



**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

Evaluación de la Circularidad de Materiales en la Construcción del Centro de Desarrollo

Tecnológico Sustentable

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

Previo la obtención del Título de:

**Magister en Ecoeficiencia Industrial**

Presentado por:

Ximena Del Rocío Toral Franco

Guayaquil - Ecuador

Año: 2026

## Dedicatoria

---

El presente proyecto lo dedico a mi familia quienes han sido pilar fundamental en mi formación personal y profesional con su apoyo incondicional a lo largo de este proceso.

De manera especial a mi esposo e hija, por ser el motor que impulsa cada paso en mi vida y la inspiración constante para seguir creciendo y superándome cada día.

## Agradecimientos

---

Mi más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica del Litoral, por constituirse en mi hogar académico y permitirme desarrollar el presente proyecto en el Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable bajo una guía sólida y con visión en el campo de la ecoeficiencia.

De manera especial, expreso mi agradecimiento al equipo técnico y profesional del Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable, por su valiosa colaboración y acompañamiento durante el desarrollo de la investigación.

## Declaración Expresa

---

Yo, Ximena Del Rocío Toral Franco acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 15 de Abril de 2026.

---

Autor 1

## **Evaluadores**

---

**Ing. Demis Cabrera**

Vocal de Proyecto

---

**Ing. Juan Peralta**

Tutor de proyecto

## Resumen

El presente proyecto de titulación tiene como propósito estimar el nivel de circularidad de materiales utilizados en el Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable, conformado por edificaciones con un área total construida de 239,96 m<sup>2</sup>. La investigación parte de la hipótesis de que una proporción significativa de los materiales constructivos proviene de fuentes secundarias, lo que justifica la necesidad de cuantificar su aporte y evaluar su impacto en términos ambientales y económicos.

Para el desarrollo de este proyecto, se utilizó un enfoque mixto que integró revisión documental de los planos arquitectónicos, registros fotográficos y levantamiento de información en campo mediante inspecciones físicas de las edificaciones y entrevistas. Los materiales identificados se clasificaron como nuevos, reutilizados, reciclados y reaprovechados aplicando criterios de economía circular y posteriormente cuantificados para estimar el Índice de Circularidad de Materiales (ICM).

Los materiales empleados en la construcción alcanzaron un ICM ponderado por costo del 41,3%, con un ahorro económico estimado de USD 17.685,85 y una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>eq de aproximadamente 8.333,1 kg, frente a un escenario convencional. Se identificó que los elementos con mayor aporte de circularidad fueron las estructuras metálicas, cubiertas y materiales de acabado.

Se concluye que la aplicación de estrategias de economía circular en la construcción genera beneficios económicos y ambientales relevantes, estableciendo una base metodológica y un conjunto de indicadores que facilitan la medición y evaluación de la circularidad en construcciones sostenibles.

**Palabras Clave:** Economía circular, construcción sostenible, índice de circularidad, ecoeficiencia

## Abstract

This graduation project aims to estimate the level of circularity of materials used in the Sustainable Technology Development Center, consisting of buildings with a total constructed area of 239.96 m<sup>2</sup>. The research is based on the hypothesis that a significant proportion of construction materials comes from secondary sources, which justifies the need to quantify their contribution and assess their environmental and economic impact.

For the development of this project, a mixed-method approach was used, integrating documentary review of architectural plans, photographic records, and field data collection through physical inspections of the buildings and interviews. The identified materials were classified as new, reused, recycled, and repurposed by applying circular economy criteria and were subsequently quantified to estimate the Material Circularity Index (MCI).

The materials used in the construction achieved a cost-weighted MCI of 41.3%, with an estimated economic saving of USD 17,685.85 and a reduction of approximately 8,333 kg of CO<sub>2</sub>eq emissions compared to a conventional scenario. It was identified that the elements with the highest contribution to circularity were metal structures, roofing, and finishing materials.

It is concluded that the application of circular economy strategies in construction generates significant economic and environmental benefits, establishing a methodological foundation and a set of indicators that facilitate the measurement and evaluation of circularity in sustainable construction.

**Keywords:** Circular economy, sustainable construction, circularity index, eco-efficiency

## Índice general

Resumen.....	I
Abstract.....	II
Índice general .....	III
Abreviaturas .....	V
Simbología .....	VI
Índice de tablas .....	VII
Índice de Figuras .....	VIII
Capítulo 1 .....	1
1.1 Introducción .....	2
1.2 Descripción del Problema .....	3
1.3 Justificación del Problema .....	3
1.4 Objetivos.....	5
<i>1.4.1 Objetivo General</i> .....	5
<i>1.4.2 Objetivos específicos</i> .....	5
<i>1.4.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible</i> .....	5
1.5 Marco Teórico .....	6
<i>1.5.1 Economía Circular en la Construcción</i> .....	6
<i>1.5.2 El Sector de la Construcción y el Paradigma de la Economía Circular</i> .....	6
<i>1.5.3 Marco Normativo y Situación de la Construcción Circular en Ecuador</i> .....	7
<i>1.5.4 Evaluación de la Circularidad: El Índice de Circularidad de Materiales (ICM)</i> 7	7
<i>1.5.5 Análisis del Ciclo de Vida (ACV) y Base de Datos de Emisiones</i> .....	7
Capítulo 2.....	9
2.1 Metodología. ....	10
<i>2.1.1 Fase 1: Revisión Documental y Entrevistas</i> .....	10

2.1.2	<i>Fase 2: Clasificación de Materiales</i>	14
2.1.3	<i>Fase 3: Estimación de Materiales Circulares</i>	14
2.1.4	<i>Fase 4: Identificación de Beneficios Ambientales</i>	17
2.1.5	<i>Fase 5: Propuesta de Indicadores</i>	18
Capítulo 3		19
3.1	Resultados y Análisis	20
3.1.1	<i>Cálculo del Índice de Circularidad de Materiales</i>	20
3.1.2	<i>Beneficios Ambientales</i>	21
3.1.3	<i>Indicadores de Circularidad Propuestos</i>	22
3.1.4	<i>Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible</i>	22
Capítulo 4		24
4.1	Conclusiones y recomendaciones	25
4.1.1	<i>Conclusiones</i>	25
4.1.2	<i>Recomendaciones</i>	25
Referencias		0

## Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ICM	Índice de Circularidad de Materiales
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
EC	Economía Circular
GEI	Gases de Efecto Invernadero
ACV	Análisis del Ciclo de Vida
CDTS	Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
CO <sub>2</sub> eq	Dióxido de Carbono Equivalente
NPT	Nivel de Piso Terminado
CDTS	Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable

## Simbología

m <sup>2</sup>	Metro Cuadrado
m	Metro
kg	Kilogramo
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
gbl	Global
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
U	Unidad

### Índice de tablas

Tabla 1 Resumen de Factores de Emisión Claves .....	8
Tabla 2 Información de las Edificaciones.....	10
Tabla 3 Estrategia de clasificación de materiales .....	14
Tabla 4 Inventario de materiales del edificio 10E-RECOD (99,86 m <sup>2</sup> ) .....	14
Tabla 5 Inventario estimado de materiales del edificio 10F-RECOD (140,10 m <sup>2</sup> ).....	16
Tabla 6 Estimación de emisiones de CO <sub>2</sub> eq evitadas por uso de materiales circulares en el CDTS .....	17
Tabla 7 Indicadores de Circularidad Propuestos para proyectos de construcción sostenible..	19
pLANOS	
Tabla 9 Beneficios ambientales por edificación .....	21
Tabla 10 Indicadores de Circularidad Propuestos para Proyectos de Construcción Sostenible en la Universidad. ....	22
Tabla 11 Alineación del Proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible .....	23

**Índice de Figuras**

Ilustración 1 Plano 1 <i>10BE RECOD Laboratorio y Administración</i> .....	12
Ilustración 2 Plano 2 <i>10BE RECOD Laboratorio de Mantenimiento Automotriz</i> .....	13

## **Capítulo 1**

## 1.1 Introducción

La industria de la construcción es un sector significativo que consume recursos naturales y genera residuos y emisiones contaminantes. Representa aproximadamente el 36% del consumo global de energía y el 39% de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la energía (Ramírez & Delvasto, 2025). En América Latina, este sector utiliza alrededor del 40% de los materiales extraídos y produce entre el 25% y 30% de los residuos sólidos urbanos, lo que resalta la necesidad de prácticas más sostenibles. (Correa, 2022)

Para Riquelme (2025), la economía circular plantea el rediseño de los sistemas productivos para mantener los materiales en ciclos cerrados, minimizando la extracción de recursos vírgenes y la generación de desechos. En el sector de la construcción esto se aplica mediante la reutilización de componentes, el reciclaje y el diseño orientado al desmontaje.

El Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable (CDTS), fue construido mediante el uso de materiales provenientes de excedentes de otras obras institucionales y estructuras dadas de baja dentro del campus. Esta práctica, aunque no ha sido formalmente sistematizada, constituye un caso empírico de aplicación de la economía circular en el sector de la construcción, evidenciando el potencial de estas estrategias en un contexto real. (Montero et al., 2021).

Considerando el contexto previo, nace la importancia de desarrollar un estudio que permita estimar el nivel de circularidad de los materiales empleados en la construcción del CDTS, mediante la identificación, clasificación y cuantificación de los insumos utilizados, así como la evaluación de los beneficios asociados a su reutilización y reaprovechamiento frente a un escenario convencional basado en materiales nuevos. La medición del Índice de Circularidad de Materiales (ICM), complementada con indicadores de ahorro económico y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, proporciona una base objetiva para evaluar el

desempeño de la construcción circular y generar información replicable para futuras edificaciones sostenibles.(Fonseca & Hurtado, 2025)

## **1.2 Descripción del Problema**

El Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable se concibe y ejecuta bajo un enfoque orientado a la reutilización y al aprovechamiento de materiales provenientes de fuentes secundarias, sin embargo, hasta el momento no se dispone de un estudio técnico que permita cuantificar el porcentaje de materiales circulares frente al total de la construcción; la ausencia de esta información limita la identificación y aplicación de indicadores de circularidad en proyectos de construcción sostenible.(Morales, 2022)

El establecimiento de una línea base permite replicar esta práctica en futuras edificaciones sostenibles dentro del campus universitario. La pregunta de investigación central es: ¿Cuál es el nivel de circularidad de materiales alcanzado en la construcción del Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable, y cuáles son sus beneficios ambientales y económicos respecto a un escenario de referencia con materiales nuevos?

## **1.3 Justificación del Problema**

Este proyecto se enmarca en estimar el nivel de circularidad de materiales utilizados en el Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable, así como en la evaluación de sus beneficios ambientales y económicos. La realización de este proyecto se justifica desde tres dimensiones:

### **Dimensión Ambiental**

El estado ecuatoriano está comprometido con la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la incorporación de principios de economía circular en

concordancia con sus políticas públicas y acuerdos internacionales vinculados al cambio climático. La ausencia de una cuantificación del nivel de circularidad de los materiales utilizados en la construcción del Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable constituye una limitación para valorar de manera objetiva su desempeño ambiental. La estimación del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) evitado, permite demostrar la viabilidad y eficacia de estas prácticas en el sector de la construcción sostenible.

### **Dimensión Económica**

Las estrategias de reutilización, reciclaje y reaprovechamiento de materiales generan ahorros económicos significativos al reducir la adquisición de insumos nuevos y los gastos asociados a la gestión y disposición de residuos. La ausencia de un análisis cuantitativo impide identificar y cuantificar con precisión dichos beneficios económicos. Este análisis permite estimar y valorar económicamente estos beneficios, facilitando la toma de decisiones en futuros proyectos de construcción sostenible dentro de la infraestructura universitaria.

### **Dimensión Académica e Institucional**

El Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable evidencia una orientación clara hacia la sostenibilidad en su construcción. La implementación de una metodología estructurada para la medición de la circularidad de materiales permite estimar su desempeño y establecer un modelo replicable para futuras edificaciones sostenibles dentro del campus universitario lo que fortalece la labor de la Universidad como institución referente en la promoción de prácticas de construcción sostenible y economía circular.

