Todas las especificaciones están sujetas a cambios sin previo aviso.
 Todas las especificaciones de precisión tienen una desviación de tipo uno sigma, a menos que se indique lo contrario.
 Copyright Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland 2022.

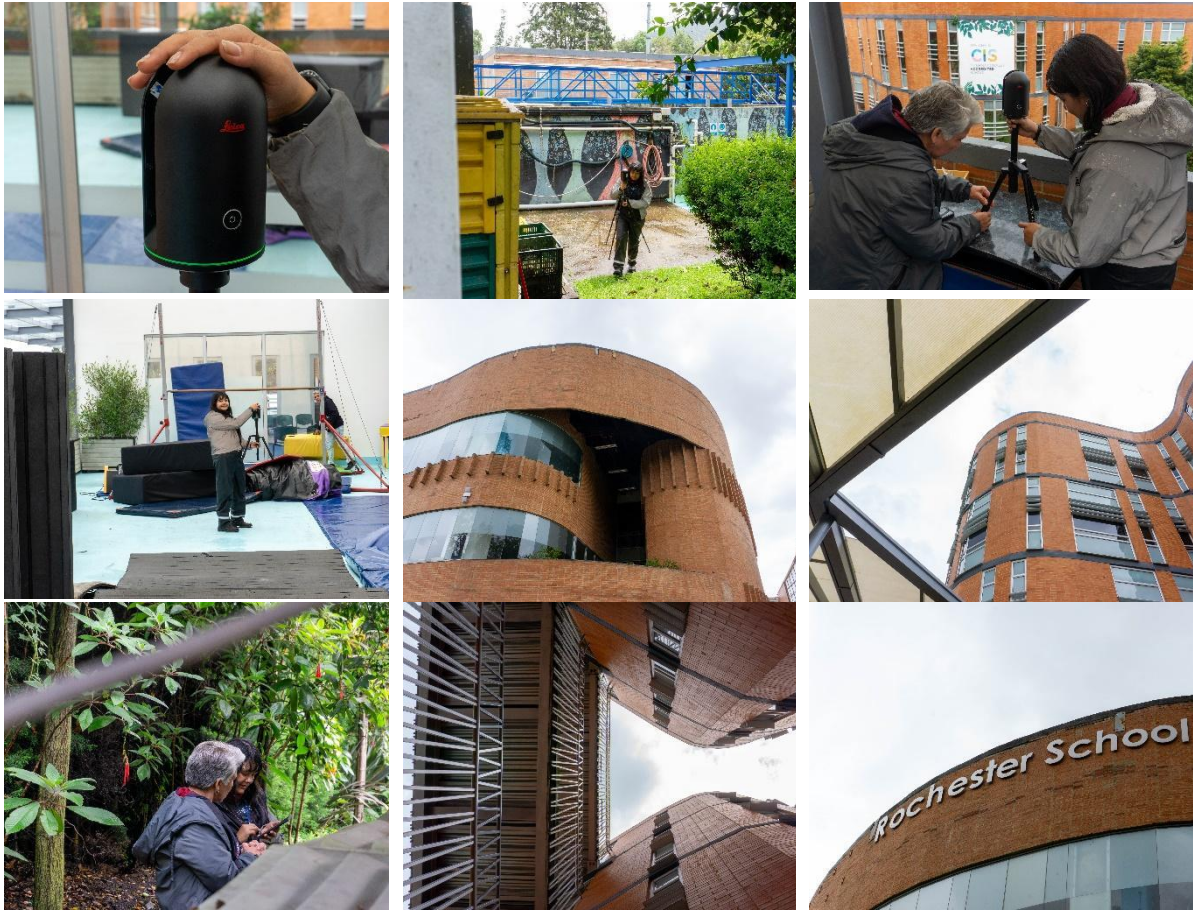


Fuente: Leica Geosystems, 2025

La planificación del escaneo láser se coordinó con el Colegio Rochester para realizarse en dos días con el fin de minimizar la presencia de personas en el campus y asegurar la exactitud de los datos. En cada una de las ubicaciones planeadas, el escaneo

tomó entre 3 y 5 minutos. Fue crucial evitar la interferencia con el equipo durante su operación para no aparecer en las tomas, lo cual garantizó la calidad de la nube de puntos obtenida (ver Ilustración 18 Toma de escaneos).

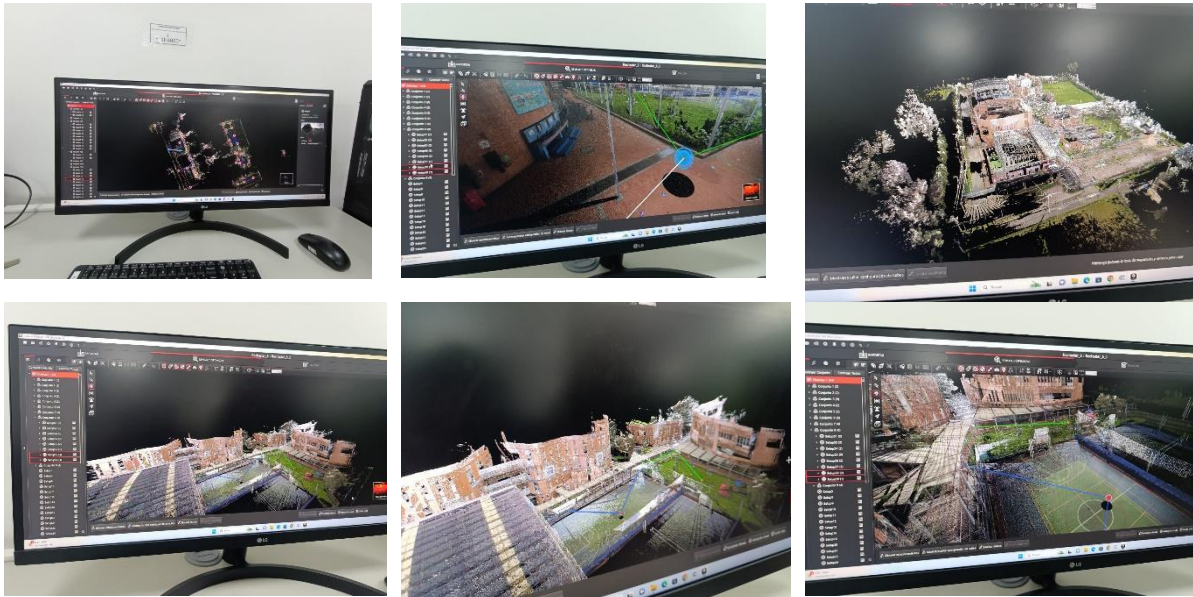
Ilustración 18 Toma de escaneos



Fuente: Acuña, Duvan apoyo de fotografía en el levantamiento 26 y 27 de abril del 2025

Como resultado del proceso de escaneo, se **obtuvo** una nube de puntos completa, la cual **fue** procesada y registrada en el software **Leica Cyclone REGISTER 360** en el laboratorio LaTi 4.0 (ver Ilustración 19 Procesamiento de datos).

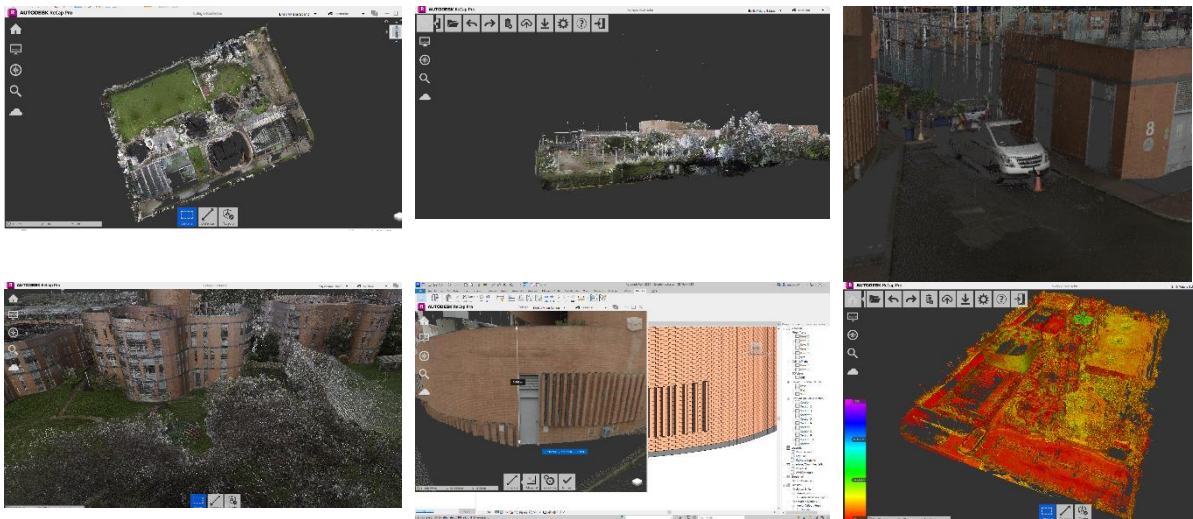
Ilustración 19 Procesamiento de datos



Fuente: Elaboración propia

Para facilitar la visualización y el uso de la nube de puntos, se exportó un archivo en formato compatible (.rcp). Este formato permitió visualizar la información en el software ReCap (Licencia educativa) de Autodesk y, posteriormente, importarla al entorno de Revit 2023 (Licencia educativa); lo que sirvió como base para la modelación digital del activo (ver Ilustración 20 Visualización en Recap).

Ilustración 20 Visualización en Recap

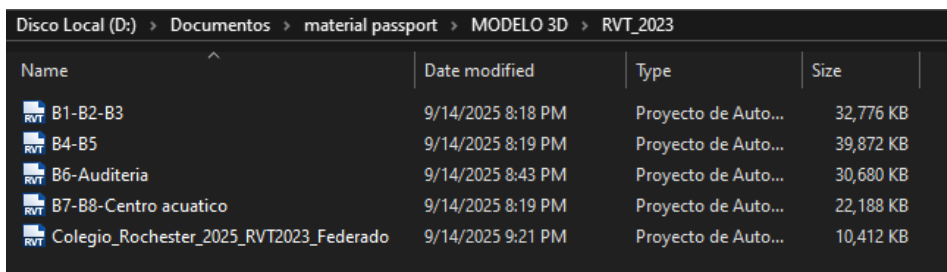


Fuente: Elaboración Propia tomado de Recap

La construcción del gemelo digital de las envolventes del colegio, se construyó a partir de los datos cuantitativos y cualitativos obtenidos mediante el levantamiento con el

escáner láser LEICA BLK 360 y su procesamiento de datos. Esta técnica permitió generar una nube de puntos detallada, la cual fue la base para la digitalización del activo. A partir de esta nube de puntos, se realizó la réplica del edificio en un modelo tridimensional en el software Revit 2023 (Ver anexo 1), bajo los estándares de la metodología BIM, garantizando una representación fiel y precisa del activo construido. Con el inicio del modelado se evidenció que se tenía que segregar el modelo debido a su peso (ver Ilustración 21 Segregación de modelos, Ilustración 22 Modelo Sobrepuesto en la nube de puntos, Ilustración 23 Gemelo digital descriptivo de las envolventes del Colegio Rochester)

