

**DECONSTRUCCIÓN: ALTERNATIVA PARA CONTRIBUIR A VIABILIZAR LA
ECONOMÍA CIRCULAR EN EL SUBSECTOR DE LAS EDIFICACIONES**

Ing. GLORIA STELLA RAMIREZ ESCOBAR, MSc.

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERIA DE MATERIALES
DOCTORADO EN INGENIERÍA ÁREA DE ÉNFASIS EN
INGENIERÍA DE MATERIALES
GRUPO DE INVESTIGACIÓN MATERIALES COMPUESTOS
SANTIAGO DE CALI – VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA
2025**

**DECONSTRUCCIÓN: ALTERNATIVA PARA CONTRIBUIR A
VIABILIZAR LA ECONOMÍA CIRCULAR
EN EL SUBSECTOR DE LAS EDIFICACIONES**

Ing. GLORIA STELLA RAMIREZ ESCOBAR, MSc

**Documento de tesis para optar por el título de Doctor en Ingeniería Área de
Énfasis en Ingeniería de Materiales**

Ing. SILVIO DELVASTO ARJONA, MSc, Dr. –Ing. - Director

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERIA DE MATERIALES
DOCTORADO EN INGENIERÍA ÁREA DE ÉNFASIS EN
INGENIERÍA DE MATERIALES
GRUPO DE INVESTIGACIÓN MATERIALES COMPUESTOS
SANTIAGO DE CALI – VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA
2025**

TABLA DE CONTENIDO

ACRONIMOS.....	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiv
DEDICATORIA	xvi
IN MEMORIAM	xvi
AGRADECIMIENTOS	xvii
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	5
1.1. Un gran problema: Residuos de Construcción y Demolición	7
1.2. Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos del Distrito Especial de Santiago de Cali ...	9
1.3. Árbol del Problema de los RCD.....	10
2. OBJETIVOS Y PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO	12
2.1. Objetivo general	12
2.2. Objetivos específicos	12
2.3. Árbol de objetivo	12
2.4. Metodología	14
2.4.1.Revisión bibliográfica	15
2.4.2.Metodología para el desarrollo del diagnóstico del problema de investigación	16
2.4.3.Análisis de la información y caracterización del sistema de operación para la deconstrucción	16
2.4.4.Análisis de las propiedades y características de los elementos de construcción deconstruibles	16
2.5. Indicadores ambientales relacionados con el objetivo general	16
2.6. Impactos esperados y alcance	16
2.7. Contribución al conocimiento y otros resultados.....	17
2.7.1.Contribución al conocimiento	17
2.7.2.Otros resultados.....	18
2.7.3.Estancia académica	19
3. MARCO CONCEPTUAL Y ANTECEDENTES	20
3.1. Residuos de construcción y demolición.....	20
3.2. Elementos de construcción	20
3.3. Coordinación modular y/o dimensional.....	21
3.4. Prefabricación	22
3.5. Machihembrado en elementos de construcción.....	24
3.6. Diseño modular y la construcción prefabricada	25

3.7. Sistemas de operaciones o de construcción	27
3.7.1. Sistema de construcción tradicional con muros de ladrillo, adobe o tapial.....	28
3.7.2. Sistema de construcción con mampostería	28
3.7.3. Sistema de construcción mixto con elementos prefabricados.....	29
3.7.4. Sistema de construcción aporticado.....	30
3.7.5. Sistemas de construcción con concreto monolítico (concreto reforzado).....	30
3.7.6. Sistema de construcción 100% con elementos de concreto prefabricado y/o desmontable	31
3.8. Economía circular (EC) en procesos de construcción y de deconstrucción	31
3.9. Diseño para la deconstrucción (DfD).....	33
3.10. Nuevas tecnologías en la industria de la construcción	34
3.11. Recuperación, reutilización y reciclaje de los RCD.....	36
3.12. Deconstrucción	37
3.13. Reconstrucción y segundo uso de edificaciones deconstruibles.....	40
3.14. Marco normativo y legal	42
3.14.1. China.....	44
3.14.2. España	45
3.14.3. Países Bajos	49
3.14.4. Estados Unidos de América (EE. UU.)	51
3.14.5. México	53
3.14.6. Brasil	56
3.14.7. Chile	59
3.14.8. Marco Legal y Normativo en Colombia	62
3.14.9. Marco normativo para los proyectos de vivienda en Colombia	70
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	74
4.1. Modelo participativo con EC.....	74
4.2. Desmonte escalonado de edificaciones con DfD.....	77
4.3. Características de los sistemas constructivos	78
4.3.1. Características del sistema de construcción tradicional con muros de ladrillo, adobe o tapial	79
4.3.2. Características del sistema de construcción con mampostería	79
4.3.3. Características del sistema de construcción mixto con elementos prefabricados (MCP) .	80
4.3.4. Características del sistema de construcción aporticado (AC)	81
4.3.5. Características del sistema de construcción con concreto monolítico (concreto reforzado) (CM)	81
4.3.6. Características del sistema de construcción 100% con elementos de concreto prefabricado y/o desmontable (TPID)	82
4.4. Indicadores de impactos ambientales en sistemas de construcción	83
4.5. Propuesta de indicadores de impacto ambiental cuantificables en procesos constructivos ...	84

4.6. Afectación ambiental de los sistemas de construcción actuales.....	88
4.7. Sistemas actuales de construcción de edificaciones para vivienda en el Distrito Especial de Santiago de Cali y los municipios de Palmira, Jamundí, Yumbo y Candelaria	89
5. CASOS DE SISTEMAS DE CONSTRUCCIÓN ANALIZADOS	91
5.1. Proyecto Manzanares, Constructora Bolívar, Candelaria	91
5.2. Proyecto El Laguito, Jamundí.....	94
5.2.1. Análisis sistema de construcción o de operaciones con mampostería para vivienda de dos plantas (Jamundí).....	95
5.2.2. Análisis sistema de construcción o de operaciones con prefabricados tradicionales para vivienda de dos plantas (Jamundí)	95
5.2.3. Análisis sistema de construcción o de operaciones con prefabricados con adición de RCD para vivienda de dos plantas (Jamundí)	96
5.2.4. Análisis sistema de construcción o de operaciones con mampostería del conjunto residencial construido en el sector de Bochalema (Distrito Especial de Santiago de Cali).....	98
5.2.5. Análisis sistema de construcción o de operaciones con prefabricados y prefabricados con adición de RCD del conjunto residencial construido en el sector de Bochalema (Distrito Especial de Santiago de Cali).....	99
5.2.6. Análisis sistema de construcción o de operaciones en concreto monolítico para una torre de apartamentos en el Distrito Especial de Santiago de Cali.....	100
5.2.6.1. Mortero de repello	105
5.2.6.2. Estuco	106
5.2.6.3. Vidrio (ventas y puertas).....	106
5.2.6.4. Aluminio.....	107
5.2.6.5. Madera (MDF)	108
5.2.6.6. Piso cerámico (porcelanato)	108
5.2.6.7. Pintura	109
5.2.6.8. Panel yeso (Drywall).....	109
5.2.6.9. Concreto.....	110
5.2.6.10. El peso del acero en la superestructura.....	110
5.2.6.11. Peso total de la superestructura	110
5.2.6.12. Volumen de concreto calculado para la cimentación (subestructura):.....	110
5.2.6.13. Peso del acero de refuerzo en la estructura (superestructura y bases)	111
5.2.6.14. Huella de carbono del concreto	112
5.2.6.15. Relación carga muerta/área construida	112
5.2.6.16. Transporte de materiales	112
5.2.6.17. Energía operacional en el proceso de construcción.....	113
5.2.6.18. Residuos de construcción y de demolición (RCD)	113
5.2.6.19. Huella de carbono del edificio por metro cuadrado construido.....	114

6. SISTEMA PROPUESTO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICACIONES

DECONSTRUIBLES	117
6.1. Componentes principales del sistema de operaciones del subsector de edificaciones propuesto	119
6.2. Criterios de éxito del sistema de operaciones del subsector de edificaciones desde su DfD propuesto	120
6.3. Desafíos para la implementación del sistema de operaciones del subsector de edificaciones con el DfD y los principios de la EC propuesto.....	121
6.4. Implementación del sistema de operaciones para el desarrollo de edificaciones con DfD y principios de EC propuesto. Caso de aplicación para proyectos de vivienda rural, desarrollado e implementado por la compañía PREMOLDEADOS SAS.....	122
6.4.1. Logros del Proyecto “Vivir”	123
6.4.2. Limitaciones del Proyecto “Vivir”	125
6.4.3. Sistema estructural y módulos de división de espacios del Proyecto “Vivir”	127
6.4.4. Elementos de construcción modulares, prefabricados y estandarizados del “Proyecto Vivir”.....	127
6.4.4.1. Cimientos del sistema.....	128
6.4.4.1.1. Detalles del diseño de los cimientos	129
6.4.4.1.2. Instalación en obra de los cimientos	129
6.4.4.2. Placas de concreto	131
6.4.4.2.1. Detalles del diseño de las placas de concreto	131
6.4.4.2.2. Instalación en obra de las placas de concreto	131
6.4.4.3. Conexiones metálicas embebidas	132
6.4.4.3.1. Detalles del diseño de las conexiones metálicas embebidas	132
6.4.4.3.2. Instalación en obra de las conexiones metálicas embebidas	132
6.4.4.4. Estructura metálica del techo.....	133
6.4.4.4.1. Detalles del diseño de la estructura metálica del techo.....	133
6.4.4.4.2. Instalación en obra de la estructura metálica del techo.....	133
6.4.4.5. Piso adoquinado de concreto	133
6.4.4.5.1. Detalles del diseño del piso adoquinado de concreto (NTC 2017)	134
6.4.4.5.2. Instalación en obra del piso adoquinado de concreto	134
6.4.5. Etiquetado de los elementos de construcción modulares, prefabricados estandarizados del “Proyecto Vivir”.....	134
6.4.6. Actividades para la construcción de la vivienda del “Proyecto Vivir” con el sistema de operaciones propuesto.....	137
6.4.7. Deconstrucción y reutilización de los elementos de construcción del “Proyecto Vivir” ...	140
6.5. Implementación residencial del sistema de operaciones del subsector de edificaciones propuesto.	141
6.5.1. Detalles del sitio	141
6.5.2. Características del diseño	141

6.5.3. Propuestas de mejora	142
6.5.4. Desafíos	144
6.6. Éxito del sistema frente a los objetivos originales de la investigación.....	144
6.7. Análisis de emisiones de CO ₂ de la casa prototipo del “Proyecto Vivir”	145
6.7.1. Huella de carbono del concreto	145
6.7.2. Huella de carbono de mortero de repello.....	145
6.7.3. Huella de carbono del estuco	145
6.7.4. Huella de carbono de vidrio en ventanas y puertas	146
6.7.5. Huella de carbono de las partes metálicas en ventanas y puertas	146
6.7.6. Huella de carbono del acero.....	147
6.7.7. Huella de carbono de La madera (MDF)	148
6.7.8. Huella de carbono piso cerámico (porcelanato).....	148
6.7.9. Huella de carbono pintura	148
6.7.10. Huella de carbono panel yeso	149
6.7.11. Huella de carbono del UPVC	149
6.7.12. Huella de carbono transporte de materiales	149
6.7.13. Huella de carbono energía operacional en el proceso de construcción	149
6.7.14. Huella de carbono RCD	149
6.7.15. Huella de carbono del concreto y el acero de cimentación	149
6.7.16. Huella de carbono de la casa por metro cuadrado construido	150
6.8. Análisis estimado de emisiones de CO ₂ del “Proyecto Vivir”	151
7. VALORACIÓN DE LOS INDICADORES DE IMPACTO AMBIENTAL DEL MODELO	
CIRCULAR	153
7.1. Valoración de los indicadores del modelo circular para los sistemas tecnológicos de construcción	153
7.2. Limitaciones prácticas del prototipo “Vivir”	159
7.3. Escalabilidad del prototipo “Vivir”	159
7.4. Futuro del sistema de construcción 100% prefabricado	159
7.5. Lecciones aprendidas	160
CONCLUSIONES	161
RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES	165
ANEXOS	167
REFERENCIAS.....	169

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa Distrito Especial de Santiago de Cali y municipios cercanos.	8
Figura 2. Árbol del problema.	11
Figura 3. Árbol de objetivo.	13
Figura 4. Etapas metodológicas.	14
Figura 5. Acciones metodológicas con respecto a los objetivos.	15
Figura 6. Residuos de construcción y demolición.	20
Figura 7. Elementos de construcción prefabricados en edificio de parqueaderos (Sawgrass Mills, Sunrise, Florida, Estados Unidos).	23
Figura 8. Vivienda rural.	28
Figura 9. El Coliseo Romano, Italia - Vivienda Rural con muros de mampostería, Cauca (Colombia).	29
Figura 10. Vivienda de Interés social construcción mixta con elementos prefabricados y componentes vaciados en sitio Valle del Cauca (Colombia).	29
Figura 11. Edificio en construcción (Distrito Especial de Santiago de Cali, Ciudad Jardín) con tecnología aporticada y elementos de mampostería de ladrillo de arcilla cocida.	30
Figura 12. Edificio Torre de Babilonia en construcción (Distrito Especial de Santiago de Cali, Av. Cañas Gordas).	31
Figura 13. Modelo circular en los procesos de construcción y deconstrucción.	33
Figura 14. Tecnologías aplicadas en la industria de la construcción.	35
Figura 15. Torre Nakagin Capsule Tokio.	40
Figura 16. Estructura de una edificación en el sur del Distrito Especial de Santiago de Cali.	42
Figura 17. Países con normativa para la implementación de la EC estudiados.	44
Figura 18. DfD para un modelo circular en los procesos de construcción y deconstrucción.	75
Figura 19. Abordaje y cuantificación del modelo participativo con principios de la EC.	76
Figura 20. Criterios para el éxito y aceptación del DfD.	78
Figura 21. Vivienda urbana Distrito Especial Santiago de Cali.	79
Figura 22. Hospital de San Juan de Dios, Santiago de Cali 1920 - Estado actual plazoleta de acceso 2019.	80
Figura 23. Casa construida de sistema mixto con prefabricados en urbanización de Sunrise, Florida, Estados Unidos.	80
Figura 24. En primer plano edificio en construcción con tecnología de concreto monolítico; al fondo se aprecian otros, ya construidos con la misma tecnología.	81
Figura 25. “Proyecto Vivir” Casa piloto sistema de construcción con elementos prefabricados 100% desmontables.	83
Figura 26. Proyecto Torre Jardines de Babilonia en el Distrito Especial de Santiago de Cali.	90
Figura 27. Edificaciones para vivienda- Proyecto Manzanares de Constructora Bolívar. Fuente:	92
Figura 28. Residuos Generados, Clasificados y Gestionados. Fuente.	93
Figura 29. Proyecto de Vivienda Unifamiliar C.R. Laguito – Jamundí.	94
Figura 30. Emisiones de CO ₂ con el método mampostería.	95
Figura 31. Emisiones de CO ₂ con el método prefabricados.	96
Figura 32. Emisiones de CO ₂ con el método prefabricados con adición de RCD.	97
Figura 33. Emisiones de CO ₂ con el método mampostería.	98
Figura 34. Emisiones de CO ₂ con el método prefabricados tradicionales y prefabricados con adición de RCD.	100
Figura 35. Edificio para vivienda, construido con concreto monolítico.	102
Figura 36. Edificio para vivienda, construido con concreto monolítico.	104
Figura 37. Plano de apartamento típico.	105
Figura 38. Características del DfD que consolidan los principios de la EC.	117
Figura 39. DfD para fortalecer la vida útil de las diversas capas de las edificaciones.	118

Figura 40. Componentes que dan viabilidad a una EC real.	119
Figura 41. Componentes que dan viabilidad a una EC real.	121
Figura 42. “Proyecto Vivir” Casa piloto sistema de construcción con DfD y los principios de la EC	123
Figura 43. Proyecto Vivir” sistema de construcción reticular con DfD.	123
Figura 44. “Proyecto Vivir” modular, flexible y deconstruible “.	125
Figura 45. Costos y propuestas del sistema constructivo.	126
Figura 46. “Proyecto Vivir” Elementos de construcción prefabricados.	127
Figura 47. Elementos de construcción modulares, prefabricados y estandarizados del “Proyecto Vivir”	128
Figura 48. Cimientos del sistema, prefabricados y estandarizados del “Proyecto Vivir”	129
Figura 49. Puntos de excavación y extracción de tierra del “Proyecto Vivir”.	130
Figura 50. Actividades del sistema de construcción con DfD “Proyecto Vivir”	140

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Reporte de los RCD generados por municipio	10
Tabla 2. Tipo y usos de la técnica del machihembrado	25
Tabla 3. Implosión vs. deconstrucción: análisis técnico comparativo	39
Tabla 4. Costos comparativos (USD/m ² , 2024)	39
Tabla 5. Reglamentación para la implementación de la EC en China.....	45
Tabla 6. Reglamentación para la gestión de residuos en España	46
Tabla 7. Reglamentación para la implementación de la EC en España:	48
Tabla 8. Regiones de España que ha incorporado la EC en sus políticas de desarrollo.	49
Tabla 9. Reglamentación para la implementación de la EC en EE. UU.	53
Tabla 10. Reglamentación para la implementación de la EC en México.....	55
Tabla 11. Reglamentación para la implementación de la EC en Brasil	57
Tabla 12. Reglamentación para el manejo de los RCD en Brasil.....	58
Tabla 13. Reglamentación clasificación de RCD y uso de áridos reciclados en Brasil.....	59
Tabla 14. Reglamentación clasificación de RCD y uso de áridos reciclados en Chile	60
Tabla 15. Reglamentación a nivel territorial para el manejo de residuos en Chile	60
Tabla 16. Reglamentación para la implementación de la EC en Chile.....	61
Tabla 17. Programas y Guías para el desarrollo de construcciones sostenibles, la generación y gestión de RCD en Colombia	64
Tabla 18. Reglamentaciones vigentes para la generación y gestión de RCD orientados hacia la EC en Colombia	65
Tabla 19. Leyes y normativas sobre el manejo de residuos sólidos.....	68
Tabla 20. Leyes y normativas para el buen uso de los recursos y el aprovechamiento de los RCD en el sector de la construcción.....	69
Tabla 21. Marco normativo para los proyectos de vivienda en Colombia	70
Tabla 22. Indicadores propuestos para valorar ambientalmente un sistema de operaciones o de construcción	86
Tabla 23. Referencias que avalan los resultados de los indicadores ambientales estimados por m ² para diversos sistemas de operación constructivos.....	87
Tabla 24. Impactos ambientales representativos del proyecto Manzanres	92
Tabla 25. Paralelo emisiones individuales y totales de CO ₂ proyecto de vivienda de dos plantas Jamundí.	94
Tabla 26. Emisiones individuales y totales de CO ₂ - proyecto conjunto residencial construido con el método de mampostería	98
Tabla 27. Emisiones individuales y totales de CO ₂ proyecto conjunto residencial construido con prefabricados y prefabricados con adición de RCD	99
Tabla 28. Huella de carbono de RCD por acciones a vertedero (por tonelada).....	114
Tabla 29. Huella de carbono de componentes del edificio al sur del Distrito Especial de Santiago de Cali kgCO ₂ eq/(m ² construido).....	115
Tabla 30. Indicadores ambientales valorados en huella de carbono para edificio de 16 pisos ..	116
Tabla 31. Elementos de construcción y accesorios necesarios para el "Proyecto Vivir"	136
Tabla 32. Peso del concreto casa unifamiliar prototipo de vivienda del "Proyecto Vivir" 53,42 m ² ..	145
Tabla 33. Peso del acero y del techo de UPVC de la casa unifamiliar prototipo de vivienda del "Proyecto Vivir"	148
Tabla 34. Huella de carbono kgCO ₂ eq/m ² construido de los componentes de la casa unifamiliar prototipo de vivienda del "Proyecto Vivir" 53,42 m ²	151
Tabla 35. Análisis estimado de emisiones de CO ₂ del "Proyecto Vivir" con sistema de construcción 100% prefabricado deconstruible-área: 53,5 m ²	152
Tabla 36. Análisis comparativo de las Emisiones de CO ₂ en Sistemas Constructivos para un Edificio de 16 pisos	154

Tabla 37. Indicadores ambientales estimados por m ² . sistemas constructivos para un edificio de 16 pisos.....	155
Tabla 38. Ponderación de los indicadores ambientales para los cinco Sistemas Constructivos de un Edificio de 16 pisos.....	156

ACRONIMOS

10R's: Repensar, Rediseñar, Recuperar, Reducir, Reutilizar, Reparar, Remanufacturar, Revalorizar, Reciclar y Reprocesar
ABAG: Asociación Brasileira de Agronegocio
ABRECON: Asociación Brasileira para Reciclaje de Residuos de Construcción
AC: Acumulación
AMDEL: Asociación de Municipalidades para el Desarrollo Económico Local (Chile)
AMSO: Área Metropolitana del Suroccidente
BBC: British Broadcasting Corporation
BIM: Building Information Modeling (Modelado de información de construcción)
CAMACOL: Cámara Colombiana de la Construcción
CANACEM: Cámara Nacional del Cemento
CBS: Estadísticas de los Países Bajos
CCCS: Consejo Colombiano de Construcción Sostenible
CDW: Construction and Demolition Waste
CEPAL: Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CIB: Consejo Internacional de la Construcción
CNDRC: Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma de China
CO₂: Dióxido de Carbono
CONPES: Consejo Nacional de Políticas Económica y Social
DANE: Departamento Administrativo Nacional de Estadística
DEI: Índice de Facilidad de Desamble
DfD: Diseño para la Deconstrucción
DfMA: Diseño para Fabricación y Montaje
DNP: Departamento Nacional de Planeación
DOL: Departamento de Trabajo de EE. UU
EC: Economía Circular
EDGE: Excellence in Design for Greater Efficiencies
EF: Efecto
EPA: Agencia de Protección Ambiental
EX: Extensión
FIFA: Federación Internacional de Fútbol Asociado
GIRS: Gestión Integral de Residuos Sólidos
I: Intensidad
ICONTEC: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación
INe: Instituto nacional de estadística
INN: Instituto Nacional de Normalización (Chile)
IoT: Internet de las Cosas
IPCO: Oficina de Innovación, Asociaciones y Comunicación
LCA: análisis automatizado del ciclo de vida
LEED: Leadership in Energy and Environmental
MMA: Ministerio del Medio Ambiente
MO: Momento
ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU: Organización de las Naciones Unidas

PAI: Plan de Acción Indicativo
PBL: Evaluación Ambiental de los Países Bajos
PE: Persistencia
PEI: Programa de Experiencias Internacionales
PGIRS: Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos
PMA: Programa de Manejo Ambiental
PND: Plan Nacional de Desarrollo
PR: Periodicidad
RB: Recuperabilidad
RCC: Residuo de Construcción Civil
RCD: Residuos de Construcción y Demolición
REP: Responsabilidad Extendida del Productor
RIVM: Instituto Nacional de Salud Pública y Medio Ambiente
RSC: Responsabilidad Social Corporativa
RSD: Residuos Sólidos Domiciliarios
RV: Reversibilidad
SI: Sinergia
TPID: Totalmente prefabricados industrializados desmontables
UE: Unión Europea
UPVC: Cloruro de Polivinilo no plastificado
VIP: Vivienda de Interés Prioritario
VIS: Vivienda de Interés Social
WFD: Waste Framework Directive (Directiva Marco sobre Residuos)

RESUMEN

La investigación doctoral, que se presenta en este documento, tuvo como objetivo estudiar los sistemas de operaciones del subsector de construcción de viviendas en la región conformada por el Distrito Especial de Santiago de Cali (Colombia) y su área de influencia (los municipios de Palmira, Jamundí, Yumbo y Candelaria) con el fin de proponer soluciones, basadas en criterios de deconstrucción, que permitan la viabilidad de la EC en este subsector. En esta región se generan entre 85.297 y 90.000 t/mes de RCD, que constituyen un indicador de la dinámica del sector constructor y de la afectación ambiental que este genera; lo anterior se aprecia al evaluar los sistemas constructivos bajo los lineamientos de EC con indicadores ambientales asociados a la huella de carbono. Es necesario continuar ejerciendo acciones para mitigar la huella de carbono con independencia del sistema constructivo que se use.

La reducción de RCD y la utilización de los que resulten en cualquier proceso va en la dirección correcta; esto se fundamenta en que elementos prefabricados con adición de RCD presentan un descenso de entre 30 y 50% de las emisiones incorporadas. Los sistemas mixtos con prefabricados evidencian una disminución del 20% en CO₂, mientras el sistema de concreto reforzado monolítico, predominante actualmente en las construcciones formales en Colombia, presenta una huella de carbono de 445 kgCO₂eq/m² y una generación de 32 kg/m² de RCD, calculadas para un edificio de 16 pisos, que son cifras comparables con las de estudios internacionales. Los resultados resaltan que el sistema de prefabricados, especialmente si es desmontable y reutilizable, es la opción más sostenible porque se facilita la reutilización de los componentes, reduce significativamente el volumen de los RCD y el impacto ambiental medido a través de su huella de carbono.

Como solución, se propone una tecnología de deconstrucción, con un diseño apropiado, DfD, para construir con elementos de construcción prefabricados y el uso de normas para la coordinación modular; en consecuencia, se consume menos masa en los materiales para componentes prefabricados, como el cemento de baja huella de carbono; elementos de construcción ensamblables, como Lego, que permiten el desensamblaje para dar un segundo uso después de la vida útil de un edificio, para ser utilizados en otro tipo de trabajo posterior. Se propone un tipo de solución tecnológica basada en el uso de elementos prefabricados, como el proyecto “Vivir”, que es más relevante para la vivienda social prioritaria. El proyecto “Vivir” es un prototipo de vivienda desarrollado por la empresa de prefabricación PREMOLDEADOS SAS. Este sistema deconstruible probablemente tendrá un impacto positivo en el entorno local al reducir la huella de carbono, que reportó 9.010 kgCO₂eq y 169 kgCO₂eq/m² de área construida, valores mucho más bajos que si se construyera con otras tecnologías de construcción no deconstruibles.

Palabras clave: Diseño para la Deconstrucción (DfD), Coordinación Modular, Construcción Prefabricada, Elementos Constructivos, Deconstrucción, Economía Circular (EC), Residuos de Construcción y Demolición (RCD), Huella de Carbono, Sistemas de construcción, Indicadores de Impacto Ambiental.

ABSTRACT

A doctoral research, presented in this document, aimed to study the systems of operations of the subsector of housing construction in the region comprised of the Special District of Santiago de Cali (Colombia) and its area of influence (the municipalities of Palmira, Jamundí, Yumbo, and Candelaria) in order to propose solutions, based on deconstruction criteria, that allow for the viability of the Circular Economy (CE) in this subsector. In this region, between 85,297 and 90,000 metric tons per month of Construction and Demolition Waste (CDW) are generated, which constitutes an indicator of the dynamics of the construction sector and its environmental impact. This is evident when evaluating the construction systems under the frameworks of Circular Economy (CE) with environmental indicators used to calculate the carbon footprint. It is necessary to continue taking actions to mitigate the carbon footprint regardless of the construction system used.

The reduction of Construction and Demolition Waste (RCD) and the utilization of those that result from any process is going in the right direction, this is supported by the finding that prefabricated elements with the addition of RCD shows a reduction of between 30 and 50% of the incorporated emissions. Mixed systems with prefabricated elements demonstrated a 20% decrease in CO₂, while the monolithic reinforced concrete system, currently predominant in formal constructions in Colombia, has a carbon footprint of 445 kgCO₂eq/m² and generates 32 kg/m² of RCD, calculated for a 16-story building, which are values comparable to those from international studies. The results highlight that the prefabricated system, especially if it is dismantlable and reusable, is the most sustainable option because it facilitates the reuse of components, significantly reduces the volume of RCD and the environmental impact measured through its carbon footprint.

As a solution, a deconstruction technology is proposed, with an appropriate design, as DfD, to build with prefabricated construction elements and the use of standards for modular coordination; in consequence, less mass is consumed in the materials for prefabricated components, such as, low footprint carbon cement; assembleable building elements, like Lego, that allow for disassembly to give a second use after the useful life of a building, to be used for undertaking another type of subsequent work. A type of technological solution based on the use of prefabricated elements is proposed, such as the “Vivir” project, that is more relevant for priority social housing. The “Vivir” project is a housing prototype developed by the prefabrication company PREMOLDEADOS SAS. This deconstructible system will likely have a positive impact on the local environment by reducing the carbon footprint that reported 9.010 kgCO₂eq and 169 kgCO₂eq/m² of built area, values much lower than if constructed with other non-deconstructible building technologies.

Keywords: Design for Deconstruction (DfD), Modular Coordination, Prefabricated Construction, Construction Elements, Deconstruction, Circular Economy (CE), Construction and Demolition Waste (CDW), Carbon Footprint, Construction Systems, Environmental Impact Indicators.

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi fortaleza en cada día, por iluminar mi camino con sabiduría y bendecirme con el don de la salud.

A mi hijo Nicolás, mi mayor tesoro y razón de ser, por tu amor inquebrantable y por estar siempre a mi lado.

A mi maestro Silvio Delvasto, por compartir no solo su conocimiento, sino también su humanidad.

A mi familia, hermanos, sobrinos, cuñados, tíos, primos, por ser el pilar que sostiene nuestros valores, por honrar el legado de nuestros padres y por ayudarme a ser quien soy.

A mis profesores, compañeros y amigos, a esa familia que la vida me regaló, por acompañarme en esta etapa de retos y hacer de cada aprendizaje una celebración.

IN MEMORIAM

En honor a mis padres **Jaime Ramírez y Mercedes Escobar**, a mi hermano **Carlos Ramírez Escobar**, quienes siempre fueron fuente de inspiración, sabiduría y fortaleza.

Aunque ya no estén a mi lado,
su amor, sus enseñanzas y su luz
siguen guiando cada paso que doy.

Este logro es un tributo a su legado,
a la gratitud que perdura más allá del tiempo
y al amor infinito que llevo en mi corazón.

Por siempre en mi memoria.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero y profundo agradecimiento a Dios por estar siempre presente en mi vida bendiciéndome grandemente en salud, sabiduría, disciplina y fortaleza para concluir esta etapa de mi vida. Gracias Dios, por todas las personas que hicieron posible este reto, por los que caminaron junto a mí para ser apoyo, inspiración y fortaleza. Gracias por demostrarme que el amor verdadero es generoso y lo entrega todo para que el otro se supere a sí mismo. “Gracias Gracias Gracias Dios”

Agradezco a mi hijo NICOLÁS OSPINA RAMIREZ, mi mejor compañero y apoyo en cada reto, en cada proyecto. Gracias por tu amor incondicional, tu lealtad y tu paciencia.

Agradezco a mi maestro al Dr. SILVIO DELVASTO ARJONA, por su dedicación, su tiempo y apoyo constante. Sus conocimientos, su paciencia y compromiso han sido fundamentales para mi éxito académico y profesional, esta tesis es un testimonio de su guía experta, generosa y amable. Gracias por ser un mentor excepcional e inigualable, por la confianza entregada y por las oportunidades recibidas antes y durante mi formación profesional. La amistad que usted me brinda, su apoyo y orientación me permiten hoy día fortalecerme como profesional y como persona, gracias por ser tan intelectual y humano al mismo tiempo.

Agradezco a la Profesora RUBY MEJÍA, directora del grupo de investigación GMC, por su apoyo y acogida desde el día uno cuando me presente para iniciar mis estudios de doctorado. Su invitación y acogida en eventos académicos me permitieron realizar dos estancias académicas internacionales. Su apoyo y orientación permanente para que cumpliera con todos los requisitos semestre a semestre, me reconocen hoy la oportunidad de culminar mis estudios. Gracias por todo y, por tanto.

Agradezco a la compañía PREMOLDEADOSA S.A.S., a sus directivos JUAN MANUEL BECERRA y ALEJANDRO BELTRÁN, por su interés, disposición y apoyo a este proyecto de investigación reflejados en la implementación del modelo propuesto al desarrollar un prototipo de vivienda con DfD y los principios de la EC denominado “Proyecto Vivir” y adoptar el eslogan “Sin Prefabricado no hay Deconstrucción...sin Deconstrucción no hay Circularidad”.

Agradezco a mis compañeros y amigos en mi instancia Doctoral en la Universidad del Valle, algunos de ellos me reconocieron como su docente de pregrado, lo que hizo más grato los momentos compartidos, su respeto, lealtad, sincera amistad, el apoyo y motivación brindada me dieron la valentía de continuar mis estudios; agradezco a cada uno de ustedes por ser tan especiales conmigo, por las explicaciones y acompañamiento en las materias propias de la carrera y en diversos temas, en especial quiero agradecer

a John A. Torres, Gustavo Acevedo, Yimmy Silva U, Estefanía Montoya, Carolina Perea, Raquel Guerrero, Rafael Robayo, William Valencia y Mónica Villaquiran, gracias por todo lo compartido.

Agradezco a todos los que hacen parte del grupo de profesores, laboratoristas y administrativos de la Escuela de Ingeniería de Materiales de la Universidad del Valle, por sus enseñanzas, su profesionalismo, su cariño y todo el tiempo compartido. A todos ustedes gracias por su acogida y por compartirme nuevos conocimientos. Cada día con ustedes ha sido una experiencia enriquecedora, un viaje de crecimiento y aprendizaje que siempre valoraré y que viví con alegría gracias a ustedes.

Comparto con ustedes estas frases que vienen muy acorde con lo trabajado y aprendido durante mi instancia Doctoral en la Escuela de Ingeniería de Materiales, de la Universidad del Valle:

Visionario a su época, Gaudí transmitió la necesidad y urgencia de crear ciudades y construcciones que convivan en armonía con el mundo natural.

“Cuando el edificio tiene simplemente lo que necesita con los medios disponibles, tiene carácter o dignidad que es lo mismo”.

“Para hacer las cosas bien es necesario: primero, el amor; segundo, la técnica”

“La originalidad consiste en el retorno al origen; así pues, original es aquello que vuelve a la simplicidad de las primeras soluciones”

“Todo lo que tiene armonía tiene vida, y cuando lo admiras parece que vuelve a nacer en ti”

“El arquitecto del futuro se basará en la imitación de la naturaleza, porque es la forma más racional, duradera y económica de todos los métodos”

Antoni Gaudí

INTRODUCCIÓN GENERAL

El sector construcción juega un papel fundamental en el desarrollo y avance de todas las civilizaciones, ya que busca mejorar la calidad de vida de las personas. Es una de las principales industrias, responsable de movilizar una gran cantidad de materias primas e insumos, de impulsar el crecimiento territorial y de crear fuentes de empleo. Sin embargo, esta industria también genera un gran impacto ambiental negativo, debido al uso de múltiples recursos naturales no renovables para la ejecución de las obras, a las grandes cantidades de residuos generados y al elevado consumo de energía, y, por ende, conduce a elevadas emisiones de CO₂. El Consejo Internacional de la Construcción (CIB) ha señalado que el desperdicio de estos recursos naturales se debe a procesos productivos ineficientes, al desplazamiento de suministros y a la ineficiencia en la utilización de insumos durante el desarrollo de la construcción (Conseil International du Bâtiment, 2021).

Hace 15 años ya se reconocía a nivel mundial que el sector de la construcción era responsable del 40% del consumo energético global, del uso del 30 % de las materias primas, del 25% de los residuos sólidos generados, del 25% del consumo de agua y del 12% de la ocupación del suelo. Como consecuencia de esta alta demanda de recursos, también contribuía con el 33% de las emisiones de gases de efecto invernadero (greenhouse gases-GHG) (De Meester *et al.*, 2009; Liu, Li and Yao, 2010). Esto hace necesario el desarrollo de actividades que estén orientadas hacia las 10R's de la EC definidas por (Potting *et al.*, 2017): repensar, rediseñar, recuperar, reducir, reutilizar, reparar, remanufacturar, revalorizar, reciclar y reprocesar; si estas actividades se cumplen, en forma integral, se puede afirmar que se observan efectivamente los criterios de la EC. De todos los sistemas tecnológicos de construcción, la deconstrucción de edificaciones se aproxima al cumplimiento de varias de las 10R's, que son pertinentes, en el sector de la construcción, asumiendo la extensión de su vida útil, y en el caso de una estructura de concreto diseñada para ser ensamblada o deconstruida, de acuerdo con el DfD (Eberhardt, Birgisdóttir and Birkved, 2019).

La industria de la construcción en Colombia estuvo posicionada como una de las más dinámicas de América Latina con una tasa de crecimiento anual compuesto de 7,4% para el período 2019-2023, y es una de las ramas de la economía con mayor participación en el PIB de Colombia (Proceso Invest in Bogotá, 2019), contribuyendo con un 6,5%. Esta contribución, en términos económicos, fue de COP 66,9 billones en el 2019, con una proyección al 2023 de COP 89,11 billones, que no se cumplió, pues para el año 2023 la construcción de viviendas presentó una caída muy notoria, para el tercer trimestre registró un decrecimiento del 7,7% frente al tercer trimestre del 2022, señaló Guillermo Herrera, presidente ejecutivo de la Cámara Colombiana de la Construcción. La disminución del 5% en el PIB en edificaciones se presenta por la disminución en el

desarrollo de proyectos de vivienda donde el 79% de estos proyectos son viviendas de interés social (VIS) (CAMACOL, 2023).