## **1.4 OBJETIVOS**

### ***1.4.1 Objetivo General***

Estimar el nivel de circularidad de materiales en la construcción del Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable, mediante la identificación, clasificación y cuantificación de materiales circulares, para la elaboración de indicadores técnicos, ambientales y económicos aplicables a futuras edificaciones sostenibles de la institución

### ***1.4.2 Objetivos específicos***

1. Identificar los materiales empleados en la construcción, diferenciando entre nuevos, reutilizados, reciclados y reaprovechados, mediante inspecciones físicas a la infraestructura existente.
2. Estimar los volúmenes de cada tipo de material para la determinación del porcentaje de circularidad.
3. Estimar los beneficios ambientales y económicos derivados del uso de materiales circulares en comparación con materiales nuevos.
4. Proponer indicadores de circularidad aplicables a proyectos de construcción sostenible por medio del análisis de ingeniería.

### ***1.4.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible***

ODS 11: Ciudades y Comunidades Sostenibles.

ODS 12: Producción y Consumo Responsables.

ODS 13: Acción por el Clima

ODS 4: Educación de Calidad

## **1.5 Marco Teórico**

### ***1.5.1 Economía Circular en la Construcción***

La Economía Circular (EC) es un modelo económico regenerativo por diseño que busca disociar el crecimiento económico del consumo de recursos finitos. En la construcción, la EC se expresa mediante la jerarquía de las 9R: Rechazar, Reducir, Reutilizar, Reparar, Renovar, Remanufacturar, Reciclar, Recuperar energía y Reintegrar. Las estrategias de mayor impacto (primeras R) preservan más valor del material y evitan mayor cantidad de emisiones. (López, 2026)

### ***1.5.2 El Sector de la Construcción y el Paradigma de la Economía Circular***

En los estudios de Gamboa (2023), señala que la industria de la construcción es reconocida como uno de los mayores consumidores de recursos naturales y generadores de desechos. Según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2022), los edificios son responsables de gran parte de las emisiones de gases de efecto invernadero. Frente a este modelo lineal de extraer-fabricar-desechar, surge la Economía Circular (EC). En el mismo contexto, autores como Oviedo (2019), definen la EC como un sistema regenerativo que minimiza la entrada de recursos y la pérdida de energía mediante la creación de bucles cerrados de materiales.

Por otro lado, este concepto se materializa en la teoría de Cradle to Cradle, en las investigaciones de David et al., (2025), sostiene que los edificios deben ser diseñados y gestionados como bancos de materiales, donde cada componente pueda ser recuperado y reutilizado al final de su vida útil sin perder valor.

### ***1.5.3 Marco Normativo y Situación de la Construcción Circular en Ecuador***

Ecuador ha dado pasos de gigante en relación a la aprobación del Libro Blanco de Economía Circular (2021) y la Ley Orgánica de Economía Circular Inclusiva. Estos instrumentos legales priorizan la gestión eficiente de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD). La literatura local e internacional coincide en que la reutilización de estructuras preexistentes es la estrategia más efectiva para reducir el Carbono Incorporado, que representa las emisiones generadas durante la extracción, transporte y fabricación de materiales.(Vallejo & Yajnes, 2025)

### ***1.5.4 Evaluación de la Circularidad: El Índice de Circularidad de Materiales (ICM)***

La Economía Circular (EC) es un modelo económico regenerativo por diseño que busca desacoplar el crecimiento económico del consumo de recursos finitos. De esta manera, se facilita la transición de la teoría a práctica mediante la medición del desempeño circular. La metodología de referencia desarrollada por la Ellen MacArthur Foundation y Granta Design (2019) establece el Índice de Circularidad de Materiales (ICM). Este indicador permite cuantificar en qué medida los flujos de materiales son restaurativos.(Olivares, 2025)

### ***1.5.5 Análisis del Ciclo de Vida (ACV) y Base de Datos de Emisiones***

La literatura científica sugiere que la evaluación de circularidad debe complementarse con un Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Wernet et al. (2016), a través de la base de datos Ecoinvent, proporcionan factores de emisión que permiten transformar el ahorro de masa de materiales (acero, vidrio, hormigón) en ahorro de CO<sub>2</sub> equivalente.(Rúa, 2024)

Los factores de emisión empleados en este estudio están basados en bases de datos reconocidas internacionalmente Ecoinvent v3.9, ICE Database v3.0 – University of Bath y en la literatura técnica regional para Ecuador.

**Tabla 1***Resumen de Factores de Emisión Claves*

<b>Material</b>	<b>Unidad</b>	<b>FE Nuevo (kg CO<sub>2</sub>/u)</b>	<b>FE Circular (kg CO<sub>2</sub>/u)</b>	<b>Fuente</b>
Acero estructural	kg	1,85	0,05	ICE v3.0 / Ecoinvent
Plancha galvanizada	m <sup>2</sup>	18,00	0,80	ICE v3.0 / Ecoinvent
Bloque de hormigón	u	0,21	0,02	IPCC / Ecoinvent
Madera de encofrado	pie-tabla	0,30	0,03	ICE v3.0 / Ecoinvent
Vidrio	m <sup>2</sup>	15,00	4,00	ICE v3.0 / Ecoinvent
Cerámica/baldosa	m <sup>2</sup>	12,00	1,00	ICE v3.0 / Ecoinvent
Puerta metálica	u	25,00	1,50	ICE v3.0 / Ecoinvent

*Nota.* FE = Factor de emisión. Hammond y Jones (2019) para materiales nuevos; Wernet et al. (2016) para circulares.

## Capítulo 2

## 2.1 Metodología.

### 2.1.1 Fase 1: Revisión Documental y Entrevistas

Los hallazgos preliminares en la revisión documental y entrevistas a responsables de la obra muestran que en la edificación se emplearon: Estructuras metálicas, Bloques de hormigón recuperados de excedentes, Madera, vidrios, cerámica y baldosas etc.