Ilustración 21 Segregación de modelos



Name	Date modified	Type	Size
B1-B2-B3	9/14/2025 8:18 PM	Proyecto de Auto...	32,776 KB
B4-B5	9/14/2025 8:19 PM	Proyecto de Auto...	39,872 KB
B6-Auditeria	9/14/2025 8:43 PM	Proyecto de Auto...	30,680 KB
B7-B8-Centro acuatico	9/14/2025 8:19 PM	Proyecto de Auto...	22,188 KB
Colegio_Rochester_2025_RVT2023_Federado	9/14/2025 9:21 PM	Proyecto de Auto...	10,412 KB

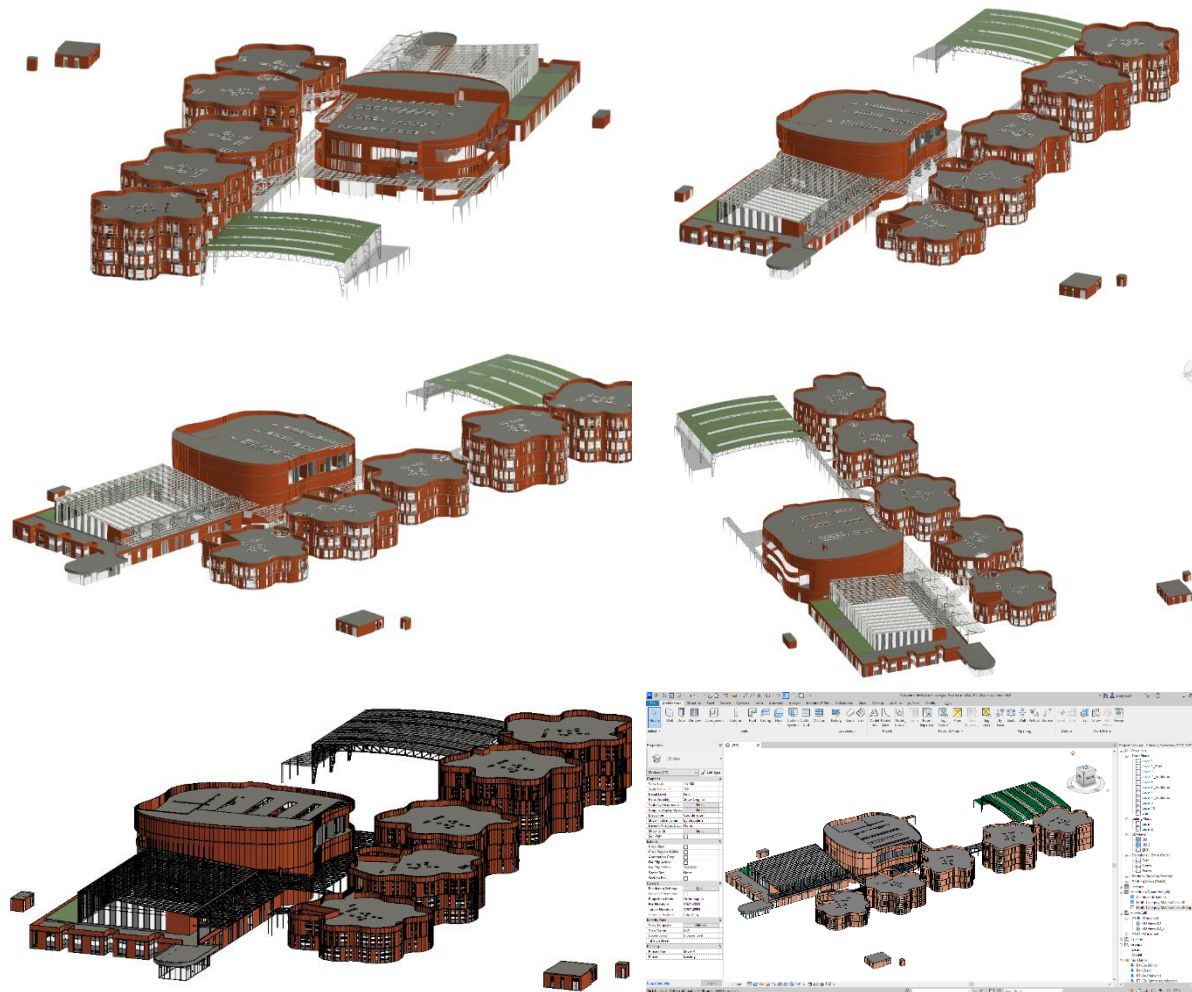
Fuente: Elaboración Propia

Ilustración 22 Modelo Sobrepuesto en la nube de puntos



Fuente: Elaboración Propia

Ilustración 23 Gemelo digital descriptivo de las envolventes del Colegio Rochester



Fuente: Elaboración Propia tomado de Revit

El gemelo digital descriptivo del Colegio Rochester se desarrolló bajo parámetros BIM (Building Information Modeling), que se alinearon con los objetivos de la investigación. El modelo se construyó a partir de un levantamiento de las condiciones existentes del activo, utilizando una nube de puntos que se importó al entorno de Revit para la modelación digital. La segregación del modelo se realizó por bloques, como se evidencia en la Ilustración 21, lo que facilitó una organización sistemática de los datos. Siendo un modelo As-built, se representó con un Nivel de Desarrollo (LOD) 500, lo que garantizó que la información fuera fiel al activo construido y con un alto nivel de detalle. Su propósito principal fue servir como una herramienta para la extracción de las cantidades de materiales

para el análisis de ciclo de vida y posterior desarrollo del pasaporte, lo que contribuyó a los objetivos de sostenibilidad del estudio (ver Ilustración 22 y 23 para el modelo sobrepuesto en la nube de puntos y el gemelo digital descriptivo), (Ver anexo 2, Visual Modelos Revit .pdf).

Identificación y Cuantificación de Materiales que Constituyentes de las Envolventes del Colegio Rochester.

A partir de la información recibida desde el Colegio Rochester (Ver Tabla 2 Materiales que conforman las envolventes identificadas desde el manual de mantenimiento proporcionado por OIKOS), y el modelo digital desarrollado en Revit, se procedió a la identificación y extracción de las cantidades de los materiales que conforman las envolventes del edificio, cumpliendo así con el segundo objetivo específico de la tesis: "Identificar y catalogar los materiales de las envolventes recopilando datos detallados sobre el origen, propiedades técnicas".

Tabla 2 Materiales que conforman las envolventes identificadas desde el manual de mantenimiento proporcionado por OIKOS

Elementos	Material
Muros	Ladrillo estructural prensado de .245 x .06 x .12.
Columnas expuestas	3000 y 3500 psi. Perfiles HEA, VIP y Tubulares cuadrados ASTM A-500-C.
estructura metálica de la piscina y Auditeria (incluyendo columnas/perfiles)	Láminas ASTM A-36. Pintura para la estructura metálica de la piscina: Imprimante epóxico fosfato de zinc (3 mils), barrera epóxica (2 mils) y esmalte epóxico gris aluminio (3 mils). Pintura para la estructura metálica de la Auditeria: Anticorrosivo alquídico (3 mils) y esmalte alquídico negro (3 mils).
Ventanearía	Vidrio templado incoloro de 6mm (en la parte inferior de la ventanería). Vidrio templado opalizado de 6mm (en la parte superior de la ventanería y secciones de 70 cms y 45 cms de altura). Vidrio laminado transparente a tope con bordes biselados (5 + 5). Perfiles de aluminio extruido, pintados con pintura electroestática.
Cubiertas	Marco perimetral en aluminio crudo (tubular 1101, tubular de 1 1/2"x1 1/2", con adaptador y pisa vidrio). Placa Estructural en Concreto aligerado Makrolon multi UV 2/10-10.5: Teja de PVC plastificado

con armadura de fibra de poliéster que transmite la luz, es resistente a impactos y cambios climáticos, y está recubierta con una capa protectora UV.
Lámina MAKROLON UV: Viene con protección contra rayos UV por co-extrusión.

Fuente: Elaboración Propia con información del manual de uso y mantenimiento de la nueva sede del Colegio Rochester, octubre 2012.

Para esta fase, las tablas de cuantificación (schedules) de Revit fueron la herramienta principal, permitiendo la extracción de un listado detallado de los componentes, sus tipos y volúmenes. Este método facilitó obtener el primer resultado cuantitativo clave, que incluyó la identificación de materiales principales como hormigón, ladrillo prensado, aluminio, vidrio y policarbonato, entre otros, como se presenta en la tabla de cuantificación. La información cuantitativa extraída fue complementada por las descripciones cualitativas obtenidas a través de entrevistas con el personal del colegio y visitas de campo, lo que enriqueció la caracterización de las envolventes. Entre los materiales principales se identificaron el hormigón estructural, los ladrillos de arcilla, las carpinterías de aluminio con vidrio y los aislamientos, entre otros.

Este es el primer resultado cuantitativo clave extraído del modelo BIM.

Explica brevemente que las tablas de cuantificación (schedules) de Revit fueron la herramienta principal. (ver Ilustración 24 Materiales y cantidades extraídas del modelo)

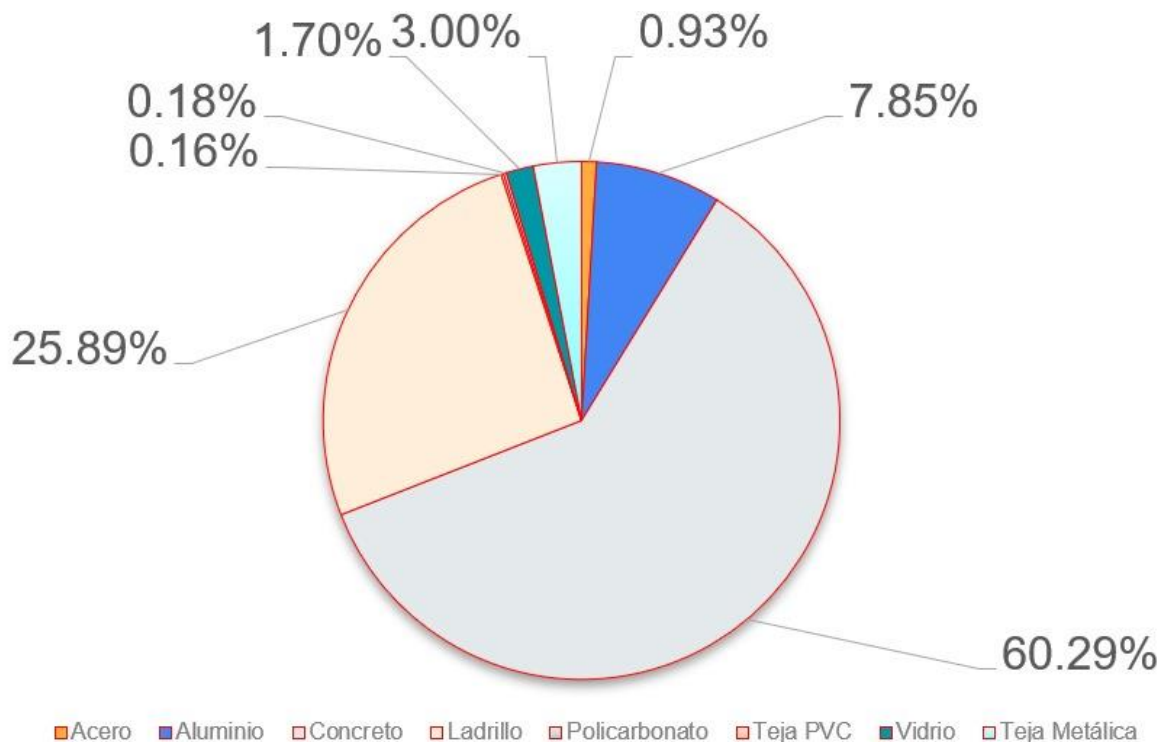
Ilustración 24 Materiales y cantidades extraídas del modelo