En el año 2018 el departamento del Valle del Cauca contaba con 4.475.886 habitantes de los cuales 2.935.972 residían en el Distrito Especial de Santiago de Cali y en los municipios aledaños: Palmira, Jamundí, Yumbo y Candelaria. Es decir, el 65.6% de la población del departamento se concentra en esta región (DANE, 2020), lo que hace que sea notable -en épocas de desarrollo normal del país- el incremento del desarrollo de proyectos de vivienda, y por lo tanto, la generación de RCD, los consumos de energía y de agua, y las emisiones de gases de efecto invernadero.

La generación de residuos es atribuida principalmente al crecimiento de la población urbana y a la conformidad de la sociedad que observa esta problemática bajo el concepto de "fuera de mi vista, fuera de mi mente", haciendo necesaria una Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS), que es un proceso complejo que involucra diversas tecnologías y disciplinas asociadas con el control de la generación, el manejo, almacenamiento, recolección, transferencia, transporte, procesamiento y disposición final de los residuos sólidos; estos procesos deben ser económicamente aceptables (Tchobanoglous et al, 2002). La gestión de residuos sólidos, que articula la dimensión ambiental con el componente de servicio público, constituye una prioridad en las políticas públicas tanto nacionales como regionales. En este contexto, resulta fundamental incorporar el enfoque de EC en los proyectos de vivienda desde su etapa de diseño, con el objetivo de reducir la generación y disposición RCD, promover su reutilización, extender la vida útil de los materiales, generar valor a través de los elementos reutilizados, prevenir la contaminación, y facilitar así el desarrollo sostenible y la protección del medio ambiente.

Los actuales métodos de construcción con fijaciones permanentes de sus elementos solo permiten al final de su uso implosiones y/o demoliciones destructivas que incrementan el volumen de residuos, la contaminación ambiental, el uso de materias primas vírgenes, no permiten una deconstrucción que se ajuste a los principios de la EC. Diseñar desde el inicio las edificaciones para su deconstrucción incrementará significativamente la recuperación de elementos de construcción para un segundo uso e impactará positivamente la economía y el medio ambiente. El concepto de deconstrucción debe incluirse desde el diseño del proyecto para que al final del primer ciclo de vida de una obra los elementos constructivos que la componen puedan ser desmontados para luego ensamblarlos y construir una nueva obra. Por lo tanto, el desperdicio de materiales que componen los elementos de construcción y la energía para su reprocesamiento o adecuación son menores y los elementos constructivos tendrán al final de este segundo ciclo de vida un nuevo uso, con lo cual se genera una serie de ciclos indefinidos. Esto conlleva a una reducción en la explotación de recursos naturales no renovables, al igual que en el consumo de energía y agua.

La deconstrucción, partiendo del DfD hasta el final de la vida útil de una edificación, será el camino ideal para lograr una verdadera EC en el sector de la Construcción. En el proceso de deconstrucción de un edificio, el 85% de su peso total representa los materiales que pueden ser reutilizados, reciclados, reprocesados, recuperados, revalorizados, algo que permitirá reducir el volumen de RCD y crear nuevas fuentes de empleo (Gaiker, 2007). Sin embargo, de alguna manera algunos volúmenes de residuos quedarán. El concepto de deconstruir se sintetiza, literalmente, como la separación de los subsistemas más pequeños de un sistema mayor, para luego integrarlos en un nuevo sistema, sin destruir los subsistemas que formaban parte del anterior para sintetizarlos posteriormente, que es lo que caracteriza al sistema constructivo actual.

El objeto de estudio en esta investigación doctoral comprende el Distrito Especial de Santiago de Cali y los municipios de Palmira, Jamundí, Yumbo y Candelaria, dada su estrecha relación por los procesos de mayor densificación de los núcleos residenciales y de conurbación urbana. Puerto Tejada se agregó a estos municipios vecinos, puesto que se integró al Área Metropolitana del Suroccidente (AMSO), entidad administrativa que se conformó tras la aprobación de una consulta popular en noviembre de 2024. El Distrito Especial de Santiago de Cali en poco tiempo terminará por fundirse en un solo conglomerado con sus municipios vecinos, para conformar un sistema urbanístico que recogerá las propuestas para impulsar el desarrollo de la región, como una sola área metropolitana.

Dado los impactos negativos- ambientales, sociales, y económicos- que las tecnologías de construcción de edificaciones han venido generando, se busca mediante la introducción de la deconstrucción, contribuir a mitigar estos impactos, dando respuesta en esta investigación a preguntas tales como: ¿Se puede considerar qué se cumplen los principios de EC en el subsector de edificaciones de la industria de la construcción, dados los volúmenes, las características y particularidades de los RCD generados y dispuestos finalmente? ¿Los diseños y tecnologías de construcción de edificaciones de vivienda formal actualmente utilizados se alinean con los principios de EC? ¿Es posible establecer niveles de gradualidad entre los diferentes sistemas de construcción en función de su integración con los principios de la economía circular? ¿Qué se debe hacer para viabilizar la deconstrucción en el área objeto de estudio?

La finalidad de Investigar una alternativa de deconstrucción, que permita viabilizar la EC en el subsector de las edificaciones de la industria de la construcción es la de lograr el aprovechamiento integral de los materiales y/o elementos de construcción a lo largo de su ciclo de vida, disminuir el volumen de los RCD y del CO₂ que se generan actualmente. Este es el problema y la solución es iniciar las nuevas construcciones usando el sistema DfD y construir con elementos de construcción prefabricados, que cumplan con estándares de coordinación modular. De esta manera, eventos futuros

(obsolescencia, corrosión, catástrofes naturales, remodelación urbanística, acciones humanas impropias, etc.) serán más soportables, desde el plano ambiental.

Es necesario trabajar en la caracterización de un sistema de operaciones que contemple en los proyectos de construcción de vivienda las condiciones para lograr la deconstrucción y por lo tanto cumplir los lineamientos de la EC, desde el diseño del proyecto hasta el fin del ciclo de vida de los materiales y elementos de construcción para contribuir a la disminución de los costos ambientales, económicos y sociales, en conjunto con el fortalecimiento del marco normativo legal para la construcción de edificaciones sustentables, la gestión de los materiales y/o elementos de construcción de segunda mano y el aprovechamiento y disposición final de los RCD, que deben resultar en volúmenes mínimos, en el Distrito Especial de Santiago de Cali y los municipios de Palmira, Jamundí, Yumbo y Candelaria. Ya, en escenarios de otros países se tienen experiencias, tal como la edificación deconstruible del Estadio 974, construido en Doha, Qatar, para la Copa Mundial de Fútbol FIFA en 2022. Este proyecto se destacó por ser el primer estadio completamente desmontable, diseñado para satisfacer las necesidades deportivas durante el lapso del campeonato y establecer nuevos estándares de sostenibilidad. El estadio construido con contenedores de envío y un marco estructural de acero, tuvo capacidad para 40.000 espectadores, fue deconstruible completamente para que sus partes se reutilicen en otros proyectos (Elengical, 2022). En julio de 2025 el estadio sigue en pie y se ha usado para espectáculos musicales y como escenario de los últimos tres encuentros de la Copa Intercontinental de la FIFA 2024. Los otros estadios también siguen activos y han sido utilizados por los clubes de la Qatar Stars League, la copa Emir y futuramente los partidos eliminatorios de la Copa Mundial FIFA 2026 (Castro, 2022)

En busca de un desarrollo económico sostenible, todos los procesos deben estar encaminados a la búsqueda de alternativas ambientales desde cada una de las áreas y procesos involucrados en la construcción, que deben tener como objetivo minimizar los desperdicios, reutilizar elementos de construcción, reciclar materiales y explotar recursos ambientales responsablemente. Es importante pensar que nada debería ser desechado, todo podría ser reutilizado, reciclado y procesado si se consideran permanentemente los procedimientos que se plantean en un sistema de deconstrucción, que logran hacer realidad la EC en el sector de edificaciones, que debe estar caracterizada por tener procesos más eficientes, sostenibles y amigables con el medio ambiente, maximizando la vida del producto y minimizando de manera consciente la generación de RCD.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Un sistema de construcción o constructivo consiste en el levantamiento de un edificio con una destinación específica y comprende el conjunto de técnicas, tecnologías, materiales y procedimientos que se requieran, donde el énfasis está en las soluciones de diseño y los procesos técnicos de los sistemas tradicionales industrializados (hormigón, acero y prefabricados, entre otros) que adopten el concepto de EC con un óptimo uso de los recursos (Prieto, Torres-González and Carpio, 2024)(Jacob, Nandra and Gupta, 2025).

El Sistema de operaciones en la construcción se refiere principalmente al conjunto de procesos, actividades y metodologías empleadas para transformar insumos (materiales, mano de obra, equipos) en productos (edificios, infraestructuras), con un enfoque fuerte en la gestión eficiente de recursos, la secuencia de actividades, la mejora continua de la producción en obra y ante todo, ser cada vez más sostenible (Olanrewaju, 2025). El Sistema de operaciones del sector de la construcción es un concepto ligado a la gestión, planificación y optimización de todo el proceso constructivo, más relacionado en cómo se organizan y se llevan a cabo las actividades para lograr el resultado deseado.

El término "sistema de operaciones" se puede equiparar a un "sistema constructivo moderno" cuando este se inscribe en un marco que integra enfoques administrativos, logísticos y técnicos, también circunscrito en lo que se denomina un sistema de sistemas (Thneibat, 2025). Así, estos subsistemas integrados o sistemas de operaciones se conocen en el medio como sistema de construcción o sistema constructivo, que es el nombre que se usó en esta investigación como equivalente a "sistema de operaciones", también, por simplificación y entendida su aplicación al subsector de edificaciones.

Los subsistemas del sistema de operaciones se caracterizan porque están conformados por: A) Subsistema de gestión de proyectos, que está enfocado en la planificación, ejecución y control de proyectos de construcción. B) Subsistema de logística de construcción, que está relacionado con la gestión de materiales, equipos y recursos en el sitio de construcción. C) Sistema de producción en construcción, que se refiere a los procesos y técnicas utilizados para la construcción de edificaciones. D) Sistema de gestión de obras, que está enfocado en la supervisión y control de las actividades en el sitio de construcción. Seguir estos subsistemas con un enfoque centrado en la descarbonización, enmarca un proyecto dentro de los principios de la EC, de lo contrario se convierten en barreras para su cumplimiento (Amarasinghe *et al.*, 2025).

Los sistemas de construcción se pueden catalogar desde aquellos altamente consumidores de recursos naturales no renovables, de energía, de agua y generadores de RCD, hasta aquellos donde se minimiza el impacto ambiental al cumplir circularidad en la construcción (Dakir *et al.*, 2024). La magnitud del problema en un contexto

determinado está dada por la prevalencia que se tenga de un sistema de construcción específico, así, por ejemplo, miles de años atrás, cuando los sistemas de construcción estaban determinados por el uso de materiales naturales renovables como madera, cueros, fibras vegetales o en cuevas. Los diferentes sistemas de construcción han evolucionado; sin embargo, en contextos determinados coexisten, por ejemplo, una torre de elevada altura construida con concreto monolítico en una ciudad capital y en el mismo país, una maloca hecha de madera, tierra y paja en una región selvática. Aunque son contextos muy diversos, el primero, un proceso constructivo, altamente generador de gases de efecto invernadero, y el último, muy bajo.

También, en el área objeto de estudio (Distrito Especial de Santiago de Cali y los municipios de Palmira, Jamundí, Yumbo y Candelaria) se encontró el uso de sistemas de construcción diversos, tales como; construcción tradicional con adobe y tapial, construcción con concreto monolítico, construcción aporticada, construcción con mampostería, construcción mixta con elementos prefabricados o con algunos de los otros sistemas. Se debe anotar que no hay ocurrencia del sistema 100% prefabricado deconstruible. Los sistemas mencionados anteriormente generan un elevado volumen de RCD ya sea por actividades de mejoramiento, demolición, implosión o accidentes por fallas estructurales, corrosión, acciones humanas (terrorismo) o accidentes naturales (acciones, sísmicas, deslizamientos, inundaciones, volcánicas, inclemencias del tiempo como lluvias, vendavales, etc.). Aunado a la generación de los RCD, están los problemas de movilidad, disposición final y uso del suelo.

A pesar de múltiples investigaciones desarrolladas sobre el aprovechamiento de los RCD (Silva *et al.*, 2024) (Silva-Urrego and Delvasto-Arjona, 2020) (Luz M. Murillo, 2017) (Robayo-Salazar, Valencia-Saavedra and Mejía de Gutiérrez, 2022), son contados los casos exitosos de producción y comercialización de elementos de construcción desarrollados con adición de RCD en el medio. A continuación, se ilustra el árbol de problema (Figura 2). Puesto que el gran generador de elevados impactos ambientales, económicos y sociales es la generación de los RCD, la investigación considera que minimizar los RCD es el aspecto central de esta y esto, implica analizar, mediante indicadores, el impacto ambiental de uno de varios sistemas de construcción, para concluir el óptimo sistema de operaciones o de construcción, que es el que permita deconstruir y dar un uso posterior y durable a los elementos de construcción.

Al introducir el concepto de deconstrucción, se puede plantear la hipótesis de que, estrictamente, los principios de la EC en la industria de la construcción actual no se cumplen en su totalidad, desde los puntos de vista ambiental y económico; no es suficiente reducir los volúmenes de RCD, que posteriormente son reprocesados con consumos adicionales de energía, agua, mano de obra y recursos naturales (vírgenes). También, son necesarios la aplicación efectiva de directrices ambientales, la legislación apropiada y seguir los códigos de construcción para implementar practicas sostenibles

en el sector (Moshood, Rotimi and Shahzad, 2024). Sin embargo, no se debe caer en maximalismos, se reconocen limitaciones para lograr circularidad con base en deconstruir, y cabe aceptar la progresividad en los caminos para acercarse a su cumplimiento. La reducción de implosiones en masa, el aprovechamiento de los RCD, entre otros, están comprendidos dentro de esa progresividad. Es de aclarar, que las 10 R's no son todas aplicables a la construcción de edificaciones.

1.1. Un gran problema: Residuos de Construcción y Demolición

Santiago de Cali como Distrito Especial es una de las tres ciudades más pobladas de Colombia junto con Bogotá y Medellín, de acuerdo con el Censo del DANE del 2018; su desarrollo urbanístico, los cambios sociales, culturales y económicos que se viven en las últimas décadas en la ciudad, fueron los que llevaron a expedir la Ley 1933 de agosto de 2018 que la declara “Distrito Especial, deportivo, cultural, turístico, empresarial y de servicios de Colombia”. Su permanente relación con los municipios de Palmira, Jamundí, Yumbo y Candelaria generan en la práctica un área metropolitana con constante crecimiento poblacional, de infraestructura y vivienda. El crecimiento poblacional está generando una mayor densificación de los núcleos residenciales al igual que un permanente crecimiento urbano hacía el oriente, norte y sur del Distrito Especial de Santiago de Cali; esta situación se suma a la dinámica generada por el proceso de conurbación urbana donde los habitantes de los municipios vecinos, hacen presencia permanente en el mundo laboral y comercial de Cali (Alcaldía de Cali Equipo Patrimonio Cultural Material Secretaría de Cultura., 2021). La ubicación geográfica del Distrito Especial de Santiago de Cali y los municipios de Palmira Jamundí, Yumbo y Candelaria que se pueden apreciar en la Figura 1 (GeoCVC, 2019), han generado unos corredores viales que permiten el constante flujo de sus habitantes gracias a su cercanía.

Las dinámicas de crecimiento demográfico y conurbación han dado origen a proyectos como los realizados en el Bulevar del Río Cali, los proyectos habitacionales y comerciales que se dan en los barrios del centro con el proyecto llamado Ciudad Paraíso, en las antiguas instalaciones de algunas industrias, hoteles o centros comerciales que ya no están en funcionamiento, al igual que los proyectos de vivienda que se desarrollan en cada uno de los municipios cercanos al Distrito Especial de Santiago de Cali (Alcaldía de Cali Equipo Patrimonio Cultural Material Secretaría de Cultura., 2021). Un gran problema ambiental que generan los procesos constructivos, unos más que otros, es el elevado volumen de residuos, que resultan aún desde las primeras etapas de una construcción, por ejemplo, los cortes de mampostería y los sobrantes de morteros y concretos. El volumen mayor se tiene al final de la vida útil de cualquier edificación. Este problema se agrava cuando crece la población y aumenta la demanda de construcciones, principalmente para vivienda. También, cuando el estándar de vida aumenta, medido en términos del Producto Interno Bruto (PIB) per cápita.

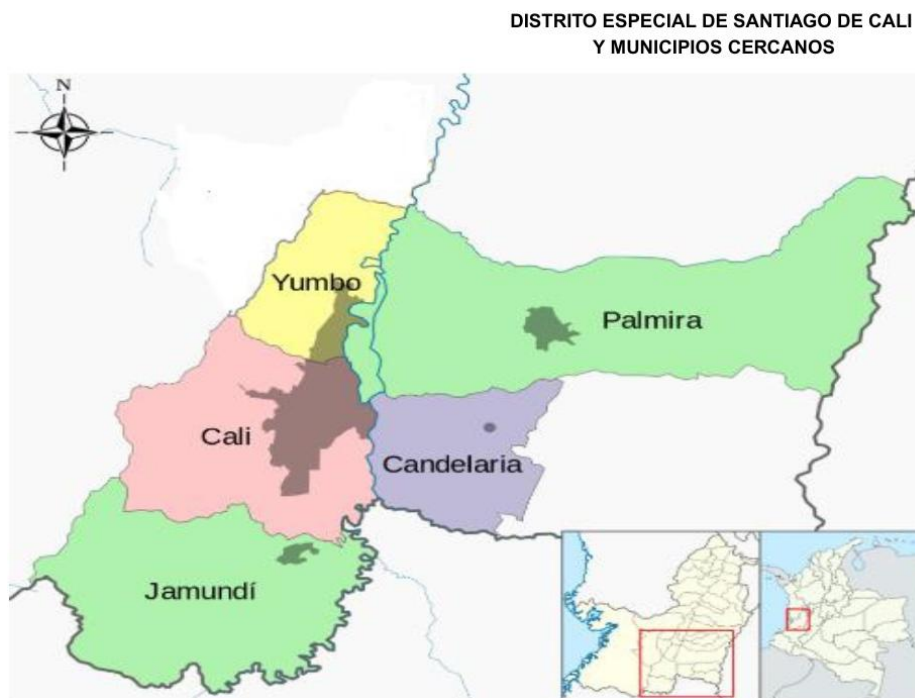


Figura 1. Mapa Distrito Especial de Santiago de Cali y municipios cercanos. Fuente: Elaboración propia con información de GeoCVC cartográfica básica

Para el 2023 se tenía un estimado de la demanda de materiales de construcción en Colombia del orden de 36 billones COP, con una tasa de crecimiento anual compuesto de 5,43% entre 2013 y 2023. El consumo de materiales de construcción se duplicó .en Colombia entre 2007 y el 2017, generando una producción de COP 18,3 billones y ventas por COP 24,78 billones en 2017 (Consejo Superior de la Judicatura - Dirección Ejecutiva Seccional de Administración Judicial, 2024).

En términos de cantidad, la generación de RCD fue superior a 22 millones de toneladas en el año 2017. La Resolución 472 del 28 de febrero de 2017 fijó la meta de aprovechamiento de un porcentaje superior al 2% del peso total de los materiales usados en una obra para los grandes generadores de residuos, este porcentaje se incrementa 2 puntos cada año hasta alcanzar un mínimo de 30%. El cumplimiento de esta resolución exigía un 10% de aprovechamiento en el año 2021, que no se cumplió. Esta exigencia es laudable puesto que la reducción de la generación de RCD propende por la protección de la salud pública y el medio ambiente, sin embargo, no ha sido cumplida (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). La Resolución 1257 del 23 de noviembre de 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la República de Colombia (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021), modificó la Resolución 472 y tiene

un enfoque mayor de EC, y abrió la puerta para potenciar procesos como el de deconstrucción, pues en sus considerandos es explícita en señalar la necesidad de “...ampliar los mecanismos para la promoción efectiva del aprovechamiento de los RCD bajo un enfoque de EC...”. Esta resolución fue modificada por la Resolución 1257 de 2021 en sus artículos: 2, 9, 12, 13, 15, 17, 18, 19 y en sus anexos del I al VIII.

1.2. Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos del Distrito Especial de Santiago de Cali

Los procesos de construcción y demolición que se desarrollan actualmente en el Distrito Especial de Santiago de Cali y los municipios de Palmira, Jamundí, Yumbo y Candelaria generan entre 85.297 y 90.000 t/mes de RCD según el reporte de sus PGIRS. En septiembre de 2020 se generaron aproximadamente de 2.700 t/día de RCD, con densidad de estos de 1,12 kg/m³. Esto muestra la prevalencia de un modelo de economía lineal en las construcciones que genera costos ambientales, económicos y sociales significativos. Al adoptar el modelo de EC de la deconstrucción se podrá reducir gradualmente la generación de RCD.

La revisión, ajuste y actualización del PGIRS del Distrito Especial de Santiago de Cali, publicada el 9 de septiembre del 2020, permite conocer las proporciones de algunos materiales presentes en los RCD donde se pueden resaltar materiales cerámicos en un 96,94%, madera 0,82%, plástico 0,42%, metales 0,20%, orgánicos 0,88%, papel y cartón 0,74% (Equipo técnico Departamento Administrativo de Planeación Distrital Cali, 2020).

La información analizada en los PGIRS del Distrito Especial de Santiago de Cali y de los municipios de Palmira, Jamundí, Yumbo y Candelaria, permite conocer el volumen de los RCD generados en cada uno de ellos, como se pueden observar en la Tabla 1 (Alcaldía Municipio de Palmira, 2016; Alcaldía Municipio de Yumbo, 2016; Jamundi Secretaria de Ambiente y Desarrollo Agropecuario Sostenible, 2016; Alcaldía Municipio de Candelaria, 2017; Equipo técnico Departamento Administrativo de Planeación Distrital Cali, 2020).

Tabla 1. Reporte de los RCD generados por municipio

MUNICIPIO	CANTIDAD RCD/MES	DISPOSICIÓN FINAL	FUENTE
Palmira	2.990 t	Predio privado, recuperación Cra 38 No. 65 - 302	PGIRS 2016-2027
Jamundí	2.265 t	Relleno sanitario regional Colombia-Guabal Ubicado en Yotoco	PGIRS 2016-2027
Yumbo	263 m ³	Dos escombreras ubicadas en Arroyohondo y 26 puntos críticos	PGIRS 2016-2027
Candelaria	No cuantificado	Sitios más impactados por la disposición inadecuada de RCD cabecera municipal, la vía de acceso a la PTAR y la vereda Gualí	PGIRS 2017-2027
Distrito Especial de Santiago de Cali	79.779 t	El DAGMA reporta 25 sitios de disposición final para grandes generadores, la EDT de la 50 es utilizada por los pequeños generadores y un 20% en puntos críticos	PGIRS 2020-2027

Fuente: Creación propia con información de PGIRS

1.3. Árbol del Problema de los RCD

El árbol de problemas es un diagrama que permite identificar y comprender de manera estructurada una situación problemática, sus causas y sus efectos. Esta herramienta facilita la representación encadenada de las condiciones negativas percibidas por los actores involucrados, organizando el problema central en el eje medio del esquema, las causas en la parte inferior y los efectos en la parte superior. Su utilización permite, además, sentar las bases para la posterior formulación de los objetivos del proyecto (Perez O. and Leal Giraldo, 2017).

La Figura 2 presenta el árbol del problema desarrollado para esta investigación, en el cual se identifica el foco central del problema, sus causas fundamentales, entendidas como los factores que originan la situación, y sus efectos, concebidos como las consecuencias derivadas. Se destaca un efecto mayor, que refleja el impacto general del problema abordado, especialmente en dimensiones ambientales, económicas, sociales, de salud pública, higiene, seguridad y movilidad, afectando directamente la calidad de vida de los habitantes del Distrito Especial de Santiago de Cali y de los municipios de Palmira, Jamundí, Yumbo y Candelaria. Cabe señalar que cada una de las causas y efectos representados en el árbol ha sido analizada previamente en esta sección, en el marco del contexto de los RCD.

ÁRBOL DE PROBLEMA

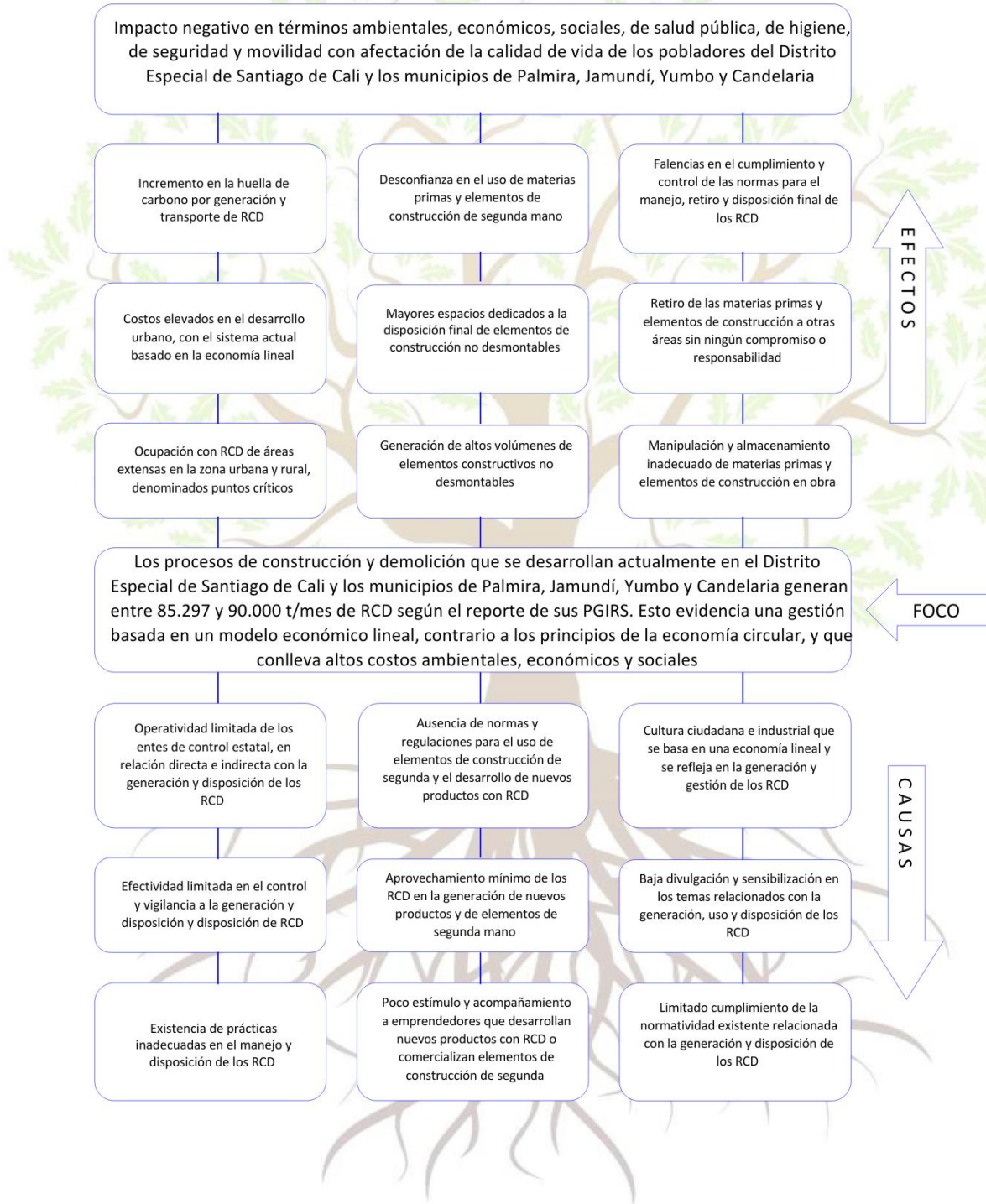


Figura 2. Árbol del problema. Fuente: Elaboración propia

Con base en el estudio del problema, se plantean los objetivos de la investigación.

2. OBJETIVOS Y PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

Para el desarrollo de esta investigación, se planteó el objetivo general con un trazado metodológico orientado al cumplimiento de cuatro (4) objetivos específicos.

2.1. Objetivo general

Investigar el sistema de operaciones del subsector de edificaciones de viviendas del Distrito Especial de Santiago de Cali y su área de influencia en los municipios de Palmira, Jamundí, Yumbo y Candelaria, para proponer soluciones que permitan lograr la viabilidad de la EC en este subsector con base en criterios de deconstrucción.

2.2. Objetivos específicos

- Establecer el estado actual del marco normativo de los proyectos de vivienda en lo relacionado con el diseño, la construcción, la rehabilitación, la demolición, el desmantelamiento, y disposición de residuos al final del ciclo de vida de las construcciones; desmantelamiento, montaje y ensamble de elementos constructivos de segundo uso.
- Seleccionar las etapas y actividades necesarias del sistema de operaciones o sistema constructivo del subsector de edificaciones para el aprovechamiento de los elementos y materiales de construcción sin destrucción de estos.
- Evaluar comparativamente, los sistemas de construcción lineales e intermedios y el propuesto con deconstrucción, con base en Indicadores de EC.
- Plantear una propuesta para lograr la viabilidad de EC del sistema de operaciones o constructivo del subsector de edificaciones con base en criterios de deconstrucción.

2.3. Árbol de objetivo

El árbol de objetivo se desarrolló como una respuesta de solución a la situación analizada en el árbol de problema. Su estructura se fundamenta en una lógica de fines y medios, dejando ver su relación entre las posibles soluciones (Perez O. and Leal Giraldo, 2017). En la Figura 3 se presenta el diagrama del árbol de objetivo como herramienta que identifica las actividades desarrolladas en esta investigación, en su estructura se encuentra el objetivo general en la parte central, los fines en la parte superior y los medios en la parte inferior, todos estos redactados en positivo para tener una herramienta flexible.

ÁRBOL DE OBJETIVO

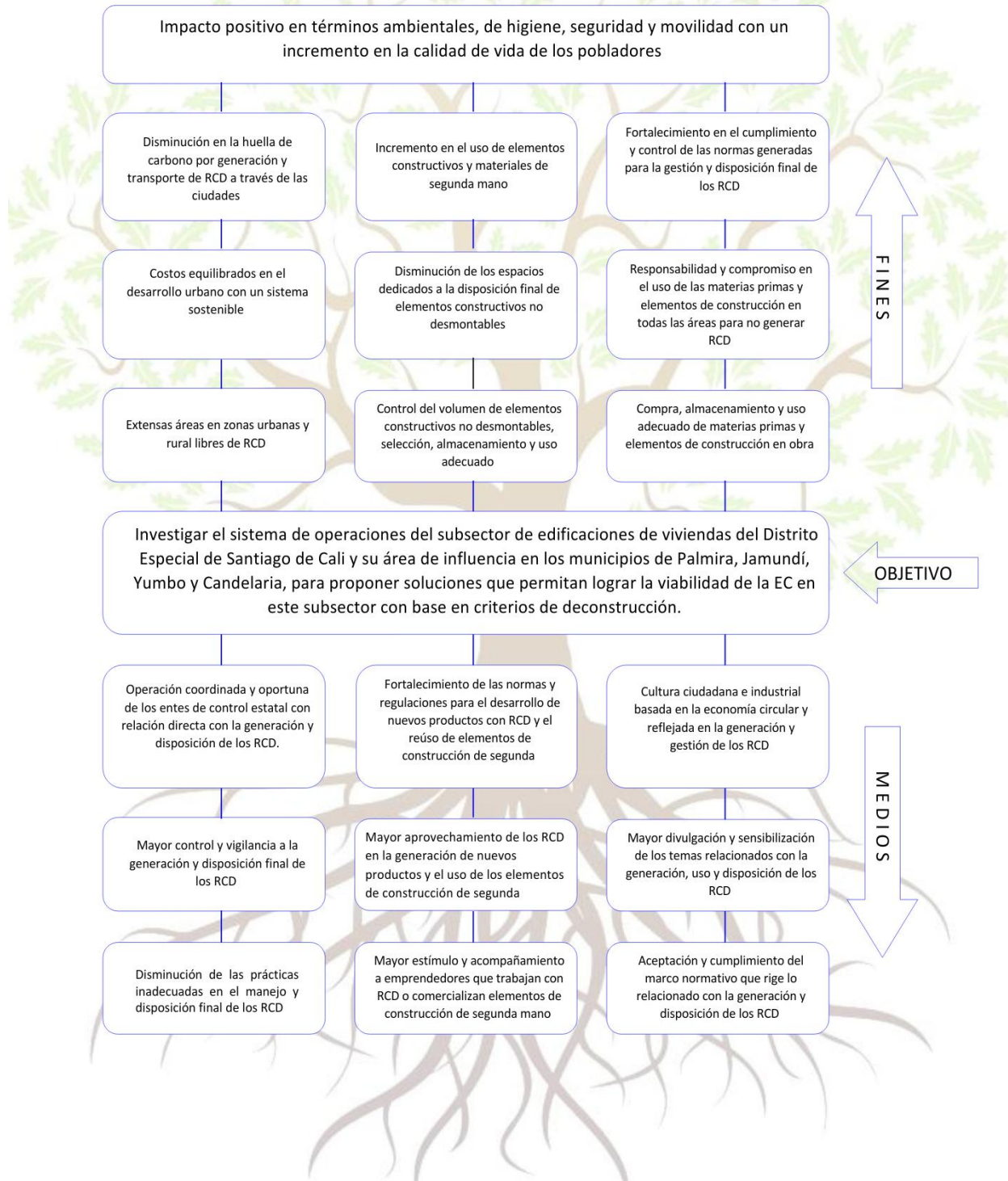


Figura 3. Árbol de objetivo. Fuente: Elaboración propia.

2.4. Metodología

En la Figura 4 se ilustra la ruta metodológica llevada a cabo en esta investigación, donde se observaron los resultados de cada una de las etapas desarrolladas; partiendo de la definición y justificación del problema, luego se crearon los objetivos con el fin de tener claridad en el propósito y los entregables de la investigación, igualmente se delimitó el alcance y las restricciones particulares propias de esta investigación.

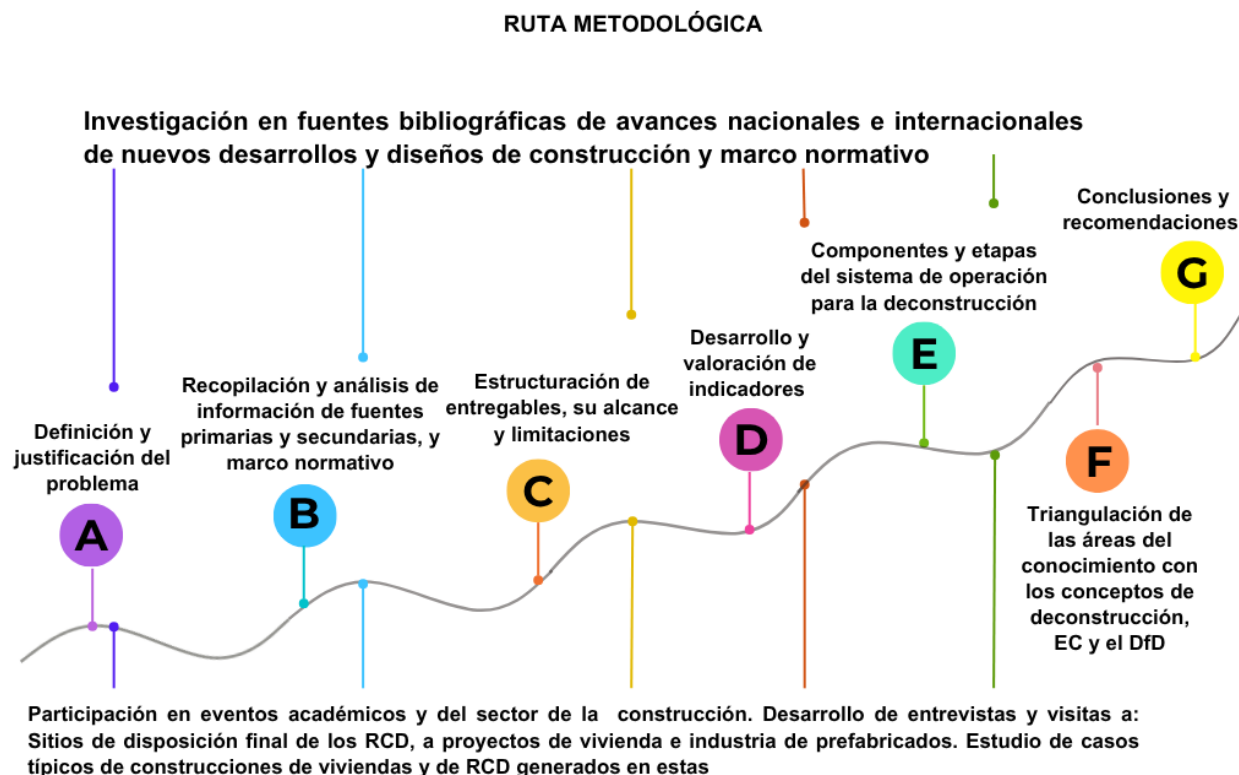


Figura 4. Etapas metodológicas. Fuente: Elaboración propia.