#### Revisión de Planos Arquitectónicos

El Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable está conformado por dos edificaciones contiguas ubicadas en el Campus Gustavo Galindo Velasco, Km 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil.

**Tabla 2**

*Información de las Edificaciones*

<b>Código</b>	<b>Denominación</b>	<b>Área Construida (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Espacios Principales</b>
<b>10E-RECOD</b> Laboratorio y Administración.	CDTS – Módulo A	99,86 m <sup>2</sup>	Lab., Sala de Reuniones, Cocina, Bodega
<b>10F-RECOD</b> Laboratorio de Mantenimiento Automotriz.	CDTS – Módulo B (Lab. Automotriz)	140,10 m <sup>2</sup>	Lab. Automotriz, Bodega Biomasa, Bodega Maquinaria, Aula, Baño
<b>TOTAL</b>	<b>CDTS</b>	<b>239,96 m<sup>2</sup></b>	—

*Nota.* Información correspondiente a los Planos Arquitectónicos

Ambas estructuras son de planta baja, construidas con sistema mixto (estructura metálica + mampostería), con cubierta metálica y contrapiso de hormigón. Los planos arquitectónicos oficiales emitidos por la institución (10E-RECOD y 10F-RECOD), se

encuentran fechados octubre 2023 y octubre 2025, respectivamente. han sido incorporados como referencia técnica primaria de este proyecto.

### **Descripción Técnica de la Edificación 10E-RECOD, Módulo A (Área de Laboratorio y Administración**

Con base en la Lámina A1 1/3 (Planta Baja a escala 1:50) y la Lámina A1 3/3 (Fachadas a escala 1:60), se identifican las siguientes características:

- **Área de planta baja y planta cubierta:** 99,86 m<sup>2</sup> cada una.
- **Espacios:** Sala de Reuniones, Laboratorio (dos módulos), Cocina, Bodega.
- **Sistema constructivo:** Estructura metálica (columnas y vigas de perfiles laminados) con cubierta de planchas metálicas galvanizadas; mampostería de bloque de hormigón; contrapiso de hormigón simple; carpintería metálica (puertas y ventanas).
- **Niveles de piso terminado:** NPT  $\pm 0.00$  a  $\pm 0.16$  m según zona.
- **Modulación estructural:** 4 ejes transversales (A-B-C-D) y 4 ejes longitudinales (1-2-3-4).
- **Código catastral:** 097-0080-000-0-0-0. Campus: Gustavo Galindo Velasco.

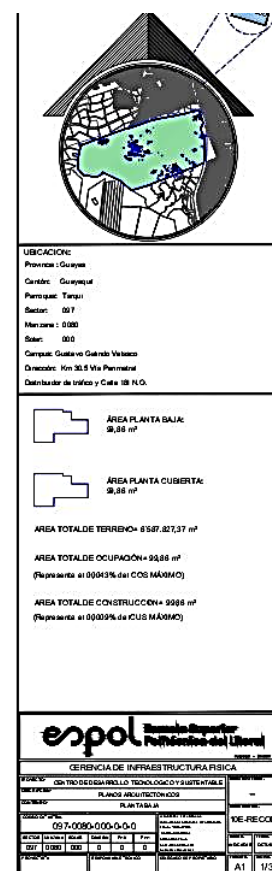
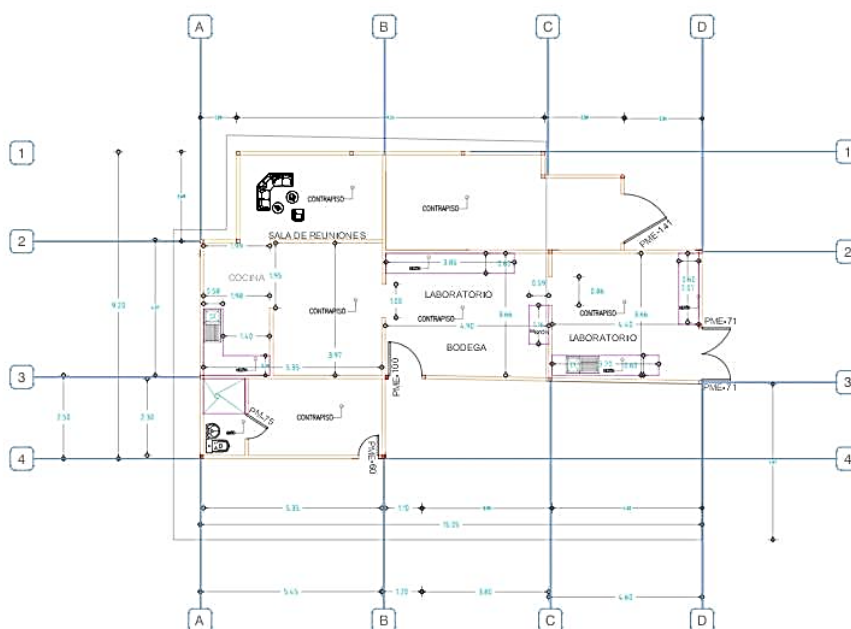


Maquinarias/Motocultor/Combustible, Bodega de Insumos Varios, Aula de Clases – Seguridad Industrial, Baño.

- **Sistema constructivo:** Similar al 10E-RECOD; estructura metálica con cubierta de planchas galvanizadas y mampostería de bloque.
- **Niveles de piso terminado:** NPT  $\pm 0.00$  a  $\pm 0.12$  m.
- **Modulación estructural:** 6 ejes transversales (A-B-C-D-E-F) y 4 ejes longitudinales (1-2-3-4).
- **Código catastral:** 097-0080-000-0-0-0. Campus: Gustavo Galindo Velasco.