Cantidades				
Material: Name	Material: Area	Material: Volume	KG	Toneladas
Acero	1434 m ²	4.73 m ³	37110.37 kg	37.110368
Aluminio	6985 m ²	115.36 m ³	312642.37 kg	312.64237
Concreto gris claro de fc=21MPa	6768 m ²	997.81 m ³	2401345.26 kg	2401.345257
Mampostería de ladrillo prensado fino liviano 24.5x12x6.5cms a la vista	6929 m ²	824.80 m ³	1031070.52 kg	1031.070525
Policarbonato 8mm Traslucido	766 m ²	4.59 m ³	5512.38 kg	5.512375
Policarbonato opaco 8mm	117 m ²	0.70 m ³	839.21 kg	0.839205
Teja Metalica Aluzinc Pintada 4 Cal 28 Verde	1150 m ²	15.21 m ³	119375.41 kg	119.375415
TejaPVCPlastica_Makrolon_multiUV2/10-10.5	608 m ²	3.65 m ³	4379.92 kg	4.379922
TejaPVCPlastica_Makrolon_multiUV2/10-10.5_Transparente	399 m ²	2.40 m ³	2875.28 kg	2.875277
Vidrio_laminado_transparente_5+5	438 m ²	3.92 m ³	9799.92 kg	9.799922
Vidrio_templado_incoloro_6mm	2763 m ²	16.58 m ³	41453.86 kg	41.453858
Vidrio_templado_opalizado_6mm	1106 m ²	6.64 m ³	16594.95 kg	16.594952

Fuente: Elaboración Propia tomado de Revit

En la Ilustración 25 Distribución porcentual de materiales, se representa un gráfico de rosquilla que ilustra la distribución porcentual del peso en toneladas de los principales materiales utilizados en las envolventes del Colegio Rochester. Se observa que los materiales con mayor porcentaje son el concreto (60,29%), el ladrillo (25,89%), el aluminio (7,85%), y la teja metálica (3,00%), lo que indica su predominancia en la superficie exterior del edificio. En menor proporción se encuentran el vidrio (1,70%), el acero (0,93%), la Teja PVC (0,18%) y el policarbonato (0,16%). Esta visualización facilita la comprensión de la composición material de las envolventes, ofreciendo una base cuantitativa para futuros análisis de impacto ambiental y estrategias de economía circular.

Ilustración 25 Distribución porcentual de materiales



Fuente: Elaboración Propia

Como parte del análisis de los materiales se recopila información acerca de su origen y sus propiedades técnicas más relevantes, esto permitiendo entender las características que definen la importancia de su uso y aplicación (Ver Tabla 3 Origen y propiedades técnicas de los materiales).

Tabla 3 Origen y propiedades técnicas de los materiales

Material	Origen	Propiedades Técnicas Clave
Acero	Es una aleación de hierro con carbono (generalmente menos del 2%). Se produce en altos hornos a partir de mineral de hierro o a través del reciclaje de chatarra en hornos de arco eléctrico. Se le pueden añadir otros elementos (cromo, níquel) para crear aceros con propiedades específicas (ej. inoxidable).	Alta resistencia mecánica: Excelente para soportar grandes fuerzas sin deformarse. - Densidad media: 7,850 kg/m ³ . - Dúctil y maleable: Se puede deformar para crear alambres y láminas. - Buena conductividad térmica y eléctrica. - Punto de fusión: Alrededor de 1,375 °C, varía según la aleación. - Versatilidad: Sus propiedades se modifican fácilmente con tratamientos térmicos y aleaciones.
Aluminio	Se extrae principalmente de la bauxita. Su producción es un proceso electrolítico intensivo en energía. También es altamente reciclable, requiriendo solo el 5% de la energía de la producción primaria.	Ligereza: Su densidad es de 2,700 kg/m ³ , casi un tercio de la del acero. - Resistencia a la corrosión: Forma una capa de óxido natural que lo protege. - Excelente conductividad térmica y eléctrica. - Maleable y dúctil: Fácil de mecanizar y conformar. - No es magnético. - Punto de fusión bajo: Aproximadamente 660 °C.
Concreto	Es un material compuesto fabricado a partir de la mezcla de cemento, agua, y agregados (arena y grava). Al mezclarse, el cemento reacciona con el agua (hidratación) y endurece, uniendo los agregados en una masa sólida. Se pueden añadir aditivos para modificar sus propiedades.	Alta resistencia a la compresión: Su principal propiedad, ideal para estructuras. - Baja resistencia a la tracción: Se suele reforzar con acero (concreto armado). - Durabilidad: Resiste las condiciones ambientales durante mucho tiempo. - Trabajabilidad (en estado fresco): Puede moldearse en diversas formas. - Aislante térmico y acústico moderado. - Permeabilidad variable: Depende de la relación agua/cemento.
Ladrillo	Es un material cerámico fabricado a partir de arcilla o barro, que se moldea y luego se cuece a altas temperaturas (más de 350 °C) en un horno. Los ladrillos se han utilizado en la construcción desde hace milenios, evolucionando desde el adobe secado al sol.	Buena resistencia a la compresión: Adecuado para muros de carga y cerramientos. - Aislamiento térmico y acústico: Sus propiedades aislantes dependen de su densidad y si es macizo o hueco. - Durabilidad y resistencia al fuego. - Porosidad: Puede absorber humedad. - Resistencia a la compresión (ladrillo común): Alrededor de 90 kg/cm ² .
Policarbonato	Es un polímero termoplástico del grupo de los poliésteres. Se obtiene a partir de la reacción de bisfenol A (BPA) y fosgeno. Es conocido por su extraordinaria resistencia.	Extremadamente resistente al impacto Ligereza: Aproximadamente la mitad del peso del vidrio. Alta transparencia: Transmite la luz de manera similar al vidrio. Buen aislante térmico. Flexibilidad: Puede curvarse en frío. Rango de temperatura de uso: -40 °C a 130 °C.

Material	Origen	Propiedades Técnicas Clave
PVC (Policloruro de Vinilo)	Es un polímero termoplástico que se produce a partir de la polimerización del monómero de cloruro de vinilo. Sus componentes principales provienen de la sal común (57%) y del petróleo o gas natural (43%).	Versatilidad: Puede ser rígido o flexible según los aditivos utilizados. - Duradero y resistente a la corrosión y a agentes químicos. - Buen aislante eléctrico, térmico y acústico. - Ligero y fácil de instalar. - Larga vida útil: Puede durar más de 50 años en algunas aplicaciones. - Es termoplástico: Se ablanda con el calor y se puede moldear.
Teja Metálica	Se fabrica a partir de una lámina de acero base, que luego recibe un recubrimiento protector y estético. Puede ser acero galvanizado (recubierto de zinc) o acero con aleación de Aluzinc (Aluminio, Zinc y Silicio). Finalmente, se le aplica una capa de pintura de color para mayor protección y acabado.	- Ligereza: Peso aproximado de 3.38 kg/m, facilitando su instalación y requiriendo estructuras de soporte menos robustas. - Alta resistencia a la corrosión: Gracias a las capas de zinc y aluminio. - Durabilidad y bajo mantenimiento. - Resistencia a condiciones climáticas adversas (viento, granizo, lluvia). - Variedad de colores y acabados estéticos. - Espesor: Típicamente delgado, como 0.36mm, sin sacrificar resistencia.
Vidrio	Es un material inorgánico, duro, frágil y amorfo. Se fabrica principalmente a partir de la fusión de dióxido de silicio (arena), junto con carbonato de sodio y caliza a altas temperaturas. El vidrio también existe en la naturaleza (ej. obsidiana).	Transparencia: Su propiedad más característica. - Dureza superficial y resistencia a la abrasión. - Fragilidad: Se rompe con facilidad ante un impacto. - Químicamente inerte: Muy resistente a la mayoría de los productos químicos. - Mal conductor de calor y electricidad (aislante). - 100% reciclable: Se puede reciclar infinitamente sin perder calidad.

Fuente: Elaboración Propia a partir de fuentes consultadas

Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y Pasaporte de Materiales

El ACV de las envolventes se realizó en el software One Click LCA, generándose una modelación específica para las envolventes como parte del proyecto de investigación en curso del Grupo EcoEdificación “*Aplicación de Análisis de Ciclo de Vida en la Estimación de Impactos Ambientales del Colegio Rochester*”, considerando los siguientes parámetros para el modelado del software:

- Unidad Funcional: 1Tn de fachada
- Total, de área de fachada: 29463m²
- Total, de volumen de fachada: 8838,9 m³
- Total, de Masa de Fachadas: 4182,1Tn

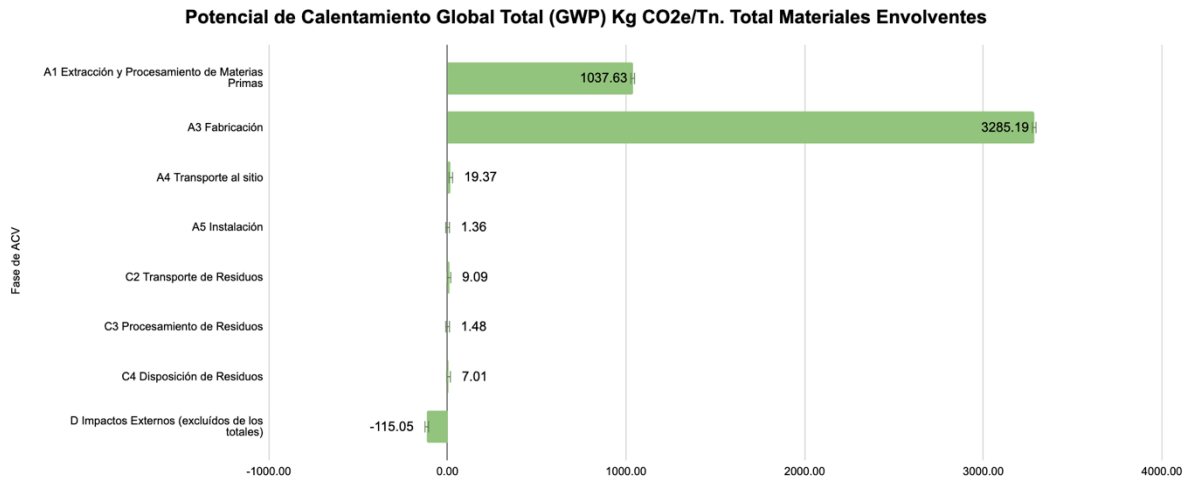
- Pérdidas en obra (A5): 5% (=209,105Tn)
- Distancias A2 y Actividades A3: Asumidas por el Software
- Distancia A4: 100Km
- Distancias restantes: 50Km
- A5 energía utilizada (electricidad – combustible) utilizada: 2651,7Kwh
- Porcentaje de reciclaje aplicado en C3*: 22%.

*Se debe aclarar que el valor de 22% para C3, está por debajo de lo referido por el Observatorio Ambiental de Bogotá, que para 2017 estableció la meta de controlar el 25% de los RCDs en obra, aspecto que para 2011-2012, no estaba establecido.