Esta investigación y análisis adoptó un enfoque cualitativo y cuantitativo, en la metodología se desarrolla el estudio de casos o situaciones del sector de la construcción en el Distrito Especial de Santiago de Cali y los municipios de Palmira, Jamundí, Yumbo y Candelaria, donde se allegó la información correspondiente de proyectos de empresas del sector de la construcción, que permite realizar un diagnóstico de la situación actual de los proyectos de construcción de vivienda, de los materiales y de los elementos de construcción que se utilizan en estos. Se ha revisado literatura sobre elementos de construcción, prefabricados, industrialización de la construcción, RCD, PGIRS, PMA, EC en el sector de la construcción, que son conceptos fundamentales para la investigación y el análisis.

Con la información analizada se determinaron tendencias y cambios con mira a una transición hacia un nuevo sistema de operación en el sector de la construcción que

exige una alianza entre los sectores públicos y privados para la implementación de un sistema de operación o de construcción con lineamiento de la EC y procesos de gestión exitosos en las organizaciones que favorezcan el cuidado del medio ambiente y fortalezcan el sector de la construcción como un sector con proyectos sostenibles. La Figura 5 permite conocer las actividades principales desarrolladas para el logro de los objetivos.

OBJETIVOS Y ACTIVIDADES

OBJETIVO GENERAL	Investigar el sistema de operaciones del subsector de edificaciones de viviendas del Distrito Especial de Santiago de Cali y su área de influencia en los municipios de Palmira, Jamundí, Yumbo y Candelaria, para proponer soluciones que permitan lograr la viabilidad de la EC en este subsector con base en criterios de deconstrucción
OBJETIVOS ESPECIFICOS	
01	Establecer el estado actual del marco normativo de los proyectos de vivienda en lo relacionado con el diseño, la construcción, la rehabilitación, la demolición, el desmantelamiento, y disposición de residuos al final del ciclo de vida de las construcciones; desmantelamiento, montaje y ensamble de elementos constructivos de segundo uso Acción 1: Revisión Bibliográfica Acción 2: Análisis caso de estudio Acción 3: Codirección tesis EI Acción 4: Documentar la información trabajada
Acción 1: Revisión Bibliográfica Acción 2: Análisis casos actuales Acción 3: Visitas industriales - Entrevistas Acción 4: Documentar la información trabajada	Seleccionar las etapas y actividades necesarias del sistema de operaciones o sistema constructivo del subsector de edificaciones para el aprovechamiento de los elementos y materiales de construcción sin destrucción de estos 02
03	Evaluar comparativamente, los sistemas de construcción lineales e intermedios y el propuesto con deconstrucción, con base en Indicadores de EC Acción 1: Revisión Bibliográfica Acción 2: Análisis casos de estudio Acción 3: Codirección tesis IMAT Acción 4: Documentar la información trabajada
Acción 1: Revisión Bibliográfica Acción 2: Análisis casa con DFD Acción 3: Avances industria prefabricados Acción 4: Documentar la información trabajada	Plantear una propuesta para lograr la viabilidad de EC del sistema de operaciones o constructivo del subsector de edificaciones con base en criterios de deconstrucción 04

Figura 5. Acciones metodológicas con respecto a los objetivos. Fuente: Elaboración propia.

2.4.1. Revisión bibliográfica

Durante el desarrollo de la investigación se realizaron las actividades de revisión bibliográfica con el objetivo de mantener actualizada la información. Para desarrollar la revisión, se contó principalmente con el acceso a las bases de datos disponibles en la biblioteca de la Universidad del Valle, en la información publicada en internet y en medios de comunicación, en revistas y entrevistas empresariales, en los comunicados y normativas de los gobiernos nacional, departamental y municipal.

2.4.2. Metodología para el desarrollo del diagnóstico del problema de investigación

Para desarrollar el diagnóstico del problema de la investigación, de los interesados e involucrados y de las necesidades actuales y futuras, se analizó la información lograda durante la revisión bibliográfica al igual que la recibida a través de visitas y entrevistas desarrolladas en las empresas constructoras, empresas productoras de elementos de construcción, principalmente de prefabricados, en sitios de disposición final de los RCD, en empresas gestoras, recicladoras y transformadoras de RCD.

2.4.3. Análisis de la información y caracterización del sistema de operación para la deconstrucción

La información recopilada se trató de acuerdo con su origen y aporte, para tener claridad en cada uno de los contextos que se trabajaron durante el desarrollo de esta investigación; se busca con esto llegar al reconocimiento de los beneficios e impactos del sistema de operación para la deconstrucción por medio de la identificación de los diferentes elementos, actividades y tendencias que debieron ser definidos claramente para así mostrar su interrelación e interdependencia como un todo.

2.4.4. Análisis de las propiedades y características de los elementos de construcción deconstruibles

Se hizo un análisis de los avances desarrollados en relación con las características y propiedades de los materiales y elementos de construcción prefabricados desarrollados para una futura deconstrucción con fines de reciclar, reutilizar y reducir los RCD generados. Estos materiales y elementos de construcción deben ser estandarizados y normados, para que a futuro se logre un impacto ambiental y económico positivo.

2.5. Indicadores ambientales relacionados con el objetivo general

El análisis y tratamiento de la información obtenida permitió desarrollar indicadores ambientales orientados al monitoreo de los sistemas tecnológicos de construcción, como resultado de esta investigación. Los indicadores diseñados se presentan en la parte correspondiente a indicadores ambientales de los sistemas de construcción, estos permiten valorar el cumplimiento completo de una EC en el sector de edificaciones planteado en el objetivo.

2.6. Impactos esperados y alcance

La triangulación de las áreas del conocimiento junto a la caracterización del sistema de operaciones y de los indicadores valorados para la deconstrucción y los

conceptos de deconstrucción, prefabricado y elemento para la construcción, permitieron mostrar los resultados obtenidos a lo largo de esta investigación.

Este proyecto de investigación incluye el estudio, valoración y aprovechamiento de los RCD de un proyecto de construcción de viviendas en el municipio de Candelaria, igualmente la valoración del ciclo de vida de dos proyectos de vivienda analizados en paralelo; dos trabajos de grado de dos estudiantes de pregrado, de Ingeniería Industrial y de Ingeniería de Materiales se inscribieron en esta parte de la investigación.

El alcance de este proyecto de investigación está definido por el análisis realizado a partir de la información documentada de fuentes secundarias y primarias, el estudio de casos, al igual que el planteamiento de una propuesta industrial de una empresa de prefabricados, que permita la viabilidad de una EC real en el sistema de operaciones del subsector de edificaciones con base, desde su diseño, en criterios de deconstrucción.

2.7. Contribución al conocimiento y otros resultados

Las contribuciones desarrolladas en este proyecto de investigación están dadas en los resultados de cada una de las actividades desarrolladas en pro del logro de los objetivos trazados, en el marco del alcance de esta investigación y los requisitos exigidos por la Universidad del Valle en su Resolución 065 del 2014.

2.7.1. Contribución al conocimiento

Principales contribuciones al conocimiento de este proyecto de investigación:

- Determinar las principales características y particularidades de los RCD generados en un proyecto de construcción de edificaciones de vivienda (Proyecto de vivienda de constructora Bolívar en Candelaria).
- Cuantificar el volumen de RCD generados en un proyecto de construcción como caso de estudio y documentar su disposición final (Proyecto de vivienda de constructora Bolívar en Candelaria).
- Reconocer los sistemas (diseños, modelos metodologías y tecnologías) utilizados en el desarrollo de proyectos de construcción de edificaciones de vivienda actuales.
- Definir y valorar indicadores para el modelo circular en los procesos de construcción y deconstrucción.
- Analizar el impacto ambiental en varios casos de construcciones, que usan sistemas constructivos diversos.
- Motivar el desarrollo de un sistema de construcción que incorpore la deconstrucción desde el diseño con los conceptos de EC para proyectos de construcción de edificaciones de vivienda considerando las regulaciones y

condiciones del área geográfica de investigación. Con base en lo anterior, la empresa PREMOLDEADOS SAS desarrolló un proyecto piloto constructivo de vivienda rural, aplicable también en zonas urbanas con ambiente rural, que utiliza elementos de construcción prefabricados; el proyecto se denomina “Proyecto Vivir” y se encuentra en etapa de prueba para lograr la certificación en la SNR 10 título E. A esta casa piloto se le hizo un estudio de su huella de carbono y se comparó con la del sistema con mampostería, pertinente para vivienda unifamiliar.

2.7.2. Otros resultados

Los trabajos de grado de estudiantes de pregrado de la Universidad del Valle que se inscribieron en el marco del presente proyecto de investigación doctoral fueron:

- Ñañez Rivera Dahiana Angélica, 2021 – Ingeniería Industrial. Impacto económico y ambiental de la Economía Circular en las actividades conjuntas de una empresa constructora y una empresa manufacturera de materiales de construcción y demolición en Candelaria.
- Gómez Álzate Michell, 2022 - Ingeniería de Materiales. Medición de la huella de CO₂ en tres sistemas de construcción local de viviendas desde el tradicional al prefabricado con elementos constructivos basados en residuos de construcción.

Este proyecto de investigación compartió los avances logrados en su momento en tres eventos académicos con ponencias relacionadas a los temas trabajados, un artículo sometido a publicación y una contribución en un libro:

- Webinar, 2023 - “De las nano partículas a los materiales de construcción para un mundo sostenible” Universidad del Valle. Tema presentado: Economía Circular en un modelo de deconstrucción.
- Jornada de Economía Circular, 2023 – “Hacia una sinergia de gobernanza, industria y academia entorno al aprovechamiento de RCD” Red Cyted Eco Eico. Tema presentado: Economía Circular en un modelo de construcción deconstruible.
- Cali Circular, 2023 – “Primer encuentro social, económico y ambiental Universidad, Empresa, Estado” Distrito Especial de Santiago de Cali. Tema presentado: Potencializar la Economía Circular en toda organización.
- Artículo: Huella de carbono de un edificio elevado construido con sistema de construcción de concreto monolítico reforzado, publicado en la revista DELOS. <https://doi.org/10.55905/rdelosv18.n68-175>
- Artículo: Impacto ambiental de los sistemas tecnológicos de construcción en Colombia, publicado en la revista DELOS. <https://doi.org/10.55905/rdelosv18.n68-176>

- Artículo: Deconstruction for a Real Circular Economy in the Construction Sector of Colombia, en la revista Modulo de Arquitectura CUC de Colombia, aprobado para publicación, a la espera de su publicación.
- Contribución en el Libro de la Red ECoEiCo capítulo 2: libro Economía Circular Sector Construcción, en espera de publicación.

2.7.3. Estancia académica

Se realizó una estancia en el Centro de Diseño y Optimización de Procesos y Materiales (DIOPMA), del Departamento de Ciencia de Materiales y Química Física. Facultad de Química de la Universidad de Barcelona, durante los días del 3 al 26 de Julio 2023. En este contexto y durante la estancia, se presentaron las diferentes líneas de investigación que actualmente se están desarrollando, y algunas ya desarrolladas, a partir de residuos y recursos secundarios para la elaboración de materiales de construcción; igualmente se compartieron conocimientos, teorías relacionada con la EC y dos software para el análisis del ciclo de vida (LCA), se realizaron prácticas en los laboratorios para el análisis de muestras de los diferentes materiales desarrollados con residuos. Estas actividades se lograron con la dirección y acompañamiento del Dr. Joshep María Chimenos Ribera, docente de Universidad y su grupo de investigación.

Otra estancia corta, fue hecha en Green Engineering and Resources Research Group, del Departamento de Química e Ingeniería de procesos y recursos. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Telecomunicaciones de la Universidad de Cantabria, los días 13 y 14 de Julio 2023. Durante la estancia se presentó la línea de investigación de bioensayos de ecotoxicidad en los materiales de construcción desarrollados a partir de recursos secundarios, que se lleva a cabo en el Grupo de Investigación Green Engineering and Resources, por dos estudiantes de posgrado. Esta estancia académica se logra en el marco de la red iberoamericana EcoEico, sobre la economía circular en el campo de la construcción, con el direccionamiento y acompañamiento de la Dra. Ana María Andrés Payan, docente de la Universidad, y su grupo de investigación.

3. MARCO CONCEPTUAL Y ANTECEDENTES

Durante el análisis de la situación actual y la investigación se conocieron, recopilaron y manejaron términos, técnicas, avances y logros relacionados con la EC y la deconstrucción, comunes entre la industria de la construcción de edificaciones y los entes gubernamentales que trabajan a nivel mundial para regular el uso de materias primas vírgenes, la generación, la gestión, el uso y disposición final de los RCD.

3.1. Residuos de construcción y demolición

La guía ambiental para desarrollar el PGIRS en Colombia trata del manejo de los RCD desde su generación hasta su disposición final, entendiendo RCD como los residuos generados durante el desarrollo de un proyecto de construcción, donde se tienen todos los residuos sólidos o sobrantes generados durante la construcción, reparación, demolición y excavación de obras civiles, de viviendas o de otras actividades articuladas. Entre los RCD se tienen identificados dos clases; aquellos que son susceptibles de aprovechamiento como los productos de excavaciones, cimentaciones, residuos pétreos y no pétreos; y los no susceptibles de aprovechamiento como los residuos peligrosos o contaminados entre los cuales están el asbesto, el Eternit, los biosanitarios y los residuos electrónicos. Los RCD generados en proyectos de construcción presentan un mayor volumen de residuos pétreos conformados por arenas, gravas, gravillas, hormigón, sobrantes de mezcla de cemento, cerámicas, trozos de ladrillos y bloques (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2017). En la Figura 6 se ilustra el tipo de residuos que se encuentran en sitios de acopio para aprovechamiento o disposición final.



Figura 6. Residuos de construcción y demolición. Fuente: Elaboración propia

3.2. Elementos de construcción

Los elementos constructivos deberían seguir los criterios de coordinación modular y/o dimensional, estos se diseñan y dimensionan de forma individual o colectiva,

representan un conjunto de materiales conformados donde cada uno cumple con una función previamente establecida. Se consideran elementos constructivos a muros, columnas, vigas, tejas, ladrillos, bloques, ventanas, puertas, techos, entre otros (KREANDO, 2021).

Un elemento constructivo es una unidad conformada por materiales que cumple una función específica dentro de una edificación. Existen múltiples tipos de elementos constructivos, y su integración es fundamental para la ejecución de cualquier proyecto de construcción. De acuerdo con el rol que desempeñan se clasifican como elementos constructivos estructurales (Componentes de la cimentación, losas, pilares, forjados, etc.) y como elementos constructivos compartimentados (Cubiertas, fachadas, particiones interiores, etc.).

En España, el Código Técnico de la Edificación establece un catálogo de elementos constructivos, y los clasifica bajo los epígrafes de: cubiertas, huecos, fachadas, particiones interiores verticales y medianerías, particiones interiores horizontales, puentes térmicos. Este catálogo está concebido como un instrumento de ayuda para cumplir las exigencias generales de diseño de los requisitos de habitabilidad: salubridad, protección frente al ruido y ahorro de energía. Además, contiene información de las características de materiales que los contienen (FUNCIONA, 2021).

Los elementos constructivos están conformados por diferentes materiales y pueden ser productos elaborados al pie de obra o prefabricados. Los materiales más utilizados para conformar los elementos son: la piedra, el yeso natural, la arcilla, el agua, los metales, la madera, etc., y los productos elaborados o prefabricados pueden ser hechos de yeso, cemento, hormigón, morteros, vidrios, cerámicos, plásticos, aislantes térmicos y acústicos, etc. (Socarrás Cordoví and Vidaud Quintana, 2017).

3.3. Coordinación modular y/o dimensional

La coordinación modular y/o dimensional es la aplicación de un rango de medidas relacionadas para el dimensionamiento de componentes y ensambles en la edificación que los incorpora. Cuando se trata de diseño modular, se hace referencia a la aplicación del concepto de coordinación modular y/o dimensional al proceso de diseño arquitectónico. La coordinación modular, exige una coordinación dimensional donde se emplea un módulo como unidad de medida básica que utiliza sus múltiplos y submúltiplos, con el fin de dimensionar la edificación y cada uno de sus componentes. Esto exige una estrecha relación entre el diseño de la edificación, la fabricación de los componentes y la fase de obra para generar múltiples beneficios y costo-eficientes al proyecto que garanticen unas etapas de construcción y montaje óptimas, rápidas y económicas con elementos de diferente procedencia, función y características (CAMACOL, 2018) (Elejalde López *et al.*, 2015).

El diseño modular debe ser visto como una estrategia efectiva que aporta en gran medida a la sostenibilidad de los proyectos de construcción, ya que permite la reducción en la generación y disposición final de los RCD como resultado de la disminución de desperdicios en obra y de la posibilidad de deconstruir para no demoler, así como la rebaja en los tiempos de ejecución debido al aumento de la eficiencia en el montaje y la optimización de los recursos, que a su vez reduce los costos del proyecto. El diseño modular en Colombia debe desarrollarse de acuerdo con los procedimientos definidos en la NTC 45 - Ingeniería Civil y Arquitectura - Coordinación modular de la construcción - Bases, definiciones y condiciones generales, y la NTC 2332 Construcción de edificaciones - Coordinación modular. Principios y reglas. Es importante tener en cuenta la Ficha No. 20 de la Guía de criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana, del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, sus orientaciones son de gran utilidad para todo tipo de edificaciones (CAMACOL, 2018).

Entre los beneficios que otorga la coordinación modular y/o dimensional se debe tener en cuenta el progreso en la comunicación y la eficiencia entre el diseño y el proceso de montaje al manejar una expresión dimensional común, proporcionando también a las construcciones un potencial de intercambiabilidad de sus elementos de construcción que se refleja en la reducción de los costos de mantenimiento, en la fácil sustitución de las piezas que lo requieren, en la posibilidad de hacer procesos de deconstrucción selectiva, que admita el reúso o reciclaje de varios de estos elementos de construcción, la reducción de desperdicio de materiales en obra y el incremento en la productividad (Hernán Darío Elejalde López, Ana Milena Joya Camacho, Pbro. Julio Jairo Ceballos Sepúlveda, 2015).

3.4. Prefabricación

La prefabricación ha sido empleada desde muchos años atrás por los antiguos romanos que utilizaron moldes en la construcción de sus redes de acueducto, en los sistemas de drenaje y túneles. En Francia, en 1891 se registran los primeros avances de una empresa que prefabricaba vigas de hormigón y para 1904 se construye el primer edificio de grandes paneles. En 1905 se inicia la construcción de edificios con paneles en Liverpool, Inglaterra, y aunque no se generalizó por toda Inglaterra, esta técnica sí fue acogida en Europa Oriental y Escandinavia (Sarria, 2020).

La característica primordial de la prefabricación es la fragmentación en piezas de una estructura, donde cada una de sus piezas se han producido en fábricas, para luego ser transportadas y ensambladas en el sitio donde se desarrolla la construcción y así dar forma a la edificación o la obra pública. En la búsqueda permanente de soluciones para cada proyecto de construcción se evidencia que todo se puede prefabricar partiendo de la prefabricación mínima hasta la prefabricación integral máxima de varios elementos de construcción. En la Figura 7 se aprecia el uso de elementos de construcción en un edificio de parqueaderos.



Figura 7. Elementos de construcción prefabricados en edificio de parqueaderos (Sawgrass Mills, Sunrise, Florida, Estados Unidos). Fuente: Elaboración propia.

La atención en el desarrollo de los prefabricados se concentró durante un tiempo en los elementos constructivos estructurales, luego se trabajó en otros elementos de construcción. La prefabricación se entiende como la actividad que inicia la industrialización de la construcción, algo que hoy día se reafirma con diferentes estructuras prefabricadas y ejecutadas en países como Francia, Italia y Estados Unidos, que cuentan con una gran tradición en este campo y a los que se une en los últimos años España (Socarrás Cordoví and Vidaud Quintana, 2017).

Las necesidades actuales hacen un llamado a la industria de la ingeniería, arquitectura y construcción para que se unan en pro de generar beneficios ambientales con el desarrollo e implementación de métodos más eficientes apoyados en la prefabricación, las nuevas técnicas de construcción y la evaluación de estrategias modulares alternativas que mejoren la eficiencia de la construcción (Dakir *et al.*, 2024). Se concluye de un caso estudio realizado en Melbourne, Australia, donde se desarrolló “una solución flexible semi-modular para una pared “húmeda” de baño residencial” que los principios del Diseño para Fabricación y Montaje (DfMA) permiten ahorros significativos y eficiencias frente a la construcción tradicional en cuanto a tiempo, materiales y mano de obra, este caso permite conocer de manera práctica los beneficios de la prefabricación basada en el DfMA, la reducción de los tiempos de planificación y construcción al igual que la necesidad de capacitar la mano de obra para que migren a una operación más segura en el desarrollo de las construcciones (Vaz-Serra, Wasim and Egglestone, 2021).

El constante crecimiento en la industria de la construcción permite su contribución significativa al crecimiento económico mundial, sin embargo, paralelamente genera efectos adversos sociales, económicos y ambientales por su alto consumo de energía, las emisiones de CO₂ y los daños severos a los ecosistemas. Análisis e investigaciones promocionan la implementación de la prefabricación como la industrialización de la

construcción sostenible, como una estrategia para migrar de la construcción convencional in situ que le permita suplir los requisitos del modelo de desarrollo bajo en carbono. La prefabricación se apoya en un proceso logístico donde los elementos de construcción son elaborados en una fábrica fuera del sitio del proyecto de construcción para posteriormente ser transportados e instalarlos en la edificación. La industrialización de la construcción con los prefabricados permite reducir los RCD en un 50%, los recursos en 35,82%, el daño a la salud en un 6,61% y el daño al ecosistema en un 3,47%, adicionalmente se ha identificado la prefabricación como la forma prospectiva de contribuir al desarrollo sostenible de la industria de la construcción. La industrialización de la construcción global con la implementación de la prefabricación es un tema de análisis que incluye la identificación de los factores de rendimiento, sostenibilidad ambiental, costo de capital, riesgos de programación, diseño y desarrollo que influyen en la elaboración de los elementos de construcción prefabricados, todos estos factores vistos en el marco de las perspectivas de sostenibilidad ambiental, económica y social (Wu *et al.*, 2021).

3.5. Machihembrado en elementos de construcción

El machihembrado en elementos de construcción de concreto y arcilla es un método mecánico que se utiliza para unir borde con borde de objetos similares en seco, principalmente en pisos, paneles, losas, placas, postes, etc. Cada elemento de construcción tiene en sus extremos de forma opuestas una lengüeta llamado macho y una ranura llamada hembra, esto le permite al elemento de construcción insertar la lengüeta en la ranura creado ensambles en seco sin necesidad de pegantes o fijaciones metálicas y eliminando la necesidad de mortero (American Society for Testing and Materials, 2023).

El machihembrado en los elementos de construcción prefabricados permite la transferencia de cargas entre cada elemento, con una resistencia entre 2,2 y 1,8 MPa al corte (American Society for Testing and Materials, 2022). El machihembrado permite lograr una alineación precisa entre todos los elementos de construcción con una tolerancia dimensional de $\pm 0,2$ mm, lo que genera un sellado hermético que reduce aproximadamente el 70% las posibles infiltraciones de aire, agua y plagas. De esta manera, se cumplen los requisitos de la ISO 2768:1989 (Standardization, 1989) que se encuentra en revisión y será reemplazada por la norma ISO/CD 2768 (ISO, 2025).

La técnica del machihembrado tiene una eficiencia y sostenibilidad en su instalación que le permite lograr durante su ensamble ser 3 veces más rápida que los sistemas con mortero, además de disminuir el consumo de energía durante la construcción de una edificación y eliminar el consumo de agua de mezcla. Su vida útil puede ser superior a 50 e incluso 100 años en condiciones normales (Soto Ardila, 2022). En la Tabla 2 se observan los tipos y usos de machihembrado para elementos de

construcción prefabricados en concreto y arcilla. La sostenibilidad de esta técnica permite la reducción de RCD otorgando a los proyectos donde se implementa la posibilidad de ser certificados bajo los requisitos de la norma ISO 14025:2021 y LEED v4.1 MRc4.

Tabla 2. Tipo y usos de la técnica del machihembrado

MATERIAL	TIPO DE MACHIHEMBRADO	USOS COMUNES	NORMATIVA
CONCRETO	Lengüeta trapezoidal	Bloques estructurales	ASTM C90_23_7.3
	Dovetail (cola de milano)	Paneles prefabricados	PCI MNL_137_22
ARCILLA	Ranura recta	Ladrillos portantes	NTC 4205 Colombia 2022
	micro-joint ($\leq 5\text{mm}$)	Revestimientos	ISO 130006 2022

Fuente: Elaboración propia

3.6. Diseño modular y la construcción prefabricada

La crisis generada por la pandemia de COVID-19 dejó en evidencia las falencias en capacidad de atención médica e institucional y creó grandes desafíos al nivel mundial, varios países trabajaron en la ampliación de sus capacidades en períodos cortos para contener la expansión del virus, con proyectos de construcción rápida, que se apoyan en técnicas de construcción fuera de sitio y en el DfMA, lo que permite adquirir experiencia y una mejor preparación para situaciones futuras. Actualmente, se cuenta con diferentes tecnologías de construcción moderna como son la prefabricación de elementos de construcción y las soluciones volumétricas. Es necesario analizar los esfuerzos y trabajos realizados en la construcción del Hospital Huoshenshan de emergencia de 1,000 camas en Wuhan, China, que se desarrolló en 10 días, demostrando que se requiere dar mayor relevancia al enfoque integrado del DfMA para reconocer los atributos de sus directrices, estrategias, el grado de integración del equipo interdisciplinario y los métodos aplicados para la integración del DfMA (Tan *et al.*, 2021).

En Australia se busca dar una respuesta oportuna a la demanda de vivienda con técnicas de construcción prefabricadas por sus ya reconocidos beneficios, tales como la productividad, el desempeño sostenible, la seguridad, la calidad, la disminución de los tiempos en construcción y de los costos. Las listas de espera por una vivienda asequible son largas y están en permanente crecimiento, lo que impulsa la simulación de eventos que conlleven a mejorar los tiempos de finalización y entrega de las viviendas, sin incluir las decisiones de desarrollo de los diseños. Con el desarrollo de un modelo de dinámica de sistemas se busca la pertinencia en la aplicación de un modelo de construcción con un enfoque diferente al modelo tradicional que tenga en consideración los elementos

constructivos prefabricados desde el diseño. Las actividades inmersas en los procesos de fabricación propios de las técnicas de construcción fuera de sitio o con elementos de construcción prefabricados se estiman más rápidas que las actividades del proceso de construcción tradicional o en el sitio, esto se puede lograr por el sistema de fabricación cerrado y controlado con la capacidad de automatizar las actividades y permitiendo el trabajo en paralelo con la cimentación. Se cuenta con evidencia convincente que permite promover las estrategias de las técnicas de construcción con prefabricados en proyectos de viviendas asequibles en Australia dado que estas permiten que se logren ahorros significativos en los costos totales del proyecto con la disminución de los tiempos de construcción y entrega, la eficiencia en el diseño modular, compartimentación, y replicación del diseño de dormitorios, baños y cocinas, la disminución de los RCD y el impacto ambiental (MacAskill *et al.*, 2021).

Los proyectos de construcción con tiempos cortos se ven favorecidos al ser desarrollados con elementos de construcción prefabricados; utilizar techos prefabricados y/o pisos estructurales otorgan un potencial de rapidez al proyecto y permite una reducción en los gastos de mano de obra y materiales. Un cambio realizado a la sección transversal sólida por sección transversal sándwich la convierte en una losa multifuncional y genera nuevas opciones que ya se están implementando en muchos proyectos, es necesario tener en cuenta que esta losa solo se puede producir como elemento prefabricado en fábrica para lograr reducir los costos en mano de obra, tiempo y materiales, sus ventajas se verán reflejadas en la medida que su implementación sea creciente; como ejemplo del uso de esta técnica se puede mencionar un proyecto de construcción que se desarrolló en la ciudad de Múnich con una producción en 39 semanas de 47.000 m² de losas para piso y se entregaron e instalaron por semana 93 elementos de techo prefabricados, las actividades a desarrollar en el sitio de construcción fueron las de acoplamiento de línea, que se favorecen con una planificación coordinada. El uso de paneles de techo prefabricados elimina los tiempos, los costos y las actividades in situ del encofrado, la instalación de los andamios, las redes eléctricas e hidrosanitarias y de los conductos de ventilación entre otras, porque ya están integradas en su diseño y fabricación, estos componentes de tecnología de construcción se desarrollan con menores costos en la fábrica y eliminan las actividades de instalación en sitio, permitiendo continuidad en las instalaciones con conexiones de acoplamiento sencillos en toda la estructura (Friedrich, 2021).

La construcción modular unida a las tecnologías digitales como la plataforma de modelado de información para las construcciones, BIM, logra cada día mayor aceptación por los beneficios económicos, energéticos, sociales y ambientales que aporta; su integración puede generar y gestionar información a lo largo del ciclo de vida de una edificación desarrollada con elementos de construcción prefabricados que aún está sin explorar. El análisis automatizado del ciclo de vida (LCA) para prefabricados basado en BIM puede incluir varios niveles de análisis según las unidades funcionales o los

elementos prefabricados únicos y se puede realizar con procesos automatizados y parametrizados que fusionen la información de LCA del edificio analizado. Se adelantaron estudios en un edificio en la ciudad de Hong Kong que permitió validar la eficiencia del método, abordar características específicas de la prefabricación, mejorar el diseño y rendimiento holístico de la construcción para disminuir los impactos. Ambientales, sociales, energéticos y económico de las nuevas edificaciones y de las renovadas. En Hong Kong los edificios generan el 90% de las emisiones de CO₂ por el consumo de energía durante su operación, esto incrementa la necesidad de realizar el LCA en la industria de la construcción para trabajar en pro de la disminución en las emisiones de CO₂, esta evaluación o análisis del ciclo de vida se puede aplicar en las fases de producción, construcción, operación y fin de la vida útil de los materiales y/o elementos de construcción. La prefabricación está dada desde el diseño, la elaboración de los elementos de construcción y ensamble en fábrica, el transporte e instalación en sitio y se ha demostrado que minimiza los altos costos de construcción, la generación de RCD, los riesgos en salud, las emisiones de CO₂ y el alto consumo de energía lo que hace más fácil su adopción en el mundo. En Hong Kong la Autoridad de Vivienda promueve el uso del diseño modular y la construcción prefabricada. (Ansah *et al.*, 2021).

Se puede agregar, que, como condición única y necesaria, si se parte de diseño y construcción con elementos de construcción prefabricados (“legos constructivos”) sí será posible la deconstrucción para cumplir realmente los postulados de la EC en el futuro. Sin embargo, dadas las situaciones de contextos económicos, sociales, ambientales, geográficos y culturales, el uso de tecnologías que permitan deconstruir no es siempre posible, la deconstrucción se limita, por lo tanto, a contextos donde la prefabricación es dable, por esto, donde sea posible, es la opción donde las edificaciones se reciclan como tales al utilizar sus elementos de construcción. La unión o ensamblaje de estos elementos conforman un sistema constructivo, decir los sistemas constructivos, en última instancia, están caracterizados por los tipos de elementos constructivos que los componen, y estos por los materiales que son conformados para obtenerlos. Por esto, a continuación, se hace una presentación de algunos sistemas constructivos que se manejan en la región de estudio de la investigación, es decir, el Distrito Especial de Santiago de Cali y su área de influencia.

3.7. Sistemas de operaciones o de construcción

Los sistemas de construcción o de operaciones en la industria de la construcción varían desde aquellos de alto consumo de recursos, energía, agua y generadores de RCD, hasta aquellos donde se minimiza el impacto ambiental. Antiguamente, el impacto era bajo cuando los sistemas de construcción estaban determinados por el uso de materiales naturales renovables. Aunque los sistemas evolucionan, persisten sistemas primitivos que conviven en contextos actuales, como una torre de concreto junto a un rancho de madera, tierra y paja. El crecimiento poblacional y la escasez de suelo

urbanizable obligan a densificar con edificaciones modernas que excluyen materiales ligeros y requieren estructuras más robustas, marcando contrastes que se exponen a continuación.

3.7.1. Sistema de construcción tradicional con muros de ladrillo, adobe o tapial

El sistema de construcción tradicional se fundamenta en técnicas constructivas desarrolladas en el sitio de la obra. De acuerdo con el Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes, NSR-10– Sección A.3.2, este sistema se clasifica como no industrializado porque más del 70% de sus componentes se realizan en la obra. El adobe es un ladrillo basado en tierra sin cocer y el tapial es una pared hecha de tierra compactada (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010; ASTM International, 2018; American Concrete Institute, 2019; The Canadian Association of Alternative Strategies & Assets (CAASA), 2024). El proceso incluye preparación del terreno, ejecución estructural con curado de 7 días y acabados, que requieren al menos 28 días antes de los revoques (Arce Gálvez and Serrano López, 2015) (American Society for Testing and Materials, 2021b) (ASTM International, 2013). Sus ventajas son la adaptabilidad y la disponibilidad local de materiales en un 95%, estas construcciones son frecuentes en zonas rurales, son autoconstruidas con materiales como suelo, caña, guadua y estiércol. La Figura 8 deja ver dos ejemplos de vivienda rural, una en el departamento del Cauca, Colombia, y la otra en Oropesa, Cusco, Perú.

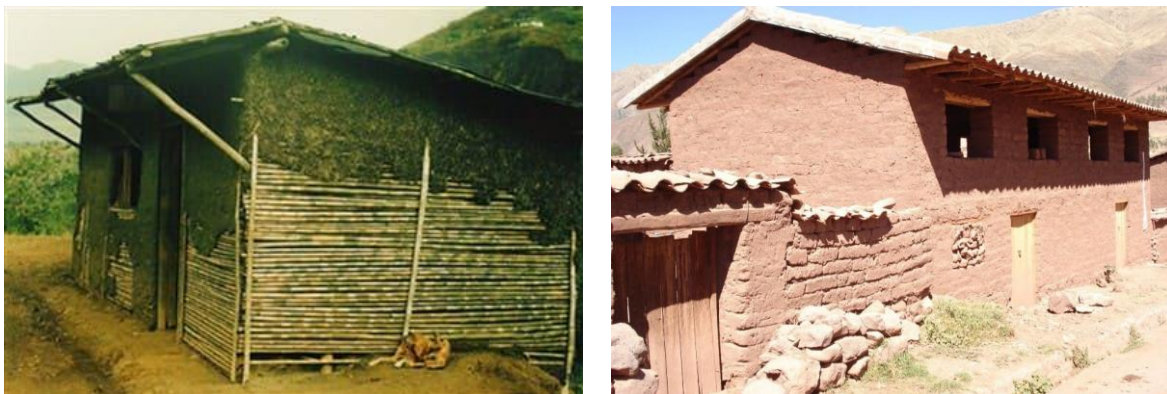


Figura 8. Vivienda rural. Fuente: elaboración propia

3.7.2. Sistema de construcción con mampostería

El sistema de construcción con mampostería es uno de los más antiguos y usados en el mundo, consiste en disponer manualmente piedras, ladrillos o bloques unidos con mortero (Lourenço, 2014). Ejemplos emblemáticos (ver Figura 9) como el Coliseo Romano o Anfiteatro Flavio, que tiene cerca de 2.000 años, evidencian su durabilidad. En Colombia es frecuente este sistema en viviendas con mampostería simple, sin

refuerzos estructurales, destacándose por su buen comportamiento térmico, acústico y bajo costo de los materiales. (ver Figura 9, fotografía inferior)



Figura 9. El Coliseo Romano, Italia - Vivienda Rural con muros de mampostería, Cauca (Colombia). Fuente: Elaboración propia

3.7.3. Sistema de construcción mixto con elementos prefabricados

El sistema de construcción mixto combina elementos prefabricados con componentes vaciados en sitio, optimizando tiempos y recursos hasta un 30% respecto a otros sistemas. Utiliza losas alveolares de $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$, vigas pretensadas, muros de concreto prefabricados y elementos fundidos en obra, que cumplen con las normas ASTM C 1451 y NSR 10 (ver Figura 10). Su eficiencia constructiva es un 40% mayor que la de los sistemas tradicionales, reduce defectos en un 25% según ISO 9001:2015 y disminuye la generación de RCD en un 20% de acuerdo al criterio MRc2 de LEED v4.1 (ASTM International, 2000; Barrett, 2003; Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010; Tierra Armada, 2012; ISO, 2015; Fernandes Rocha *et al.*, 2022; U.S. Green Building Council (USGBC), 2025).