## Ilustración 2

10BE RECOD Laboratorio de Mantenimiento Automotriz



### 2.1.2 Fase 2: Clasificación de Materiales

Se realizó inspección física de ambas edificaciones para validar la información documental e identificar in situ los materiales empleados. Se estableció un inventario detallado utilizando fichas técnicas estandarizadas para cada elemento constructivo y fotografías de registro. Con base en los planos arquitectónicos los materiales, se clasificaron según la siguiente taxonomía circular:

**Tabla 3**

*Estrategia de clasificación de materiales*

<b>Categoría</b>	<b>Definición</b>	<b>Estrategia EC (9R)</b>
<b>Nuevo (N)</b>	Material adquirido como insumo virgen para esta construcción.	No aplica (lineal)
<b>Reutilizado (RU)</b>	Componente empleado sin transformación significativa, proveniente de otra obra o estructura.	Reutilizar (R3)
<b>Reciclado (RC)</b>	Material que fue reprocesado para obtener materia prima secundaria.	Reciclar (R7)
<b>Reaprovechado (RA)</b>	Material recuperado con mínima reacondicionamiento para uso equivalente.	Reparar/Renovar (R4-R5)

*Nota.* La clasificación de materiales se utilizó tomando como base las 9R's

### 2.1.3 Fase 3: Estimación de Materiales Circulares

A partir del inventario, se estimarán los volúmenes y pesos de cada material, utilizando los planos arquitectónicos como fuente primaria de medición.

**Tabla 4**

*Inventario de materiales del edificio 10E-RECOD (99,86 m<sup>2</sup>)*

<b>Material</b>	<b>Cant.</b>	<b>Ud.</b>	<b>Tipo</b>	<b>% Circ.</b>	<b>Costo Total 100% Nuevo (USD)</b>	<b>Costo Ahorro (USD)</b>	<b>Costo Nuevo (USD)</b>
Estructura metálica (perfiles y vigas)	1850	kg	<b>Reaprovechado</b>	80%	\$ 5.180	\$ 4.144,00	\$ 1.036,00
Cubierta	105	m <sup>2</sup>	<b>Reaprovechado</b>	60%	\$ 1.942,50	\$ 1.165,50	\$ 777,00
Bloques de hormigón (150x200x400 mm)	2100	u	<b>Nuevo</b>	0%	\$ 945	\$ —	\$ 945,00
Mortero de pega y enlucido (cemento)	1.85	m <sup>3</sup>	<b>Nuevo</b>	0%	\$ 333	\$ —	\$ 333,00
Madera (encofrados)	210	pies-tabla	<b>Nuevo</b>	0%	\$ 252	\$ —	\$ 252,00
Ventanas con vidrio reciclado	8	m <sup>2</sup>	<b>Reutilizado</b>	100%	\$ 760	\$ 760,00	\$ —
Puertas metálicas reutilizadas	6	u	<b>Reutilizado</b>	100%	\$ 1.680	\$ 1.680,00	\$ —
Cerámica/baldosa reaprovechada (piso)	72	m <sup>2</sup>	<b>Reaprovechado</b>	20%	\$ 1.584	\$ 316,80	\$ 1.267,20
Tubería PVC	48	ml	<b>Reaprovechado</b>	50%	\$ 216	\$ 108,00	\$ 108,00
Instalaciones eléctricas	1	gbl	<b>Nuevo</b>	0%	\$ 2.800	\$ —	\$ 2.800,00
Contrapiso (hormigón)	9.99	m <sup>3</sup>	<b>Nuevo</b>	0%	\$ 1.448,55	\$ —	\$ 1.448,55
Pintura interior/exterior	1	gbl	<b>Nuevo</b>	0%	\$ 950	\$ —	\$ 950,00

<b>TOTAL 10E- RECOD</b>	<b>\$ 18.091,05</b>	\$ 8.174,30	\$ 9.916,75
---------------------------------	---------------------	-------------	-------------

*Nota.* Costo Total = precio referencia × cantidad (escenario todo nuevo). Costo Nuevo = Costo Total × (1 - %Circ.). Costo Ahorro = Costo Total × %Circ. Precios unitarios estimados a valores de mercado Ecuador 2026 con base en catálogo de la Cámara de la Construcción de Guayaquil y CAMICON. Datos de categoría y %Circ. obtenidos del levantamiento de campo

**Tabla 5**

*Inventario estimado de materiales del edificio 10F-RECOD (140,10 m<sup>2</sup>)*

<b>Material</b>	<b>Cant.</b>	<b>Ud.</b>	<b>Tipo</b>	<b>% Circ.</b>	<b>Costo Total 100% Nuevo (USD)</b>	<b>Costo Ahorro (USD)</b>	<b>Costo Nuevo (USD)</b>
Estructura metálica (perfiles y vigas)	2600	kg	<b>Reaprovechado</b>	80%	\$ 7.280	\$ 5.824,00	\$ 1.456,00
Cubierta	148	m <sup>2</sup>	<b>Reutilizado</b>	0%	\$ 2.738	\$ —	\$ 2.738,00
Bloques de hormigón (150x200x400 mm)	2950	u	<b>Recuperado</b>	0%	\$ 1.327,5	\$ —	\$ 1.327,50
Mortero de pega y enlucido (cemento)	2.6	m <sup>3</sup>	Nuevo	0%	\$ 468	\$ —	\$ 468,00
Madera (encofrados)	295	pies-tabla	<b>Reaprovechado</b>	20%	\$ 354	\$ 70,80	\$ 283,20
Ventanas con vidrio	10	m <sup>2</sup>	<b>Reutilizado</b>	100%	\$ 950	\$ 950,00	\$ —
Puertas metálicas reutilizadas	8	u	<b>Reaprovechado</b>	100%	\$ 2.240	\$ 2.240,00	\$ —

Cerámica/baldosa reaprovechada	85	m <sup>2</sup>	<b>Reaprovechado</b>	15%	\$ 1.870	\$ 280,50	\$ 1.589,50
Tubería PVC	65	ml	Nuevo	50%	\$ 292,5	\$ 146,25	\$ 146,25
Instalaciones eléctricas	1	gbl	Nuevo	0%	\$ 3.800	\$ —	\$ 3.800,00
Contrapiso	14.01	m <sup>3</sup>	Nuevo	0%	\$ 2.031,45	\$ —	\$ 2.031,45
Pintura interior/exterior	1	gbl	Nuevo	0%	\$ 1.400	\$ —	\$ 1.400,00
<b>TOTAL 10F-RECOD</b>					<b>\$ 24.751,45</b>	\$ 9.511,55	\$ 15.239,90

*Nota.* Costo Total = precio referencia × cantidad (escenario todo nuevo). Costo Nuevo = Costo Total × (1 - %Circ.). Costo Ahorro = Costo Total × %Circ. Precios unitarios estimados a valores de mercado Ecuador 2026. Datos de categoría y %Circ. obtenidos del levantamiento de campo.