La información base de cada material para integrar al ACV, se fundamentó en las Declaraciones Ambientales de Producto de los fabricantes ACESCO, CEMEX, DIACO, y Ladrillera Santa Fe, que se han elaborado posterior al proceso constructivo del colegio (2011-2012).

En relación con la métrica de potencial de calentamiento global (GWP), se evidencia que las fases de extracción y fabricación (Ver Ilustración 26 Contribución al Potencial de Calentamiento Global (GWP) del total de materiales de las envolventes) son las que generan un mayor aporte a la métrica de carbono de las envolventes (A1=1037,63 KgCO₂e/Tn y A3=2385,19 KgCO₂e/Tn); cabe destacarse que de realizarse una correcta deconstrucción y recuperación al final de la vida útil, podría reducirse el GWP en 115,05 KgCO₂e/Tn

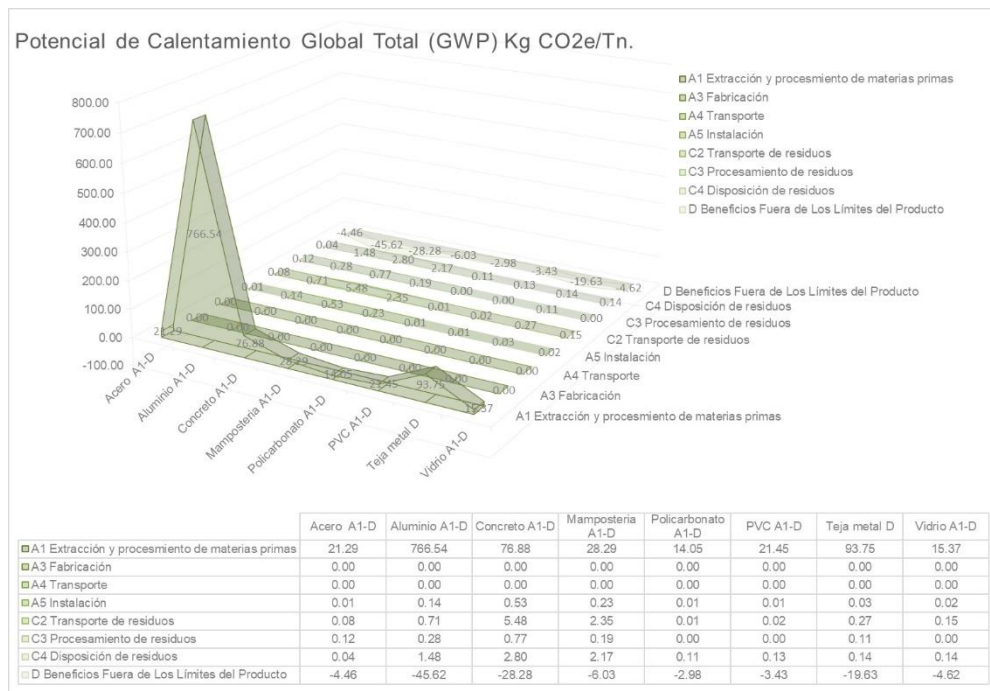
Ilustración 26 Contribución al Potencial de Calentamiento Global (GWP) del total de materiales de las envolventes



Fuente: Elaboración Propia a partir resultados One Click LCA

De forma específica, se presenta en la Ilustración 27 Potencial de Calentamiento Global Total de cada material de las envolventes por fase del ACV, los resultados del Total del Potencial de Calentamiento Global (GWP) para cada uno de los materiales constitutivos de las envolventes en las diferentes fases del ACV.

Ilustración 27 Potencial de Calentamiento Global Total de cada material de las envolventes por fase del ACV



Fuente: Elaboración Propia a partir resultados One Click LCA

Como se evidencia, la fase A1, para el total de materiales, evidencia los mayores valores de GWP, destacándose que el aluminio refiere el mayor aporte con 766, 54 KgCO₂e/Tn, seguido de la teja metálica (instaladas en cubierta del Bloque de Mantenimiento y canchas polideportivo) con 93,75 KgCO₂e/Tn, posteriormente el concreto con 76,88 KgCO₂e/Tn, luego el ladrillo con 28,29 KgCO₂e/Tn y finalizan en orden descendente el PVC, el vidrio y el policarbonato.

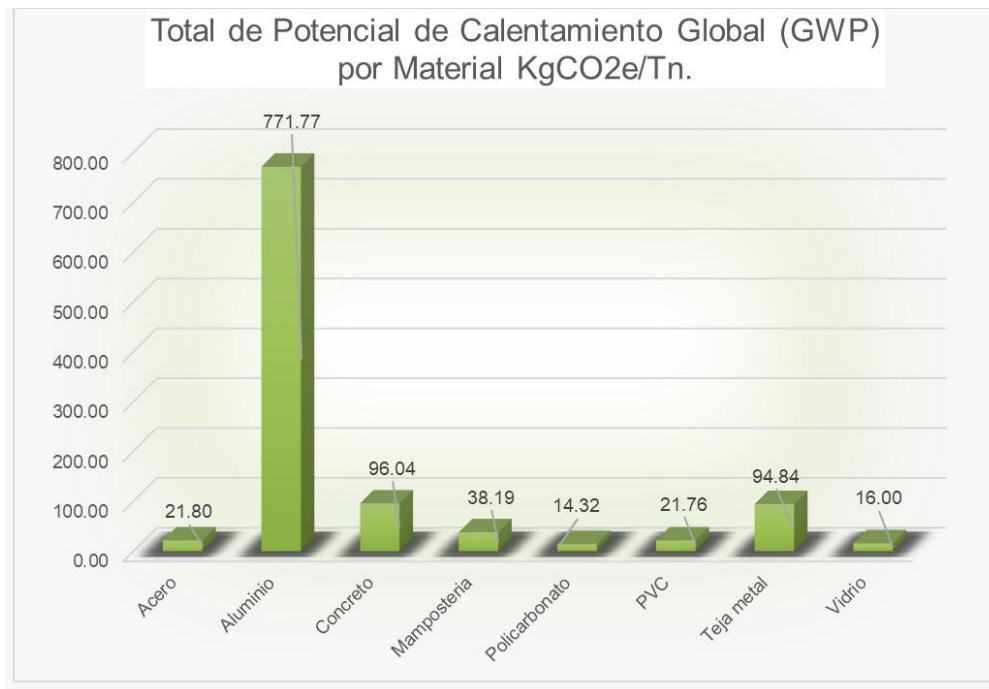
De igual forma, considerando la etapa D (beneficios fuera de los límites), el aluminio evidencia la mayor reducción en un proceso de circularidad con -45,62 KgCO₂e/Tn, seguido del concreto con -28,28 KgCO₂e/Tn y la teja metálica con -19,63 KgCO₂e/Tn.

Si se relacionan estos potenciales de beneficios frente a la distribución porcentual de la materialidad, el ladrillo que representa el 25,89% del total de las envolventes, registra solamente -6,03 KgCO₂e/Tn en beneficios, mientras que el aluminio que representa el 7,85% y el concreto con el 60,29% de representación de las envolventes, tendrían los mayores aportes de beneficios, indicando así la necesidad de una recomendación de una deconstrucción selectiva al final de la vida útil o una validación del ciclo al cual reincorporarse.

De los resultados del ACV, se extraen los valores del carbono embebido (sumatoria de GWP de las etapas A-C), de cada material para ser integrados en el pasaporte específico, así como el valor de la etapa D. En la Ilustración 28 Potencial de Calentamiento Global Total (KgCO₂e/Tn) por Material de las Envolventes del Colegio Rochester, se presenta la consolidación por material del GWP (embebido).

Es evidente que el Aluminio representa para las envolventes del colegio, el mayor aporte en GWP con 771,77 KgCO₂e/Tn. De igual forma, el metal de las tejas mencionadas, así como el concreto, son los materiales que tienen un alto GWP.

Ilustración 28 Potencial de Calentamiento Global Total (KgCO₂e/Tn) por Material de las Envolventes del Colegio Rochester



Fuente: Elaboración Propia a partir resultados One Click LCA

Materiales como el acero, el policarbonato, el vidrio y el PVC, tuvieron valores menores de GWP comparativamente a los previamente referidos.

El Pasaporte de Materiales (MP) se desarrolló como el entregable clave de la investigación, funcionando como una matriz digital principal para organizar la información del estudio. Dando solución al objetivo específico 3 “Desarrollar un Pasaporte de Materiales digital por medio de un documento digital que plasme la trazabilidad y gestión de los materiales de las envolventes, orientando su correcta disposición al final de la vida útil para su reincorporación en un ciclo circular. “Este documento integra la data sobre los materiales del colegio, incluyendo sus propiedades, cantidades y potenciales de reutilización y reciclaje. El diseño de su estructura se fundamentó en la revisión de diferentes pasaportes de materiales en páginas como (cdt.cl, archdaily.co, blueroominnovation.com, energrendesign.com, one-dna.com), y se diseñó en conjunto con el Equipo de Comunicaciones del Colegio, ya que al ser un entregable para su uso institucional, se diseñó con los lineamientos de identidad corporativa.

Su estructura incluye:

- Información general: Nombre del material, fabricante, y ubicación en el edificio.
- Datos cuantitativos: Cantidades volumétricas y peso.
- Análisis de Ciclo de Vida (ACV): Datos del Potencial de Calentamiento Global, obtenidos a partir de Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) y analizados con el software One Click LCA.
- Potencial de circularidad: Clasificación de los materiales según su potencial para ser reincorporados en nuevos ciclos productivos al final de la vida útil del edificio.

Ilustración 29 Imágenes de la plantilla base



Fuente: Colegio Rochester

La información consolidada en el MP fue fundamental para el análisis y la toma de decisiones, demostrando ser una herramienta eficaz para la gestión de activos y la promoción de la Economía Circular.

En el anexo 3 se puede revisar el pasaporte de materiales diligenciado con la información generada. Sin embargo, a manera de ejemplo se presentan imágenes resultantes del MP del Ladrillo ya que es el material que es más visible en términos de las envolventes y que da un carácter a la arquitectura del colegio.

Ilustración 30 Pasaporte de Materiales para el ladrillo



Fuente: Elaboración propia – Plantilla Colegio Rochester

Visión y evaluación del potencial de circularidad

La articulación de los datos y el Pasaporte de Materiales permitió una interpretación integral de los hallazgos desde la perspectiva de la Economía Circular. Como resultado de objetivo específico 4 “Evaluar las estrategias para la reincorporación de los materiales analizando la viabilidad y el potencial de las estrategias de reutilización, reciclaje o reincorporación de los materiales, basándose en la información desarrollada en el Pasaporte de Materiales, para fomentar la circularidad”. El análisis revela que las envolventes del Colegio Rochester funcionan como un valioso "banco de materiales" que puede ser aprovechado al final de la vida útil del activo. La información detallada en el Pasaporte de Materiales proporcionó la base para que el colegio pueda planificar a futuro la

reutilización o el reciclaje de sus componentes, reduciendo la generación de residuos de construcción y la demanda de materiales vírgenes.

La evaluación del potencial de circularidad de los materiales solicitados, como el acero, el aluminio, el concreto, el ladrillo, el policarbonato, el PVC y el vidrio, se basa en su clasificación dentro de los ciclos de la economía circular (Ciclo Técnico) y las oportunidades de reutilización, reciclaje, y estrategias de valorización, particularmente en el sector de la construcción (RCD: Residuos de Construcción y Demolición).