Figura 10. Vivienda de Interés social construcción mixta con elementos prefabricados y componentes vaciados en sitio Valle del Cauca (Colombia). Fuente: Elaboración propia

3.7.4. Sistema de construcción aporticado

El sistema aporticado utiliza pórticos de concreto armado o de acero para darle forma de un esqueleto resistente (McCormac and Brown, 2014). Las vigas y columnas conectadas soportan las cargas mientras que los cerramientos pueden ser variados, incluyendo ladrillos cerámicos o prefabricados como se observa en las edificaciones de la Figura 11. Su eficiencia en distribución de cargas y flexibilidad arquitectónica permiten plantas libres sin muros estructurales, ideal para edificios de mediana y gran altura (Chopra, 1995). Actualmente, se emplean tres tipos de subsistemas: concreto fundido in situ, postensado y prefabricado (Kanavaris *et al.*, 2024).



Figura 11. Edificio en construcción (Distrito Especial de Santiago de Cali, Ciudad Jardín) con tecnología aporticada y elementos de mampostería de ladrillo de arcilla cocida. Fuente: Elaboración propia.

3.7.5. Sistemas de construcción con concreto monolítico (concreto reforzado)

El sistema de construcción con concreto monolítico se usa en edificaciones de mediana y gran altura según la NSR-10 en Colombia. En este estudio se entiende como aquel donde la parte estructural se funde en sitio en una operación continua, para conformar un solo elemento sin uniones como se observa en las imágenes de la Figura 12 (American Concrete Institute, 2019). Es predominante este sistema de construcción en edificios altos, cuyos elementos solo pueden demolerse o implosionarse al final de su vida útil, generando altos volúmenes de RCD y consumo energético. Se considera gran altura a edificaciones de más de 12 pisos. Algunas fuentes establecen un umbral más bajo, de 7 a 10 plantas o de unos 23 a 30 metros de altura, el estándar más aceptado es que un edificio de mayor altura tenga al menos 13 plantas; y se consideran rascacielos a las que superan los 40 pisos que son un subconjunto de los edificios de gran altura (Geoff Craighead, 2009).

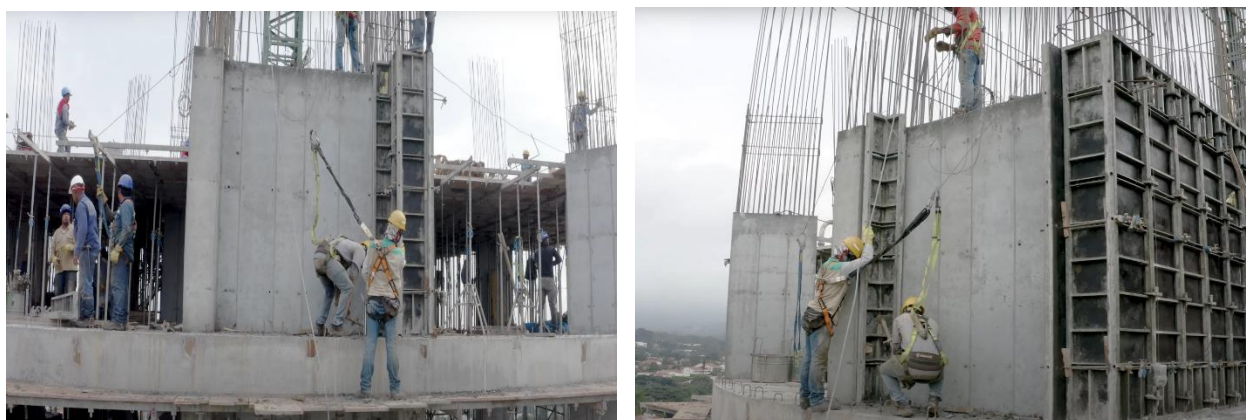


Figura 12. Edificio Torre de Babilonia en construcción (Distrito Especial de Santiago de Cali, Av. Cañas Gordas) Fuente: (Stenformwork, 2025)

3.7.6. Sistema de construcción 100% con elementos de concreto prefabricado y/o desmontable

La construcción 100% con concreto prefabricado, o industrializada, desarrolla todos sus componentes estructurales en fábrica mediante procesos automatizados. Este sistema se caracteriza por el uso de elementos prefabricados, losas alveolares, columnas modulares, muros sándwich y conexiones sísmicas, ensamblando en obra elementos fabricados industrialmente. (Precast/ Pretessed Concrete Institute, 2010) Se clasifica como sistema categoría 4 cuando más del 95% de los elementos son prefabricados. La variante más avanzada es la Construcción Modular Volumétrica (CMV), que lleva la prefabricación a niveles superiores, optimizando los ensamblajes in situ, reduciendo emisiones y RCD en edificaciones de gran altura (Wu *et al.*, 2025), logrando visualizarse como una construcción de paredes prefabricadas con ensamblables de concreto reforzado, que pueden inscribirse para procesos de deconstrucción.

3.8. Economía circular (EC) en procesos de construcción y de deconstrucción

La EC es un ciclo de desarrollo continuo positivo que permanentemente está convirtiendo productos que se encuentran al final de su vida útil en recursos para desarrollar otros productos o materias primas, logrando así cerrar bucles en ecosistemas industriales y disminuyendo los residuos que por décadas se han generado. Este modelo de economía se apoya en tres principios básicos que tienen como objetivos:

- Preservar y aumentar el capital natural controlando permanentemente los stocks finitos y creando las condiciones para la regeneración del medio ambiente.
- Optimizar el rendimiento de los recursos diseñando para reciclar, renovar y reelaborar, lo que permitirá alargar el ciclo de vida útil de los materiales y componentes.

- Promover la efectividad del modelo de EC para disminuir el daño causado a la vida animal y humana, la contaminación del aire, el agua y la tierra.

La EC abarca un campo multidisciplinar de investigación (Lopes de Sousa Jabbour *et al.*, 2019). En ese sentido la estrategia propone transformar los sistemas productivos para dar valor agregado a los diferentes recursos naturales, mediante la innovación tecnológica, la colaboración entre actores e interesados y las propuestas de los nuevos modelos de negocio. La EC es un sistema económico que sustituye al concepto de “final de vida” con reducción, alternativas de reutilización, reciclaje y recuperación de materiales en procesos de producción y/o consumo (del Valle García and Esteban-Ibáñez, 2023).

El modelo de EC se caracteriza por promover la reducción del uso de recursos naturales e insumos, así como por fomentar el empleo de energía limpias y recursos renovables y reciclables, por hacer énfasis en la necesidad de reducir las emisiones durante todo el ciclo de vida del material, por mantener el valor en la economía de los productos, componentes y materiales extendiendo su vida útil (Cerdá and Khalilova, 2015). Para el sector de la construcción la EC plantea un enfoque de ciclo de vida en toda la cadena de valor, pasando por todos los procesos y actores involucrados, desde la extracción de materias primas, pasando por la separación y recolección de residuos, el reciclaje y la elaboración de elementos de construcción o materias primas secundarias, actividades que deben estar presentes en los proyectos de construcción, mantenimiento, rehabilitación y demolición (Fundación Conama, 2018).

El sector de la construcción sigue siendo un sector con procesos enmarcados en una economía lineal ya que la reutilización de materiales o elementos de construcción es muy baja y al final del ciclo de vida de las construcciones el proceso de demolición presenta unas tasas bajas de recuperación. Conama en el 2018 hace una propuesta para la disminución de RCD y la implementación de la EC en el sector de la construcción, la cual está resumida en la Figura 13, que fue elaborada en esta investigación doctoral con base en el modelo de CONAMA (Fundación Conama, 2018). La necesidad del trabajo en conjunto con traspaso del conocimiento entre los profesionales de las fases de diseño, planificación y producción es esencial para la implementación de la EC en este sector. Posteriormente ese conocimiento debe ser entregado a los profesionales de la fase de ejecución para que estos realicen un traspaso de información y responsabilidad a los usuarios quienes deben tener un conocimiento profundo de la construcción, que permita una fase de uso prolongado de la obra apoyada en el mantenimiento y la reforma parcial o total de la construcción, que además, permitan durante la demolición o deconstrucción el retorno máximo de todos los materiales o componentes a fases anteriores del proceso (Fundación Conama, 2018).

MODELO CIRCULAR EN LOS PROCESOS DE CONSTRUCCIÓN Y DECONSTRUCCIÓN

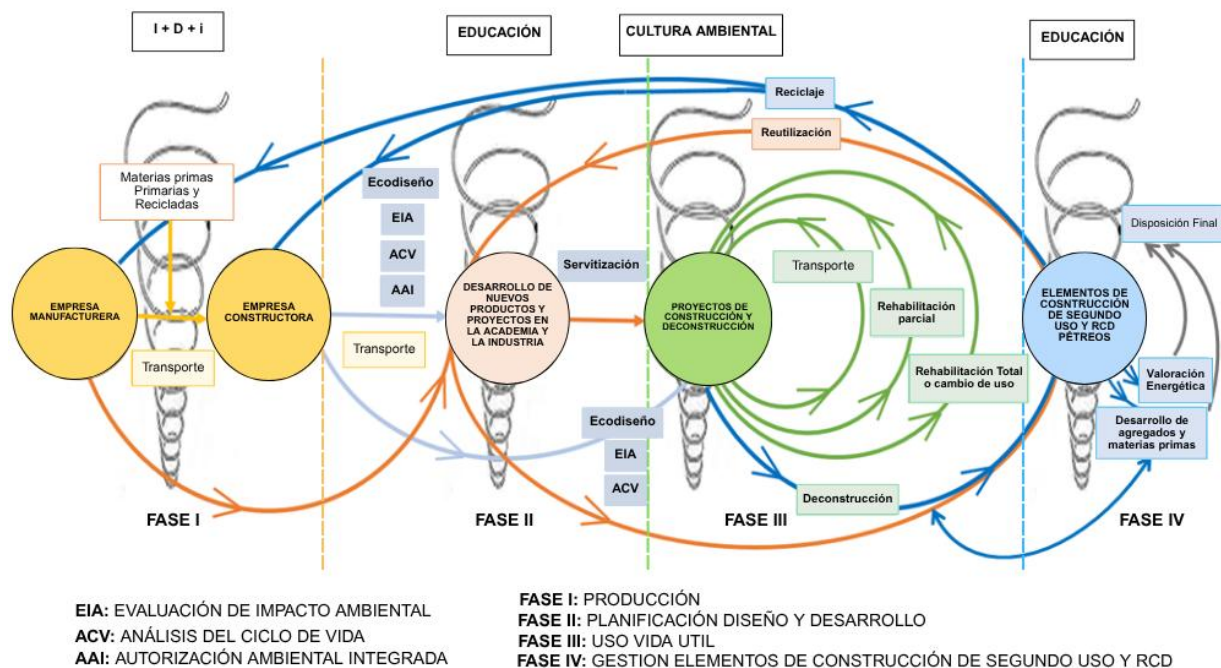


Figura 13. Modelo circular en los procesos de construcción y deconstrucción. Fuente: Elaboración propia con base en CONAMA (Fundación Conama, 2018)

El PGIRS y el PMA tienen como objetivo reducir la generación de RCD en la obra y desarrollar una gestión adecuada de los ya generados, se debe trabajar toda esta gestión con un modelo de EC que contribuya a la disminución del impacto ambiental y económico actual. En el Congreso Nacional del Medio Ambiente realizado en el año 2018 por CONAMA, se define la EC como un modelo económico que utiliza la mínima cantidad de recursos naturales necesarios, incluidos el agua y la energía, para satisfacer las necesidades requeridas en toda actividad, fortalece el uso de materiales reciclados siempre que sea posible, es un modelo que gestiona eficientemente los recursos utilizados, manteniéndolos, reciclándolos y recirculándolos en el sistema económico el mayor tiempo posible alargando su ciclo de vida para minimizando la generación de residuos, disminuye los impactos ambientales contribuyendo en la conservación y regeneración del medio ambiente y los recursos naturales (Fundación Conama, 2018).

3.9. Diseño para la deconstrucción (DfD)

El DfD es un término más en medio de un sin número de términos que se asumen según como sea aplicado a una construcción al final de su vida útil, por ejemplo, se tienen diseño para reutilización, reciclaje, reparabilidad, desmontaje, adaptación, recuperación de productos y fin de la vida útil. El gran beneficio que tiene el DfD es el de extender la vida útil de un edificio porque sus componentes o elementos de construcción son fáciles

y rápidos de remover, permitiendo así su adaptación al cambio para cumplir diferentes funciones a lo largo de su vida útil, el DfD permite que sea más económico remodelar y extender la vida útil de toda construcción, esta es la forma de reducir los costos de renovación y de prolongar la vida útil de un edificio según la necesidad o uso que se le dé, generando su salvación y reutilización (Pulaski *et al.*, 2004a). El DfD en los últimos años está ganando un buen espacio entre los arquitectos e ingenieros de todo el mundo. La creciente preocupación por el alto volumen de RCD generados versus la disminución de los recursos naturales, y los mínimos porcentajes de reciclaje en la industria de la construcción generan una mejor comprensión del DfD y su integración con la EC en la práctica profesional de la arquitectura (Cutieru, 2021).

El DfD como una técnica de diseño, implica tomar decisiones clave desde las etapas iniciales del proyecto con el fin de aumentar las posibilidades de reutilización de los elementos constructivos al final del ciclo de vida de la edificación. El DfD busca administrar de manera responsable todos y cada uno de los elementos de construcción para minimizar el consumo de materias primas, esto se puede lograr durante actividades de renovación o demolición de edificios donde actualmente se pretende dar un nuevo uso a estos materiales en otros proyectos o productos. Reducir el impacto ambiental es una de las metas para los arquitectos e ingenieros al desarrollar los diseños para la construcción, adaptación y renovación de estos. Su mayor valor radica en diseñar para que todos y cada uno de los recursos utilizados puedan ser recuperados y reutilizados económicamente (Souza, 2021).

El DfD viabiliza la deconstrucción y reutilización de los elementos de construcción al final del ciclo de vida de las edificaciones, lo que les permite renacer en otro proyecto con iguales funciones, igualmente permite el DfD que las edificaciones al final de su ciclo de vida puedan ser proyectadas para otra vocación de uso. Las ventajas ambientales del DfD permiten la reducción de RCD's, el menor consumo de recursos y la disminución de las emisiones de CO₂. (Sánchez and Fúster, 2024).

3.10. Nuevas tecnologías en la industria de la construcción

Los cambios generados a los modelos tradicionales trabajados por décadas en la industria de la construcción enriquecen y transforman los proyectos que se desarrollan hoy día apoyándose en nuevas tecnologías como las relacionadas en la Figura 14 (Alpha-Hardin Comp, 2021).

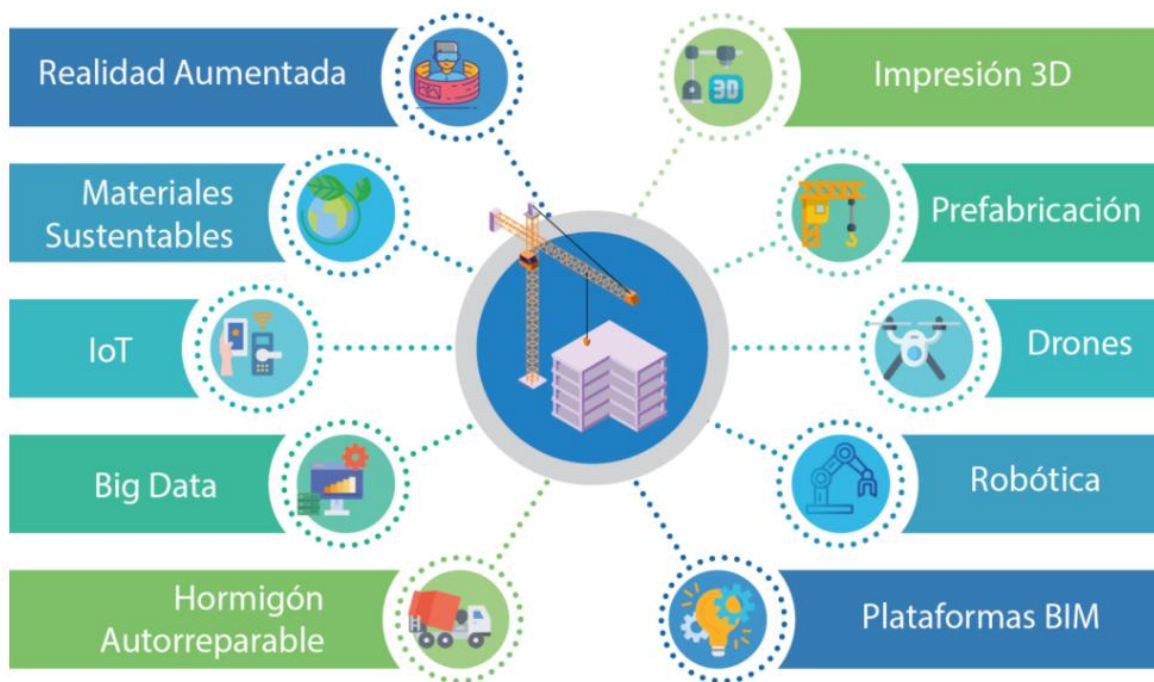


Figura 14. Tecnologías aplicadas en la industria de la construcción. Fuente: Alpha- Hardin Comp, 2021.

Las nuevas tecnologías en la industria de la construcción han adoptado la impresión 3D como método central para la fabricación de elementos de construcción prefabricación que permite reducir los tiempos y el trabajo en la obra, en el desarrollo de edificaciones aún se tienen dificultades para su construcción debido a la dificultad para incluir refuerzos (Alpha- Hardin Comp, 2021). Se cuenta entre las nuevas tecnologías con drones que generan un valioso aporte en todas las actividades a desarrollar desde la logística, el seguimiento y control hasta la generación de información (BigData) en tiempo real, la robótica que cuenta con dos (2) albañiles mecánicos; Motor Manson y SAM100, cuya fortaleza es la productividad y optimización del tiempo, con precisión, seguridad y velocidad, la plataforma BIM integra información geométrica, de tiempos, de costos, ambiental y de mantenimiento, va desde el diseño pasando por la ejecución del proyecto y permaneciendo en todo el ciclo de vida de la construcción reduciendo los costos de operación, centraliza toda la información de un proyecto en un modelo digital, Big Data hace su aporte a través del análisis predictivo, sus macrodatos fortalecen la toma de decisiones anticipadamente y permiten la construcción de patrones meteorológicos, internet de las cosas IOT su trabajo se da por la forma como se construye y habitan los espacios, en todo su ciclo de vida apoyándose en BIM; -construcción sustentable- de hecho el modelo incluye al hormigón autorreparable, por su mayor durabilidad y generación de menor impacto ambiental; busca terminar con la obsolescencia programada. Esta tecnología genera a los interesados e involucrados la posibilidad de conocer y moverse por el espacio antes de que exista, permite ver detalles estructurales,

calcular los materiales, realizar modificaciones y observar la eficiencia del edificio (Alpha-Hardin Comp, 2021).

3.11. Recuperación, reutilización y reciclaje de los RCD

Es posible contribuir positivamente con el medio ambiente al realizar la gestión y recuperación de elementos, recursos y materiales, desviándolos de la disposición final y llevándolos a los mercados de segunda mano, para ello se hace necesario realizar la gestión de datos y la clasificación de los elementos, recursos y materiales, estas actividades son indispensables para el análisis cuantitativo de productos de segunda mano que circulan por las organizaciones de reutilización.

En Nueva York el Centro para la Reutilización de Materiales durante los últimos 10 años, ha organizado las actividades de reutilización y ha recopilado información valiosa sobre las fortalezas y debilidades de sus operaciones, actualmente impulsa la EC siguiendo el ejemplo de Dave Bennink, quien ha fortalecido en los últimos años la Red de Construcción Circular y el Instituto de Deconstrucción de Edificios, dando origen al Centro de Innovación en Reutilización de Elementos de Construcción en la ciudad de Nueva York, el cual estará ubicado en Brooklyn (Jonas Roche, 2025). El Centro cuenta con una metodología para estandarizar el mantenimiento de registros y caracterizar los productos posconsumo que permite agruparlos por la composición de sus materiales, por productos individuales y por categorías de productos. Cuando no se dispone de datos adecuados de algunos productos, se realiza un “estudio de caracterización de campo” que se incorpora en el desarrollo de datos significativos y útiles sobre el peso y la composición del material o producto. Finalmente, esta metodología incorpora la estimación del impacto ambiental generado con la reutilización, utilizando modelos estándar disponibles a través de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EE. UU. y otras entidades mundiales (Fortuna and Diyamandoglu, 2016). La EPA en conjunto con la Oficina de Innovación, Asociaciones y Comunicación (IPCO) implementó en 2009 un proyecto piloto de deconstrucción, durante el cual se llevaron a cabo capacitaciones en deconstrucción y construcción con materiales reutilizados. Posteriormente, se realizaron deconstrucciones en viviendas urbanas mediante la técnica de panelización, que consiste en cortar techos y piso de manera que puedan ser reutilizados en otras edificaciones. En este proyecto piloto se encontró que la deconstrucción requirió 5% menos de presupuesto que el estimado de demolición, haciendo de esta una práctica atractiva para los inversionistas. Por su parte el equipo de deconstrucción dirigido por Dave Bennink, Profesional en EC, del Instituto de deconstrucción de Edificios, ha unido sus esfuerzos con un enfoque colaborativo con los dueños de edificaciones y los nuevos constructores, para abordar el cambio climático apoyados en arquitectos, ingenieros, representantes y entes gubernamentales, para salvar los materiales que se dirigían al vertedero con el objetivo de diseñar, reparar, refabricar, reciclar y reinstalar los materiales recuperados en nuevas estructuras.” (Dave Bennink, comunicación personal, 17 abril 2023) (Dave

Bennink, comunicación personal, 24 mayo 2023) (Dave Bennink, comunicación personal, 13 de junio 2025).

El reciclaje de los RCD es objeto de estudio desde 1970 y las razones principales son la creciente conciencia de la importancia de reciclar los residuos de todas las fuentes posibles en el contexto del “Desarrollo Sostenible”. Los gobernantes que se sumaron a este contexto realizaron encuestas y análisis para estimar el volumen de los RCD generados, encontrándose con cifras verdaderamente alarmantes. En la Unión Europea (UE) los RCD generados equivalen a los residuos más pesados y voluminosos. Para el 2022 toda la UE generó más de 415,18 millones de toneladas de RCD, valor que representa el 38,4% del total de todos residuos generados, además es necesario tener en cuenta que la industria de la construcción es uno de los sectores con mayor inversión (Eurostat, 2024). El poder legislativo juega un papel fundamental en la gestión y el reciclaje de los RCD y es a través de la Directiva Marco de Residuos revisada 2008/98/EC (WFD) que la UE establece su objetivo de lograr una recuperación del 70% de los RCD generados en edificios y obras públicas para el año 2020. Las estadísticas para el 2011 en toda la UE muestra una variación entre el 10% y el 40% en los niveles de recuperación y reciclaje de los RCD. Mientras que para el año 2012 en Alemania los RCD alcanzaron una tasa de valorización del 95,5% y su principal objetivo es mantener esta tasa a futuro, en Dinamarca su objetivo es mantener la tasa de reciclaje y lograr una mejor calidad de sus RCD reciclados, sin embargo en Francia la situación es diferente, para ellos la generación y gestión de los RCD es un tema nuevo, dinámico, que se afecta por la ausencia de voluntad política, del interés y participación de los clientes en general, y de su dependencia con la logística, los costes y la política fiscal (Oliveira Neto *et al.*, 2017).

3.12. Deconstrucción

Las construcciones actuales son grandes, estacionarias y complejas, sus elementos de construcción son de valor relativamente bajo y a menudo difíciles de separar; un gran volumen de estos materiales y elementos de construcción no son fáciles de reciclar. El valor de una construcción está dado por la funcionalidad y confort que brinda al ensamblar todos los materiales y elementos de construcción de acuerdo con el diseño. Esta situación hace que los materiales y elementos de construcción conserven mayor valor cuando se puede deconstruir y se reutilizan, que al ser reciclados. Mucho de lo que hoy día se llama reciclaje no es más que el ciclo descendente de un material o elemento de construcción porque es llevado a un uso de grado inferior al que inicialmente fue desarrollado. Por ejemplo, el hormigón se puede reciclar como un agregado de bajo valor, al igual que los residuos de madera que son molidos y utilizados como fibra, ambos son modificados y pierden valor sus propiedades; situaciones como estas evidencian la necesidad de recuperar materiales y elementos de construcciones para su reutilización antes de que requieran recursos adicionales para su transformación, tales como la

energía, transporte, agua o que sean llevados a sitios de disposición final. (Pulaski *et al.*, 2004b).

La generación de nuevas y múltiples tecnologías le otorgan a la industria de la construcción una transformación con innovación que ofrece cambios permanentes a la forma de concebir sus procesos y actividades. Esta transformación permite la reducción de costos y tiempos, el desarrollo de nuevas construcciones sustentables, eficientes, seguras y con una mayor productividad, la innovación en la construcción y las nuevas tecnologías deben unirse para favorecer la deconstrucción y así ampliar el ciclo de vida de los materiales y/o elementos de construcción (Alpha- Hardin Comp, 2021). La deconstrucción puede ser asumida como una estrategia que permite cumplir con los objetivos ambientales, sociales y económicos de una región o de un país. Se requiere de mano de obra calificada y capacitada en las actividades propias de la deconstrucción; sus costos, los materiales y/o elementos de construcción recuperados deben ser competitivos y requieren de un mercado para su circularización.

Los factores aliados al proceso de deconstrucción están dados por los costos de disposición final en vertederos, de la mano de obra y maquinaria, al igual que del tiempo, la dificultad en las actividades de desmonte y del valor de los materiales y/o elementos de construcción recuperados; los materiales peligrosos son un gran desafío para la deconstrucción.

El impacto ambiental se puede reducir en la medida que los RCD sean aprovechados por un receptor a través de simbiosis industrial, como se reglamentó en el artículo 1 de la Resolución 1257 de 2021 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021). Sin embargo, la ventaja de la deconstrucción es que los elementos de construcción pueden ser utilizados en otro proyecto de construcción o de remodelación (Pulaski *et al.*, 2004b) y que los elementos de construcción recuperados no sean sometidos a demolición para disgregarlos. Por lo anterior, urge un cambio a nivel global que permita pasar del proceso de demolición que genera hasta un 50% de RCD en todo el mundo al proceso de deconstrucción para desviar de manera adecuada estos materiales y/o elementos de construcción de los vertederos a sitios de depósito que permitan su circularidad y prolonguen su ciclo de vida, en la Tabla 3 se aprecia el análisis técnico comparativo entre deconstrucción e implosión, otro sistema utilizado al final del ciclo de vida de las edificaciones.

Tabla 3. Implosión vs. deconstrucción: análisis técnico comparativo

ITEM	DECONSTRUCCIÓN	IMPLOSIÓN	REFERENTES
Descripción	Desmontaje selectivo uno a uno de los elementos de construcción para ser reutilizados	Demolición con explosivos controlados en corto tiempo	OSHA 1926.900 (EE.UU.) / EN 15804+A2 (UE)
Tiempo	Semanas a meses	Horas	Camacol 2023
Normativa Colombiana	Resolución 0472/2023 (Incentivos fiscales)	Resolución 1023/2023 (ANM)	Ley 2173 de 2021 (Multas RCD)

Fuente: Elaboración propia

Este paso permitirá ahorros significativos en los costos de uso de materias primas no renovables, en los costos de gestión y vertimiento de los RCD, además, con la deconstrucción se pueden controlar las perturbaciones, los peligros y riesgos para la salud que causan la demolición y la implosión, en la Tabla 4 se hace una comparación de los impactos ambientales entre implosionar vs. deconstruir.

Tabla 4. Costos comparativos (USD/m², 2024)

ITEM	DECONSTRUCCIÓN	IMPLOSIÓN	DIFERENCIA	REFERENCIAS
Ejecución	25-50	50-100	100%	ANDI (2023)
Gestión RCD	2-5	5-10	-60%	EPA 600/R-23-004
Seguros	3-8	20-50	567%	Lloyd's Construction Report
Valor Recuperado	10-20	\$ 0	+∞%	Ellen MacArthur Found. (2023)
Total	75-160	37-75	103%	

Fuente: Elaboración propia

La afectación económica de una implosión es un 103% más costosa por metro cuadrado (en dólares, durante el 2024), mientras que el impacto ambiental se reduce entre un 50% y un 90% cuando se opta por procesos de deconstrucción.

Es preciso admitir la deconstrucción como una estrategia de sostenibilidad económica y ambiental para que se dé el DfD, igualmente todo el soporte que requiere para lograr fortalecer los conocimientos técnicos y las herramientas de apoyo para su desarrollo. Por esto, es necesario un cambio de cultura y costumbres que fortalezcan el proceso de deconstrucción (Akinade *et al.*, 2017). El desarrollo y uso de indicadores ambientales contribuyen a determinar tecnologías de deconstrucción más aproximadas al cumplimiento de los criterios de la EC. El Índice de Facilidad de Desamble (DEI) que incluye 17 variables es una propuesta sugestiva por ser cuantitativa y realmente señalar

cuando toma el valor de 1 la plenitud de la deconstructibilidad de una tecnología de construcción (Hernández, Díaz and Rodríguez-Grau, 2025)

3.13. Reconstrucción y segundo uso de edificaciones deconstruibles

La actual deconstrucción y el segundo uso de los elementos de construcción utilizados en la torre Nakagin Capsule construida en Tokio en 1972, ilustrada en la Figura 15 (Kisho Kurokawa, 2015), deslumbró a toda la comunidad nacional e internacional por las oportunidades que genera a los elementos de construcción y a las edificaciones cuando cumplen su ciclo de vida. En 1972 se apreciaba como una torre futurista de 13 pisos compuesta por 140 cápsulas desmontables, cada una adecuada para un residente individual, con una ventanilla mirando hacia afuera. Por su diseño modular y estética minimalista; la Nakagin Capsule Tower fue una maravilla del diseño del siglo XX con la intención de expresar una teoría posguerra japonesa de la arquitectura como un organismo vivo, que daba origen al metabolismo en el diseño y la construcción, como lo explicó el arquitecto Kisho Kurokawa, quien diseñó la torre e imaginaba edificios con partes modulares que pudieran unirse y desprenderse según fuera necesario. “Si reemplazas las cápsulas cada 25 años, podría durar 200 años”, dijo Kurokawa en el 2007, el año en que murió, “Lo diseñé como arquitectura sustentable” (Hornyak, 2024).



Figura 15. Torre Nakagin Capsule Tokio. Fuente: (Tokio Art Beat, 2023)

La Nakagin Capsule Tower fue desmantelada en el 2022 y sus 140 cápsulas prefabricadas fueron retiradas una por una. Solo, 23 cápsulas lograron sobrevivir al abandono y falta de mantenimiento. Luego de algunas renovaciones, estas 23 cápsulas huérfanas inician una segunda vida, serán las polinizadoras de nuevas ideas arquitectónicas por todo Japón y el mundo, al ser convertidas en piezas de museo y

espacios de arte. La imparable reconstrucción de cada pieza de la torre Nakagin Capsule le dio vida nuevamente a 23 cápsulas, eliminando el asbesto, reparando cada una de sus partes, repintándolas e instalando nuevos accesorios (Tokio Art Beat, 2023).

En 2018 se construyó “The Green House”, un edificio modular y completamente desmontable en Utrecht, Países Bajos. El proyecto fue diseñado para ser oficina gubernamental moderna, temporal y desmantelable, para ser reconstruida en un futuro, en otro lugar. La base de la edificación se compone de bloques de hormigón prefabricados, sobre los cuales se edificó una estructura desmontable de acero galvanizado. Para la fachada se utilizaron paneles prefabricados de entramado de madera y paneles de vidrio reutilizados del antiguo edificio Knoopkazerne, por su parte el piso de la planta baja está compuesto de ladrillos recuperados de un antiguo muelle de Tiel, lo que destaca el enfoque de sostenibilidad y circularidad del proyecto (Castro, 2018).

En 1999, en Países Bajos se lanzó el programa IFD-Building (edificio industrial flexible y desmontable) centrado en el uso de métodos de construcción industrial que pueden responder a grandes necesidades de volumen y adaptarse rápidamente, ofreciendo solución ante situaciones tales como una catástrofe ambiental. Una construcción derivada de este proyecto es la oficina de de “Damen Bouwcentrum y ABT” en Delft, construida con piezas industriales ensambladas, como columnas y vigas prefabricadas y desmontables, en hormigón (Van den Brand et al., 2003). Otro ejemplo es el edificio Vleuten, un centro de información de planeación residencial, construido con paredes, pisos y columnas de hormigón atornillados entre sí, facilitando su desmontaje una vez el proyecto de vivienda finalice (Bart and Kowalczyk, 2010).

Durante el 2020 se trabajó en Colombia un proyecto denominado Maquina Verde, como una propuesta innovadora de un grupo de investigación de la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá, quienes participaron en el Programa de Experiencias Internacionales (PEI). La ubicación del proyecto es en Cartagena de Indias específicamente en la Ciénaga de La Virgen como un nuevo proyecto de vivienda, Se enfoca en el uso de un sistema modular prefabricado de metal y madera, una de sus características es la armonía con el paisaje y el clima de sus materiales, dado que se desarrolló con un montaje de estructuras escalonadas, fachadas y techos móviles, estos últimos equipados con paneles solares y sistemas de recolección de aguas lluvias y energía (Baraya, 2020).

En la construcción actual en Colombia, y en el Distrito Especial de Santiago de Cali en particular (ver Figura 16), se aprecia que las construcciones de nuevos centros comerciales, edificaciones para restaurantes y sitios de diversión, entre otros, se están construyendo con estructuras de perfiles de acero y elementos de cierre y cubiertas

ligeras. Si bien, el material principal no es de prefabricados de concreto, sus elementos constructivos sí son desmontables, lo que hace deconstruibles a estas edificaciones.



Figura 16. Estructura de una edificación en el sur del Distrito Especial de Santiago de Cali. Fuente: Elaboración propia

3.14. Marco normativo y legal

En el marco normativo y legal se cuenta con avances y políticas a nivel global que están siendo trabajadas desde su creación, implementación, verificación y control en los países de Asia, Europa, América y Colombia en pro de una EC en el sector de la construcción de edificaciones. La nueva realidad que se vive hoy en día, marca una tendencia hacia la construcción sostenible que toma mayor relevancia y se hace inclusive más urgente de desarrollar.

Existen en el mundo alrededor de 45 esquemas de certificación en construcción sostenible, cuyo objetivo es validar la sostenibilidad de los proyectos e integrar criterios ambientales y sociales que permitan a sus usuarios disminuir el consumo de recursos naturales y el impacto ambiental que causa el sector de la construcción. En Colombia, los más usados son “Certificación CASA, Certificación EDGE y Certificación LEED”, con un reconocimiento en el mundo, como el país con el mayor número de certificados por área (m²) registrada y certificada en Certificado EDGE. Cada uno de estos certificados está dado por segmento o tipo de proyecto (David Dominguez y Ramiro Buitrago Issa, 2020).

Certificación CASA V3 (Excelencia en Arquitectura y Construcción Sostenible): Desarrollado por el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS), se otorga a los proyectos de Vivienda de Interés Social VIS y No VIS, Proyectos con otros usos tipo “Co-living” y Proyectos de estancias para servicios turísticos de corta y larga estadía. El

puntaje asignado depende de las estrategias implementadas, tiene un rango de 1 a 5 y se representa con estrellas (CCCS; et al., 2023)

Certificación EDGE: Esta certificación se otorga a proyectos de vivienda, hospitales, instituciones educativas, hoteles, oficinas y centros comerciales. Certifica desde el desarrollo de los materiales y elementos de construcción, el uso eficiente de la energía y el agua con un ahorro mínimo del 20% en cada uno de ellos, en algunas regiones de Colombia el ahorro debe ser mayor al 20%, según lo establecido en la Resolución 0549 de 2015 del Ministerio de Vivienda para nuevos proyectos de construcción (CAMACOL, 2025) (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2015).

Certificación LEED: Este certificado se centra en garantizar la calidad ambiental interior para sus usuarios y en el ahorro de agua y energía, tiene en consideración la evaluación de: la integración del diseño, la locación y el transporte, la eficiencia en agua, energía y atmósfera, los materiales y recursos, la calidad del ambiente interior, la innovación en el diseño, la prioridad en la región, la autosostenibilidad del sitio. LA certificación LEED es considerada como el principal sistema de certificación en construcción sostenible del mundo y tiene cuatro (4) niveles de certificación. Certificación LEED, LEED PLATA, LEED ORO y LEED PLATINO (David Dominguez y David Serna, 2020).

Para Asia, Europa, América y Colombia se evidencia una tendencia en la normalización y generación de leyes que permiten avances significativos para el sistema de construcción de edificaciones bajo los principios de una EC. En la Figura 17 se resaltan los países y sus avances en EC. Posteriormente, se presentan los avances normativos de estos países.