#### 2.1.4 Fase 4: Identificación de Beneficios Ambientales

La Tabla 6 presenta la estimación de emisiones de CO<sub>2</sub>eq evitadas material por material, calculadas como: CO<sub>2</sub> evitado = Cantidad × [%Circ × (FE\_nuevo – FE\_circular)].

**Tabla 6**

*Estimación de emisiones de CO<sub>2</sub>eq evitadas por uso de materiales circulares en el CDTS*

Material / Categoría	Edif.	% Circ.	CO <sub>2</sub> Escenario 100% Nuevo (kg)	CO <sub>2</sub> Escenario Circular (kg)	CO <sub>2</sub> Evitado (kg)	Reducción (%)
Estructura metálica	10E	80%	3.422,5	758,50	2.664,00	78%
Cubierta metálica	10E	60%	1.890	806,40	1.083,60	57%

Bloques hormigón	10E	0%	441	441,00	—	0%
Madera encofrada	10E	0%	63	63,00	—	0%
Vidrio/ventanas	10E	100%	120	32,00	88,00	73%
Puertas metálicas	10E	100%	150	9,00	141,00	94%
Cerámica/baldosa	10E	20%	864	705,60	158,40	18%
Estructura metálica	10F	80%	4.810	1.066,00	3.744,00	78%
Cubierta metálica	10F	0%	2.664	2.664,00	—	0%
Bloques hormigón	10F	0%	619,5	619,50	—	0%
Madera encofrada	10F	20%	88,5	72,60	15,90	18%
Vidrio/ventanas	10F	100%	150	40,00	110,00	73%
Puertas metálicas	10F	100%	200	12,00	188,00	94%
Cerámica/baldosa	10F	15%	1.020	879,80	140,20	14%
<b>TOTAL CO<sub>2</sub></b>	<b>Ambos</b>		<b>16.502,5 kg</b>	8.169,40	8.333,10	50.5%

*Nota.* CO<sub>2</sub> evitado = Cantidad × [%Circ × (FE\_nuevo – FE\_circular)]. Solo materiales con factores de emisión verificados (ICE v3.0 y Ecoinvent v3.9). Elaboración propia.

El CO<sub>2</sub> evitado total para el CDTS asciende a 8.333,1 kg, con una reducción del 50,5% respecto al escenario de referencia con todos los materiales nuevos. Esta cifra equivale al secuestro de aproximadamente 16 árboles tropicales adultos durante 25 años (FAO, 2020). Los materiales de mayor impacto son la estructura metálica y la cubierta, que concentran el mayor volumen y los factores de emisión más altos.

### **2.1.5 Fase 5: Propuesta de Indicadores**

Con base en los resultados obtenidos, se formuló un conjunto de indicadores de circularidad estandarizados y un protocolo metodológico de aplicación para futuros proyectos

de construcción sostenible, alineado con las normas ISO 20400 (Compras sostenibles) y los marcos de *reporting* de circularidad reconocidos internacionalmente.

**Tabla 7**

*Indicadores de Circularidad Propuestos para proyectos de construcción sostenible*

#	Indicador	Fórmula / Definición	Unidad
I-1	ICM (costo)	$\Sigma \text{ Costo Ahorro} / \Sigma \text{ Costo Total} \times 100$	%
I-2	ICM (ítems)	$\text{N}^\circ \text{ ítems con \%Circ} > 0 / \text{N}^\circ \text{ ítems totales} \times 100$	%
I-3	CO <sub>2</sub> evitado/m <sup>2</sup>	$\text{CO}_2 \text{ evitado total} / \text{Área construida total}$	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>
I-4	Ahorro económico/m <sup>2</sup>	$\Sigma \text{ Costo Ahorro} / \text{Área total}$	USD/m <sup>2</sup>
I-5	Fracción carbono circular	$\text{CO}_2 \text{ esc. circular} / \text{CO}_2 \text{ esc. nuevo} \times 100$	%

*Nota.* FDR = Factor de Diversión de Residuos; I-5: fracción de carbono que permanece en el escenario circular respecto al escenario todo nuevo. Elaboración propia.

## **Capítulo 3**

### 3.1 Resultados y Análisis

#### 3.1.1 Cálculo del Índice de Circularidad de Materiales

La Tabla 8 muestra que el ICM ponderado por costo del CDTS es 41,3%, por tanto el 41,3% del valor total de referencia de los materiales corresponde al ahorro generado por el uso de fuentes secundarias.

El edificio 10E-RECOD presenta un mayor nivel de circularidad (45,2%) en comparación con el 10F-RECOD (38,4%), por el mayor porcentaje de circularidad de su estructura metálica y su cubierta.

**Tabla 8**

*Indicadores de Circularidad Propuestos para proyectos de construcción sostenible*

<b>Indicador</b>	<b>10E-RECOD</b>	<b>10F-RECOD</b>	<b>TOTAL CDTS</b>
Área construida (m <sup>2</sup> )	99,86	140,10	239,96
Costo total 100% nuevo (USD)	\$ 18.091,05	\$ 24.751,45	\$ 42.842,5
Costo Nuevo (USD)	\$ 9.916,75	\$ 15.239,90	\$ 25.156,65
Costo ahorro por Circularidad (USD)	\$ 8.174,30	\$ 9.511,55	<b>\$ 17.685,85</b>
ICM ponderado por costo (%)	45,2%	38,4%	<b>41,3%</b>
Ahorro por m <sup>2</sup> construido (USD/m <sup>2</sup> )	\$ 81,86	\$ 67,89	<b>\$ 73,70</b>
Ítems con componente circular (#)	6 de 12	6 de 12	12 de 24

*Nota.* ICM (%) =  $(\Sigma \text{Costo Ahorro} / \Sigma \text{Costo Total}) \times 100$ . Costo Ahorro = valor que habría correspondido a los materiales circulares si se los hubiera adquirido como nuevos a precios Ecuador 2026. Elaboración propia.