A continuación, se presenta en la Tabla 4 Evaluación del potencial de circularidad de estos materiales, que resume la evaluación del potencial de circularidad de estos materiales:

Tabla 4 Evaluación del potencial de circularidad de estos materiales

Material	Clasificación de Circularidad / Tipo de Residuo	Oportunidades y Potencial de Circularidad
Acero	Material de Ciclo Técnico. RCD Aprovechable (Metal ferroso, chatarra)	<p>Alta Tasa de Aprovechamiento: Colombia tiene como meta una tasa de aprovechamiento del 90% para la chatarra de hierro y acero destinada a la elaboración de acero para el año 2021.</p> <p>Upcycling: El acero, es de los materiales que, desde la EC, puede reciclarse para productos con propiedades técnicas comparables o mejoradas (reciclaje de circuito cerrado o <i>closed-loop recycling</i>)</p> <p>Estrategias: Aumentar la cantidad y calidad de la chatarra recolectada; optimizar el proceso siderúrgico para reducir la escoria; fomentar la simbiosis industrial (e.g., usando escoria en construcción).</p> <p>Reciclaje: Puede ser reciclado para la fabricación de nuevos productos o fundido en lingotes.</p>
Aluminio	Material de Ciclo Técnico (Metal). RCD Aprovechable (Metal no ferroso)	<p>Reciclaje primario (Closed-loop): Al reciclarse el aluminio en nuevos productos que presentan productos con propiedades técnicas comparables a las originales</p> <p>Reutilización: La perfilería de aluminio puede reutilizarse en nuevas estructuras o como material de refuerzo.</p>
Concreto	Material estructural/cemento. RCD Aprovechable (Pétreo), aunque a menudo se descarta	<p>Aprovechamiento y Reciclaje: Los esfuerzos de reciclaje en el sector de la construcción a menudo se centran en metales y madera, dejando al concreto y escombros de demolición con un valor potencial no considerado.</p> <p>Producción de Áridos Reciclados: Sustitución de agregados naturales (NA) con agregados de concreto reciclado. El reciclaje de concreto puede</p>

Material	Clasificación de Circularidad / Tipo de Residuo	Oportunidades y Potencial de Circularidad
		<p>producir agregado fino reciclado para mortero de albañilería</p> <p>Potencial: Se ha identificado un gran potencial para aumentar la tasa de aprovechamiento de cemento y concreto. El reciclaje de hormigón está disponible mediante tecnologías de gestión de RCD.</p> <p>Reprocesamiento Mecánico: Aplicación de métodos de tratamiento y reciclaje de concreto ligero.</p> <p>Innovación: Desarrollo de <i>CirCrete</i>, una métrica específica para concreto optimizada para la gestión de su Fin de Vida (EOL). Los agregados reciclados de materiales cementicios poseen características físicas y mecánicas evaluables. El concreto con agregados reciclados (5-10% de contenido reciclado) es una alternativa</p> <p>Barreras de Calidad: Los agregados reciclados presentan desafíos como mortero adherido, impurezas y alta porosidad, lo que reduce su rendimiento mecánico y durabilidad</p>
Ladrillo	Material estructural (Mampostería). RCD Aprovechable (Pétreo - Arcilla)	<p>Reutilización/Aprovechamiento: Puede ser utilizado como material de relleno, en la construcción de muros de contención, pavimentación (triturado), fabricación de adoquines, jardinería o decoración.</p> <p>Uso como agregado en morteros: La incorporación de agregado fino reciclado, derivado de materiales de RCD, en el mortero de albañilería (masonry mortar) ha ayudado a disminuir las cargas ambientales</p> <p>Innovación/Alternativas: Existen ladrillos y bloques fabricados a partir de escoria de procesos siderúrgicos. Ladrillos no estructurales pueden incorporar contenido reciclado cerámico (5-10% en peso) o plástico PET reciclado (25%).</p>
Policarbonato	RCD Aprovechable (Plástico)	<p>El policarbonato es un tipo de plástico/polímero de alto valor, a menudo utilizado en sistemas complejos como fachadas. El policarbonato como plástico, por el uso al momento de la deconstrucción, según su grado de contaminación, requiere de procesos tecnológicos para un alto grado de reciclaje.</p> <p>Reciclaje Químico (Ruta Implícita para Plásticos Complejos): Esta alternativa, desde la investigación futura, requiere que se priorice el desarrollo de métodos alternativos para la recuperación de plásticos complejos. El reciclaje químico es una ruta prioritaria para abordar las limitaciones del reciclaje mecánico de plásticos contaminados o complejos como el policarbonato.</p>
PVC (Policloruro de Vinilo)	Material de Ciclo Técnico (Plástico). RCD Aprovechable (Plástico)	<p>Reciclaje: El PVC rígido (tuberías hidrosanitarias y eléctricas) y en el presente caso, tejas; puede reciclarse mecánica o químicamente para producir nuevos perfiles y paneles. Los residuos de <i>banner</i> o lona de PVC pueden reciclarse en plantas especializadas.</p>

Material	Clasificación de Circularidad / Tipo de Residuo	Oportunidades y Potencial de Circularidad
Teja Metálica		<p>Upcycling de residuos de PVC provenientes de la industria de la construcción pueden ser utilizados para la producción de baldosas de PVC reciclado</p> <p>Rutas Tecnológicas Emergentes: La investigación futura debería priorizar los métodos alternativos de recuperación de materiales, incluyendo específicamente el reciclaje químico para plásticos.</p> <p>Reutilización: La lona de PVC puede reutilizarse para fabricar bolsas, cubiertas, o revestimientos. Innovación: Estudio sobre "Green-PVC" que utiliza residuos industriales totalmente reciclados y contenido de fuentes renovables. El PVC es ampliamente utilizado en la construcción (tuberías, marcos, suelos).</p> <hr/> <p>Verificación de uso de Conexiones Mecánicas: Verificar la existencia de conexiones atornilladas, para facilitar la separación y reutilización.</p> <p>Recuperación de Componentes Metálicos Post-Consumo: Las industrias de metales (como el aluminio) han demostrado que la recuperación de componentes metálicos post-consumo es impulsada por beneficios ambientales y de costos.</p> <p>Reciclaje Primario (Closed-Loop Recycling): Para los materiales técnicos (como los metales), la forma deseable de reciclaje es aquella que permite crear productos con propiedades comparables a las originales (reciclaje primario).</p>
Vidrio	Material de Ciclo Técnico. RCD Aprovechable	<p>Reciclaje de Alto Valor: El vidrio puede reciclarse en su totalidad para producir nuevos envases y otros productos.</p> <p>Reutilización/Otros Usos: Puede reutilizarse en construcción o decoración, o desintegrarse para ser utilizado como material de relleno, en carreteras (molido) o drenaje en agricultura.</p> <p>Potencial de Reutilización de Componentes: El potencial de reutilización para un panel de ventana se estima entre 20% y <50%. El vidrio es un flujo de material prioritario en la Estrategia Nacional de Economía Circular (ENEC) en el flujo de envases y empaques</p> <p>Desarrollo de Geopolímeros: Valorización de residuos de ladrillo y vidrio (Glass CDWs) provenientes de la construcción y demolición para el desarrollo de Geopolímeros que contienen más del 80% de residuos</p> <p>Producción de Vidrio Expandido: Empleo de vidrio expandido como estrategia para utilizar mejor los residuos existentes y mejorar la eficiencia de los recursos</p>

Fuente: Elaboración Propia a partir de referentes técnicos

Interpretación de los Resultados

Síntesis de los Hallazgos Principales

Los hallazgos principales del estudio se concentraron en la viabilidad de la digitalización para impulsar la Economía Circular en activos existentes. Se demostró el éxito de la metodología de integración al desarrollar un Gemelo Digital (DT) en Revit (con LOD 500) a partir de escaneo láser, lo que permitió la extracción precisa de las cantidades de materiales de las envolventes. El Pasaporte de Materiales (MP), que sirvió como matriz digital, integró estos datos cuantitativos con el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) realizado con One Click LCA, posicionándolo como una herramienta clave para la gestión. El análisis identificó el concreto (60,29%), ladrillo (25,89%), aluminio (7,85%), y teja metálica (3%) como los materiales predominantes por área en el Colegio Rochester. Este resultado confirmó que las envolventes funcionan como un valioso "banco de materiales" cuya trazabilidad facilita la planificación estratégica de la reutilización y el reciclaje, estableciendo un modelo metodológico replicable para otras edificaciones.

Discusión a la Luz de la Literatura

La comparación de los resultados con la literatura existente confirma las tendencias tecnológicas emergentes, pero también destaca la importancia del contexto local y metodológico en la gestión de activos existentes.

Los resultados del estudio, Digitalización de activos construidos bajo estándares BIM: caso de estudio pasaporte de materiales de las envolventes del Colegio Rochester, confirmaron la viabilidad y el potencial estratégico de la integración digital, tal como lo sugiere la literatura reciente (CCCS & CAMACOL, 2021); (CCCS, 2022).

- **Confirmación de Tendencias:** El hallazgo principal sobre la viabilidad de integrar el Gemelo Digital (DT), el Pasaporte de Materiales (MP) y el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para la gestión de activos existentes confirma la dirección que la literatura ha identificado como necesaria para mejorar el rendimiento ambiental de los activos

construidos (Boje, y otros, 2023). El estudio valida que el enfoque de BIM-ACV no solo es teórico, sino aplicable en la realidad de un edificio en operación.

- **Contradicción y Contexto:** La literatura sobre la integración de BIM y ACV ha documentado desafíos recurrentes en la recopilación de datos y la interoperabilidad (Boje, y otros, 2023). El presente estudio contradice esta limitación en su fase de digitalización al demostrar el éxito de la metodología de levantamiento y extracción de cantidades. El uso de la metodología Retro-BIM para crear un modelo As-built superó la falta de planos originales y la ausencia de DAPs históricas, resolviendo los desafíos de datos reportados en estudios previos.

Razones de las Diferencias

Las posibles diferencias en los hallazgos con respecto a la literatura global se atribuyen a factores clave del contexto de la investigación:

- **Contexto del Edificio:** Gran parte de la literatura sobre certificaciones LEED se centra en tipologías de oficina o comercio. La investigación se enfocó en un activo existente de uso educativo K12 (el Colegio Rochester), cuya singularidad y enfoque en la gestión de O&M con criterios de sostenibilidad ya habían reportado resultados consistentes con conceptos teóricos de colegios verdes (Ortega, 2022). Este contexto específico, permite aislar y evaluar el impacto de la herramienta digital de forma más pura.
- **Metodología Mixta:** El uso del enfoque de métodos mixtos es crucial. La integración de los datos cuantitativos (extracción de cantidades y ACV) con los datos cualitativos (entrevistas y contexto local) facilitó una comprensión holística que permitió sortear y explicar los desafíos de datos, un rigor que a menudo falta en estudios puramente cuantitativos de ACV (Hernández-Sampieri, 2014)

Evolución del Mercado: El posible contraste con percepciones comunes sobre sobrecostos en la construcción sostenible puede deberse a la evolución y madurez del mercado colombiano, lo que subraya la importancia de contextualizar las investigaciones producidas en América Latina para generar conocimientos válidos y aplicables a nuestras

realidades.

La Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Neto Cero Carbono (CCCS, 2022) establece que la evolución de las edificaciones existentes en el mercado de la construcción es un imperativo urgente para la descarbonización del sector. Esto se debe a que las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) provienen principalmente de la fase de operación de este parque edificado, evidenciando una gran brecha regulatoria y tecnológica.