AVANCES NORMATIVOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE LA ECONOMÍA CIRCULAR



Figura 17. Países con normativa para la implementación de la EC estudiados. Fuente: Elaboración propia

3.14.1. China

El gigante asiático, como es conocido, es de los más grandes consumidores de materias primas, siendo responsable de emitir 10.944.686 kilotoneladas de CO₂ que afectan el medio ambiente (Grupo Banco Mundial, 2024). China es pionera a nivel global en la implementación de la EC, valorando su gestión durante los 70 cuando creó las normas de conservación energética; en los 80 evidenciaron un mayor crecimiento con la generación de normas para la implementación de la EC. Durante el 2004, la Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma de China (CNDRC) con la normatividad desarrollada inicia procesos basados en la EC, para el año 2009 se valora todo el trabajo realizado desde la década de los 70 y se promulga la Ley de Promoción de la EC de la República de China (KaiMBA, 2021), en la Tabla 5 se presentan las leyes para la implementación de la EC en China.

Para el año 2017, China bloquea la entrada de residuos de países como España y Estados Unidos que posteriormente se reincorporaban a sus procesos, productivos y en el año 2021 toma la decisión de no recibir ningún tipo de residuo de otros países, es en esta época cuando se regula la recepción de residuos clasificados para ser reutilizados en las cadenas productivas (Residuos Profesional, 2020); se establecieron como metas por la Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma reducir los consumos de energía al

13,5% y agua al 16% para el 2025 y un hito primordial de un tope máximo de emisión de CO₂ al 2030 y la neutralidad de carbono al 2060 (Myllyvirta *et al.*, 2023).

Se estima que la producción anual de RCD en China es del 35% de los residuos sólidos urbanos superando 2 mil millones de toneladas anuales y la tasa de utilización integral fue solo del 40% para el año 2021 (Ma *et al.*, 2023). Estas cifras aumentan con la emisión de CO₂, ya que la dinámica económica pos pandemia establece un escenario de crecimiento del sector; sin embargo, decisiones gubernamentales exigen tomar medidas a los fabricantes como la reducción de la producción de acero de un 30% a un 50% para así disminuir la tasa de emisiones (Acermetal, 2022).

La república de China es pionero en promover una legislación específica. En el 2020 el presidente chino, Xi Jinping, anunció a la ONU su compromiso por reducir las altísimas cifras de emisiones de CO₂ a través de una revolución verde. “Este anuncio marca un giro en la estrategia económica nacional, convirtiendo la EC en un asunto prioritario, destacando 4 áreas: Producción circular, sistemas industriales circulares, apuesta por el reciclaje, y consumo más ecológico” (TheCircularLab, 2022).

Tabla 5. Reglamentación para la implementación de la EC en China.

ACTO ADMINISTRATIVO	EMITE	OBJETO	DESCRIPCIÓN
Ley de Promoción de la Economía circular	IV Reunión del Comité Permanente del XI Asamblea Nacional Popular	Facilitar la EC, aumentar la tasa de uso de recursos, proteger y mejorar el medio ambiente y lograr el desarrollo sostenible.	Se determina el compromiso legal para la implementación de la EC, apuntando a la mejora del uso y eficiencia de los recursos, la protección del medio ambiente y la disminuyendo residuos
La Ley de Protección del Medio Ambiente (LPMA 2015)	VII Reunión del Comité Permanente de la XX Asamblea Nacional Popular	Proteger y mejorar el medio ambiente, prevenir y controlar la contaminación, salvaguardar la salud pública, promover la construcción de la civilización ecológica y fomentar el desarrollo económico y social sostenible	Revisada y adoptada el 24 de abril de 2014, entra en vigor el 1 de enero de 2015. Esta Ley se aplicará al territorio de la República Popular China y otras áreas marítimas bajo su jurisdicción.

Fuente: Elaboración propia 2024

3.14.2. España

Luego de la recesión económica del periodo 2008-2014 se inicia en España un movimiento relacionado con la sostenibilidad en los procesos industriales, esta crisis evidencia el bajo consumo de los recursos no renovables como resultado de las presiones ambientales para disminuir su uso con una afectación en su economía (Cotec *et al.*, 2023).

Según el Instituto Nacional de Estadística de España la generación de residuos para el 2020 fue de 105,6 millones de toneladas; tomando de estos 102,3 millones de residuos no peligrosos representados en residuos: minerales, vegetales, animales y

mezclados. Esta clasificación permite ver los residuos generados por los sectores residenciales e industriales españoles, dejando en claro que el 21,3% de los residuos generados son del sector residencial, y el 78,7% son del sector industrial, observando que el sector de construcción generó el 30,8% de los residuos a nivel nacional y dejando en firme una reducción del 1,2% en el área urbana, y del 57,6% en área industrial en el mismo periodo (INE Instituto Nacional de Estadística, 2022).

Los actos administrativos que regulan la producción y gestión de los RCD, y las exigencias de seguridad de las estructuras de hormigón, acero y mixtas hormigón-acero están regladas por decretos reales, según se informa en la Tabla 6. Igualmente, se aprecia, en la misma tabla, que la Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición, GERD, ha emitido la Guía española de áridos reciclados procedentes de construcción y demolición RCD. En la Tabla 7 se muestra una breve descripción de los actos administrativos relacionados con la reglamentación para la implementación de la EC en España. Se informa el organismo que emite la providencia y el objeto de cada una. En la Tabla 8 se indican las regiones de España que han incorporado la EC en sus políticas de desarrollo.

El concepto de EC es de mayor estudio y tendencia en los últimos años y está soportado en las diversas políticas que incentivan el desarrollo sostenible, el diseño ecológico, el reciclaje, la construcción sostenible y el segundo uso de los elementos de construcción y las edificaciones (Construcia, 2020).

A pesar del avance en el desarrollo de planes, programas y normativas relacionadas con la EC en el sector público España durante el 2019 solo cumplió con un 10% de los requerimientos exigidos del uso de materiales recuperados, lo que lo sitúa por debajo de otros países de la región, lo que evidencia el estancamiento de la transición que se requiere de la economía lineal a la EC (Cotec *et al.*, 2021).

Tabla 6. Reglamentación para la gestión de residuos en España

ACTO ADMINISTRATIVO	EMITE	OBJETO	DESCRIPCIÓN
Real decreto 105/2008	Ministerio de la Presidencia	Regula la producción y gestión de RCD	Establece el régimen jurídico de la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición, para fomentar su prevención, reutilización, reciclado y otras formas de valorización para contribuir a un desarrollo sostenible de la construcción.
Guía española de áridos reciclados procedentes de construcción y demolición RCD	Proyecto GEAR	Caracterizar y estandarizar los áridos reciclados provenientes de RCD, para mejores aplicaciones en obra y garantizar la durabilidad y el comportamiento mecánico y ambiental	La Guía propone estándares de calidad que determinan la adecuación a determinados usos de cada calidad de material reciclado, así como las evaluaciones a realizar en los materiales de construcción reciclados

Tabla 6. Continuación - Reglamentación para la gestión de residuos en España

ACTO ADMINISTRATIVO	EMITE	OBJETO	DESCRIPCIÓN
Real decreto 470/2021	Ministerio de la Presidencia, Relaciones con las Cortes y Memoria Democrática	Establecer las exigencias de las estructuras de hormigón, acero y mixtas hormigón-acero para satisfacer los requisitos de seguridad estructural y seguridad en caso de incendio, además de proteger el medio ambiente.	Responde a la necesidad de actualizar la reglamentación vigente sobre estructuras de hormigón y de acero, incluye una nueva reglamentación para las estructuras mixtas de hormigón y acero.

Fuente: Elaboración propia 2024

Tabla 7. Reglamentación para la implementación de la EC en España:

ACTO ADMINISTRATIVO	EMITE	OBJETO	DESCRIPCIÓN
Ley 22 de 2011 de residuos y suelos contaminados.	Jefatura del Estado	Regular la gestión de los residuos con medidas que prevengan su generación y mitiguen los impactos en la salud humana y el ambiente.	Su aplicación contempla exclusiones a residuos contaminados y/o peligrosos.
Programa Estatal de Prevención de Residuos 2014-2020	Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente	Hacer eficiente el uso de los recursos, disminuir la generación de residuos	Trasformar la economía actual, en un nuevo modelo de crecimiento basado en el uso eficiente de los recursos
Real Decreto 105 de 2008	Ministerio de la Presidencia	Establecer el régimen jurídico de la producción y gestión de los RCD.	Establece criterios sobre la utilización de RCD inertes en obras de restauración, relleno o valorización.
Real Decreto 1481/2001	Ministerio de Medio Ambiente	Regular la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero	Definición de los tipos de residuos, establecer requisitos técnicos exigibles a las instalaciones, una nueva estructura e imputación de los costes.
Real Decreto 1304/2009	Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino	Modificar el Real Decreto 1481/2001	Se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero
Orden MAM/304 de 2002	Ministerio de Medio Ambiente	Publicar las operaciones de valorización y eliminación de residuos y la lista europea de residuos	Divulgar de acuerdo con la lista de la UE de residuos su gestión, valorización y eliminación e impulsar las medidas que mitiguen los impactos adversos
Real Decreto 653 de 2003	Ministerio de Medio Ambiente	Establecer las medidas a que deben ajustarse las actividades de incineración y coíncineración de residuos	La incineración para reducir su volumen, su peso y modificar su composición. Con la coíncineración se utilizarán como combustibles
España Circular 2030	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico	Reducir el consumo nacional de materiales en un 30%, mejorar la eficiencia en el uso del agua un 10%, recortar la generación de residuos un 15%, llevar las emisiones de CO ₂ por debajo de los 10 millones de toneladas al 2030	Impulsa un nuevo modelo de producción y consumo en el que el valor de productos, materiales y recursos se mantengan en la economía durante el mayor tiempo posible, que se reduzcan al mínimo la generación de residuos y se aprovechen con el mayor alcance posible

Fuente: Elaboración propia 2024

Tabla 8. Regiones de España que ha incorporación la EC en sus políticas de desarrollo.

REGIÓN	ACTO ADMINISTRATIVO	OBJETIVO	DESCRIPCIÓN
Andalucía	Declaración de Sevilla 2017	Fomentar y desarrollar políticas de EC que promuevan un modelo de desarrollo urbano sostenible, inclusivo y resiliente.	Genera estrategias de reducción de vertido, prevención de los residuos, fomento del ecodiseño, la reutilización y el reciclaje.
Extremadura	Estrategia de Economía Verde y circular” (Junta de Extremadura, 2017) Extremadura 2030	Potenciar la producción de bienes y servicios a niveles de máxima reducción en el uso de materias primas, agua, energía y de generación de residuos	La ordenación territorial, el urbanismo sostenible y la construcción verde, con la priorización de la rehabilitación integral antes de desarrollar una nueva construcción
Cataluña	Estrategia de impulso a la economía verde y la economía circular” (Generalitat de Catalunya, 2015)	Establecer prioridades entre las actuaciones futuras del Gobierno, impulsar y dar visibilidad a los esfuerzos realizados en materia de EC y economía verde	incrementar el liderazgo empresarial y la capacidad de cambio hacia nuevos modelos que identifiquen la edificación su rehabilitación sostenible como una oportunidad de negocio, innovación y crecimiento

Fuente: Elaboración propia 2024

3.14.3. Países Bajos

En la década de los 90 se apertura la innovación en el ecodiseño con una política de incentivos que facilitó a las empresas desarrollar procesos de reciclaje y valorización de residuos utilizándolos como materia prima y/o eliminándolos de forma segura (Chavez Brenes, 2020).

La implementación de la EC en Holanda le permite tener altos niveles de calidad en los procesos productivos y los manejos de los recursos, posicionándolo como un referente mundial; los sectores productivos que acogieron la política del ecodiseño en sus procesos apropiaron conocimientos que permiten hoy en día tener profesionales capacitados y especializados en EC. La búsqueda permanente de la valorización de los residuos mediante el reciclaje sin el uso de la incineración permite en Países Bajos que otros procesos utilices esos residuos siendo esta una de las metas durante muchos años. Actualmente el gobierno holandés desarrolla un proyecto cuyo mayor objetivo es lograr una economía 100% circular para el 2050. Este proyecto ha logrado resultados positivos alcanzando un reciclaje del 80% del total de los residuos generados, incinerando el 16% y dejando un 4% en un relleno sanitario (Chavez, 2017).

Las políticas y estrategias del gobierno en Países Bajos acogen también al sector de la construcción y la gestión de los residuos, ya que estos también son parte del sector industrial con gran valor económico; la construcción recicla el 90% de los residuos

generados en sus actividades, esto como una estrategia a la escasez de las materias primas y la dificultad para obtener áridos naturales (Barroso, 2013).

La Agencia de Evaluación Ambiental de los Países Bajos (PBL) junto con Estadísticas de los Países Bajos (CBS) y el Instituto Nacional de Salud Pública y Medio Ambiente (RIVM) desarrollan un monitoreo permanente al avance de la EC, a los problemas surgidos en la implementación de la EC y sus estrategias, a la articulación social de sus programas y a la gestión de las políticas públicas, contemplando cada uno de los objetivos de la meta holandesa de la EC (Hanemaaijer *et al.*, 2023); igualmente, identifican las varianzas y falencias de los objetivos no cumplidos, como el caso analizado en el estudio denominado “Circular Economy What We Want To Know And Can Measure” donde se detectó que a pesar del alto volumen de reciclaje de los residuos (80%), el uso de materiales secundarios es solo del 8% en la economía holandesa (Potting *et al.*, 2018).

Uno de los referentes en EC, por estar a la vanguardia con múltiples iniciativas, es el marco normativo y legal de los Países Bajos, que se fundamenta en una de sus iniciativas insignia “Una Economía Circular en los Países Bajos para 2050” la cual fue desarrollada y publicada en el 2016 por Ministerio de Infraestructura y Medio Ambiente y el Ministerio de Asuntos Económicos, esta iniciativa establece las medidas para gestionar materias primas, productos y servicio se forma eficiente reduciendo el uso de recursos en un 50% para el 2023 y con un objetivo al 2050 de una economía 100% circular (Escuela de unidad editorial, 2023).

Los acuerdos logrados voluntariamente durante los años 2017-2019 con el sector privado, la sociedad civil y el gobierno permiten a Países Bajos lograr una reducción escalonada en el uso de materias primas vírgenes, posteriormente, la meta es lograr que el 100% del plástico sea reutilizable o reciclable, todo esto con metas al 2025 (Chavez Brenes, 2020).

Los Países Bajos han trabajado en la implementación del modelo EC con buenos resultados en los procesos de reciclaje, valorización, explotación o importación de materias primas y control de la emisión de CO₂. Los RCD se reciclan entre 85-95% logrando construir el primer carril de bicicletas del mundo en plástico reciclado (tapas de botellas). Cuentan con un edificio sostenible para oficinas que ha sido premiado por contar con paneles solares que permiten la recarga de celulares, computadores portátiles y carros eléctricos (Iresiduo, 2019). Sus estrategias y planes para implementar la EC permiten desarrollar proyectos y programas que articulan la sociedad con el sistema productivo y ambiental generando agentes de cambio para clasificar los residuos como el primer escalón de la cadena de aprovechamiento, reúso, prolongación de vida y reciclaje de elementos; todas estas iniciativas se enmarcan en programas y normativas gubernamentales junto a los programas de recolección, selección, reciclaje,

comunicación y educación como claves para alcanzar los objetivos de una EC. En Países Bajos existen programas articulados a 80 escuelas primarias desde el 2022, el objetivo es trabajar con la población infantil y los residentes de los municipios donde hay cobertura, para lograr mejores resultados en la separación de los residuos desde la fuente (Duurzaamheid, 2022).

En Ámsterdam se cuenta con la implementación estratégica de un modelo sostenible llamado “Dona de Kate Raworth” por su alineación con la EC y su ubicación se le ha llamado La Dona de Ámsterdam (Republica, 2020). Este es un proyecto implementado en el 2020 cuya estrategia es a 5 años, incluye medidas concretas en lo que se refiere a alimentos y productos locales, programas de reparación de muebles, equipos, uso de materiales reciclados de la construcción y el ejercicio de trueque y venta de artículos de segunda mano; su objetivo primordial es reducir el uso de materias primas y energía para el 2030. Su propuesta se fundamenta en el uso regenerativo, circular y bioeconómico que mantenga y valore el esfuerzo productivo y de consumo en el planeta (Orgaz, 2021).

3.14.4. Estados Unidos de América (EE. UU.)

El informe entregado por Circulab Colab en 2018 “El estado de la Economía Circular en Estados Unidos” presenta 202 iniciativas para implementar la EC, la gran mayoría de estas iniciativas son presentadas por la empresa privada que encuentran oportunidades económicas y medioambientales en temas de educación y generación de conciencia, transparencia de la información, financiamiento, diseño, innovación de materiales, extensión de la vida útil de los productos, residuo como recurso y producto como servicio (Circular Colab, 2018). Investigaciones desarrolladas evidencian que el 16% de las compañías en Estados Unidos han implementado la EC y un 62% consideran que este tema hace parte de su estrategia de mercado (ING group, 2019).

Estados Unidos de Norteamérica se caracteriza por su fuerte arraigo al modelo económico lineal, su alto consumo de recursos naturales y baja recuperación de estos es uno de los temas a trabajar en los siguientes años, EE. UU., es considerado el tercer país en el mundo con la demanda más alta en el sector de la construcción de materias primas, materiales y elementos de construcción (Anastasiades *et al.*, 2023). Su fuerte permanencia y arraigo al modelo de economía lineal junto a su permanente desarrollo, se reflejan en los niveles de consumo y la generación de residuos, los cuales poseen una estrecha relación con los ingresos y el desarrollo económico, según informe de la BBC News Mundo, en el 2019. Los datos de la EPA para el 2018 estimaron una generación de 600 millones de toneladas de desechos de construcción y demolición, de las cuales, según la fundación Ellen MacArthur, se estima que el 15% se desperdicia y entre un 20% y un 30% son gestionados en plantas de reciclaje que se encargan de adecuarlos para

nuevos procesos constructivos o industriales, este trabajo se logra según la normativa de cada estado de EE. UU (Environmental Protection Agency, 2021).

Programas como el “Leadership in Energy and Environmental Design” (LEED), el “Enterprise Community Partners”, el “National Green Building Standard” y cubierta “AirPlus” de la EPA incentivan hace algunos años las iniciativas de reciclaje en los Estados Unidos de Norte América, la implementación y mantenimiento de estos programas otorgan certificaciones con estándares de sostenibilidad (García, 2014). Estados Unidos cuenta con avances en legislación, normas y programas de reciclaje, aprovechamiento, gestión de residuos y su reincorporación en los procesos industriales, cambios en la cultura de consumo de materias primas en la industria y la sociedad que se reflejan en la disminución de residuos generados. En diversas ramas de la producción se evidencia la concreción de esos avances. Así, por ejemplo, la implementación de diferentes programas para la conservación, el reciclaje, transformación y tratamiento de recipientes para bebidas, aceites usados, y la disposición selectiva en vertederos de materiales especiales, evidencian el compromiso y avance de EE. UU (Ghisellini, Cialani and Ulgiati, 2016).

Con la implementación del plan estratégico 2022-2026 y la estrategia nacional de reciclaje se busca llegar a la meta una óptima gestión de los residuos sólidos y cero emisiones para el 2050 (EPA, 2022). En la Tabla 9 se presenta información acopiada en la investigación sobre actos administrativos relacionados con la implementación de la EC en Estados Unidos, se indica el emisor de cada acto, su objeto y una descripción sucinta de este.

La implementación de diferentes programas para la conservación, el reciclaje, transformación y tratamiento de recipientes para bebidas, aceites usados, y la disposición selectiva en vertederos de materiales especiales, evidencian el compromiso y avance de EE. UU (Ghisellini, Cialani and Ulgiati, 2016).

Los avances logrados en EE. UU., con la implementación del modelo de EC a través de estrategias de sostenibilidad que buscan una menor generación de residuos y su reincorporación a los procesos en el sector productivo no son suficientes dado el alto desarrollo de su economía y lo lento que se hace el proceso de cambio de una economía lineal a una EC.

Tabla 9. Reglamentación para la implementación de la EC en EE. UU.

ACTO ADMINISTRATIVO	EMITE	OBJETO	DESCRIPCIÓN
Ley de conservación y recuperación de recursos de 1976	Congreso de EE. UU.	Regular la generación, tratamiento, almacenamiento, transporte y disposición de desechos sólidos y varias disposiciones de reciclaje / reutilización	Proporcionar asistencia técnica y financiera para la formulación de planes de administración para la recuperación de residuos y la eliminación inocua de residuos peligrosos
Ley de Aire Limpio Prevención de la Contaminación de 1990	Congreso de EE. UU	Exigir prácticas de reducción del origen de la basura para evitar que sustancias y elementos contaminantes se liberen en el medio ambiente	Aborda la crisis de contaminación del aire buscando beneficiar la salud, el medio ambiente y la economía, exige prácticas de reducción del origen de la basura.
Estrategia Nacional de Reciclaje 2021	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA)	Aumentar el acceso equitativo a los servicios de reciclaje, reducir los impactos medioambientales en las comunidades marginadas y estimular el desarrollo económico. Mejorar la infraestructura del reciclaje con el análisis, financiación, diseño y la eficiencia	Reducir la contaminación en el flujo de materiales reciclados. Mejorar los mercados de productos reciclados, incrementar la recolección de materiales reciclables. Mejorar las políticas y programas para apoyar la reciclabilidad.
Plan estratégico 2022-2026, de la Agencia de Protección Ambiental de EE. UU.	Departamento de Trabajo (DOL) para los años fiscales 2022-2026	Comunicar la ruta a seguir para concretar las prioridades ambientales de la EPA en los próximos cuatro años, proteger la salud humana y el medio ambiente.	Aborda exclusivamente el cambio climático y se fija una meta sin precedentes para avanzar la justicia ambiental y los derechos civiles enfatizando en las comunidades históricamente marginadas.

Fuente: Elaboración propia 2024

3.14.5. México

Uno de los ejes económicos más importante en México es la industria de la construcción, esta se caracteriza por el gran volumen de recursos que mueve en proyectos del sector público y privado, además por estar siempre vinculada en el desarrollo de país como uno de los pilares para su logro (Poo Rubio, 2004).

En lo que respecta al tema de disposición de residuos de construcción, la problemática se agudizó en 2017 debido al sismo del 19 de septiembre, varias edificaciones tuvieron que ser demolidas (Martínez, 2017). Haciendo que los volúmenes de residuos de construcción aumentarán en gran dimensión, por ello la cifra de residuos estimada en el país, según un estudio de la SEMARNAT para el 2018, fue de 10,15 millones de toneladas de RCD (Alzate, 2022). En ese sentido, se observa que las normativas solo buscan gestionar el residuo y la forma de depositarlo en lugares legales,

mientras que el marco de la valorización no es considerado. Sin embargo, en el sector privado empresas como HOLCIM están adaptando un modelo circular con operaciones líderes en reciclaje de residuos de construcción, así han logrado sustentar el cemento más circular del mundo, el cual tiene un 20% de material reciclado. Otras de las iniciativas de reciclaje del sector privado que se muestran como novedosas en la región mexicana, es la de CANACEM (Cámara Nacional del Cemento), que con su hoja de ruta México busca valorizar residuos de construcción y así disminuir los gases de efecto invernadero que se producen en la industria.

En palabras del presidente de CANACEM: “La Hoja de Ruta México es un hito en la historia para la industria del cemento. Representa los esfuerzos que el sector ha realizado y continuará realizando para contribuir a la sustentabilidad del país y del mundo. Es el inicio de un nuevo camino y una oportunidad para reconocer a quienes lideran cada una de las compañías cementeras, enalteciendo al sector, al optar por la construcción de un México fuerte y sustentable” (Federación Interamericana del Cemento and Cámara nacional del cemento, 2023).

En México se ha elevado el número de planes de gestión de residuos, aproximadamente 35% de las municipalidades del país cuentan hoy en día con un plan de gestión de residuos urbanos (Cosme Da Costa, 2022b). Y el de las PYMES mexicanas (Rodríguez-Espíndola *et al.*, 2022). En cuanto a la EC, una de las ciudades que más ha progresado en estrategias y modelos de EC es Ciudad de México con la aprobación de la Ley de Economía Circular, lo que significa un avance en materia económica, política y social (Gobierno de la Ciudad de Mexico, 2023). Además de programas como el puesto en marcha en 2021 denominado “Programa de recolección de residuos de la construcción y demolición (RCD) en la ciudad de México” encargado de recoger los residuos de construcción domiciliarios y de viviendas que tiene complejidad en el manejo de estos residuos, de ahí que los grandes generadores deben hacer una gestión de acuerdo la normativa de reciclaje y valorización (Secretaría de Medio Ambiente, 2021). La Tabla 10 recoge las principales leyes, reglamentos y disposiciones para la implementación de la EC en México.

En infraestructura, actualmente México posee la planta de reciclaje de PET más grande de todo el continente americano, además de 30 plantas recicladoras de dicho material, el 60% de los envases de PET enviados al mercado son recuperados y de estos el 64% regresan a ser envases (Anipac *et al.*, 2022)(Asociación Mexicana de Bebidas, 2021). Diego Reyer, cofundador de Makense América, indicó durante el Foro Forbes Economía Verde y Desarrollo Sustentable 2022 (Staff, 2022), que los corporativos deben tomar ese liderazgo transformador, pues solo el “cumplir” con criterios ESG no va lograr el gran cambio que se necesita.

Tabla 10. Reglamentación para la implementación de la EC en México.

ACTO ADMINISTRATIVO	EMITE	OBJETO	DESCRIPCIÓN
Ley General del equilibrio ecológico y la protección al ambiente de 1988	Cámara de Diputados Del H. Congreso De La Unión.	Establecer los presupuestos mínimos para la preservación y restauración del equilibrio ecológico y ambiental.	Propiciar el desarrollo sustentable
NOM-161-SEMARNAT-2011	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales	Establecer los criterios para clasificar los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo como los RCD	Aprovechamiento de los Residuos de Manejo Especial, con un Plan de Manejo
Ley General para la prevención y gestión integral de los residuos de 2003	Cámara de Diputados Del H. Congreso De La Unión Secretaría General Secretaría de Servicios Parlamentarios	Prevención de la generación, valorización y gestión integral de los residuos peligrosos, prevenir la contaminación con estos residuos y llevar a cabo su remediación	Se busca aplicar principios de valorización, responsabilidad compartida y manejo integral de residuos.
Visión Nacional Hacia una Gestión Sustentable 2019	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales	Manejo de los residuos en un modelo de EC, para el aprovechamiento de los recursos naturales y favorecer el desarrollo sustentable en el país.	Aumentar la cobertura de recolección de residuos a nivel nacional (el 84%), así como instalar infraestructura para su tratamiento y disposición.
Una Aproximación a la Economía Circular en México	Centro de Estudios de las Finanzas Públicas	Impulsar el crecimiento económico y reducir el impacto ambiental del modelo económico lineal	Desvincular de la actividad económica el consumo de materiales vírgenes y recursos no renovables
Ley para la prevención, gestión integral y economía circular de los residuos del Estado de Quintana Roo- Decreto número 337 de 2019	Congreso del Estado de Quintana Roo	Regular la gestión integral de los residuos con un enfoque de EC y ciclo de vida.	Disposiciones del gobierno en relación a la disminución de residuos, su valorización y ciclo de vida
Reglamento de prevención y gestión integral de los residuos de manejo especial para el Estado de Tamaulipas 2013	Congreso del Estado de Tamaulipas	Prevención de la generación de residuos y su gestión integral mediante su minimización, valorización y aprovechamiento	Propende por la disminución de la contaminación y la remediación de suelos contaminados con residuos de manejo especial.
La Ley de Economía Circular 2023	Gobierno de la Ciudad de México	Reducir residuos, promover la reutilización, el reciclaje y la valorización de estos, fomentar la innovación y la adopción de prácticas sostenibles en la producción y consumo.	Prohíbe productos de un solo uso. Promueve la implementación de un sistema de depósito y retorno para envases de bebidas, establece incentivos fiscales y financieros.
Hoja de Ruta México – FICEM “Hacia una Economía Baja en Carbono”	CANACEM	Tiene como meta reducir para 2030 la intensidad de emisión directa de CO ₂ en al menos 17%.	Aumentar la tasa de co-procesamiento de residuos hasta el 32% y reducir el contenido promedio de Clinker al 66% al año 2030.

Fuente: Elaboración propia 2024

3.14.6. Brasil

Los modelos de aplicación del concepto de EC en Brasil, están presentes en la política nacional de residuos sólidos de la República Federativa de Brasil, documento que tiene que ver con la relación de dos conceptos, la EC y la Responsabilidad Social Corporativa (RSC) (Cosme Da Costa, 2022a), los cuales se consideran los ejes principales en la generación de negocios circulares sostenibles y sustentables para apoyar la circularidad de materias primas y residuos. De la mano de la RSC en Brasil se cuenta con un sistema de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), esto ha logrado que las tasas de aprovechamiento y de recuperación aumentan en algunos sectores, este concepto permite que las empresas además de generar productos o servicios, en sus sistemas de producción visualicen la idea de qué hacer con los residuos, ya sea con mecanismos de recolección selectiva o de logística inversa (De Miguel *et al.*, 2022).

El sector de la construcción en el periodo del 2020 generó 47 millones de toneladas de Residuo de Construcción Civil, RCC, esta cifra es la suma total de residuos RCC de las diferentes municipalidades que llevaron estos residuos a lugares seguros de eliminación o reciclaje. Se estima que alrededor de 221.2 kilos de RCC por habitante al año se generan en Brasil, donde la región sudoeste es la que aporta mayor porcentaje de estos con un 52% (Muguruza, 2022). Según cifras de ABRECON (Asociación Brasileira para Reciclaje de Resíduos de Construção) más de la mitad de los RCC se eliminan de manera ilegal y solo el 16% del total de residuos de construcción generados se recicla. En la encuesta para el sector de la construcción civil, ABRECON 2020 identifica 25 millones de metros cúbicos de material reciclado y recuperados en las plantas de reciclaje de residuos de RCC; esto permite sustituir los áridos naturales gruesos y finos procedentes de canteras (Torres, 2021).

Al disponer de concreto para fines estructurales con un 20% de sustitución de agregados vírgenes por agregados reciclados, se autoriza su uso en hormigón estructural con una resistencia máxima de 20 MPa y donde el nivel de riesgo es menor (Cimento Itambé, 2021). La regulación en Brasil para la aplicación de los materiales reciclados considera los riesgos, es por esto que se debe implementar con todos los requisitos establecidos en las normas (Silveira Da Lima and Ferrerira Da Cruz, 2019).

Siendo Brasil pionero mundial en todo lo relacionado al reciclaje y uso de RCD aún tiene falencias en la transición e implementación de la EC, porque enfrenta diversas situaciones dadas desde el prejuicio social e industrial con relación al uso de material reciclado y/o de segundo uso (Porcelli and Martínez, 2018).

En lo que respecta al marco legal, en el año 2019 Brasil contaba con iniciativas públicas encaminadas de manera directa al desarrollo de la EC en el país, en la Tabla 11 se presentan actos administrativos relacionados con este marco.

Tabla 11. Reglamentación para la implementación de la EC en Brasil

ACTO ADMINISTRATIVO	EMITE	OBJETO	DESCRIPCIÓN
Programa cambio verde de 1991	Federación Paranaense de las Asociaciones de los Productores Rurales	Crear en la población el hábito de separar la basura reciclable. Sensibilizar a la comunidad para destinación final de los residuos..	Intercambio de material reciclable por alimentos. Los alimentos son adquiridos de productores rurales y entregados al Programa, que actúa directamente en 102 puntos fijos de cambio.
Ley Federal No. 12.305 de 2010	Congreso Nacional	Regula la Política Nacional de Gestión de Residuos en Brasil y	Hace responsables por el ciclo de vida del producto a los fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores, los municipios y los proveedores de servicios de limpieza urbana. Propone reducir la producción y consumo de residuos que impactan el medio ambiente.
Foro de producción y consumo sustentable de 2018	Asociación Brasileira de Agronegocio (ABAG)	Analizar la Meta 12: "Producción y Consumo Responsables" de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU.	Propone acciones para que la industria nacional logre la competitividad de sus negocios y la sostenibilidad de sus operaciones logrando que la producción y el consumo sea más responsable y consecuentemente más sostenible con la industria.

Fuente: Elaboración propia 2024

Existen otras normas a nivel federal que están relacionadas de manera indirecta en el manejo de residuos, en especial de los residuos de construcción, estas se informan en la Tabla 12. La Asociación Brasileña de Normas Técnicas y los Comités Técnicos han desarrollado y publicado las normas que reglamentan el procedimiento para el uso de áridos reciclados en pavimentos y hormigón no estructural, algunas en la Tabla 13.

La Política Nacional de Residuos Sólidos No 12.305 del año 2002, permite a Brasil tener grandes avances en una adecuada gestión de los RCD, y en la implementación de la EC. El crecimiento del sector de la construcción le permite atender las necesidades de infraestructura para el desarrollo del país y de su población. Las empresas constructoras aun evidencian resistencia al uso de elementos de construcción desarrollados con material reciclado y a la prolongación del ciclo de vida de elementos de construcción porque temen que su imagen se ve afectada en el mercado, se requiere de programas y campañas para generar cultura y mayor conciencia en la sociedad y en la industria, que permita una apropiación de la EC (Rosembach Miranda, Cirelli and Duduchi, 2009).

Tabla 12. Reglamentación para el manejo de los RCD en Brasil

ACTO ADMINISTRATIVO	EMITE	OBJETO	DESCRIPCIÓN
Decreto No 7.404 de 2010	Senado Federal	Establece la Política Nacional de Residuos Sólidos, crea el Comité Ministerial para la Política Nacional de Residuos Sólidos y el Comité Orientador para la Implementación de Sistemas de Logística Inversa, y otras disposiciones.	Regula la LEY N° 12.305, del 2 de agosto del 2010, que instituye la política nacional de Residuos Sólidos. Crea el Comité Interministerial para la Política Nacional de Residuos Sólidos y el Comité Orientador para la implementación de sistemas de logística inversa.
Ley Federal No. 11.445 de 2007	Cámara de Diputados	Establecer los lineamientos nacionales para el saneamiento básico y para la política federal de saneamiento básico.	Abarca el suministro de agua potable, el manejo de aguas residuales, la gestión de residuos sólidos y el drenaje urbano
Resolución No. 307 de 2002	Consejo Nacional de Medio Ambiente-CONAMA	Establece directrices, criterios y procedimientos para la gestión de los residuos de la construcción.	Clasifica residuos de construcción civil en cuatro clases (Clase A, B, C y D) para facilitar su correcta disposición final. También incluye acciones relacionadas con el transporte, recepción, clasificación, almacenamiento o disposición final.
Ley 12.187 de 2009	Cámara de Diputados	Promover el desarrollo del DfD, la reutilización de materiales de construcción y, en consecuencia, la demanda de materiales secundarios en el mercado.	El instrumento normativo es la reducción de emisiones de GEI en la construcción para aumentar la vida residual de los materiales de construcción mediante prácticas circulares.
Ley Federal No. 6938 de 1981	Cámara de Diputados	Establece la Política Nacional de Medio Ambiente, sus fines y mecanismos, constituye el Sistema Nacional de Medio Ambiente y establece el Registro de Defensa Ambiental.	Tiene por objetivo la preservación, mejora y recuperación de la calidad ambiental en el país.

Fuente: Elaboración propia 2024

Tabla 13. Reglamentación clasificación de RCD y uso de áridos reciclados en Brasil

ACTO ADMINISTRATIVO	AÑO	EMITE	DESCRIPCIÓN
NBR 10.004	2004	Asociación Brasileira de Normas Técnicas	Clasifica los residuos sólidos de acuerdo con sus riesgos potenciales para el medio ambiente y la salud.
NBR 15.112	2004	Asociación Brasileira de Normas Técnicas	Residuos de la construcción civil y residuos voluminosos- Áreas de transbordo y clasificación- Directrices para proyectos, implantación y operación
NBR 15.113	2004	Asociación Brasileira de Normas Técnicas	Residuos sólidos de la construcción civil y residuos inertes –Vertederos-Directrices para proyectos, implantación y operación
NBR 15.114	2004	Asociación Brasileira de Normas Técnicas	Residuos sólidos de la construcción civil- Áreas de reciclaje-Directrices para proyectos, implantación y operación.
NBR 15.115	2004	Asociación Brasileira de Normas Técnicas	Áridos reciclados de residuos sólidos de la construcción civil. Ejecución de la capa de pavimento-Procedimientos
NBR 15.116	2004	Asociación Brasileira de Normas Técnicas	Áridos reciclados de residuos sólidos de la construcción civil. Utilización en pavimentación y preparo de hormigón sin función estructural- Requisitos
NBR 15.116	2021	Asociación Brasileira de Normas Técnicas	Áridos reciclados para uso en morteros y hormigones de cemento Portland- Requisitos y métodos de ensayo.