El Costo Ahorro total generado por el uso de materiales circulares en el Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable a USD 17.685,85, equivalente a USD 73,70 por m<sup>2</sup> construido. Por tanto, el Costo Nuevo representó el 58,7% del Costo Total de referencia, mientras que el 41,3% restante fue cubierto mediante materiales provenientes de fuentes secundarias.

### 3.1.2 Beneficios Ambientales

**Tabla 9**

*Beneficios ambientales por edificación*

<b>Indicador Ambiental</b>	<b>10E-RECOD</b>	<b>10F-RECOD</b>	<b>Total CDTS</b>
<b>CO<sub>2</sub> evitado total (kg)</b>	4.135,00 kg	4.198,10 kg	8.333,10 kg
<b>CO<sub>2</sub> evitado por m<sup>2</sup> (kg/m<sup>2</sup>)</b>	41,40 kg/m <sup>2</sup>	30,0 kg/m <sup>2</sup>	34,70 kg/m <sup>2</sup>
<b>Reducción relativa de carbono incorporado (%)</b>	59,5%	43,9%	50,5%
<b>Equivalente ambiental (árboles / 25 años)</b>	≈ 8	≈ 8	≈ 16

*Nota.* Equivalencia basada en capacidad de secuestro de árbol tropical adulto de 21 kg CO<sub>2</sub>/árbol/año (FAO, 2020). Elaboración propia.

### 3.1.3 Indicadores de Circularidad Propuestos

**Tabla 10**

*Indicadores de Circularidad Propuestos para Proyectos de Construcción Sostenible en la Universidad.*

#	Indicador	Fórmula / Definición	Unidad	Valor CDTS
I-1	ICM (costo)	$\Sigma \text{Costo Ahorro} / \Sigma \text{Costo Total} \times 100$	%	41,3%
I-2	ICM (ítems)	$N^{\circ} \text{ ítems con \%Circ} > 0 / N^{\circ} \text{ ítems totales} \times 100$	%	50,0%
I-3	CO <sub>2</sub> evitado/m <sup>2</sup>	CO <sub>2</sub> evitado total / Área construida total	kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>	34,7 kg/m <sup>2</sup>
I-4	Ahorro económico/m <sup>2</sup>	$\Sigma \text{Costo Ahorro} / \text{Área total}$	USD/m <sup>2</sup>	\$ 73,70
I-5	Fracción carbono circular	$\text{CO}_2 \text{ esc. circular} / \text{CO}_2 \text{ esc. nuevo} \times 100$	%	49,5%

*Nota.* FDR = Factor de Diversión de Residuos; I-5: fracción de carbono que permanece en el escenario circular respecto al escenario todo nuevo. Elaboración propia.

### 3.1.4 Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Este proyecto contribuye directamente a cuatro Objetivos del Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas.

**Tabla 11***Alineación del Proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible*

<b>ODS</b>	<b>Meta principal</b>	<b>Contribución del proyecto</b>
<b>ODS 11</b>	Ciudades y Comunidades Sostenibles	Promueve prácticas de construcción sostenible en infraestructura universitaria, contribuyendo a comunidades más resilientes y eficientes en el uso de recursos.
<b>ODS 12</b>	Producción y Consumo Responsables	Cuantifica y documenta la reutilización y reciclaje de materiales, apoyando la gestión sostenible de recursos naturales y la reducción de residuos de construcción.
<b>ODS 13</b>	Acción por el Clima	La cuantificación de CO <sub>2</sub> evitado contribuye a la medición y reporte de mitigación de emisiones GEI en el sector de la construcción a nivel institucional.
<b>ODS 4</b>	Educación de Calidad	Genera conocimiento técnico aplicado sobre economía circular en construcción, fortaleciendo las capacidades investigativas de la institución educativa y su liderazgo académico regional.

*Nota.* Elaboración propia con base en Agenda 2030 de las Naciones Unidas

## Capítulo 4

## **4.1 Conclusiones y recomendaciones**

### **4.1.1 Conclusiones**

- Se identificaron y clasificaron los materiales del Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable en cuatro categorías: nuevos, reutilizados, reciclados y reaprovechados, como se detalla en las Tablas 4 y 5, determinando que 12 de los 24 ítems constructivos provienen de fuentes secundarias, siendo la estructura metálica reaprovechada y las puertas y ventanas reutilizadas los elementos de mayor aporte circular.
- A partir de la cuantificación de volúmenes y pesos detallados en las Tablas 4 y 5, se estimó un ICM ponderado del 41,3% para el Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable (45,2% en el edificio 10E-RECOD y 38,4% en el 10F-RECOD, según Tabla 8), confirmando un nivel moderado-alto de circularidad en la construcción.
- Conforme a los resultados presentados en la Tabla 6 y Tabla 9, el uso de materiales circulares generó un ahorro económico del 41,3% respecto al costo total de referencia con materiales nuevos y una reducción del 50,5% en las emisiones de CO<sub>2</sub>eq incorporado frente al escenario convencional.
- Se formularon cinco indicadores estandarizados de circularidad: ICM por costo, ICM por ítems, CO<sub>2</sub> evitado por m<sup>2</sup>, ahorro económico por m<sup>2</sup> y fracción de carbono circular, detallados en la Tabla 10, aplicables como base metodológica replicable para la evaluación de futuros proyectos de construcción sostenible en la institución.

### **4.1.2 Recomendaciones**

- Se recomienda a la administración del Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable adoptar el protocolo de inventario y la taxonomía de economía circular desarrollados en este proyecto para todas las intervenciones futuras en el campus. La sistematización de

datos desde la fase de desmontaje facilitará la creación de un inventario de materiales que permitirá identificar, clasificar y cuantificar los materiales circulares.