La principal conclusión de la Hoja de Ruta es que, a diferencia de los edificios nuevos, no existe ninguna normativa que promueva el ahorro de agua y energía o la realización de *retrofits* (adecuaciones profundas) en el *stock* de edificios ya construidos. Esta situación exige el desarrollo inmediato de instrumentos, incentivos y tecnología para que las edificaciones existentes puedan implementar medidas de descarbonización. La meta es ambiciosa: lograr que la participación de la electricidad alcance el 94% en este segmento para el año 2050, sustituyendo los combustibles fósiles.

Para impulsar esta evolución, la Hoja de Ruta propone una estrategia dual que abarca la operación y el fin de vida:

Se busca la implementación de un código de construcción sostenible y una etiqueta energética obligatoria para las edificaciones existentes. Las estrategias se centran en:

Auditorías: Promover la inclusión en la regulación de auditorías energéticas periódicas, con el objetivo de que el 100% de los edificios existentes las realice para 2050, conduciendo a procesos de *retrofit* y electrificación de sistemas.

Tecnología: Impulsar el uso de la Mejor Tecnología Disponible (BAT) y la incorporación de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) *in situ*.

Circularidad y Gestión de Materiales

El proceso de descarbonización requiere un enfoque en el final del ciclo de vida para aprovechar los materiales:

Aprovechamiento de Residuos: Aumentar progresivamente el porcentaje de residuos de demolición enviados a procesos de aprovechamiento, buscando una meta del 90% para 2050. La EC, refiere desde el ciclo tecnológico (ellenmacarthurfoundation, 2022), la

importancia de recuperar desde los residuos, especialmente materiales finitos, que pueden ser gestionados a partir del Reciclaje, Reacondicionamiento/Remanufacturar, Reutilizar/Redistribuir, Mantener/prolongar.

Desde la literatura, los principales procesos refieren al reciclaje de los RCDs, especialmente como materias secundarias que pueden ser reincorporadas al proceso productivo del mismo elemento (ej. Aluminio, Acero, metal), o ser transformado en material secundario para producción de otros insumos (ej., concreto, ladrillo), posterior a un proceso de transformación tecnológica o mecánica (Alazaiza, 2024).

El reciclaje (Skene & Oarga-Mulec, 2024), es último paso del ciclo técnico. El reciclaje como alternativa se considera cuando un producto no puede ser utilizado en su función para la que fue elaborado, al no poderse restaurar o rehacerlo. Sin embargo, debe considerarse que al no poderse restaurar o rehacer, pero manteniendo los materiales constitutivos, estos son viables al conservar el valor mismo. Así al reciclar, se transforma un producto o sus componentes para convertirlos en nuevos materiales.

Es importante referir que, a nivel global, se ha identificado que para incremento de las tasas de recuperación de RCDs, requiere regulación específica con metas claras según la normatividad del país o región.

En la Unión Europea se estableció en la modificación en 2018 de la Directiva Marco de Residuos (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea., 2008) que para 2020 se debía lograr el objetivo obligatorio de recuperación del 70% del peso de los RCDs no peligrosos, incluyendo estrategias como la reutilización, el reciclaje y otras formas de recuperación de materiales. Según Eurostar, la tasa promedio de Recuperación para la Unión Europea en 2016 fue del 89%.

Estados Unidos, reportó a través de la Agencia de Protección Ambiental que solo el 38% de los 169 millones de toneladas de RCDs fueron recicladas para 2014.

Digitalización y Pasaportes: Se requiere incrementar el uso de auditorías de pre-demolición (Minambiente, 2017) y adoptar pasaportes de edificios existentes. Estos pasaportes deben contener la información clave para la recuperación, reúso o reciclaje de

los materiales, siendo esenciales para la trazabilidad y el fomento de la Economía Circular en la construcción.

Contribución al Conocimiento

El estudio realiza una contribución significativa al llenar un vacío identificado en la literatura:

- **Validación Empírica del Marco MP-DT en Activos Existentes:** El hallazgo principal que llena un vacío de conocimiento es la validación empírica y metodológica de un marco que articula BIM, el Gemelo Digital y el Pasaporte de Materiales con el ACV específicamente diseñado para activos construidos existentes. Numerosos estudios sobre la integración BIM-LCA se centran en las etapas tempranas de diseño para el soporte de decisiones (Parece, Resende, & Rato, 2024), pero esta tesis demuestra un modelo replicable para la auditoría y gestión de créditos de circularidad en la fase de re-certificación de edificios ya operando. Por ejemplo, en el trabajo de (Honic, Kovacic, & Rechberger, 2019) se menciona que el enfoque de sus investigaciones previas estaba en la nueva construcción y la fase de diseño, donde existe el máximo grado de libertad para elegir materiales. Este aporte es fundamental para el sector, ya que la mayor parte del parque edificado global ya existe.

Respuesta a las Preguntas de Investigación e Hipótesis

La viabilidad y el potencial de la estrategia propuesta en el estudio se confirmaron, validando afirmativamente la hipótesis planteada y resolviendo el problema de investigación central. Se demostró la viabilidad de la gestión digital de activos mediante la integración del Gemelo Digital (DT), el Pasaporte de Materiales (MP) y la información de Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Este modelo confirmó que el desarrollo del Pasaporte de Materiales, gestionado desde un prototipo de Gemelo Digital, fortalece los argumentos de circularidad en activos construidos, siendo una estrategia tangible para la transición hacia un sistema regenerativo y sostenible.

El Pasaporte de Materiales cumplió su función como la matriz digital principal, facilitando la trazabilidad y la reincorporación de los materiales, lo cual fue fundamental para la toma de decisiones. Específicamente, el análisis reveló que las envolventes del Colegio Rochester funcionan como un valioso "banco de materiales" cuya información detallada permite a la institución planificar a futuro la reutilización o el reciclaje de sus componentes, lo que reduce la generación de residuos y la demanda de materiales vírgenes. Finalmente, se concluyó que el modelo digital desarrollado, al optimizar la trazabilidad y la gestión del ciclo de vida de los materiales, es replicable en otras edificaciones existentes para contribuir a la descarbonización y a la implementación de la Economía Circular en el sector de la construcción.

Implicaciones del Estudio

Los resultados de esta investigación tienen implicaciones significativas en el mundo real, aportando valor tanto a la práctica de la gestión de activos como al marco teórico-metodológico de la construcción sostenible. La viabilidad demostrada del modelo propuesto establece un camino estratégico para impulsar la Economía Circular en edificaciones existentes.

Implicaciones Prácticas: El modelo integrado de digitalización y gestión de materiales proporciona un camino estratégico para arquitectos, ingenieros, gestores de activos y legisladores:

Para Propietarios y Gestores de Activos: Se recomienda la implementación del modelo Gemelo Digital (DT) - Pasaporte de Materiales (MP) para activos existentes. El MP demostró ser una herramienta crucial que permite transformar la incertidumbre sobre los materiales en valor estratégico, facilitando la planificación del fin de vida útil y las decisiones de renovación.

Para Arquitectos e Ingenieros (Retro-BIM): Se sugiere integrar el escaneo láser y el modelado BIM (LOD 500) como estándares para la auditoría de activos existentes. Esta metodología no solo garantiza la precisión de la extracción de cantidades, sino que también optimiza los procesos de diseño para la deconstrucción (DfD).

Para Legisladores y Organismos de Certificación (LEED/TRUE): Los resultados sugieren que las políticas públicas deben incentivar el uso de herramientas como el Pasaporte de Materiales. El MP proporciona la evidencia cuantificable (ACV) y trazable necesaria para verificar y fortalecer los argumentos de circularidad, simplificando la auditoría de créditos de sostenibilidad en las re-certificaciones.

Implicaciones Teóricas: El estudio realiza contribuciones significativas al conocimiento académico en la intersección de la tecnología y la sostenibilidad:

Validación de un Marco de Integración para Activos Existentes: La investigación propuso y validó empíricamente un marco metodológico que articula el BIM, el Gemelo Digital y el Pasaporte de Materiales con el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Este enfoque ayuda a superar la brecha identificada en la literatura sobre la limitada aplicación e integración de estas tecnologías en edificaciones existentes (retro-BIM) para fines de circularidad.

Contribución a la Gestión de la Información del Ciclo de Vida (LCM): El estudio confirma la utilidad del MP como un contenedor digital clave que centraliza los datos técnicos, ambientales y de circularidad de los materiales. Esto extiende la aplicación teórica de los sistemas de gestión de información (BIM/DT) al ámbito de la sostenibilidad material, transformando el edificio en un "banco de materiales" verificable.

Aporte al Contexto Regional (LCA): Al realizarse en Colombia, el estudio apoya la necesidad crítica de generar datos empíricos locales para el Análisis de Ciclo de Vida. Los resultados obtenidos con el software OneClick LCA sirven como punto de partida para que la academia y la industria fortalezcan el desarrollo de bases de datos regionales, mejorando la precisión y la representatividad de las métricas de sostenibilidad en América Latina.

Limitaciones del Estudio

Alcance y Enfoque del Estudio de Caso

Foco Limitado en las Envolventes: La investigación se centró exclusivamente en el desarrollo de un Pasaporte de Materiales (MP) para las envolventes del Colegio Rochester.

Si bien este enfoque permitió un análisis profundo de la interfaz clave entre el edificio y el ambiente, las conclusiones sobre el potencial de circularidad y la gestión de activos no abarcan la totalidad de los sistemas estructurales, mecánicos o interiores del edificio. Sin embargo, se destaca que este primer desarrollo, será complementado en fases posteriores por el Colegio, considerando su interés en complementar la totalidad del modelo y pasaportes de otros materiales y sistemas, para la proyección desde la economía circular al final de su vida útil.

Nivel de Madurez del Gemelo Digital: El estudio se limitó a desarrollar un prototipo de Gemelo Digital (DT) en su fase descriptiva (primer nivel de madurez). Este nivel se enfocó en la representación precisa de la entidad física y la consolidación de datos (MP), sin alcanzar los niveles de madurez más avanzados que permitirían la simulación, predicción u optimización en tiempo real del desempeño operativo del activo. El DT, conforme a las conversaciones con la Dirección de Infraestructura del Colegio, será complementado en fases posteriores.

Desafíos de Datos Históricos y Contexto Regional

Ausencia de Datos BIM y ACV Originales: El Colegio Rochester fue construido en 2011-2012. Una limitación fundamental fue que, durante su diseño y construcción original, no se empleó la metodología BIM ni se contó con las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP). La metodología tuvo que realizarse mediante un levantamiento de las condiciones existentes (escaneo láser) para crear un modelo *As-built* (LOD 500), lo cual introduce una dependencia de la medición *ex-post facto*.

Dependencia de Bases de Datos Foráneas para LCA: Como problema inherente al contexto de América Latina y Colombia, existe una carencia de bases de datos locales para el Análisis de Ciclo de Vida (LCA). La necesidad de utilizar bases de datos de otras regiones (como ECOINVENT o datos europeos en One Click LCA) puede comprometer la representatividad de los resultados del ACV aplicados a los materiales de producción local colombiana.

Limitaciones en Información Histórica de Sostenibilidad: La falta de permeabilidad de los fabricantes locales por las iniciativas de sostenibilidad en el momento de la construcción (2011-2012), implicó la ausencia de insumos nacionales que pudieran demostrar métricas de carbono embebido o contenidos de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV).