Fuente: Elaboración propia 2024

3.14.7. Chile

El tema de infraestructura y de disposición final de los RCD es un tema importante, puesto que los diferentes estudios han mostrado que existen 7 regiones de Chile que no cuentan con recintos autorizados para disponer RCD; se estima que en la región metropolitana existen unos 1000 vertederos ilegales y más de 3700 a nivel nacional (Fernando Silva *et al.*, 2024) (Mesa de noticias de El Mostrador, 2023). Esto junto a la extracción ilegal de recursos y materias primas para la construcción provoca una alta contaminación de los suelos, ecosistemas superficiales y acuíferos, un deterioro del paisaje y pérdidas por eliminación directas de recurso valorizable que tiene alta demanda (Garay, 2022).

Cabe anotar que, en Chile, desde hace más de una década, el manejo de los residuos ha estado presente como preocupación en los distintos sectores sociales y mucho antes de que iniciara su participación en las diferentes delegaciones enfocadas en la implementación de la EC, ya se desarrollaban políticas para la gestión y manejo de residuos sólidos. A su vez, el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) al ser el principal ente gubernamental de Chile que impulsa la adopción del modelo de EC ha apoyado la tramitación de varias leyes y estrategias, algunas indicadas en la Tabla 14.

Tabla 14. Reglamentación clasificación de RCD y uso de áridos reciclados en Chile

ACTO ADMINISTRATIVO	EMITE	OBJETO	DESCRIPCIÓN
Ley No 20.920, Marco para la Gestión de Residuos, la Responsabilidad Extendida del Productor y Fomento al Reciclaje	Ministerio del Medio Ambiente	Su objetivo es incorporar la valorización de los RC como un elemento primordial en la gestión de los residuos sólidos y establece que el generador de RCD es responsable de este, hasta su valorización	Busca disminuir la generación de RCD y fomentar su reutilización, reciclaje y valorización mediante la responsabilidad extendida del productor, para proteger las personas y el medio ambiente
Ley 21.074, Fortalecimiento de la Regionalización del País	Ministerio del Interior Y Seguridad Pública	Establece facultades a los gobiernos regionales para el fomento de las actividades productivas	Apoya el emprendimiento, generando condiciones institucionales favorables para el desarrollo empresarial.
Decreto N.º 1/2013: Reglamento del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes, RETC	Ministerio del Medio Ambiente	Garantizar la recolección y acceso a la información sobre emisiones y transferencias de contaminantes, promoviendo la transparencia en la gestión ambiental	Regula la obligación de las empresas de declarar la cantidad y tipo de residuos generados. Permite el monitoreo ambiental y fomenta una gestión más transparente y responsable de los RCD

Fuente: Elaboración propia

El ministerio de Ambiente muestra que, a nivel territorial, algunas municipalidades también han implementado soluciones innovadoras para los desafíos que enfrentan en la EC (Ministerio del Medio Ambiente (MMA) *et al.*, 2021), se destacan algunas mostradas en la Tabla 15.

Tabla 15. Reglamentación a nivel territorial para el manejo de residuos en Chile

ACTO ADMINISTRATIVO	EMITE	OBJETO	DESCRIPCIÓN
Iniciativa local de sistema de separación y reutilización de residuos	Comunidad de La Pintana	Fortalecer la gestión ambiental local implementando estrategias de educación y mecanismos institucionales para enfrentar los potenciales problemas y conflictos ambientales, así como la gestión de riesgos	Fomenta el compostaje de residuos domiciliarios, reduce los micro basurales y promueve la educación ambiental.
Plan de Gestión de Residuos Sólidos Domiciliarios (RSD)	Asociación de Municipalidades para el Desarrollo Económico Local (AMDEL) Localidad de Santa Juana	Implementar un sistema integral de gestión de residuos sólidos domiciliarios, que contempla la recolección diferenciada puerta a puerta, la instalación de una planta de reciclaje y compostaje..	Reduce los costos de disposición y promueve la sostenibilidad en una comuna con alta ruralidad e industria forestal, con un plan de educación ambiental
Providencia Circular	Dirección de Desarrollo Local de la comuna de Providencia	Busca contribuir al desarrollo integral de la red productiva comunal, desde una mirada participativa, inclusiva, innovadora y sustentable	Capacitar y formar en torno a las temáticas de innovación, industrias y sustentabilidad de manera participativas.

Fuente: Elaboración propia

Distintos ministerios del Gobierno de Chile han unido esfuerzos para la elaboración de documentos denominados “Hoja de ruta de Economía Circular”, que constituyen un “plan estratégico que define una visión a largo plazo y establece las principales iniciativas que se requieren implementar para alcanzarla. Las hojas de ruta sirven como herramientas de comunicación, documentos de alto nivel que ayudan a articular el pensamiento en torno a desafíos comunes y los planes para abordarlos” en la Tabla 16 se enlistan las hojas de ruta más importantes en torno a la EC, expedidas por el gobierno Nacional de Chile.

Tabla 16. Reglamentación para la implementación de la EC en Chile

ACTO ADMINISTRATIVO	EMITE	OBJETO	DESCRIPCIÓN
La hoja de ruta 2050 Hacia una Energía Sustentable e Inclusiva (2015)	Comité Consultivo de Energía 2050	El objetivo es transformar el sector energético de Chile para que sea bajo en emisiones, económico, inclusivo y resiliente. Tiene metas como la implementación de combustibles de baja emisión a costos accesibles, la regulación de biocombustibles, y la inclusión de políticas energéticas	Busca construir una visión compartida para el desarrollo futuro del sector energía con la validación social, política y técnica. Fomenta el uso de la bicicleta para lograr un transporte público 100% libre de emisiones
Hoja de ruta para un Chile circular al 2040 (2020)	Gobierno De Chile Ministerio de Vivienda Y Urbanismo Ministerio del Medio Ambiente Ministerio de Obras Publicas	Busca que al año 2040 la EC regenerativa impulse a Chile hacia un desarrollo sostenible, justo y participativo que ponga el bienestar de las personas al centro.	Se han establecido metas para 2030 y 2040 que incluyen crear 100.000 empleos en 2030 y 180.000 en 2040. Se busca reducir los residuos sólidos municipales en un 10% para 2030 y un 25% para 2040, así como disminuir la generación de residuos por PIB en un 15% y un 30% en esos años, respectivamente. Además, se planea recuperar el 50% y el 90% de los sitios afectados por disposición ilegal para esos años, respectivamente
Hoja de ruta RCD economía circular en construcción 2035 (2020)	Gobierno De Chile Ministerio de Vivienda Y Urbanismo Ministerio del Medio Ambiente Ministerio de Obras Publicas	Busca impulsar políticas de Estado sobre EC al integrar al sector privado y a la academia, promoviendo un trabajo colaborativo que forme una red para establecer definiciones comunes, acuerdos, políticas y metas de mejora. El objetivo es fomentar la transición hacia una EC en el sector construcción y sus cadenas de valor	Se proponen ejes y estrategias para enfrentar desafíos en el sector, como instalar plantas para valorización de RCD en todas las regiones, promover la EC desde el ámbito público y valorizar el 70% de los RCD, centrándose en que el 40% de los materiales de construcción sean circulares. Busca remediar los impactos ambientales de la extracción de áridos y la disposición inadecuada de residuos.

Fuente: Elaboración propia

Chile es considerado como uno de los países de América latina que más políticas para la implementación de EC ha desarrollado en la última década (Samaniego and Galindo, 2021). La Hoja de Ruta RCD Economía Circular en Construcción ha incentivado

a los profesionales la búsqueda de alternativas para los RCD, y dada la gran cantidad que se generan en el país representan un problema ambiental considerable. En diciembre de 2024 se lanzó la nueva normativa NCh-163: 2024, es “significativo a la Economía Circular y sostenibilidad al fomentar la inclusión de materiales reciclados y subproductos o residuos de la industria en la fabricación de hormigón, lo que reduce la dependencia de recursos naturales primarios o vírgenes, además de minimizar los desechos enviados a vertederos” enfatiza el académico de la Universidad Católica de Chile, Yimmy Silva (Centro Uc del Hormigón, 2024).

En Chile, los efectos en el PIB de las políticas ambiciosas están entre el 0,4% y 4,6%, mientras que las políticas moderadas logran efectos entre el 0% y el 0,3%, (Rodríguez *et al.*, 2023). Estas cifras permiten observar que la transición hacia la EC genera un impacto en el empleo y en la productividad de los materiales. En conclusión, Chile se encuentra en una etapa temprana de la transición hacia una EC, siendo necesario generar un entendimiento común de lo que significa y espera del proceso, así como la forma en que este se llevará a cabo. Por su parte, se destaca el rol del estado como el principal coordinador para impulsar y articular las acciones que generen las condiciones para transitar de forma efectiva y con el menor riesgo posible hacia dicho cambio (Salvatierra Arraño, 2019). Finalmente, es difícil cuantificar resultados que permitan medir la efectividad de las estrategias y lineamientos, así como el alcance de las metas.

3.14.8. Marco Legal y Normativo en Colombia

A raíz del agotamiento de los recursos naturales y acelerada degeneración climática se muestra la necesidad de repensar el camino lineal de producción y consumo de “tomar, hacer, desechar” (Merli, Preziosi and Acampora, 2018). Colombia a través del Departamento Nacional de Planeación (DNP) lidera la misión de crecimiento verde, “a través de la cual se busca definir los insumos y lineamiento de política pública para orientar el desarrollo económico del país hacia el crecimiento verde en el 2030, de manera comprensiva y acertada”, esta política climática, orientada con los compromisos internacionales como la agenda 2030 y sus Objetivos de Desarrollo Sostenible, el acuerdo de París, recomendaciones e instrumentos de organizaciones como la OCDE, y de igual manera con las políticas ambientales y sectoriales del territorio nacional.

La EC en Colombia es la ruta estratégica que el gobierno nacional ha considerado para la implementación de un modelo económico circular amigable con el medio ambiente (Ministerio de Ambiente, 2023); a partir de los compromisos adquiridos en tratados internacionales relacionados con la protección y conservación del medio ambiente y a su vez aferrándose a la agenda 2030 lanzada por la ONU en el 2015, el gobierno nacional a través del Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2018-2022 denominado “Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad” en el capítulo del Pacto por el Emprendimiento y la

Productividad, estableció una hoja de ruta, donde se promueve una economía dinámica, incluyente y sostenible. En el año 2019 fue lanzada la Estrategia de Economía Circular, su implementación es fundamental para el sector. La propuesta del PND, una estrategia del gobierno nacional que le apuesta a repensar el modelo lineal de economía que aún predomina en el país y poder construir un nuevo modelo: el de la EC, buscó crear un paradigma que permitiera migrar hacia un enfoque de eficiencia de recursos, teniendo en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas y el uso circular de los materiales, la energía y el agua (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2023). La construcción colectiva de esta estrategia debe corresponder a los actores involucrados: sectores productivos, ciudadanos, ONG's, asociaciones y emprendedores.

El marco legal y normativo de Colombia que reglamenta y guía las nuevas construcciones, la generación, gestión y disposición final de los RCD, está dado desde el orden nacional hasta el orden municipal y se complementan con el fin de mejorar las condiciones ambientales según los lineamientos de la EC. Las Tablas 17 y 18 relacionan los programas, guías y la reglamentación vigente para el desarrollo de construcciones sostenibles, la generación, gestión y disposición final de los RCD.

Tabla 17. Programas y Guías para el desarrollo de construcciones sostenibles, la generación y gestión de RCD orientados hacia la EC

PROGRAMA	EMITE	OBJETIVO	DESCRIPCIÓN
Estrategia nacional de economía circular	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Ministerio de Comercio, Industria y Turismo	Estrategia por la cual busca el cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio	Busca fortalecer el modelo de desarrollo económico, ambiental y social del país, a partir de la lógica de “producir conservando y conservar produciendo”
Documento 3874: Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos	DNP, Consejo Nacional de Políticas Económica y Social	Política para la gestión integral de residuos sólidos como política nacional de interés social, económico, ambiental y sanitario que promueve la cultura ciudadana y establecer roles	Medidas encaminadas a la prevención de generación de residuos, minimizar aquellos que van a disposición final, promover la reutilización, aprovechamiento y tratamiento de estos, con acciones para mejorar el monitoreo y la verificación
Economía circular en el sector de la construcción	Congreso Nacional del Medio Ambiente 2018	Garantizar un crecimiento sostenible mediante la utilización de los residuos de una manera más inteligente y sostenible	Paquete de EC para su conocimiento, apropiación e implementación
Guía de construcción sostenible para el ahorro de agua y energía en edificaciones	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, CAMACOL Y IFC	Proporcionar una herramienta para la implementación de estrategias de construcción sostenible de las edificaciones	Debe ser aplicadas en los municipios de todo el país. La guía pretende promover eficiencia energética y conservación del agua durante el uso
Manual de gestión socio ambiental para obras en construcción	Área metropolitana Valle de Aburrá Secretaría de Medio Ambiente de Medellín	Optimizar el uso de los recursos naturales desde el diseño y operación de las obras	Promover la actuación interdisciplinaria para incorporar la variable ambiental y social en la construcción de obras

Fuente: Elaboración propia

Los avances en políticas para la implementación de la EC en Colombia permiten crear nuevos negocios verdes enfocados en esta economía, contribuyendo así al crecimiento del país y al medio ambiente. Estas políticas también han permitido brindar incentivos a los emprendedores, quienes con el desarrollo de sus negocios verdes implementan la EC, incentivos como el no pago de impuestos siempre y cuando se tenga un mínimo de inversión y empleo por un periodo de siete años, lo cual permite el crecimiento y fortalecimiento y competitividad en el mercado. Así, el gobierno nacional hizo presencia en 19 departamentos donde socializó la estrategia y realizó pactos regionales. Estas iniciativas gestionaron la implementación del modelo de EC, impactando más en los nuevos emprendimientos.

Tabla 18. Reglamentaciones vigentes para la generación y gestión de RCD orientados hacia la EC en Colombia

ACTO ADMINISTRATIVO	EMITE	OBJETO NORMATIVO	DESCRIPCIÓN
Artículo 79	Constitución política de Colombia	De los derechos colectivos y del ambiente	Derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo.
Artículo 80	Constitución política de Colombia	De los derechos colectivos y del ambiente	El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, garantizará su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución
Resolución 0549 de 2015	Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio	Por la cual se reglamenta el capítulo 1 del título 7 de la parte 2 del libro 2 del Decreto 1077 de 2015	Establece los porcentajes mínimos y medidas de ahorro en agua y energía en nuevas viviendas. se adopta la guía para el ahorro de agua y energía en edificaciones Se aplicará en ciudades como Bogotá, Medellín, Cali y Barranquilla..
Resolución 472 del 2017	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Por la cual se reglamenta la gestión integral de los RCD.	Aplica a las personas naturales y jurídicas que generen, recolectan, transporten, almacenen, aprovechen y dispongan de RCD generados en las obras civiles y otras actividades conexas.l
Política pública de eco urbanismo y construcción sostenible en Bogotá	Alcaldía Mayor de Bogotá	Contribuir, desde el urbanismo y la construcción, al desarrollo sostenible en la ciudad para enfrentar el cambio climático en condiciones de equidad a nivel urbano y rural.	Sus 3 ejes son: Prácticas sostenibles, fortalecimiento Institucional y gestión público – privada y Cultura y Educación ciudadana para la sostenibilidad.
Actualización Decreto Municipal 0771 de 2018	Alcaldía Distrito Especial de Santiago de Cali	Por la cual se reglamenta el control a la gestión integral de los RCD.	Herramienta para el buen funcionamiento del Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente DAGMA
Decreto Municipal 120 de 2016	Alcaldía de Palmira	Por el cual se adopta el plan de gestión integral de residuos sólidos PGIRS 2016-2027	Actualización del PGIRS, atendiendo la necesidad de fortalecer el sector con visión regional, así como también el aprovechamiento y tratamiento de residuos
Convenio Interadministrativo 203-15-01-017	Alcaldía de Candelaria	Actualización del PGIRS del municipio de Candelaria, valle del cauca 2017-2027	Actualización del PGIRS, conforme a los lineamientos de la Resolución 754 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio y el Ministerio de Medio Ambiente

Tabla 18. Continuación- Reglamentaciones vigentes para la generación y gestión de RCD orientados hacia la EC en Colombia

ACTO ADMINISTRATIVO	EMITE	OBJETO NORMATIVO	DESCRIPCIÓN
Resolución No. 1407 de 2018	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Reglamenta la gestión ambiental de los residuos de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio y metal	Establece a los productores la obligación de formular, implementar y mantener actualizado un Plan de Gestión Ambiental de residuos de envases y empaques que fomenten el aprovechamiento
Resolución 1257 del 2021	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Por la que se modifica la Resolución 0472 de 2017 sobre la gestión integral de los RCD. amplía los mecanismos de aprovechamiento de los RCD bajo un enfoque de EC	Aplica a las personas naturales y jurídicas que generen, recolectan, transporten, almacenen, aprovechen y dispongan de RCD generados en las obras civiles y otras actividades conexas en el territorio nacional
CONPES No. 3874 de 2016	Consejo Nacional de Política Económica y Social	Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos 2016-2030: “Es una política nacional de interés social, económico, ambiental y sanitario. Fomenta la EC a nivel nacional”	Se enfoca en la gestión de los residuos no peligrosos y busca aportar al desarrollo sostenible, a la adaptación y mitigación del cambio climático. Los residuos peligrosos presentan una dinámica propia y cuentan con una política y normatividad que promueve su prevención y minimización
CONPES 3919 Política nacional de edificaciones sostenibles	Consejo Nacional de Política Económica y Social	Plan de políticas públicas que impulsa la inclusión de criterios de sostenibilidad, para los usos y las etapas del ciclo de vida de las edificaciones. Incluye temas de EC e instrumentos normativos, entre otros.	Con ajustes normativos, se busca consolidar el desarrollo de mecanismos de seguimiento y la promoción de incentivos económicos, que contribuyan a mitigar los efectos negativos de la actividad de la construcción sobre el ambiente, mejorar las condiciones de habitabilidad y generar oportunidades de empleo e innovación
Modelamiento de los efectos macroeconómicos de la transición a la economía circular en América Latina	Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)	Introducir eficiencias en los procesos productivos y de consumo que permitan disminuir la extracción de materiales de la naturaleza y evitar impactos sobre los ecosistemas	Se espera que las variadas estrategias que utilizan los países para impulsar la transformación hacia una EC introduzcan cambios en la estructura productiva y en las transacciones entre los agentes económicos

Fuente: Elaboración propia

En Colombia se han identificado 796 negocios verdes entre 2014 y 2016 en el marco de la implementación de los programas regionales de negocios verdes (Ministerio

de Ciencias, 2017). Estas iniciativas gubernamentales han tomado importancia dentro del sector de la construcción que es un sector de mayor movilidad económica y de recursos de la nación. Un informe de la presidencia de Camacol del 2021 da cuenta de indicadores importantes que señalaban, en esa época, al sector de la construcción como líder de la reactivación económica del país, especialmente en la reactivación económica a corto plazo. Sin embargo, el sector de la construcción representa el 11% de las emisiones de CO₂ de los 237 millones de toneladas que se generaron en Colombia para el 2019, por lo que se convierte en uno de los principales sectores emisores de gas contaminante, además de un gran generador de desechos sólidos (Gobierno de Colombia, 2021).

Colombia cuenta con la Resolución 0549 de 2015 emitida por el Ministerio de Vivienda que adopta la guía de construcción sostenible, su fecha de aplicación fue a partir de 1 de agosto de 2017 (Ministerio de vivienda Ciudad y Territorio, 2015). Sin embargo, existen brechas importantes en cuanto al uso intensivo de materiales y la generación de desperdicios, pues en el país se consume el 60% de los recursos naturales no renovables extraídos de la tierra y el 40% de la energía del país. El nuevo gobierno nacional 2022-2026 y su interés en disminuir los residuos de primera mano ha establecido iniciativas dentro de su PND, “Colombia Potencia Mundial de la Vida” donde su principal apuesta es la transformación productiva, la internacionalización y acción por el clima, la cual trae nuevos retos para Colombia ya que se asegura transiciones tanto energéticas y sostenibles en los sectores económicos, en transporte, el freno a la deforestación, revitalizar la naturaleza y la reindustrialización del conocimiento y tecnología.

Para el manejo de los residuos sólidos en Colombia se cuenta con un marco legal conformado por leyes, decretos y resoluciones que regula su generación, aprovechamiento, valorización y disposición final. Estas leyes y normativas se relacionan en la Tabla 19.

Por décadas, el sector de la construcción de edificaciones ha sido un gran generador de RCD, en Colombia se produce alrededor de 22 millones de toneladas de RCD. Es por eso que partiendo de las políticas de implementación de la EC, se plantea la construcción sostenible, de la mano de la gestión de residuos, esta puede contribuir a la disminución de la emisión de estos gases contaminantes y es que este concepto ha venido cobrando importancia dentro del sector en Colombia, de acuerdo con estudios adelantados del Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS), desde el 2010 se ha dado un crecimiento progresivo de registros, presentándose un pico en 2016, atribuido al cambio de versión en la certificación LEED (sigla en inglés para *Leadership in Energy and Environmental Design*), donde varios proyectos se registraron de manera anticipada, registros que han venido en aumento desde el 2018. Actualmente el Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible trabaja en las iniciativas y políticas que fortalecen el sector de la construcción para que sus proyectos se realicen con la visión

de construcciones sostenibles, estas iniciativas se encuentran incluidas en el marco de la estrategia nacional de EC.

Tabla 19. Leyes y normativas sobre el manejo de residuos sólidos.

NORMA	DESCRIPCIÓN
Decreto 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.
Ley de 9 de 1979	Por el cual se dictan Medidas Sanitarias para la protección del Medio Ambiente
Ley 99 de 1993	Por el cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental SINA y se dictan otras disposiciones
Ley 142 de 1994	Por el cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.
Resolución 541 de 1994	Por el cual se regula el cargue, descargue, transporte, almacenamiento y disposición final de escombros, materiales, elementos, concretos y agregados sueltos, de construcción, de demolición y capa orgánica, suelo y subsuelo de excavación.
Decreto 948 de 1995	Reglamento de protección y control de la calidad del aire.
Decreto 357 de 1997	Por el cual se regula el manejo, transporte y disposición final de escombros y material de construcción.
Ley 689 de 2001	Por la cual se modifica parcialmente la Ley 142 de 1994.
Ley 769 de 2002	Por el cual se expide el Código Nacional de Tránsito Terrestre y se dictan otras disposiciones
Resolución 114 de 2003	Por el cual se adopta el Reglamento Técnico y Operativo para la concesión del servicio de recolección, barrido y limpieza de vías y áreas públicas y corte de césped en áreas públicas y transporte de los residuos al sitio de disposición del Distrito Capital
Decreto 838 de 2005	Por el cual se modifica el decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones
Decreto 312 de 2006	Por el cual se adopta el Plan Maestro Integral de Residuos Sólidos para Bogotá, Distrito Capital
Decreto 620 de 2007	Por medio del cual se complementa el Plan Maestro de Residuos Sólidos, mediante la adopción de las normas urbanísticas y arquitectónicas para la regularización y construcción de las infraestructuras y equipamientos del Sistema General de Residuos Sólidos en Bogotá, Distrito Capital
Ley 1259 de 2008	Por medio de la cual se instaure en el territorio nacional la aplicación del comparendo ambiental a los infractores de las normas de aseo, limpieza y recolección de escombros y se dictan otras disposiciones.
Decreto 364 de 2013	Por el cual se modifican excepcionalmente las normas del Plan de Ordenamientos Territorial de Bogotá D.C.
Decreto 2981 de 2013	Por el cual se reglamenta la prestación del servicio público de aseo

Fuente: Elaboración propia

A pesar del crecimiento de la construcción sostenible en el país, en períodos normales, los actores principales de este sector como los constructores y desarrolladores, diseñadores y consultores y proveedores o fabricantes, enfrentan barreras para hacer el paso a este modelo; la ausencia de mayores incentivos por parte del gobierno, la poca

demanda en el mercado y la falta de asesoría en cuanto al uso de nuevas tecnologías dentro del país son algunas de esas barreras que debe afrontar la construcción sostenible para su implementación. Para el sector de la construcción en Colombia se dispone de un marco legal para el buen uso de los recursos y el aprovechamiento de los RCD, en la Tabla 20 se presentan algunos de los actos administrativos pertinentes.

Tabla 20. Leyes y normativas para el buen uso de los recursos y el aprovechamiento de los RCD en el sector de la construcción.

ACTO ADMINISTRATIVO	EMITE	DESCRIPCIÓN
Resolución 1257 de 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible	Por la cual se modifica la Resolución 0472 de 2017 sobre la gestión integral de RCD. Se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en construcción y demolición - RCD, define los mecanismos para la efectiva gestión, aprovechamiento y disposición final de los RCD, las obligaciones de los generadores, gestores, municipios, distritos y autoridades ambientales competentes y metas de aprovechamiento de RCD.
Resolución 1285 de 2015, Ministerio de Defensa Nacional de la República de Colombia	Departamento Administrativo de la Función Pública	Por el cual se modifica el Decreto 1077 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio, en lo relacionado con los lineamientos de construcción sostenible para edificaciones. Establece lineamientos de construcción sostenible para edificaciones, encaminados al mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes y al ejercicio de actuaciones con responsabilidad ambiental y social.
Resolución 1482 de 2017, Barranquilla Verde	Alcaldía de Barranquilla	Por medio de la cual se reglamenta el registro de generadores y gestores en el marco de la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición - RCD - en el distrito de Barranquilla y se dictan otras disposiciones.
Resolución 1115 de 2012, Secretaría distrital del ambiente	Alcaldía Mayor de Bogotá	Por medio de la cual se adoptan los lineamientos Técnico - Ambientales para actividades de aprovechamiento y tratamiento de los RCD en el Distrito Capital.
Guía de manejo socio ambiental para la construcción de obras de infraestructura pública	Alcaldía municipal de Medellín	Incluye el manejo, tratamiento, transporte, disposición final y aprovechamiento de los escombros o RCD.
Decreto Municipal 0771 de 2018	Alcaldía de Santiago de Cali	Por el cual se reglamenta la gestión integral de los residuos sólidos de la construcción y demolición – RCD en el municipio de Santiago de Cali y otras disposiciones.
Decreto 586 de 2015	Alcaldía Mayor de Bogotá	Por medio del cual se adopta el modelo eficiente y sostenible de gestión de los Residuos de Construcción y Demolición - RCD en Bogotá D.C.
LEY 2079 DE 2021	El Congreso de Colombia	Por medio de la cual se dictan disposiciones en materia de vivienda y hábitat
LEY 388 DE 1997	El Congreso de Colombia	Armonizar y actualizar las disposiciones contenidas en la Ley 9 de 1989 con las nuevas normas establecidas en la Constitución Política, la Ley Orgánica del Plan de Desarrollo, la Ley Orgánica de Áreas Metropolitanas y la Ley por la que se crea el Sistema Nacional Ambiental.

Fuente: Elaboración en Colombia es la ruta estratégica ión propia

3.14.9. Marco normativo para los proyectos de vivienda en Colombia

En Colombia el marco normativo para los proyectos de vivienda, su montaje y ensamble a partir de elementos constructivos de segundo uso provenientes de otros proyectos se basa en normas de manejo de residuos, protección ambiental, seguridad laboral y calidad para la nueva construcción; todas estas normas buscan garantizar que cada una de las actividades que se realicen sean seguras, sostenibles y conformes con los estándares técnicos y ambientales, sin embargo, en la práctica son escasos los proyectos desarrollados con elementos de construcción de segundo uso. En la Tabla 21 se relacionan algunas de las normas que deben ser consideradas en los proyectos de construcción de edificaciones en Colombia. Es de resaltar, que en parte alguna de la normativa se menciona la deconstrucción de edificaciones y el unívocamente necesario DfD.

Tabla 21 Marco normativo para los proyectos de vivienda en Colombia

ACTO	EMITE	OBJETO	DESCRIPCIÓN
ADMINISTRATIVO			
<u>Ley 1715 de 2014</u>	Congreso de Colombia	Promover energías renovables en Colombia. diversificar la matriz energética, reducir emisiones de gases.	Mejorar la eficiencia energética en todas las zonas del país con un desarrollo sostenible y económico.
<u>Decreto 1077 de 2015</u>	Departamento Administrativo de la Función Pública	Unificar y modernizar las normas relacionadas con el sector de vivienda.	Facilita su aplicación moderniza y organiza la normativa que promueve el desarrollo territorial de manera sostenible, eficiente y transparente.
<u>Plan de Ordenamiento Territorial</u>	Ministerio de Vivienda	Establecer un marco estratégico y normativo para la organización y uso del territorio .	Promueve el desarrollo territorial equilibrado, sostenible y equitativo, coordina las políticas de ordenamiento entre los diferentes niveles de gobierno.
<u>Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (2010)</u>	Ministerio de Medio ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial	Establecer los requisitos técnicos para el diseño y construcción de estructuras antisísmicas	Busca proteger la vida de las personas, minimizando daños materiales y asegurando la funcionalidad de las edificaciones durante y después de un terremoto.
<u>Decreto 1595 de 2015</u>	Presidente de la Republica de Colombia	Establece normas para el uso eficiente y sostenible del agua, promoviendo la conservación de las cuencas hídricas.	Regula el uso y vertimiento del agua, creando un sistema de información para monitorear y controlar su uso, disponibilidad y calidad.

Tabla 21. continuación- Marco normativo para los proyectos de vivienda en Colombia

ACTO ADMINISTRATIVO	EMITE	OBJETO	DESCRIPCIÓN
Resolución 472 de 2017	El Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Regula la gestión integral de los RCD.	Promueve el aprovechamiento, reciclaje y disposición adecuada de los RCD para minimizar los impactos ambientales y fomentar prácticas sostenibles en la construcción
Decreto 596 de 2016	Presidente de la Republica de Colombia	Establece lineamientos para la gestión ambiental de los RCD en Colombia.	Promueve y fomenta el aprovechamiento, reciclaje, disposición adecuada de los RCD, las prácticas sostenibles en el sector de la construcción, y minimiza los impactos ambientales.
NTC 6656:2023	Instituto Colombiano de Normas Técnicas (Icontec)	Establece los requisitos y lineamientos para la gestión de RCD en Colombia.	Manejo sostenible de los RCD, fomenta su reutilización, reciclaje y valorización, reduce los impactos ambientales, y garantiza las prácticas responsables en la generación, transporte y disposición de los RCD.
Guia-de-materiales-para-la-construccion-sostenible.pdf (2022)	El Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Uso de insumos alternativos con criterios sostenibles, incluyendo aprovechar RCD	Reducción de los impactos ambientales y sociales generados dentro del ciclo de vida de los materiales de construcción, en el marco de la EC.
Política Nacional de Producción y Consumo 2010	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Actualizar e integrar la Política Nacional de Producción más Limpia y el Plan de Mercados Verdes	Promueve y enlaza el mejoramiento ambiental y la transformación productiva a la competitividad empresarial.
Política nacional de producción y consumo sostenible hacia una cultura de consumo sostenible y transformación productiva (2011)	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial	Promover un cambio en los patrones de producción y consumo, hacia modelos más sostenibles	Busca fortalecer el desarrollo sostenible en el país y fomentar la competitividad empresarial, alineándose con tendencias internacionales.
CONPES 3918. Estrategia para la implementación de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) en Colombia	Consejo Nacional de Política Económica y Social	Definir la estrategia para la implementación, seguimiento y evaluación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Colombia.	Establece el marco de acción del país para cumplir con la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, garantizando un desarrollo sostenible desde las dimensiones económica, social y ambiental.

Tabla 21. continuación- Marco normativo para los proyectos de vivienda en Colombia

ACTO ADMINISTRATIVO	EMITE	OBJETO	DESCRIPCIÓN
<u>CONPES 3934 Política de crecimiento verde</u>	Consejo Nacional de Política Económica y Social	de y	Establecer la Política de Crecimiento Verde en Colombia para promover un desarrollo económico sostenible, contribuyendo a la competitividad y el bienestar social.
<u>Estrategia nacional de economía circular cierre de ciclos de materiales, innovación, tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio.</u>	Ministerio ambiente desarrollo sostenible. Ministerio Comercio, Industria y Turismo	de y de y	Estrategia por la cual busca el cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio
<u>Decreto 1076 de 2015 único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible</u>	Ministerio Ambiente Desarrollo Sostenible	de y	Compilar y unificar todas las disposiciones reglamentarias del ambiente y desarrollo sostenible.
<u>Resolución 1555 de 2005- sello ambiental colombiano</u>	Ministerio Ambiente, Vivienda Desarrollo Territorial	de Y	Establecer los criterios y procedimientos para la implementación del Sello Ambiental Colombiano.
<u>Resolución 0367 de 2018</u>	Ministerio Ambiente Desarrollo Sostenible	de y	Aplicar metas ambientales, acciones y medidas sectoriales del (PAI) 2017-2022. Uso Racional y Eficiente de Energía
<u>Resolución 1257 del 2021</u>	Ministerio ambiente desarrollo sostenible	de y	Modificar la Resolución 0472 de 2017 sobre la gestión de RCD, la promoción del aprovechamiento de los RCD
<u>Resolución 0549 de 2015</u>	Ministerio Vivienda, Ciudad y Territorio	de y	Reglamentar el capítulo 1 del título 7 de la parte 2 del libro 2 del Decreto 1077 de 2015: parámetros y lineamientos de const. sostenible.

Tabla 21. continuación- Marco normativo para los proyectos de vivienda en Colombia

ACTO ADMINISTRATIVO	EMITE	OBJETO	DESCRIPCIÓN
<u>Criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana (2012)</u>	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Lineamientos para reducir el impacto ecológico de la vivienda mediante estrategias de diseño y construcción sostenibles.	Buscan optimizar el uso de recursos naturales, mejorar la eficiencia energética, promover la gestión adecuada de residuos y fomentar entornos urbanos resiliente y habitables.
<u>Especificaciones materiales de construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público en Bogotá. ET-IC 01 (2021)</u>	Instituto de Desarrollo Urbano	Requisitos técnicos y normativos que deben cumplir los materiales de construcción para la calidad, durabilidad y sostenibilidad de las obras.	Establece los criterios de selección, uso y control de calidad de los materiales empleados, incorpora lineamientos para el uso de materiales sostenibles y reciclados, promoviendo prácticas de EC y la reducción del impacto ambiental

Fuente. Elaboración propia

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

De acuerdo con los objetivos planteados en el capítulo dos (2), los resultados obtenidos durante la investigación se analizaron a partir del objetivo general que conduce posteriormente al cumplimiento de los objetivos específicos. Se parte de la base de que el sistema de operaciones del subsector de edificaciones de viviendas del Distrito Especial de Santiago de Cali y su área de influencia en los municipios de Palmira, Jamundí, Yumbo y Candelaria está determinado por los actuales sistemas tecnológicos de construcción en el medio, que deben ser superados en aras de hacer viable, con base en criterios de deconstrucción, los principios de la EC en el subsector de edificaciones de vivienda. Para esto, se parte del estudio de cada sistema en orden a desnudar las falencias que lo alejan del cumplimiento de una EC completa.

En el estudio se caracterizan cada uno de los sistemas tecnológicos de construcción investigados. Los resultados permitieron identificar los sistemas, materias primas y elementos constructivos con menor impacto en emisiones de CO₂, destacando además una aceptación moderada en aspectos educativos y culturales, y la existencia de un marco normativo aún limitado.

Uno de los temas con mayor relevancia en esta investigación tiene que ver con el DfD el cual está estrechamente unido con los principios de la EC y la generación de una cultura que pueda apropiarse las **R's** en los sectores industrial, social y gubernamental.

- Sector Industrial: antes, durante y después del desarrollo de los proyectos.
- Sector Social: con la aceptación de este nuevo sistema de construcción de edificaciones.
- Sector Gubernamental: con el desarrollo, verificación y control del cumplimiento del marco normativo legal correspondiente y necesario.

4.1. Modelo participativo con EC

En la economía lineal se extraen las materias primas de la tierra, se limpian o procesan para luego ser transformadas en industrias generalmente ubicadas en sitios diferentes al lugar de extracción para dar origen a múltiples productos. Productos que luego de ser utilizados son desechados dado que llegan al final de su vida útil o se consideran obsoletos y son remplazados por nuevas versiones.

Comprender la jerarquía de la gestión de residuos con los lineamientos de la EC es esencial en el diseño de edificaciones, para esto es necesario que los porcentajes de participación de cada una de las **R's** del modelo participativo de la EC incrementen en todos y cada uno de los proyectos actuales y futuros. La Figura 18 ilustra la integración del DfD con las opciones de gestión de residuos en un orden que guarda estrecha relación con los principios de EC.



Figura 18. DfD para un modelo circular en los procesos de construcción y deconstrucción.
Fuente. Elaboración propia

Desde la etapa de diseño de todo proyecto de construcción de edificaciones es necesario que su sistema de operaciones priorice el aprovechamiento de los elementos y materiales de construcción evitando su destrucción y la generación de residuos; esto puede permitir la implementación de un sistema de construcción sostenible desde el inicio del ciclo de vida de las edificaciones, donde la gestión de los residuos este enfocada en la no generación de estos desde sus diseños, reconociendo en cada una de las **R's** (ver Figura 19) la forma de abordar y cuantificar en cada proyecto que se desarrolle.