- Considerando que el Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable no solo es circular en su infraestructura, sino también en su equipamiento operativo (máquinas y equipos de laboratorio), se recomienda, realizar el cálculo de Índice de Circularidad de Equipamiento, complementando el Índice de Circularidad de la Construcción proporcionando una visión integral de la circularidad de la infraestructura.
- Se identificó una discrepancia entre la documentación arquitectónica inicial y la infraestructura ejecutada, específicamente en un área anexa (Laboratorio de Prototipado) no catastrada en los planos analizados. Se recomienda realizar un levantamiento técnico para asegurar que futuros cálculos de indicadores de sostenibilidad incluyan la totalidad de la infraestructura que conforma el Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable. Dado que esta área representa un porcentaje considerable de la infraestructura metálica del centro.

## Referencias

Carvajal, G. (2022). Estudio comparativo del índice de circularidad en sistemas de fachadas. *upcommons.upc.edu*.

<https://upcommons.upc.edu/server/api/core/bitstreams/c892d6c5-0fd5-4abb-934f-a66f0e314f5d/content>

Correa, Á. C. (2022). Desarrollo de una guía y catálogo de aplicación de economía circular para la construcción en Chile. *Repositorio Universidad de Chile*.

<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/192605>

David, J., Mosquera, L., & Buitrago, A. Á. (2025). Nuevos materiales para la construcción sostenible: Una revisión sistemática de la literatura (2021–2025). *Repositorio UNILIBRE*.

<http://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/31580>

Duran-Navarrete, V., & sustentable, R. G.-A. (2024). Integración de estrategias de circularidad al diseño arquitectónico mediante BIM. *SciELO Chile*.

<https://doi.org/10.29057/est.v10iEspecial.13580>

Fonseca, V. M., & Hurtado, G. P. (2025). Evaluación del uso de plástico reciclado como material de construcción en Colombia: retos y oportunidades. *Repositorio EAN*.

<https://repository.universidadean.edu.co/entities/publication/24c906d5-3d1b-4586-abd1-0c9ee92da4c6>

GAMBOA, N. (2023a). Del diseño circular a la materialidad regenerativa. *Repositorio*

*Universidad de México*. <https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/679797b0-417a-4b20-bddf-28b7519ebcd8/content>

GAMBOA, N. (2023b). Universidad Nacional Autónoma de México Posgrado De Diseño

Industrial Área De Tecnología Del diseño circular a la materialidad. *ru.dgb.unam.mx*.

<https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/995a145e-ab4e-4aa1-85f5-3622f8ad557e/content>

López, E. H. (2026). Arquitectura y construcción circular, aplicado a un sistema de envolvente de una vivienda unifamiliar en la ciudad de Cuenca. *Repositorio Dspace UAZUAY*. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/9c4796ae-b322-4ec4-9af1-1938d7c63317>

Montero, C. P., Jiménez, A., Justo, R., & Navarro, G. (2021). Propuesta de acciones para la circularidad de los residuos de construcción y demolición en los campus de la Universidad Politécnica de Madrid. *Repositorio Universidad Politécnica de Madrid Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural*. <https://oa.upm.es/id/eprint/68922>

Morales, S. R. (2022). Camino Revier: diseño de sistema urbano de transición hacia la circularidad de residuos de construcción y demolición (RCD). *tesis.pucp.edu.pe*. <https://tesis.pucp.edu.pe/bitstreams/09bdadf3-26ff-4653-b60d-e0e25ed72a04/download>

Olivares, D. R. (2025). Desarrollo inicial de protocolos estandarizados para la reutilización del acero estructural en proyectos de construcción circular. *Revista UPCOMMONS UPC*. <https://upcommons.upc.edu/entities/publication/4c08ba8a-0207-41cc-b407-2a4e4f1ea414>

Oviedo, E. O. (2019). Adopción de prácticas de economía circular para mejorar la competitividad empresarial: un enfoque en empresas de construcción de vivienda- estudio de caso en. *Repositorio UNAL*. <https://repositorio.unal.edu.co/items/051046ac-8384-4c9f-8981-9ecb60ce5825>

- Ramírez, G., & Delvasto, S. (2025). Impacto ambiental de los sistemas tecnológicos de construcción en Colombia. *ojs.revistadelos.com*.  
<https://doi.org/10.55905/rdelosv18.n68-176>
- Riquelme, P. T. (2025). Selección y evaluación de materiales de construcción de baja huella de carbono. *Repositorio Universidad Politécnica de Cartagena*.  
<https://repositorio.upct.es/entities/publication/8346ab50-5704-421f-82e2-2c4dab342ed6>
- Rúa, M. D. (2024). Propuesta de criterios para la incorporación de materiales reciclados de Residuos de Construcción y Demolición–RCD–en las obras públicas del Distrito Especial de. *Biblioteca digital UDEA*.  
<https://bibliotecadigital.udea.edu.co/entities/publication/fb960b60-ba9a-4af2-9919-78121626f3ad>
- Serrano, A., Quesada Molina, F., López Catalán, M., Guillen Mena, V., & Orellana Valdez, D. (2020). Sobre la evaluación de la sostenibilidad de materiales de construcción. *dialnet.unirioja.es*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5227715>
- Vallejo, P., & Yajnes, M. (2025). Circularidad como alternativa sostenible en la autoconstrucción de viviendas en zonas vulnerables de Latinoamérica. *Revista de análisis Dialnet unirioja*, 27. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2025.27.5704>
- Vidales Barriguete, A., Vitiello, V., Piña Ramirez, C., & Aguilera Benito, P. (2024). Construcción sostenible y economía circular: innovación en materiales para reducir impactos ambientales. *Revista RIARTE*.  
<https://www.riarte.es/handle/20.500.12251/3468>
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/S11367-016-1087-8>

## Apéndice A

### Registro Fotográfico de Circularidad de Materiales del Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable.

#### ETAPA CONSTRUCTIVA



## ESTADO ACTUAL

### **10F-RECOD: Laboratorio de Mantenimiento y Prueba Automotriz**



## 10E-RECOD: Laboratorio y Administración



## Laboratorio de Prototipado