Retos Técnicos del Modelado

Segregación del Modelo por Peso: Durante la construcción del Gemelo Digital descriptivo en Revit, fue necesario segregar el modelo por bloques debido a su peso. Este fue un desafío técnico encontrado al trabajar con levantamientos de nube de puntos en modelos de gran escala y con un alto nivel de detalle (LOD 500), lo cual requiere una gestión cuidadosa del rendimiento del *software*.

Recomendaciones para Futuras Investigaciones

El estudio cumplió con sus objetivos al validar un modelo de gestión digital para la circularidad en edificaciones existentes. Sin embargo, este trabajo abre nuevos caminos de investigación que deben abordar las limitaciones encontradas y elevar el nivel de madurez tecnológica en el sector se presentan las siguientes recomendaciones y se plantean nuevas preguntas como apertura a nuevas investigaciones que puedan derivar de la presente.

Evolución del Gemelo Digital y Madurez Tecnológica

La principal área de investigación futura se centra en la evolución del prototipo descriptivo desarrollado.

Integración en Tiempo Real y Monitoreo Operativo: Se recomienda explorar la transición del Gemelo Digital a niveles de madurez superiores que permitan la simulación, predicción y optimización en tiempo real del desempeño de los activos. Específicamente, se sugiere conectar el DT a los sensores existentes en el Colegio Rochester (como los de medición de la calidad del aire, la generación fotovoltaica y el consumo energético) para monitorear el desempeño operacional y validar el Pasaporte de Materiales con datos dinámicos.

Pregunta Pendiente: ¿Cómo afecta la integración de datos de sensores en tiempo real la longevidad y el valor residual de los materiales de la envolvente, más allá de la fase de diseño inicial?

Expansión del Alcance del Pasaporte de Materiales (MP): Se sugiere replicar la metodología de inventario y análisis para otros sistemas constructivos del Colegio Rochester (estructuras, instalaciones) o de otras edificaciones, más allá de las envolventes.

Fortalecimiento de Datos Locales y Regionales de ACV

El estudio resalta la necesidad crítica de mejorar la calidad de los datos ambientales en Colombia y América Latina.

Desarrollo de Bases de Datos Nacionales: Se recomienda enfocar futuras investigaciones en la creación de datos de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) específicos para Colombia, que fortalezcan la información generada a la fecha, ya que la dependencia actual de bases de datos foráneas compromete la representatividad de los resultados de sostenibilidad local.

Impulso de Declaraciones Ambientales de Producto (DAP): Es crucial apoyar proyectos piloto para la integración BIM-ACV y fomentar que los fabricantes de insumos en Colombia evalúen los impactos de sus procesos productivos y proporcionen la métrica de carbono embebido a través de DAP. Se destaca el avance generado en 2024 por el CCCS y Camacol, en el desarrollo de la Plataforma SOSTENIDO, en la cual, se encuentra ya información verificada de sostenibilidad de algunos insumos de construcción.

Pregunta Pendiente: ¿Cuál es la disparidad real en las métricas de carbono incorporado al usar datos regionales (colombianos) versus datos genéricos (ECOINVENT) en proyectos de rehabilitación?

Evaluación Holística y Estandarización de la Circularidad

Para avanzar en la implementación práctica de la circularidad, se requiere mayor robustez metodológica y consenso técnico.

Integración de la Evaluación de la Sostenibilidad del Ciclo de Vida (LCSA):

Futuras investigaciones deberían enfocarse en desarrollar metodologías consolidadas para evaluar categorías de impacto social (S-LCA) y alinear la aplicación práctica de las tres metodologías (E-LCA, S-LCA, LCC), resolviendo la complejidad inherente a la recolección de datos de diferentes perspectivas.

Estandarización y Armonización: Es crucial que la academia y la industria apoyen la estandarización de nomenclaturas entre regulaciones, estándares BIM y bases de datos nacionales para facilitar la interoperabilidad. Esto es vital para consolidar la información y posicionar BIM como una herramienta integral para la sostenibilidad.

Replicabilidad del Modelo y Validación en Certificaciones: Se sugiere aplicar el modelo desarrollado (DT-MP-ACV) en diversas tipologías de edificaciones existentes para confirmar su viabilidad como una estrategia replicable que contribuya a la descarbonización del sector y validar su capacidad para fortalecer los argumentos de circularidad en sistemas de certificación como LEED a escala.

Pregunta Pendiente: ¿Cómo se puede estandarizar la documentación de la información cualitativa (experiencias y percepciones) para que sea útil en modelos de toma de decisiones de sostenibilidad a gran escala?

CONCLUSIONES Y APORTES

El estudio cumplió a cabalidad con sus objetivos, confirmando la viabilidad y el potencial estratégico de la digitalización para la gestión sostenible de activos construidos.

Los hallazgos principales se resumen en los siguientes puntos:

Viabilidad de la Integración Tecnológica: Se confirmó que la integración del Gemelo Digital (DT) descriptivo, el Pasaporte de Materiales (MP) y la información del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) constituye una estrategia viable y fundamental para superar la falta de trazabilidad y gestión eficiente de materiales en edificaciones existentes.

Modelo Replicable para la Economía Circular: El modelo desarrollado demostró ser una estrategia tangible para la transición hacia un sistema regenerativo. El DT descriptivo,

construido bajo metodología BIM y LOD 500 a partir de escaneo láser, facilitó la extracción precisa de cantidades y datos. Se concluyó que este modelo es directamente replicable en otras edificaciones existentes que busquen optimizar su desempeño ambiental.

Potencial de Circularidad y Gestión Informada: Los hallazgos demostraron que las envolventes del Colegio Rochester funcionan como un valioso "banco de materiales". La información detallada en el Pasaporte de Materiales proporcionó la base para la planificación de la reutilización o el reciclaje de sus componentes, lo que fortalece y valida los argumentos de circularidad en sellos de certificación como LEED.

Aportes del Documento

Los aportes del estudio se manifiestan a nivel metodológico, digital y estratégico, ofreciendo soluciones directas para impulsar la Economía Circular en el sector de la construcción.

Aportes Metodológicos y Digitales

El estudio contribuye con la validación de un flujo de trabajo para la digitalización de activos existentes.

Desarrollo de Prototipos Digitales: Se construyó un piloto funcional del Gemelo Digital (DT) y se desarrolló el Pasaporte de Materiales (MP) como la matriz digital principal, centralizando la trazabilidad, gestión, cantidades, ACV y potencial de circularidad de los materiales.

Validación de Metodología Retro-BIM: El estudio utilizó un diseño de caso con enfoque mixto, aplicando un levantamiento con escáner láser para crear un modelo digital preciso en Revit, demostrando cómo subsanar la falta de información histórica (ausencia de BIM y DAP) en activos construidos previamente.

Entrega de Herramientas de Gestión: El prototipo del gemelo digital en Revit y el documento del pasaporte de materiales fueron entregados al Colegio Rochester para su uso directo como herramienta de gestión y planificación de la sostenibilidad.

Aportes Estratégicos para la Economía Circular

El proyecto establece un caso de uso estratégico para la transición del sector, considerando la evolución en sostenibilidad, pero más aun, al ser un campus educativo certificado LEED.

Minimización de Residuos y Valoración de Activos: El sistema de trazabilidad y la provisión de información precisa permiten identificar y recuperar materiales valiosos, lo que minimiza la generación de residuos de construcción y demolición (RCD) y maximiza el valor residual del activo.

Fomento de la Adopción Tecnológica: El proyecto demostró que el uso integrado de BIM, One Click LCA y Gemelos Digitales como estrategia integrada en la trazabilidad de un activo, lo que impulsa el cambio sistémico hacia un modelo circular en el que los materiales se perciben y gestionan como recursos altamente valorables.

Mejora de la Eficiencia Operativa: Con el Pasaporte de Materiales integrado, se facilita una gestión más eficiente, precisa y centralizada de la información, optimizando la toma de decisiones con criterios de sostenibilidad durante la fase operativa y al final de la vida útil del edificio.

Referencias Bibliográficas

- Akbarieh, A., Jayasinghe, L., Waldmann, D., & Norman, F. (2023). BIM-Based End-of-Lifecycle Decision Making and Digital Deconstruction: Literature Review. *Sustainability (Switzerland)*, 12(7). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106683>
- Alazaiza, M. Y.-A. (2024). An overview of circular economy management approach for sustainable construction and demolish waste management. *Global NEST Journal*, 26(05824). doi:<https://doi.org/10.30955/gnj.005824>
- Amiri, A., Emani, N., Ottelin, J., Sorvari, J., Marteinsson, B., Heinonen, J., & Junnila, S. (2021). Embodied emissions of buildings - A forgotten factor in green building certificates. *Energy & Buildings*, 241(110962). doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110962> 0378-7788
- Andisheh, K. (2024). Development of steel circularity passport: Literature review, research gaps, and program rules in New Zealand. *Waste Management Bulletin*, 2(3). doi:<https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.06.003>
- Aragón, A. &. (2024). Limitations of machine-interpretability of digital EPDs used for a BIM-based sustainability assessment of construction assets. *Journal of Building Engineering*, 96(110418). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110418>
- Asamblea Nacional Constituyente. (1991). *Constitución Política de Colombia*.
- Atta, I. B. (2021). Digitizing material passport for sustainable construction projects using BIM. *Journal of Building Engineering*, 43(103233). doi:[10.1016/j.jobe.2021.103233](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103233)
- Berges-Alvarez, I. M.-R. (2022). Environmental and economic criteria in early phases of building design through Building Information Modeling: A workflow exploration in developing countries. *Building and Environment*, 226(109718). doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109718>

- BID. (2023). *Lineamientos sectoriales para la gestión de residuos sólidos y el avance hacia la economía circular*. Banco Interamericano de Desarrollo.
doi:<https://dx.doi.org/10.18235/0004839>
- Boje, C., Hahn, Á., Marvuglia, A., Benetto, E., Kubicki, S., Schaubroeck, T., & Navarrete, T. (2023). A framework using BIM and digital twins in facilitating LCSA for buildings. *Journal of Building Engineering*, 76(107232).
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107232>
- Bueno, C. &. (2018). Comparative analysis between a complete LCA study and results from a BIM-LCA plug-in. *Automation in Construction*, 90(188-200).
doi:<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.028>
- CAMACOL. (2023). GUÍA PRÁCTICA PARA LA ADECUADA GESTIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN EN REMODELACIONES EN BOGOTÁ Y LA REGIÓN.
- Campos, L. M. (8 de Febrero de 2025). Entrevista semiestructurada. (E. Solano, Entrevistador)
- Cascone, S. (2023). Digital Technologies and Sustainability Assessment: A Critical Review on the Integration Methods between BIM and LEED. *Sustainability*, 12(6)(5548).
doi:<https://doi.org/10.3390/su15065548>
- CCCS & CAMACOL. (2021). Guía de gestión sostenible y circular en obras. Colombia.
Obtenido de www.cccs.org.co y www.camacol.co
- CCCS. (2021). *Estado de la construcción Sostenible en Colombia, primera edición*.
- CCCS. (2022). *Guía Técnica de Verificación de Atributos de Sostenibilidad para Materiales de Construcción*.
- CCCS. (2022). *HOJA DE RUTA NACIONAL DE EDIFICACIONES NETO CERO CARBONO*. doi: ISBN: 978-958-53949-1-9
- CCCS. (2022). *Reporte de Recomendaciones Proyecto Acelerador de Edificaciones Neto Cero Carbono (AENCC)*.