Figura 19. Abordaje y cuantificación del modelo participativo con principios de la EC.
Fuente. Elaboración propia

El sistema de operaciones del subsector de edificaciones debe centrar sus diseños con DfD en los principios de la EC y en su ciclo repetitivo de diseño, producción, reducción, reutilización, reciclaje para el aprovechamiento de los elementos y materiales de construcción sin destrucción de estos. La implementación de este sistema de operaciones permitirá disminuir las cifras de cuantificación de los RCD generados durante el ciclo de vida y aprovechamiento de un edificio. El DfD debe verse como una de las partes esenciales del sistema de operaciones del subsector de edificaciones para el aprovechamiento de los elementos y materiales de construcción, donde se deben priorizar la reducción en la generación de RCD y la reutilización de elementos de construcción y edificaciones que mantienen las características e integridad de sus materiales, antes del reciclaje, la incineración y la disposición final, todo esto planificado desde su diseño inicial con el uso del DfD para poder conservar y mantener una edificación duradera con mantenimientos y reparaciones que permitan su uso permanente, la reutilización, remanufacturación y reacondicionamiento para nuevos y diferentes usos (Geissdoerfer *et al.*, 2017).

4.2. Desmonte escalonado de edificaciones con DfD

El DfD permite el desmonte escalonado de un edificio para que este sea acondicionado para un nuevo uso o al final de su vida útil para tomar los elementos de construcción deconstruibles de forma individual o modularmente para ser reutilizados en construcciones de menor escala. El DfD por estar alineado con los principios de la EC difiere del diseño tradicional que está alineado con los principios de la economía lineal; donde las edificaciones terminan su ciclo de vida con una demolición o una implosión generando grandes cantidades de RCD.

En el sistema de operaciones del subsector de edificaciones el DfD beneficia a las constructoras, los clientes y el medio ambiente al reducir la necesidad de nuevos materiales y extender la vida útil de los componentes existentes, además de permitir la deconstrucción y la adaptabilidad de los edificios antes de pensar en su desmontaje total. Urge su implementación para reducir el consumo de nuevos materiales, disminuir la generación de los RCD, incrementar la reutilización de los elementos de construcción y extender el ciclo de vida de las edificaciones.

Para el sistema de operaciones propuesto en esta investigación donde prima el DfD bajo los principios de la EC; se han determinado cuatro criterios soportados en el trabajo de campo, entrevistas, investigaciones de fuentes primarias y secundarias, visitas a proyectos y los análisis de casos trabajados en las tesis de pregrado de dos estudiantes de ingeniería. En la Figura 20 se presentan los criterios para el éxito y aceptación del DfD con principios de la EC.

En la industria de la construcción se ha estado asociando hace algunos años la EC a la gestión de residuos que genera una edificación durante su construcción, en sus remodelaciones y al final de su ciclo de vida, sin embargo, es necesario que se tomen los principios de la EC de una manera holística, desde el diseño y durante todo el ciclo de vida de las edificaciones (Escola Sert, 2023).

El sistema de operaciones del subsector de edificaciones en sus nuevos proyectos debe no solo incorporar aspectos de sostenibilidad en sus diseños para contribuir a la des carbonización, debe también este sistema transformar su economía lineal a una EC con una correcta gestión integral de todos sus componentes durante el ciclo de vida de las edificaciones y de cada uno de sus materiales y elementos de construcción (Escola Sert, 2023).

Cuando se proyecta la construcción de una edificación es indispensable considerar cada uno de los impactos ambientales que se causaran con su diseño, desarrollo, el uso del terreno, las instalaciones, los materiales, elementos de construcción y el sistema constructivo que se utilizaran ya que todos tienen una gran incidencia en su

desempeño durante su uso y en su depreciación. Esto puede cambiar considerablemente si se realizan diseños para construcciones deconstruibles ya que sus elementos de construcción al igual que su estructura seguirán teniendo un valor si se considera el cambio de vocación de la edificación y el uso de elementos de construcción de segundo uso (Escola Sert, 2023).



Figura 20. Criterios para el éxito y aceptación del DfD. Fuente. Elaboración propia

4.3. Características de los sistemas constructivos

Los principales factores que contribuyen a la huella de carbono en la construcción son: selección de materiales, prácticas constructivas, diseño y planificación, fuentes de energía, tecnología e innovación y las estrategias de mitigación (Farhadi, 2024). En proyectos de rápida ejecución, los sistemas con elementos prefabricados resultan favorecidos, al permitir mayor velocidad, reducir costos de mano de obra y eliminar procesos in situ como encofrado, andamios o instalaciones eléctricas e hidrosanitarias, ya integradas en fábrica (Friedrich, 2021). No obstante, las condiciones del entorno pueden restringir su uso. En zonas rurales o de difícil acceso se opta por materiales y tecnologías locales, empleando sistemas tradicionales como ladrillo, adobe o tapial, así como mampostería simple o reforzada y estructuras híbridas.

4.3.1. Características del sistema de construcción tradicional con muros de ladrillo, adobe o tapial

El sistema de construcción tradicional es altamente vulnerable sísmicamente debido a sus muros sin confinamiento y baja ductilidad. La NSR-10 recomienda reforzar con columnas de amarre cada 3 m y usar mallas electrosoldadas que cumplan la normativa ASTM A1064. El impacto ambiental de este sistema registra un alto consumo de agua (Arancibia, 2013), y una huella de carbono de 171,93 kgCO₂eq/m², frente a los 62,25 kgCO₂eq/m² de otros sistemas más sostenibles (Arenas and Shafique, 2024). Además, la reutilización de sus RCD es limitada, predominando su disposición final.

En la Figura 21 se observan edificaciones del casco histórico del Distrito especial de Santiago de Cali, construidas hace más de un siglo con adobe y tapial, que aún se conservan en pie gracias a su cuidado y mantenimiento. En barrios como Granada, San Nicolás, San Antonio, el Centro, el Obrero y el Peñón, numerosas casas continúan prestando servicios de viviendas, hoteles, restaurantes, oficinas y otros servicios, prolongando así su ciclo de vida.



Figura 21. Vivienda urbana Distrito Especial Santiago de Cali. Fuente: elaboración propia

4.3.2. Características del sistema de construcción con mampostería

El sistema de construcción con mampostería se caracteriza por su flexibilidad para adecuaciones y remodelaciones que permiten prolongar su uso. El edificio del Hospital San Juan de Dios inaugurado en 1825 en Cali (ver Figura 22), es un referente de mampostería estructural que ha resistido varios sismos durante más de un siglo. El edificio original fue construido con diseños tradicionales propios de la arquitectura hospitalaria de la época, ha sido objeto de mantenimientos, ampliaciones y remodelaciones para mantener su funcionamiento, prolongar su ciclo de vida y cumplir con los estándares actuales (Bienes Inmuebles de Interés Cultural de Santiago de Cali, 2020).



Figura 22. Hospital de San Juan de Dios, Santiago de Cali 1920 - Estado actual plazoleta de acceso 2019. Fuente: Fotografía anónima, 1920, tomada de la Biblioteca Departamental Jorge Garcés Borrero, Fondo Archivo del Patrimonio Fotográfico y Fílmico del Valle del Cauca (Bienes Inmuebles de Interés Cultural de Santiago de Cali, 2020)

4.3.3. Características del sistema de construcción mixto con elementos prefabricados (MCP)

El proceso constructivo del sistema mixto con prefabricados consta de tres fases: prefabricación en planta, montaje con grúas torre de más de 50 t según OSHA 1926.1400 (2011) y precisión de 3 mm conforme a EN 13670:2009, e integración final con vaciado de nervaduras y refuerzos con malla electrosoldada $\varnothing 6$ mm@15cm. En Colombia, este sistema se aplica en torres de oficinas como el edificio Atrio Norte en Bogotá (32 pisos, construido en 14 meses) y en proyectos VIS masivos a nivel nacional. Recientemente se han desarrollado diversas innovaciones en sus conectores, para el sistema RFID, sensores de tensión embebidos, concreto UHPC ($f'c=150$ MPa) y acero de alta ductilidad según requisitos ASTM A1065. (Baduel, 2019; Garrone, Baudino and Vicente, 2019; Redacción 360 En Concreto, 2022; Singapore Standards Council, 2022) (Visita a Feria de Viviendas, Comunicación Personal, 1 marzo 2025). En la Figura 23 se aprecia la construcción en Florida (Estados Unidos), de casas con elementos prefabricados y sistemas estructurales avanzados.



Figura 23. Casa construida de sistema mixto con prefabricados en urbanización de Sunrise, Florida, Estados Unidos. Fuente: Elaboración propia

4.3.4. Características del sistema de construcción aporticado (AC)

Las principales características del sistema aporticado se hallan en el uso de columnas, vigas y losas, combinando concreto reforzado con acero y perfiles laminados con acero estructural. Este sistema puede incorporar prefabricados para acelerar su construcción y se destaca por su buen comportamiento sísmico (Federal Emergency Management Agency, 2012; Prestressed Concrete Institute, 2021). Aunque su costo inicial es mayor frente a sistemas de muros portantes por sus encofrados, detalles de refuerzos y mano de obra tecnificada; los marcos prefabricados resultan más económicos (Antonov, Molodtsov and Molodtsova, 2016). Este sistema es ampliamente usado en hospitales, oficinas, centros educativos y edificaciones industriales.

4.3.5. Características del sistema de construcción con concreto monolítico (concreto reforzado) (CM)

El sistema CM posee una alta capacidad de adaptación, permite diseños complejos y estructuras curvas, con alta durabilidad y resistencia y está presente en un gran número de edificaciones modernas en todo el mundo (Neville and Brooks, 2010). En la Figura 24, en primer plano, se aprecia un edificio en construcción en el Distrito Especial de Santiago de Cali con tecnología de concreto monolítico.



Figura 24. En primer plano edificio en construcción con tecnología de concreto monolítico; al fondo se aprecian otros, ya construidos con la misma tecnología. Fuente: Elaboración propia.

La principal característica del CM está dada por el uso casi en toda su masa del concreto u hormigón de cemento Portland (cemento Portland, agregados finos y gruesos, agua y acero como refuerzo para optimizar su resistencia (American Concrete Institute,

2019)), su impacto ambiental es alto por el elevado consumo de cemento, responsable del 7,5% de las emisiones globales de CO₂ por su elevado consumo de energía, generada por combustibles fósiles (Liu *et al.*, 2025). El sistema otorga mayor firmeza a las edificaciones haciéndolo ideal para las zonas sísmicas (National Institute of Building Sciences Building Seismic Safety Council and Federal Emergency Management Agency, 2010), y su vida útil ronda los 50 años (Cemento Ultracem, 2023). Su tiempo de construcción es lento por los tiempos de fraguado y curado (American Concrete Institute, 2021), adicionalmente su técnica de construcción genera RCD de los encofrados, de los excesos de concreto y de la fragmentación durante las demoliciones al final de ciclo de vida.

4.3.6. Características del sistema de construcción 100% con elementos de concreto prefabricado y/o desmontable (TPID)

Entre las características y ventajas del sistema totalmente prefabricado están las siguientes: permite construir en menor tiempo, reduce costos y controla mejor la siniestralidad laboral; puesto que el diseño es estándar, la producción de los elementos de construcción es automatizado y la sostenibilidad del proyecto se favorece al tener solo las actividades del ensamblado en el sitio de la obra, logrando disminuir la generación de RCD, el consumo de agua y electricidad durante el desarrollo de todo el proyecto (Marti, 2017). Se pueden reducir los tiempos de construcción hasta en un 50% (Blog, 2023; ARGOS, 2025). Su mayor desafío está en la tecnología de las uniones estructurales, clave para su estabilidad, principalmente en zonas sísmicas (Sun *et al.*, 2014).

Por todo lo anterior, la construcción con prefabricados se considera una tecnología de producción verde al disminuir las emisiones de CO₂ y los RCD, aunque aún distante de los edificios carbono cero, que además promueven energías alternativas. (Wang and Lin, 2025). En Hong Kong, los RCD se redujeron de 0,91 a 0,77 ton/m² al cambiar de sistemas convencionales a prefabricados (Lu *et al.*, 2021), permitiendo además incorporar RCD en el desarrollo de prefabricados ecológicos. Dentro de este sistema cabe la construcción industrializada, que para obtener la más elevada eficiencia y productividad, además de la prefabricación, integra las operaciones de producción en serie, masivas y automatizadas.

En el municipio de Candelaria, la empresa PREMOLDEADOS SAS orienta sus procesos hacia este tipo de prefabricados para edificaciones desmontables, como el proyecto “Vivir” (ver Figura 25), desarrollado en instalaciones de la planta de la empresa (Visita a planta en el municipio de Candelaria, 13 julio 2022, 23 agosto 2023, marzo 11 2025, 17 marzo 2025, 11 abril 2025, 15 abril 2025). A este proyecto, se le destina una sección aparte, con autorización expresa de la empresa de prefabricados PREMOLDA, con la que se compartió la filosofía detrás de la deconstrucción, con detalles de su diseño,

con base en consideraciones de la empresa de la destinación para uso en viviendas sociales y en entornos rurales o rurales asentados en centros urbanos.



Figura 25. “Proyecto Vivir” Casa piloto sistema de construcción con elementos prefabricados 100% desmontables. Fuente. PREMOLDEADOS SAS, 2025

4.4. Indicadores de impactos ambientales en sistemas de construcción

Los sistemas de construcción actuales han generado impactos ambientales que alteran extensas zonas y afectan el medio ambiente. Al reconocer la importancia de los aspectos ambientales para la vida y la biodiversidad, es posible identificar impactos presentes o futuros, positivos o negativos, de las actividades realizadas en los sistemas de construcción.

Un impacto ambiental, positivo o negativo, siempre genera modificaciones derivadas de la actividad humana (Santos, Monercillo and García, 2011). Los sistemas de construcción de edificaciones deben asumir el alto impacto ambiental por el uso intensivo de recursos naturales renovables y no renovables, el consumo energético en todas sus etapas, las emisiones de CO₂ y la generación de RCD que contaminan agua, aire y suelos (Área metropolitana del Valle de Aburra *et al.*, 2010). Por ello, es indispensable estudiar estos impactos en cada proyecto de construcción de edificaciones,

planificar ambientalmente y definir acciones preventivas, correctivas y de mejora que permitan controlar, mitigar y compensar los efectos generados (Amarilo S.A.S. *et al.*, 2022).

4.5. Propuesta de indicadores de impacto ambiental cuantificables en procesos constructivos

Existen hace décadas metodologías para evaluar el impacto ambiental de un proceso constructivo, algunas cualitativas, aún aplicadas. La Constructora Bolívar utiliza una metodología de análisis de impacto de tipo matricial, derivada de la matriz de Leopold. Dicha matriz hace énfasis en un proceso de doble entrada donde sus actividades tienen como objetivo impactar positivamente los factores ambientales más vulnerables (Ñañez, 2021). Esta empresa constructora la aplica en su plan de manejo ambiental, donde se consideran y vierten en la matriz los impactos ambientales del proyecto identificados en la matriz Leopold, al igual que el análisis cualitativo de los impactos. Teóricamente se cuenta con la valoración de cada impacto registrado y analizado lo que genera la intensidad *I* de los impactos, ecuación 1 (LEOPOLD LB *et al.*, 1971), para la medición cualitativa del conjunto de los impactos, de acuerdo a la información alimentada a la matriz Leopold (Ñañez, 2021).

$$I = \pm(3I + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + RB)$$

Ecuación 1

Los signos o letras de la ecuación corresponden al carácter del impacto y sus significados son:

I: Intensidad	RV: Reversibilidad	PR: Periodicidad
EX: Extensión	SI: Sinergia	RB: Recuperabilidad
MO: Momento	AC: Acumulación	
PE: Persistencia	EF: Efecto	

Los valores que se obtienen varían entre 13 y 100% y según la calificación obtenida el impacto será cataloga así: Irrelevante: ($0 \leq I < 50$)%, Severo: ($50 \leq I < 75$)% y Crítico: ($75 \leq I$)%.

La necesidad de adoptar indicadores en la búsqueda de mayor eficiencia de recursos en el marco de la EC ha sido planteada por diversos investigadores que aceptan la necesidad de cerrar brechas de conocimiento que permitan una EC en el sector de la construcción, con indicadores que favorezcan la reducción del impacto ambiental por sus procesos (Ossio, Salinas and Hernández, 2023) (Peng and Cao, 2025).

Con el propósito de contribuir a valorar cuantitativamente los impactos ambientales, y así seleccionar, según el contexto social, económico y cultural, el sistema constructivo de menor impacto ambiental, se proponen en esta investigación indicadores,

que se presentan en la Tabla 22. Estos permiten valorar el cumplimiento de los lineamientos de la EC en el sector de edificaciones. A mayor aproximación de la sumatoria de cada indicador al 100%, el modelo tiende a ser cada vez más lineal, y, al alejarse del 100% se adapta progresivamente a los lineamientos de la EC. Estos indicadores valoran criterios ambientales, tecnológicos, de gestión de RCD, huella de carbono, consumo de agua y energía, marco normativo, aspectos de educación y cultura. La evaluación de los indicadores ambientales, en cada uno de los diferentes sistemas constructivos, permite optimizar el desempeño ambiental de la edificación que se construya con un sistema de estos, priorizando estrategias que equilibren la eficiencia, la normatividad y la adaptabilidad tecnológica. Un enfoque integral en estas variables asegura no solo el cumplimiento regulatorio, sino también un menor impacto ecológico a largo plazo y facilita la toma de decisiones hacia opciones más sostenibles.

Se han considerado como referente para este análisis los resultados logrados por otros investigadores (ver Tabla 23) donde sus datos y observaciones respaldan cada uno de los rangos obtenidos durante la valoración de los indicadores en cinco sistemas constructivos, que son los siguientes: 1: Concreto monolítico, CM; 2: Aporticado en concreto, AC; 3: Mixto concreto prefabricado, MCP; 4: Mixto concreto prefabricado con adición de RCD, MCO + RCD; 5: Totalmente prefabricados industrializados desmontables, TPID (deconstruible).

El indicador final se valora mediante la ecuación 2, sumando los porcentajes asignados a cada uno (i) de los indicadores (I) de las variables dividido por N (número de variables) y por 100, reportando un rango entre 0 y 1. El mayor valor del indicador del sistema IS, tendiendo a 1, indica aproximación a la circularidad o cumplimiento de los principios de la EC. Cada uno de los indicadores 3, 5 y 6 están conformados por diversas variables que se ponderan con el mismo valor para arrojar finalmente el % que se le asigna al indicador.

$$IS = \left(\frac{1}{100N}\right) \sum (I_i)$$

Ecuación 2

Se aclara, que estos indicadores se han propuesto para ser valorados hasta el cierre del proceso constructivo, no se considera el periodo de operación o ciclo de vida de la edificación, que es un factor muy importante, porque evidencia la durabilidad y reparte la huella de carbono en el tiempo; por supuesto, esto puede cambiar completamente la apreciación del impacto ambiental de un sistema al cabo de muchos años, en términos de un pasaporte que lo certifique (Mao and Cao, 2025).

Tabla 22. Indicadores propuestos para valorar ambientalmente un sistema de operaciones o de construcción

i.	INDICADOR (I)	VARIABLES	MEDICIÓN (UNIDAD)
1	Impacto ambiental por el uso de materiales y elementos de construcción no prefabricados	Menor consumo de masa hasta 100%	kg/m ²
2	Uso de elementos de construcción prefabricados	Mayor utilización de elementos de construcción prefabricados hasta 100%	kg/m ²
3	Gestión de RCD en procesos de construcción y deconstrucción	Aprovechamiento de los RCD Mayor aprovechamiento: hasta 100%	%
		Valorización, reciclaje y reutilización hasta 100%	
		Valorización energética hasta 100%	kg/m ²
		Menor cantidad de RCD generados en relación con la superficie construida o deconstruida hasta 100%	
4	Huella de carbono CO ₂ en los materiales de construcción	Menor huella de CO ₂ eq/kg hasta 100%	(kgCO ₂ eq)
5	Consumo total de agua	Menor consumo de agua en procesos de construcción y deconstrucción hasta 100%	m ³ /m ²
6	Consumo total de energía no renovable	Menor consumo de energía en procesos de construcción y deconstrucción hasta 100%	kWh/m ²
7	Aplicación en el proyecto constructivo de tecnología para deconstrucción (DfD)	Se aplicó totalmente 100%, no se aplicó o se hizo parcialmente hasta 100%	%
8	Educación y cultura para el cambio tecnológico	Evidencias de uso de tecnologías amigables con el medio ambiente (energía solar, cubiertas verdes, zonas verdes amplias, reuso de agua, uso de elementos aislantes, diseños que favorecen ventilación e iluminación, etc) hasta 100%	%
IS (%)			$IS = \left(\frac{1}{100N}\right) \sum (I_i)$

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 23. Referencias que avalan los resultados de los indicadores ambientales estimados por m² para diversos sistemas de operación constructivos.

INDICADOR	No. SISTEMA CONSTRUCTIVO	FUENTES / REFERENCIAS
Impacto ambiental por materiales (kgCO ₂ eq/m ²)	3,4,5	(Hart, D'Amico and Pomponi, 2021)
	2,3	(Bechmann and Weidner, 2021)
	3,4,5	(Jiang and Bai, 2024)
	2,3	(Zhang <i>et al.</i> , 2023)
	4,5	(Kröhnert, Itten and Stucki, 2022)
	3,4	(Braune, Ekhvaia and Quante, 2021)
	2,3,4,5	(Chamasemani <i>et al.</i> , 2024)
	1,2,3,4,5	(Lu <i>et al.</i> , 2024)
Uso de prefabricados (% del total)	3,4,5	(Jiang and Bai, 2024)
	4,5	(Kröhnert, Itten and Stucki, 2022)
Gestión de RCD (kg residuos/m ²)	3,4,5	(Jiang and Bai, 2024)
	3	(Zhang <i>et al.</i> , 2023)
Huella de carbono (CO₂) (kgCO ₂ eq/m ²)	3,4,5	(Jiang and Bai, 2024)
	4,5	(Hart, D'Amico and Pomponi, 2021)
	4,5	(Kröhnert, Itten and Stucki, 2022)
	4,5	(Braune, Ekhvaia and Quante, 2021)
	2,3,4,5	(Chamasemani <i>et al.</i> , 2024)
	1,2,3,4,5	(Lu <i>et al.</i> , 2024) (Hafez <i>et al.</i> , 2024)
	1,2,3,4,5	(Gervasio and Dimova, 2018)
Consumo total de agua (litros/m ²)	1,2,3	(Hosseinian and Ghahari, 2021)
	3,4,5	(Jiang and Bai, 2024)
	4,5	(Kröhnert, Itten and Stucki, 2022)
Consumo total de energía (kWh/m ²)	1,2,3,4,5	(Gervasio and Dimova, 2018)
	3,4,5	(Jiang and Bai, 2024)
	4,5	(Kröhnert, Itten and Stucki, 2022)
Marco normativo para deconstrucción Existencia y rigurosidad	1,2,3,4,5	Decreto 1077 de 2015, Plan de Ordenamiento Territorial, Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (2010), Decreto 1595 de 2015, Guia-de-materiales-para-la-construccion-sostenible.pdf (2022), Política nacional de producción y consumo sostenible hacia una cultura de consumo sostenible y transformación productiva (2011), CONPES 3918. Estrategia para la implementación de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) en Colombia, CONPES 3934 Política de crecimiento verde, Estrategia nacional de economía circular cierre de ciclos de materiales, innovación, tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio, Resolución 1555 de 2005- sello ambiental colombiano, Criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana (2012).

Tabla 23. Continuación- Referencias que avalan los resultados de los Indicadores Ambientales estimados por m² para diversos Sistemas Constructivos.

INDICADOR	No. SISTEMA CONSTRUCTIVO	FUENTES / REFERENCIAS
Educación y cultura para el cambio tecnológico Adopción y capacitación	1,2,3,4,5	(Kröhnert, Itten and Stucki, 2022) (Zhang <i>et al.</i> , 2023)(Huang <i>et al.</i> , 2018) (Bechmann and Weidner, 2021) (Braune, Ekhvaia and Quante, 2021)(Jiang and Bai, 2024) (Gervasio and Dimova, 2018)
	3,4,5	(Jiang and Bai, 2024)(Hosseinian and Ghahari, 2021)(Langmaack <i>et al.</i> , 2021)

1: CONCRETO MONOLÍTICO, **CM**; 2 APORTICADO EN CONCRETO, **AC**; 3: MIXTO CONCRETO PREFABRICADO, **MCP**; 4: MIXTO CONCRETO PREFABRICADO CON ADICIÓN RCD, **MCO + RCD**; 5: TOTALMENTE PREFABRICADOS INDUSTRIALIZADOS DESMONTABLES, **TPID**

Fuente: Elaboración propia

Dada la tendencia de las construcciones formales para vivienda en Colombia, y en la región objeto del estudio, se seleccionó un edificio de altura de 16 pisos, a construir para evaluar los indicadores propuestos en cada uno de los diversos sistemas de construcción, esto con base en la información cuantitativa y cualitativa encontrada en las fuentes consultadas. Los resultados se presentan en el capítulo 7.

4.6. Afectación ambiental de los sistemas de construcción actuales

Los sistemas de construcción actuales han generado impactos ambientales que se ven reflejados en la modificación de grandes zonas y la generación de efectos perjudiciales al medio ambiente. Al identificar la importancia de los aspectos ambientales para la vida humana y la biodiversidad se pueden determinar algunos impactos presentes o futuros, positivos o negativos, de las actividades de los sistemas de construcción.

Un impacto ambiental puede ser beneficioso o perjudicial, siempre genera modificaciones como consecuencia de las acciones del ser humano (Santos, Monercillo and García, 2011). Los sistemas de construcción de edificaciones deben asumir el alto impacto que tienen sobre el medio ambiente, las altas cantidades de recursos naturales renovables y no renovables que utilizan, el consumo energético antes, durante y después de construidas la edificaciones, las constantes emisiones de CO₂, la generación y gestión de RCD que vierten al medio como residuos líquidos, sólidos y gaseosos sin ningún tipo de tratamiento, causando un impacto ambiental negativo en las fuentes hídricas, el aire y los suelos (Área metropolitana del Valle de Aburra *et al.*, 2010).

En el desarrollo de los proyectos de construcción de edificaciones es necesario realizar el estudio de los impactos ambientales que este puede provocar, es así como pueden hacer la planificación ambiental y tomar las decisiones que se requieren en relación a las áreas a intervenir y los posibles impactos asociados; un correcto plan de

manejo de estos impactos debe considerar la aprobación e implementación de acciones de preventivas, correctivas y de mejora para trabajar en el control, la mitigación, corrección y compensación de todas las partes afectadas (Amarilo S.A.S. *et al.*, 2022).

4.7. Sistemas actuales de construcción de edificaciones para vivienda en el Distrito Especial de Santiago de Cali y los municipios de Palmira, Jamundí, Yumbo y Candelaria

En Colombia, actualmente el sistema de construcción de edificaciones para vivienda combina métodos tradicionales con técnicas modernas, predominando el uso de estructuras en concreto reforzado y mampostería estructural. El sistema tecnológico de construcción que continua prevaleciendo desde hace varios años en construcción formal es de edificios cada vez de mayor altura (Portafolio, 2015), que usan principalmente “concreto monolítico”, sistema que se utiliza principalmente en la construcción de elementos estructurales como muros, losas, columnas y cimentaciones. Esta tecnología, consiste en vaciar el concreto de manera continua, en una sola operación, para formar una única estructura rígida y uniforme sin juntas o uniones visibles. Los apartamentos en conjuntos cerrados representan el 98% de la oferta de vivienda nueva en el Distrito Especial de Santiago de Cali, especialmente en modalidad de preventa (El País, 2023).

En el Distrito Especial de Santiago de Cali, las edificaciones están creciendo en altura, pero aún conservan un perfil más moderado que el de otras ciudades como Bogotá y Barranquilla. Las principales constructoras están apostando por proyectos residenciales verticales que oscilan entre los 20 y 30 pisos, con alturas promedio de 80 a 115 metros; estos proyectos reflejan una clara tendencia hacia la densificación urbana, con edificaciones altas que permiten aprovechar mejor el suelo disponible. También, por mayores rentabilidades por metro cuadrado y demanda de vivienda en zonas céntricas, por normativas urbanas que permiten mayor altura en ciertos sectores y referencia por conjuntos cerrados con múltiples amenidades. Entre varias, una en construcción, que se destaca por su altura de 30 pisos es la torre Jardines de Babilonia (ver Figura 26) (Stenformwork, 2025). Estas constructoras están apostando por macroproyectos que combinan vivienda, comercio y espacios públicos, especialmente en zonas como Valle del Lili, Ciudad Meléndez y Jamundí (Secretaría de Vivienda de Cali, 2023) (Santacruz, 2020) (Vivendo, 2025).

Es una exigencia en Colombia que los diseños y posterior construcción de las edificaciones se realicen con los lineamientos de las normas sismo resistentes. Al sistema actual de construcción en Colombia se le han incorporado, en algunos proyectos, de forma acompañada, materiales y elementos de construcción ecoamigables, con sistemas de eficiencia energética que a la fecha no permiten aún lograr un sistema de construcción deconstruible con los lineamientos de la EC (Visita a proyectos de construcción en el Distrito Especial de Santiago de Cali y los municipios de Palmira, Jamundí, Yumbo y

Candelaria - Evento Finca Raíz, Cali, marzo 1 2025, Entrevista con representantes de las principales constructoras con presencia en el Valle del Cauca y en Colombia).



Figura 26. Proyecto Torre Jardines de Babilonia en el Distrito Especial de Santiago de Cali. Fuente: (Delta Arquitectura, 2025)

5. CASOS DE SISTEMAS DE CONSTRUCCIÓN ANALIZADOS

Durante la investigación se analizaron proyectos de construcción de edificaciones localizados en el Distrito Especial de Santiago de Cali, Jamundí y Candelaria. Estos proyectos fueron ejecutados por empresas constructoras, que utilizaron diversos sistemas tecnológicos de construcción. Todas ellas coinciden en la necesidad de actualizar sus sistemas de construcción de edificaciones de vivienda que desarrollan actualmente (proyectos de Vivienda de Interés Prioritario (VIP), Vivienda de Interés Social (VIS) y proyectos de vivienda no VIP, no VIS). Los sistemas de construcción que se estudiaron fueron los siguientes: Mampostería, Prefabricados y Prefabricados con adición de RCD. Los datos que se analizan fueron obtenidos de (Gómez, 2022) y (Ñañez, 2021), y procesados en la investigación doctoral.

5.1. Proyecto Manzanares, Constructora Bolívar, Candelaria

En el análisis del Proyecto Manzanares de Constructora Bolívar se identificaron las etapas y actividades del sistema de construcción, al igual que se clasificaron, cuantificaron y costearon los RCD generados y su disposición final.

El sistema de construcción de edificaciones para vivienda analizado es el utilizado en el Proyecto Manzanares de Constructora Bolívar, ubicado en el municipio de Candelaria; en la Figura 27 se observan fotografías de edificaciones del proyecto Manzanares, construido por etapas. El sistema de construcción de edificaciones de este proyecto permite identificar dos etapas claves que son la excavación y la construcción, donde cada una de estas desarrolla actividades que conducen al objetivo final: lograr la construcción de 15.000 viviendas unifamiliares por etapas (Ñañez, 2021).

Las secuencias de las actividades en el proyecto Manzanares no tiene en cuenta la etapa de demolición como se presenta en la Guía para la elaboración del Plan de Gestión de RCD.(Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá (SDA) - Alcaldía de Bogotá, 2015). La tierra producto de las actividades de la etapa de excavación se utilizó en el reforzamiento del jarillón del río Cauca que bordea gran parte del proyecto, en jardines y en zonas verdes ya que este residuo cuenta con una carga vegetal que le otorga características particulares en estos espacios.



Figura 27. Edificaciones para vivienda- Proyecto Manzanares de Constructora Bolívar.
Fuente: Elaboración propia

Para el proyecto de construcción en estudio, se determinó que Constructora Bolívar utiliza la valoración de la metodología de la matriz de Leopold, que incluyó 18 aspectos. Sin embargo, en la Tabla 24 se presentan 3 aspectos del componente ambiental biótico que se destacan por tener la mayor calificación de afectación, los criterios para los valores asignados en la calificación de acuerdo al impacto ambiental, se trabajaron de acuerdo a la información contenida en los Anexos 1 y 2, la cual especifica para cada uno de los aspectos ambientales: su naturaleza, intensidad, extensión, momento, persistencia, reversibilidad, sinergia, acumulación, efecto, periodicidad y recuperabilidad, las cuales se ponderan y posteriormente se suman para lograr su clasificación, como se puede ver en la Tabla 24. (Green Assistance, 2020).

Tabla 24. Impactos ambientales representativos del proyecto Manzanares

COMPONENTE AMBIENTAL	ASPECTO AMBIENTAL	IMPACTO AMBIENTAL	CALIFICACIÓN	CLASIFICACIÓN
Biótico	Agua	Consumo de agua potable	48	Moderado
	Aire	Emisiones de contaminantes atmosféricas	35	Moderado
	Suelo	Contaminación del suelo	34	Moderado
		Generación de residuos sólidos	34	Moderado

Fuente: Matriz de impactos del proceso constructivo (Green Assistance, 2020)

El trabajo de campo realizado en el proyecto de construcción de vivienda de la Constructora Bolívar, en el municipio de Candelaria, permitió a través de la investigación evidenciar la gestión de los RCD desde su generación hasta su disposición final, pasando por un centro de acopio establecido en la obra; el grupo de trabajadores de cada una de las etapas de la construcción del proyecto se hace responsable de clasificar y transportar diariamente en tinas los RCD al punto de acopio, constructora Bolívar cuenta con los

servicios de un operador logístico quien realiza la disposición final de los RCD no recuperables (Ñañez, 2021).

Los residuos generados por las roturas de ladrillo se entregan a la ladrillera C.I. Lago Verde S.A.S. para ser utilizados como materia prima en sus procesos a pesar de no ser su actividad principal la gestión de RCD. El polvillo y los lodos de sedimentación generados por el corte de ladrillo se entregan a un tercero quien hace uso de estos en sus procesos. Durante el desarrollo de la investigación se pudo evidenciar que no se contabilizaba este material como RCD aprovechable. A la tierra de la excavación y remoción, se le dá uso en actividades de recuperación y fortalecimiento del jarillón del río Cauca; este sirve de protección al proyecto de viviendas de Constructora Bolívar por el costado sur, por donde pasa el rio Cauca. en la Figura 28 se muestran los RCD generados en cada etapa y actividad del proyecto (Ñañez, 2021).

RESIDUOS GENERADOS CLASIFICADOS Y GESTIONADOS		
ACTIVIDADES DEL PROYECTO	RESIDUO GENERADO	USO
Excavación	Tierra, rocas, material vegetal	Construcción del Jarillón, relleno alcantarillado y vías, patios, jardines, zonas verdes
Cimentación	Residuos de PVC, arcillas, bentonitas, residuos de acero, pilotajes	Disposición final en la escombrera del municipio de Candelaria y chatarrerías
Construcción	Residuos de: Arenas, vidrio, agregados, cerámicos, cobre, hierro, yeso, cal, madera, plástico, asfalto, cemento, polvo y recortes de ladrillo, lodo sedimentado	CI Lago Verde. Disposición final en la escombrera del municipio de Candelaria
Acabados	Residuos peligrosos, ceramicos, brochas, rodilloa, pinturas, cableado electico, tejas, juntas y selladores	Disposición final en la escombrera del municipio de Candelaria

Figura 28. Residuos Generados, Clasificados y Gestionados. Fuente. Elaboración propia con base en datos de (Ñañez, 2021).

En los análisis se identificaron, clasificaron, cuantificaron los RCD para luego costear la disposición final de los RCD generados en el proyecto de construcción en estudio, lo que posteriormente permite identificar las actividades que generan afectación al medio ambiente, las áreas ambientales que se pueden afectar y los efectos generados en cada etapa. En los Anexos 1 y 2, se presentan la matriz de impacto ambiental del Proyecto Manzanares de Constructora Bolivar (Green Assistance, 2020).

5.2. Proyecto El Laguito, Jamundí

En un segundo análisis se evaluaron y compararon las emisiones totales de CO₂ para dos tipos de construcción en un proyecto en Jamundí.

Las emisiones totales de CO₂ en un proyecto de vivienda unifamiliar de dos plantas, construida en el C.R. el Laguito de Jamundí con el método de mampostería (Ver Figura 29) y con el método de inclusión de dos tipos de prefabricados se presentan en la Tabla 25 según el método utilizado (Gómez, 2022).



Figura 29. Proyecto de Vivienda Unifamiliar C.R. Laguito – Jamundí. Fuente: Elaboración propia

Tabla 25. Paralelo emisiones individuales y totales de CO₂ proyecto de vivienda de dos plantas Jamundí.