CCCS. (2023). *Guía de Descarbonización para las Empresas del Sector de la Construcción*.

doi:ISBN 978-958-53949-7-1

CCCS. (2024). *Estado de la Construcción Sostenible en Colombia, Segunda edición*.

CCCS. (2025). *Hoja de Ruta de Sostenibilidad para Materiales de Construcción*. doi:ISBN:

978-628-96336-6-5

Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2016). *Documento CONPES 3874:*

Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos. Departamento

Nacional de Planeación.

Dauletбек, A. &. (2022). BIM-based LCA as a comprehensive method for the refurbishment

of existing dwellings considering environmental compatibility, energy efficiency, and

profitability: a case study in China. *Journal of Building Engineering*, 46(103852).

doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103852>

Dervishaj, A. y. (2024). From LCA to circular design: A comparative study of digital tools for

the built environment. *Resources, Conservation & Recycling*, 200(107291).

doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107291>

DNP & MINCIT. (2019). *COMPES 3975 POLÍTICA NACIONAL PARA LA*

TRANSFORMACIÓN DIGITAL E INTELIGENCIA.

DNP. (2020). *Estrategia Nacional BIM 2020-2026*.

ellenmacarthurfoundation. (23 de Mayo de 2022). www.ellenmacarthurfoundation.org.

Obtenido de [https://www.ellenmacarthurfoundation.org/articles/the-technical-cycle-of-](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/articles/the-technical-cycle-of-the-butterfly-diagram)

[the-butterfly-diagram](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/articles/the-technical-cycle-of-the-butterfly-diagram)

Feng, H., Zhao, J., Zhang, H., Shu, S., Li, D., & Thurairajah, N. (2022). Uncertainties in

whole-building life cycle assessment: A systematic review. *Journal of Building*

Engineering, 50(104191). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104191>

GBCI. (s.f.). gbc.org. Obtenido de <https://www.gbc.org>

GBCS. (s.f.). gbcgroup.com/. Obtenido de <https://www.gbcgroup.com/>

- Gherman, I.-E. L.-S. (2023). Circularity outlines in the construction and demolition waste management: A literature review. *Recycling*, 8(5)(69).
doi:<https://doi.org/10.3390/recycling8050069>.
- Giménez, Z. y. (2025). Analyzing the relationship between the level of BIM maturity and the value generated in construction projects in Colombia. *Ain Shams Engineering Journal*, 16(103351). doi:<https://doi.org/10.1016/j.asej.2025.103351>
- Hasibuan, G. C. (2025). Integrating circular economy into construction and demolition waste management: A bibliometric review of sustainable engineering practices in the built environment. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 11(101159).
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscee.2025.101159>
- Hernández-Sampieri, R. F.-C.-L. (2014). *Metodología de la investigación (6.ª ed.)*. México D.F.: McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Holland Circular Hotspot. (2022). Transition Team Circular Construction Economy, Arcadis, Netherlands' Ministries of the Interior and Kingdom Relations, & Netherlands' Ministry of Infrastructure and Water Management. *Circular Buildings: constructing a sustainable future*.
- Honic, M., Kovacic, I., & Rechberger, H. (2019). Improving the recycling potential of buildings through Material Passports (MP): An Austrian case study. *Journal of Cleaner Production*, 217(787-797). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.212>
- Hussien, A., Saleem, A., Mushtaha, E., Jannat, N., Al-Shammaa, A., Ali, S., . . . Al-Jumeily, D. (2023). A statistical analysis of life cycle assessment for buildings and buildings'. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(102143).
doi:<https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102143>
- ISO. (2006). Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. *International Organization for Standardization*.
doi:<https://www.iso.org/standard/37456.html>
- ISO. (2006). Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. *International Organization for Standardization*.

- ISO. (2018). *Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles (ISO 19650-1:2018)*.
- ISO. (2021). Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing — Part 1: Overview and general principles (ISO 23247-1:2021). Obtenido de <https://www.iso.org/standard/75064.html>
- Kathiravel, R., & Feng, H. (2024). Structural and embodied carbon performance optimization for low carbon buildings through BIM-based integrated design. *Journal of Building Engineering*, 98(111008). doi:<https://doi.org/10.1016/j.job.2024.111008>
- Madaster. (2020). *the digital library of materials*.
- Marijana Srećković, D. H. (2024). Bridging theory and practice: Stakeholder insights on circular economy in the building life cycle. *Energy Reports*, 12(3291-3301). doi:<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.09.014>
- Markou, I. y. (2025). Current methodologies of creating material passports: A systematic literature review. *Case Studies in Construction Materials*, 22(e04267). doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04267>
- Markou, I., Sinnott, D., & Thomas, K. (2025). Current methodologies of creating material passports: A systematic literature review. *Elsevier*, 22(e04267). doi:<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04267>
- Marsh, E. A. (2023). Tackling uncertainty in life cycle assessments for the built environment: a review. *Building and Environment*, 231. doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109941>
- Minambiente & MINCIT. (2019). *strategia nacional de economía circular: Cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio*.
- Minambiente. (2017). *Resolución 472 de 2017-Manejo y Disposición de Residuos de Construcción-Solames*.

- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2025). *Por medio de la cual se definen los parametros y lineamientos de construction.*
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2022). *Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Neto Cero Carbono.* Minvivienda.
- Mora, T. D. (2020). Key parameters featuring BIM- LCA integration in buildings: a practical review of the current trends. *Sustainability*, 12(17)(7182).
doi:<https://doi.org/10.3390/SU12177182>
- Naciones Unidas. (1972). *Declaración de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano* . Declaración de Estocolmo.
- Naciones unidas. (1972). *Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo.*
- Naciones Unidas. (s.f.). *Los Objetivos de Desarrollo Sostenible.* Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Núñez Larios, R. (2021). Sustainable and circular retrofitting facade: A future proof panel for building renovation. *Tesis de maestría, Delft University of Technology.*
- Obrecht, T. P. (2020). BIM and LCA integration: a systematic literature review. *Sustainability*, 12(14)(5534). doi:5534. <https://doi.org/10.3390/SU12145534>
- Olanrewaju, O. I. (2024). Operational, embodied and whole life cycle assessment credits in green buildings certification systems. *Building and Environment*, 258(111569).
doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111569>
- Olumo, A. &. (2024). Building material reuse: An optimization framework for sourcing new and reclaimed building materials. *Journal of Cleaner Production*, 479(143892).
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143892>
- OneClick LCA. (s.f.). *oneclicklca.* Obtenido de <https://oneclicklca.com/es/>
- Ortega, J. (2022). Colegio Rochester un Caso Organizacional de Modelos de Negocios Sostenibles.
- Ostapska, K., Rütther, P., Loli, A., & Gradeci, K. (2024). Design for Disassembly: A systematic scoping review and analysis of built structures Designed for Disassembly.

Sustainable Production and Consumption, 48(377-395).

doi:<https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.05.014>

Parece, S., Resende, R., & Rato, V. (2024). A BIM-based tool for embodied carbon assessment using a construction classification system. *Developments in the Built Environment*. *Developments in the Built Environment*, 19(100467).

doi:<https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100467>

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2008). Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.

Pomponi, F., & Medina Campos, L. (2018). Embodied and Life Cycle Carbon Assessment of Buildings in Latin America: State-of-the-Art and Future Directions. *Springer, Cham*.

doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-72796-7_22

Sakthibala, R. K. (2025). A critical review on recycling and reuse of construction and demolition waste materials. *Cleaner Waste Systems*, 12(100375).

doi:<https://doi.org/10.1016/j.clwas.2025.100375>

Serrano, M., Díaz, C., Boronat, P., & Mercader-Moyano, P. (2023). Optimising LCA in complex buildings with MLCAQ: A BIM-based methodology for automated multi-criteria materials selection. *Energy & Buildings*, 294(113219).

doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113219>

Serrano-Baena, M. M.-D.-M. (2023). Optimising LCA in complex buildings with MLCAQ: A BIM-based methodology for automated multi-criteria materials selection. *Energy & Buildings*, 294(113219). doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113219>

SFC. (2022). *Taxonomía Verde de Colombia*.

Sharma, N. K. (2022). Global review of circular economy and life cycle thinking in building Demolition Waste Management: A way ahead for India. *Building and Environment*, 222(109413). doi:<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109413>

- Sheombar, J. (2024). *Navigating Digital Twin Implementation in the Circular Built Environment. Identifying technological inhibitors to implementation of digital twins from the perspective of early and potential adopters.*
- Skene, K. R., & Oarga-Mulec, A. (2024). The Circular Economy: The Butterfly Diagram, Systems Theory and the. *Journal of Circular Economy*, 2(3), 25.
doi:<https://doi.org/10.55845/LIXE9236>
- SOSTENIDO. (2024). Obtenido de <https://sostenido.com.co/>
- Soust-Verdaguer, B. G. (s.f.). Development of a plug-In to support sustainability assessment in the decision-making of a building envelope refurbishment. *Buildings*, 13(6)(1472).
doi:<https://doi.org/10.3390/buildings13061472>
- Soust-Verdaguer, J. G. (2024). Supporting sustainability assessment of building element materials using a BIM- plug-in for multi-criteria decision-making. *Journal of Building Engineering*, 97(110818). doi:<https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2024.110818>
- Swarnakar, V. &. (2024). An analysis of circular economy adaptation in construction and demolition waste management sector: A systematic literature review and conceptual implementation framework. *Smart and Sustainable Built Environment*.
doi:<https://doi.org/10.1108/SASBE-08-2024-0284>
- Tanguturi, V. P. (2023). Frameworks For A Circular Economy On Demolition Waste Management - Challenges, Barriers And Strategies: Policies Way Ahead To India. *Tesis de maestría inédita, Alma Mater Studiorum Università di Bologna.*
- Tighnavard Balasbaneh, A., Sher, W., Li, J., & Ashour, A. (2024). Systematic Review of Construction Waste Management Scenarios: Informing Life Cycle Sustainability Analysis. *Circular Economy and Sustainability*, 5(529-553).
doi:<https://doi.org/10.1007/s43615-024-00424-z>
- Ungureanu, V. B. (2024). *th International Conference “Coordinating Engineering for Sustainability and Resilience” & Midterm Conference of CircularB “Implementation of Circular Economy in the Built Environment.* doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-031-57800-7>

United Nations Environment Programme. (2024). *Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. Nairobi.

doi:<https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>

UNOPS, UNEP & UN-Habitat. (2024). *National Circularity Assessment Framework for Buildings*. Copenhagen: UNOPS.

Van Capelleveen, G. V. (2023). The anatomy of a passport for the circular economy: a conceptual definition, vision and structured literature review. *Conservation & Recycling Advances*, 17(200131). doi:<https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200131>

Wahlström, M. B. (2020). Construction and Demolition Waste: challenges and opportunities in a circular economy. *European Environment Agency*.

Wilson, S. A.-D. (2023). Tracking Material Reuse across Construction Supply Chains. *Paper presented at the [Conferencia IEEE e-Science*. doi:<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85174288674&doi=10.1109/Science58273.2023.10254935&partnerID=40&md5=7cd3c246ff9ae26851fd9d136d7ee1a7>.

World Green Building Council. (2023). *Global policy principles for a sustainable built environment*.

Anexos

1. Modelos formato (.ZIP)
2. Visual Modelos Revit (pdf)
3. Pasaporte de Materiales Envolventes Colegio Rochester (pdf)