ITEM	EMISIONES (kgCO ₂ eq)		
	Método Mampostería	Método Prefabricados	Método Prefabricados con RCD
MATERIALES	9.810	6.237	5.370
PREPARACIÓN TERRENO	25	20	20
TRANSPORTE	481	408	408
CONSTRUCCIÓN	2.058	115	115
TOTAL	12.374	6.780	5.913

Fuente. Elaboración propia con base en datos de (Gómez, 2022)

Los datos obtenidos se organizaron para su presentación en paralelo por cada método de construcción utilizado y para los materiales, la preparación del terreno, el

transporte y la construcción, dando con esto la oportunidad de analizar las emisiones de CO₂ de cada método de construcción.

5.2.1. Análisis sistema de construcción o de operaciones con mampostería para vivienda de dos plantas (Jamundí)

Los datos de este análisis de emisión de CO₂ muestran al consumo energético como el principal contribuyente a las emisiones totales por su mayor esfuerzo durante el procesamiento de los materiales y elementos de construcción utilizados durante el desarrollo de la obra, que usa mampostería de ladrillo de arcilla cocida. Con esto los materiales y elementos de construcción aportan con un 79% a las emisiones totales de la obra, seguido de la preparación del terreno con el 0,2%, el transporte de los materiales con el 4%, y la etapa de construcción con un 17%. Vale la pena resaltar que las emisiones de CO₂ en las actividades de transporte, preparación de terreno y construcción del inmueble están dadas por el uso de los equipos necesarios para la construcción, presumiendo que están en buen estado y que consumen el combustible necesario para su funcionamiento (Gómez, 2022). Un análisis más detallado, debería considerar la emisión de CO₂ producto de la energía humana, sin embargo, esto, que es una realidad, en parte alguna se incluye en los análisis de emisiones de CO₂. En la Figura 30, se ilustran las emisiones totales de CO₂ generadas con el método de construcción con mampostería de cerámica roja para el proyecto de vivienda de dos plantas desarrollado en Jamundí.

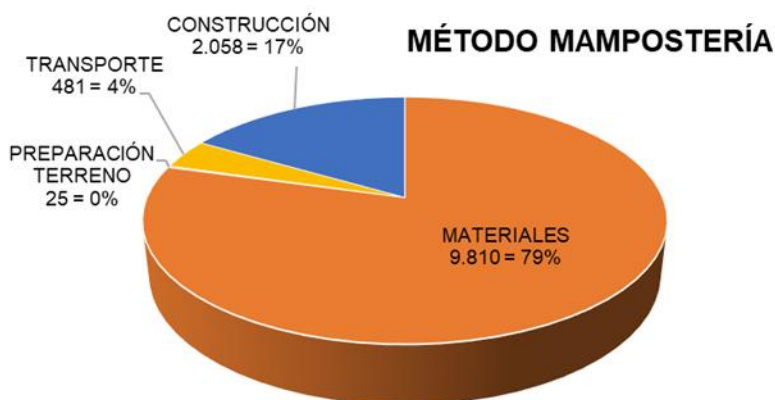


Figura 30. Emisiones de CO₂ con el método mampostería. Fuente. Elaboración propia con base en datos de (Gómez, 2022)

5.2.2. Análisis sistema de construcción o de operaciones con prefabricados tradicionales para vivienda de dos plantas (Jamundí)

En el proyecto de vivienda de dos plantas desarrollado en Jamundí al introducir elementos de construcción prefabricados y realizar el análisis de emisiones de CO₂, se obtienen emisiones totales de 6.780 kgCO₂ eq, esto evidencia una disminución del 45% en la huella de CO₂ para este proyecto, resultado que se logra con el uso de elementos

de construcción prefabricados; reduciendo así el uso de materiales y elementos de construcción, y se disminuyen: el consumo energético de los procesos, los tiempos de construcción y las emisiones de CO₂ de los materiales y de los elementos de construcción en un 36%. También, con el uso de elementos de construcción prefabricados, se reducen: el volumen de RCD generados, los tiempos de preparación del terreno, del transporte de los materiales y elementos de construcción, y las actividades de la etapa de construcción; que se ven disminuidas en un 29%, 15% y 95% respectivamente. En la Figura 31, se ilustran las emisiones totales de CO₂ generadas, con el método de construcción con prefabricados para el proyecto de vivienda de dos plantas desarrollado en Jamundí.

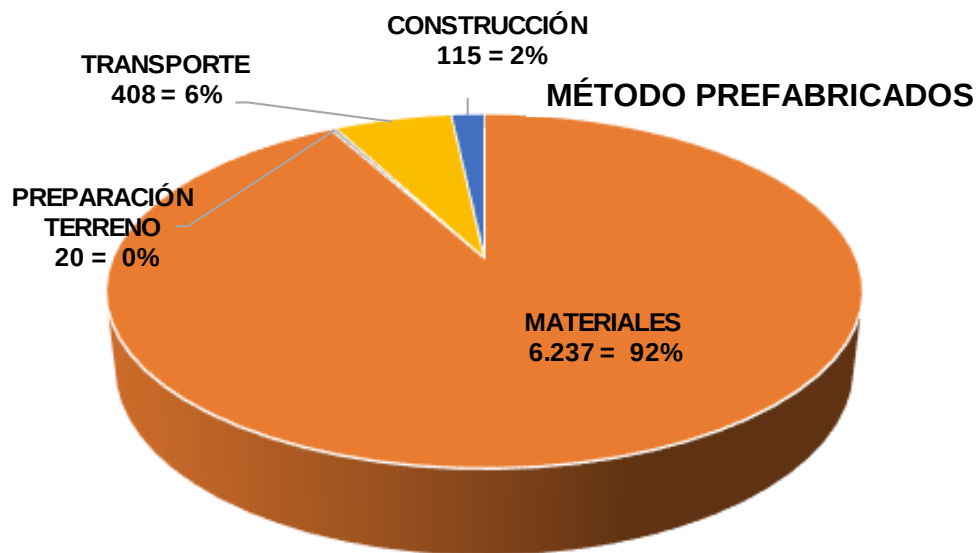


Figura 31. Emisiones de CO₂ con el método prefabricados. Fuente. Elaboración propia con base en datos de Gómez (Gómez, 2022)

5.2.3. Análisis sistema de construcción o de operaciones con prefabricados con adición de RCD para vivienda de dos plantas (Jamundí)

La incorporación de RCD en concretos con fines estructurales establece que no debe ser mayor al 20%, y para concretos con fines no estructurales no se tiene un límite de incorporación de RCD en sus agregados (andenes, huellas, áreas peatonales) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). En el análisis de emisión de CO₂ para elementos prefabricados con adición de RCD, se deben considerar los estándares de calidad exigidos, su origen, las emisiones generadas durante su transporte y transformación, dado que se pueden presentar situaciones en las que incorporar agregados genere una mayor huella de CO₂. En la construcción del proyecto de vivienda de dos plantas desarrollado en Jamundí, al utilizar elementos de construcción prefabricados con una incorporación del 17% de RCD en aridos finos (ICONTEC, 2000), las emisiones totales fueron de 5.913 kgCO₂eq, esto representa una reducción del 12%

de emisiones de CO₂, en comparación con el método anterior donde se utilizaron elementos de construcción prefabricados con materias primas vírgenes. En la Figura 32, se ilustran las emisiones totales de CO₂ generadas, con el método de construcción con prefabricados con adición de RCD para el proyecto de vivienda de dos plantas desarrollado en Jamundí. Este método con elementos de construcción prefabricados con una incorporación del 17% de RCD generó menor huella de CO₂. Para su cálculo se trabajó con la base de datos ICE DB Advanced V4 de (Circular Ecology, 2024). La disminución de CO₂/m³, cuando hay adición de RCD en un elemento prefabricado, ocurre de acuerdo con el porcentaje de uso de materiales vírgenes y cemento, que permiten el desarrollo de un elemento prefabricado más eficiente con ventajas específicas como: la optimización de sus forma y volumen, menor desperdicio de materias primas y menor consumo de energía y agua (Silva, de Brito and Dhir, 2019).

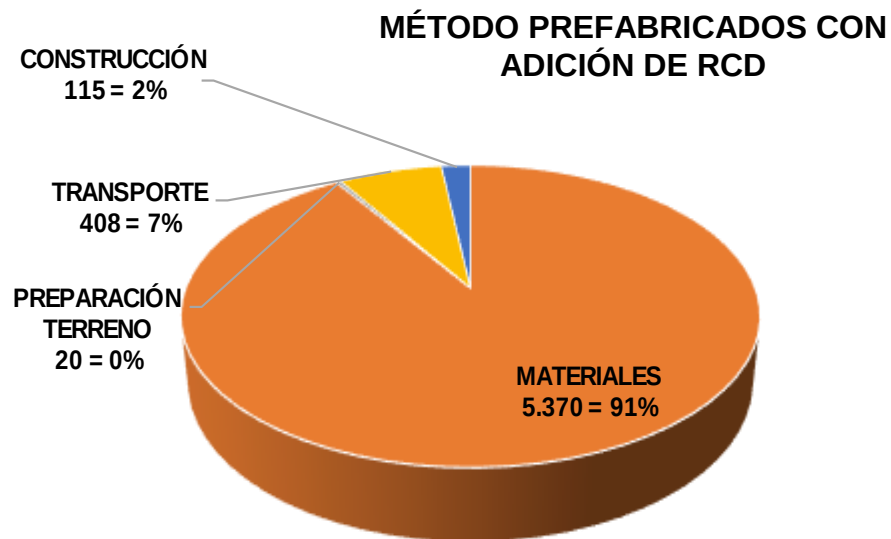


Figura 32. Emisiones de CO₂ con el método prefabricados con adición de RCD. Fuente. Elaboración propia con base en datos de (Gómez, 2022).

La disminución en la huella de CO₂ en los métodos de construcción con prefabricados y prefabricados con adición de RCD se logra en la etapa constructiva que tiene un 95% menos de emisión, además de la optimización lograda en el transporte y preparación del terreno, lo que permite evidenciar su alineación con los principios de la EC. Contrario a esto, el método de construcción tradicional continúa generando una huella de CO₂ alta por el elevado consumo de materiales en la construcción y la generación de un 16% de las emisiones durante el proceso de construcción, además de los RCD generados y mal gestionados.

5.2.4. Análisis sistema de construcción o de operaciones con mampostería del conjunto residencial construido en el sector de Bochalema (Distrito Especial de Santiago de Cali)

En el proyecto de construcción del conjunto residencial construido con el método con mampostería en el sur del Distrito Especial de Santiago de Cali, sector de Bochalema, las emisiones parciales y totales de CO₂ ocurren por el alto volumen de materiales que se requieren para su construcción, además, se debe tener en cuenta que las fachadas de las torres se construyeron con mampostería. En la Tabla 26 se presentan los valores parciales de las emisiones de los materiales, de la preparación del terreno, del transporte y de la construcción del proyecto (Gómez, 2022). En este proyecto construido con el método con mampostería la huella total de CO₂ generada es de 347 toneladas de CO₂ y las emisiones asociadas con cada uno de los materiales utilizados, incluidos los de la fachada, que se construyó con mampostería equivalen al 74% del total de las emisiones; la preparación del terreno y el transporte de los materiales equivalen al 8% y la etapa de construcción al 18% (ver Figura 33).

Tabla 26. Emisiones individuales y totales de CO₂ - proyecto conjunto residencial construido con el método de mampostería

Item	Materiales	Preparación terreno	Transporte	Construcción	Total
Emisiones (toneladas CO ₂ eq)	257	14	14	62	347

Fuente: Elaboración propia con base de datos de (Gómez, 2022).

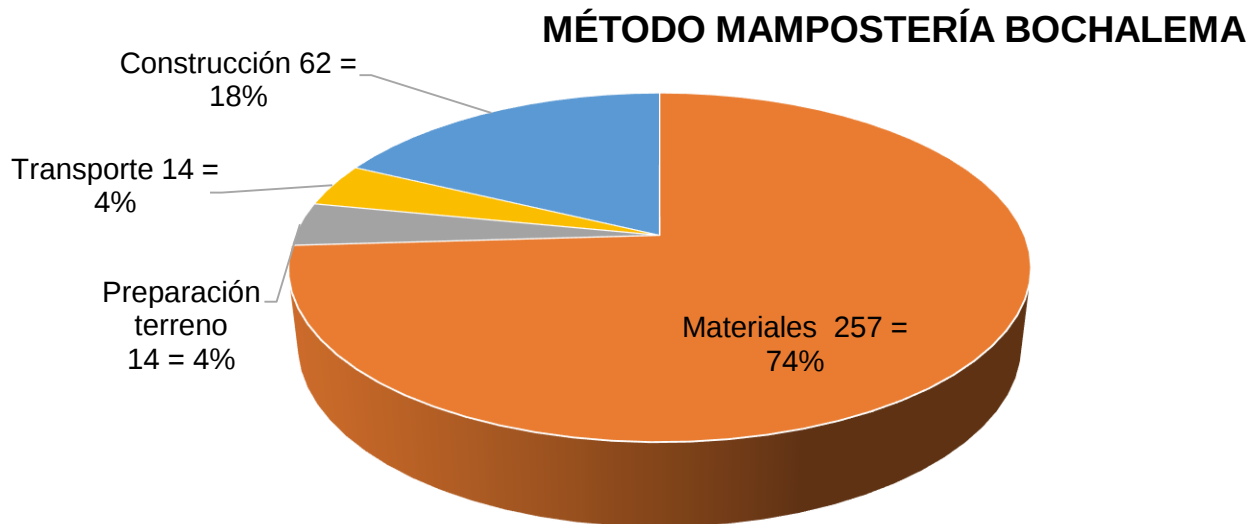


Figura 33. Emisiones de CO₂ con el método mampostería. Fuente. Elaboración propia con base en datos de (Gómez, 2022).

En este proyecto construido con el método de mampostería el total de la huella de CO₂, corresponde a los materiales y elementos de construcción, el 49% corresponde al acero estructural, el 31% al concreto, el 9% al ladrillo, el 9% a la cerámica y el 2% al encofrado; estas emisiones coinciden con las de los materiales del proyecto de la vivienda unifamiliar de dos plantas, construida en Jamundí.

5.2.5. Análisis sistema de construcción o de operaciones con prefabricados y prefabricados con adición de RCD del conjunto residencial construido en el sector de Bochalema (Distrito Especial de Santiago de Cali)

En la Tabla 27 se observan las emisiones del proyecto conjunto residencial construido en el sur del Distrito Especial de Santiago de Cali, sector de Bochalema con el método de construcción con prefabricados y prefabricados con adición de RCD. Las emisiones de CO₂ en el ítem de materiales para los prefabricados con adición de RCD tienen una disminución en la huella generada, gracias al uso de agregados finos y gruesos en el desarrollo de estos elementos.

Tabla 27. Emisiones individuales y totales de CO₂ proyecto conjunto residencial construido con prefabricados y prefabricados con adición de RCD

CONSTRUCCIÓN CON PANELES PREFABRICADOS					
Ítem	Materiales	Preparación terreno	Transporte	Construcción	Total
Emisiones (toneladas CO₂eq)	165	10	11	3	189
CONSTRUCCIÓN CON PANELES PREFABRICADOS CON ADICIÓN DE RCD					
Ítem	Materiales	Preparación terreno	Transporte	Construcción	Total
Emisiones (toneladas CO₂eq)	141	10	11	3	165

Fuente. Elaboración propia con base en datos de (Gómez, 2022)

En la Figura 34 se ilustran las emisiones totales de CO₂ generadas, con el método de construcción con prefabricados tradicionales y con prefabricados con adición de RCD, para el proyecto de vivienda del conjunto residencial construido en el sur del Distrito Especial de Santiago de Cali, sector de Bochalema.

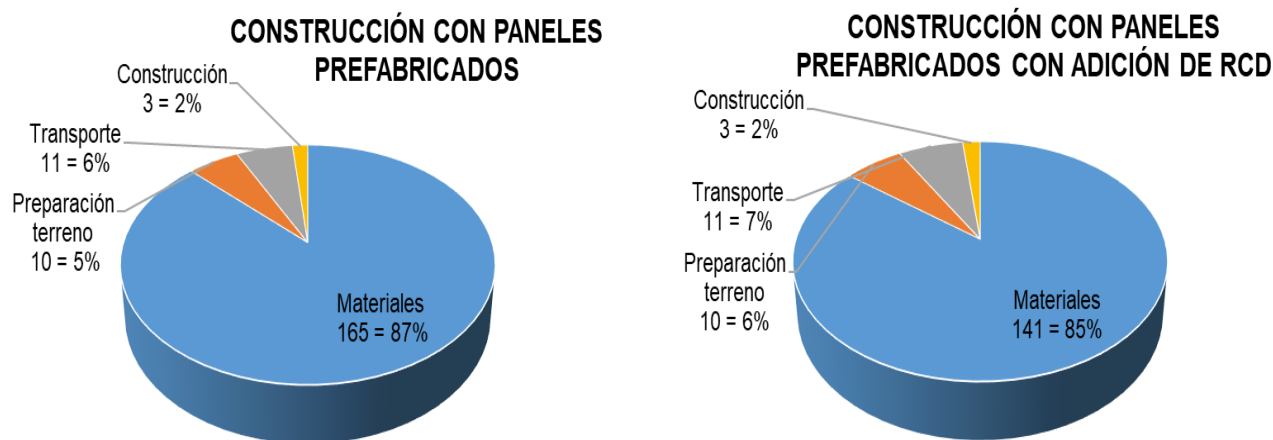


Figura 34. Emisiones de CO₂ con el método prefabricados tradicionales y prefabricados con adición de RCD. Fuente. Elaboración propia con base en datos de (Gómez, 2022).

Es evidente la disminución en la huella de CO₂ en los métodos de construcción con prefabricados y prefabricados con adición de RCD durante la etapa constructiva, sumado a esto está la optimización lograda en las actividades de transporte y preparación del terreno que se alinean con los principios de la EC. Contrario a esto, el método de construcción con mampostería sigue generando una huella de CO₂ alta por el elevado consumo de materiales en la construcción, la generación y mala gestión de los RCD durante todo el proyecto.

5.2.6. Análisis sistema de construcción o de operaciones en concreto monolítico para una torre de apartamentos en el Distrito Especial de Santiago de Cali

La tecnología de construcción con concreto monolítico está bastante arraigada y en expansión en diversas regiones del mundo, especialmente en proyectos de vivienda social, infraestructura y edificaciones que requieren alta durabilidad y eficiencia constructiva. Esto es debido a las características y ventajas que presenta este sistema constructivo. Entre estas, el sistema monolítico implica la construcción de elementos estructurales como una sola unidad, vertiendo el concreto in situ en un solo proceso, lo que elimina juntas y mejora la resistencia estructural. También, ofrece ventajas como mayor productividad, reducción de mano de obra, rapidez de ejecución, menor tiempo de construcción y mejor comportamiento sísmico, además de una elevada calidad superficial y durabilidad. Adicionalmente, su aplicación en zonas expuestas a desastres naturales es valorada, ya que las estructuras monolíticas presentan gran resistencia a terremotos, tormentas y otros eventos extremos. (Damtoft *et al.*, 2008) (Navas de García, Reyes Gil and Galván Rico, 2015).

En Colombia, y en el Distrito Especial de Santiago de Cali, existen numerosos ejemplos de implementación exitosa del sistema de construcción con concreto monolítico. Las grandes empresas constructoras hoy día lideran una tendencia creciente al uso de este sistema en sus proyectos. Es necesario reconocer que a pesar de las ventajas estructurales y de eficiencia que ofrece el sistema de construcción con concreto monolítico, su uso recurrente genera importantes y devastadoras afectaciones ambientales y sociales, por el uso de recursos no renovables, la generación de RCD y las emisiones de CO₂.

Las desventajas del sistema de construcción con concreto monolítico son perjudiciales al medio ambiente y afectan la calidad de vida de las personas, la fauna y flora del planeta, se han identificado las siguientes afectaciones generadas por este sistema: emisiones de CO₂, alto consumo de agua, generación de RCD, contaminación de suelos y del agua, alto consumo de recursos naturales no renovables. material particulado, ruido, impacto paisajístico y urbano (Damtoft *et al.*, 2008). Los sistemas con concreto monolítico presentan una huella de CO₂ elevada, que se morigera en la medida de la operación de las edificaciones y los años de operación de una construcción, siempre y cuando en el diseño de esta se tiene vientos cruzados y otras características como el uso de cementos bajos en huella de carbón y uso de RCD en la fabricación del concreto

La destrucción del concreto de una edificación contribuye al cambio climático principalmente a través de las emisiones asociadas a su producción y a las emisiones indirectas de la demolición o implosión. La producción de una tonelada de concreto premezclado genera aproximadamente entre 298 kg y 420 kg de CO₂ (0,298 a 0,42 toneladas), según estudios de ciclo de vida que incluyen materias primas, transporte, energía y producción. Esto equivale a unas emisiones de alrededor de 0,12 a 0,17 kg de CO₂ por kg de concreto producido. La mayor parte de estas emisiones proviene de la producción del cemento Portland, que puede liberar cerca de 0,9 toneladas de CO₂ por tonelada de cemento producido debido a la calcinación de la piedra caliza y la energía requerida. Al demoler una tonelada de concreto, la cantidad directa de CO₂ liberado a la atmósfera no es tan alta como la emitida durante su producción, pero el proceso de producción del concreto sí genera emisiones significativas de CO₂, como se mencionó anteriormente.

Un caso de uso del concreto monolítico en un proyecto, que se comenta, por el consumo elevado de concreto es el referido a un edificio para vivienda de 19 pisos y 150 apartamentos, construido con concreto monolítico, localizado en el sur del Distrito Especial de Santiago de Cali (ver Figura 35). El área construida es de aproximadamente: 16.000 m², un volumen global de aproximadamente: 48.000 m³. Volumen de paredes de concreto: aprox. 6000 m³. Peso del concreto, sin contar el refuerzo de acero es cercano a 14.400 toneladas. El proyecto completo son tres torres, como la anterior, para un total cercano a 450 apartamentos. Así, en el Distrito Especial

de Santiago de Cali, Colombia, existen otros proyectos destacados que emplean la tecnología de construcción con concreto monolítico, especialmente en el sector de vivienda multifamiliar y desarrollos urbanos de gran escala. Entre estos, se destacan las construcciones de empresas como Constructora Bolívar (Parque Natura, Vivero Parque Residencial), Marval (Baikal, Viverdi, Tribeca, Fiorino), Jaramillo Mora (Niquel, 826-Boreal), Meléndez (Tierralinda, Ciudad Meléndez), Normandia (Torres de Santa Lucía), Solanillas (Zento 75, Portus).



Figura 35. Edificio para vivienda, construido con concreto monolítico. Fuente: Elaboración propia.

Para este análisis se adoptó un enfoque metodológico mixto, integrando componentes cualitativos y cuantitativos que permitieron desarrollar el análisis de un caso de un proyecto de edificación de 16 pisos a construir con el sistema de construcción con concreto monolítico reforzado en el Distrito Especial de Santiago de Cali. Inicialmente se llevó a cabo una revisión documental de literatura especializada sobre el sistema enfocada a los elementos de construcción, procesos desarrollados y RCD generados y gestionados. Posteriormente, se analizó información relevante del proyecto de 16 pisos donde se valoró el área de terreno, área total construida, altura de cada piso, carga muerta, volumen y peso de cada uno de los materiales, elementos constructivos y procesos empleados, siendo necesario identificar en la literatura y en la base de datos (ICE) (Circular Ecology, 2024) el factor de emisión de CO₂, para realizar el cálculo de las emisiones de cada uno de ellos y de toda la estructura por metro cuadrado construida, y concluir con los indicadores ambientales que permiten monitorear este sistema constructivo. El periodo de vida de la edificación corresponde al denominado "de la cuna

a la puerta" (*cradle-to-gate*) en Análisis del Ciclo de Vida (ACV), que se refiere a la evaluación del impacto ambiental desde la extracción de materias primas de los materiales (la "cuna") hasta su salida al finalizar la construcción de la edificación (la "puerta"). Se incluyen las emisiones de transporte, distribución y la gestión de residuos, aunque no las etapas de uso, mantenimiento y demolición del edificio.

El edificio en estudio tiene la forma de un prisma proyectado rectangular o paralelepípedo rectangular advirtiéndose que presenta una volumetría similar a la de los edificios ilustrados en la Figura 36. La geometría de un edificio de apartamentos suele basarse en formas geométricas simples como prismas, cubos y otros poliedros. Estos elementos se utilizan para definir la estructura general del edificio, las dimensiones de los apartamentos y la disposición de espacios comunes. La geometría también juega un papel crucial en la organización de elementos como ventanas, puertas y escaleras.

El edificio en estudio se corresponde con las características de los que se construyen actualmente y cuyo sistema de construcción se impone crecientemente en Colombia, y en particular en el Distrito Especial de Santiago de Cali y municipios aledaños. Son edificaciones construidas con concreto reforzado o concreto monolítico en forma de muros estructurales continuos, generalmente con alturas que superan los 15 pisos. Las principales ciudades de Colombia se están densificando con este tipo de construcción, por esta razón, se escogió el análisis de este sistema tomando un edificio de 16 pisos para hacer el estudio de huella de carbono.

Para calcular los indicadores ambientales del edificio de 16 pisos, construido al sur del Distrito Especial de Santiago de Cali, se utilizaron datos proporcionados por compradores y visitas a un proyecto similar de 19 pisos, ya construido; se revisó información contenida en planos y en el portafolio de ventas del proyecto con metodologías estándar de evaluación ambiental en construcción.

La sostenibilidad ambiental del edificio se evaluó mediante las emisiones de dióxido de carbono equivalente, medido en kgCO₂eq. Esto corresponde a la energía incorporada en cada unidad de masa (expresada en kg) de los materiales que componen la edificación, incluyendo la de los RCD, y su efecto al no reciclarlos (Q_{RCD}) y las de actividades necesarias para desarrollar la construcción, tales como energía consumida por equipos en el transporte de materiales (Q_{tr}) y energía operacional en el proceso de construcción (Q_{op}). El impacto ambiental, Q , de construir el edificio, medido hasta el final del proceso constructivo se expresa en kgCO₂eq/metro cuadrado de construcción, mediante la ecuación 3.

$$Q = \frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{m^2} = \frac{\sum(Q_1 \times F_1 + Q_2 \times F_2 + \dots + Q_n \times F_n + Q_{tr} + Q_{op} + Q_{RCD})}{Atc}$$

Ecuación 3

Donde Q es la cantidad, de cada uno de los materiales que componen la estructura del edificio, en kg. F es el factor de emisión en kgCO₂eq/kg de cada uno de estos materiales. El Área total construida es designada como A_{tc}.



Figura 36. Edificio para vivienda, construido con concreto monolítico. Fuente: Elaboración propia.

El sistema con el que se construyó el edificio de 128 apartamentos es concreto monolítico. La superestructura está compuesta por: muros estructurales de concreto reforzado, RC de (40/50) MPa, repellos, estucos, pintura, ventanas de aluminio y vidrio plano, losas y techo de concreto, piso cerámico (gres porcelánico), panel yeso en divisiones internas y puertas de madera.

Los datos relevantes para este análisis son: Área del lote = 45 m x 21 m = 945 m²; Longitud del edificio= 45 m; ancho del edificio= 21 m; altura del edificio= 43 m. La unidad funcional del edificio es un apartamento tipo con área construida promedio de 87 m² y 75,4 m² de área privada, su plano se muestra en la Figura 37. Las áreas comunes (pasillos, ascensores, shute de basuras, ductos, etc.) comprenden el 30% del área construida. El edificio tiene 16 pisos y 8 apartamentos por piso. Espesor de cada losa: 0,2 m y altura libre (entre losas) de cada piso, h = 2,45 m.

Se define un factor de área de muro (FA) = Sección transversal de muro/m² de área construida para calcular el volumen de los muros.

$$FA = (\text{Área construida} - \text{área privada}) / (\text{área construida})$$

$$FA = (87 \text{ m}^2 \text{ de área construida} - 75,4 \text{ m}^2 \text{ de área privada}) / 87 \text{ m}^2 = 0,133 \text{ m}^2.$$

Área construida de 128 apartamentos = 8 aptos/piso x 16 pisos x 87 m²/apto= 11.136 m²

Área de zonas comunes = 0,3 x Área construida de los apartamentos= 3.341 m².

Área de apartamentos + área de zonas comunes= área total construida

Área total construida = Atc = 11.136 x 1,3= 14.476,8 m².

Superficies de cuatro muros construidos a lo largo del edificio, más cuatro muros divisorios internos de los apartamentos = (8 x 45 m x 43 m) = 15.480 m².

Superficies de muros construidos a lo ancho del edificio, incluidos los muros divisorios de los apartamentos = (6 x 21 m x 43 m) = 5.418 m²

Superficie total de muros estructurales de concreto= 20.898 m².

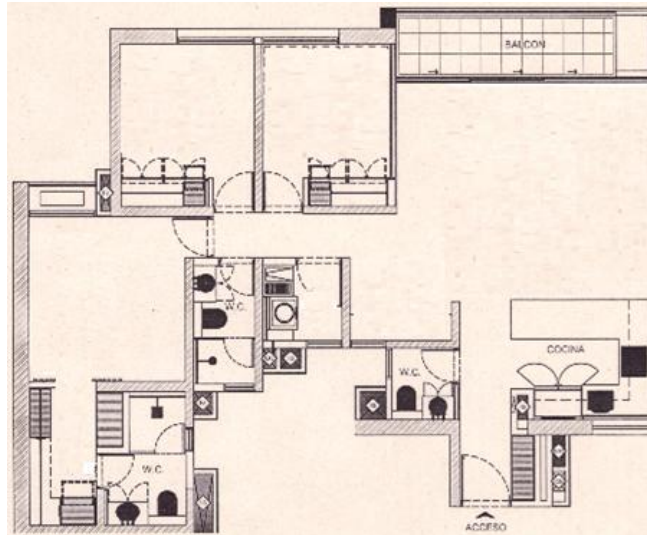


Figura 37. Plano de apartamento típico. Fuente: Elaboración propia.

5.2.6.1. Mortero de repello

Superficies de cuatro muros construidos a lo largo del edificio, más cuatro muros divisorios internos de los apartamentos x dos superficies a revocar por muro = (8 x 45 m x 43 m) x 2 = (15.480 m² x 2) = 30.960 m²

Superficies de muros construidos a lo ancho del edificio, incluidos los muros divisorios de los apartamentos x dos superficies a revocar por muro = (6 x 21 m x 43 m) x 2 = 5.418 m² x 2 = 10.836 m²

Total, superficie a revocar con mortero = 30.960 m² + 10.836 m² = 41.796 m².

Superficie de muros por un lado= 20.898 m².

Espesor repello: 1,5 cm

Volumen del repello = Superficie de muros a revocar x espesor repello = $41.796 \text{ m}^2 \times 0,015 \text{ m} = 627 \text{ m}^3$

Densidad de mortero de repello seco = 2.000 kg/m^3 .

Peso del repello de todo el edificio= $1.254.000 \text{ kg}$

Parámetro huella de carbono del repello= $0,15 \text{ kgCO}_2\text{eq/kg}$ (Circular Ecology, 2024)

Huella de carbono del mortero para edificio de 16 pisos = $188.100 \text{ kgCO}_2\text{eq}$

5.2.6.2. Estuco

Total, superficie a estucar = $30.960 \text{ m}^2 + 10.836 \text{ m}^2 = 41.796 \text{ m}^2$

Espesor estuco: 1,3 mm

Volumen del estuco = $41.796 \text{ m}^2 \times 0.0013 \text{ m} = 54,33 \text{ m}^3$

Densidad del estuco seco = 1.800 kg/m^3 .

Peso del estuco de todo el edificio= 97.803 kg

Parámetro huella de carbono del estuco = $0,164 \text{ kgCO}_2\text{eq/kg}$ (Circular Ecology, 2024)

Huella de carbono del estuco para edificio de 16 pisos = $16.040 \text{ kgCO}_2\text{eq}$

5.2.6.3. Vidrio (ventas y puertas)

Cada apartamento del edificio tiene:

Una puerta corrediza de vidrio templado con dimensiones de $2,5 \text{ m} \times 2,2 \text{ m}$, espesor del vidrio 8 mm

Cuatro ventanas con dimensiones de $1,0 \text{ m} \times 1,50 \text{ m}$ (dividido en dos partes), tienen vidrio plano. Espesor del vidrio de las ventanas 6 mm.

Cuatro ventanas con dimensiones de $0,5 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}$, vidrio plano de 4 mm. Espesor del vidrio de las ventanas 4 mm.

Volumen de vidrio= $0,085 \text{ m}^3$ de vidrio por apartamento

Volumen de vidrio en 128 apartamentos= $10,85 \text{ m}^3$.

Densidad del vidrio: 2.500 kg/m^3 .

Peso de vidrio en 128 apartamentos= 27.125 kg de vidrio plano.

Se considera un 20% en excedente para zonas comunes, el total de vidrio plano para todo el edificio de 16 pisos = 32.550 kg

Parámetro huella de carbono del vidrio $1,44 \text{ kgCO}_2\text{eq/kg}$ (Circular Ecology, 2024).

Huella de carbono del vidrio = $46.872 \text{ kgCO}_2\text{eq}$.

5.2.6.4. Aluminio

Aluminio en marcos de ventanas y puertas por cada apartamento:

Una (1) puerta corrediza con dimensiones de $2,5 \text{ m} \times 2,2 \text{ m}$

Perímetro puerta corrediza: = $9,4 \text{ m}$

Cuatro (4) ventanas G con dimensiones de $1,0 \text{ m} \times 1,50 \text{ m}$

Perímetro ventanas G = 5 m

Total, Perímetro cuatro ventanas G = 20 m

Cuatro (4) ventanas P con dimensiones de $0,5 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}$

Perímetro ventanas P = $2,2 \text{ m}$

Total, Perímetro cuatro ventanas P = $8,8 \text{ m}$

Total, Perímetro de perfiles de aluminio en puerta y ventanas = $38,2 \text{ m}$

Anchura de cada perfil (incluyendo pliegues): 10 cm

Aluminio en marcos de ventanas y puerta = $3,82 \text{ m}^2$

Espesor de cada perfil= $1,3 \text{ mm}$

Volumen del aluminio en cada apartamento= $0,004966 \text{ m}^3$

Volumen del aluminio para 128 apartamentos = 0.636 m^3

Densidad del aluminio= 2.700 kg/m^3 .

Peso del aluminio por apartamento= $13,41 \text{ kg}$.

Peso total del aluminio para 128 apartamentos = 1.716 kg

Parámetro huella de carbono del Aluminio 8,32 kgCO₂eq/kg, dato para Suramérica (Circular Ecology, 2024).

Huella de carbono del Aluminio: 1.716 kg aluminio x 8,32 kgCO₂eq por kg de aluminio = 14.277 kgCO₂eq

5.2.6.5. Madera (MDF)

Madera por apartamento

Puerta principal dimensiones: 0,9 m x 1,9 m x 0,05 m

Siete (7) puertas al interior del apartamento dimensiones: 0,8 m x 1,9 m x 0,04 m

Total, volumen madera por apartamento = 0,511 m³

Total, volumen madera en 128 apartamentos = 65,42 m³

Total, volumen madera con 20% excedente en zonas comunes= 78,5 m³

Densidad de la madera MDF = 700 kg/m³.

Peso de la madera de todo el edificio = 54.950 kg

Parámetro huella de carbono de la madera (MDF): 0,856 kgCO₂eq/kg de la madera MDF, (Circular Ecology, 2024).

Huella de carbono de la madera (MDF) = 47.037 kgCO₂eq

5.2.6.6. Piso cerámico (porcelanato)

Área piso porcelanato por apartamento = 81,21 m²

Espesor del porcelanato = 9 mm

Volumen piso cerámico por apartamento = 0,731 m³

Volumen piso cerámico en 128 apartamentos = 93,56 m³

Volumen piso total con 30% excedente zonas comunes = 1,3 x 93,56 m³ = 121,628 m³

Densidad = 2,4 g/cm³ = 2.400 kg/m³

Peso piso cerámico de un apartamento = 1.754 kg

Peso piso cerámico todo el edificio con 30% excedente zonas comunes = 291.912 kg

Parámetro huella de carbono de piso cerámico: 0,8 kgCO₂eq/kg (Circular Ecology, 2024) (Peng *et al.*, 2012).

Huella de carbono piso cerámico = 233.530 kgCO₂eq

5.2.6.7. Pintura

Superficie pintada= 5 x Área construida x 5 = 192.541 m²

Total, superficie a pintar = 30.960 m² + 10.836 m² = 41.796 m²

Espesor pintura: 125 µm (micrómetros)

Volumen de la pintura = Superficie de muros estucados a pintar x espesor de pintura = 41.796 m² x 125 x 10⁻⁶ m = 3,87 m³

Densidad de la pintura = 1.300 kg/m³.

Peso de la pintura de todo el edificio= 5.031 kg

Parámetro huella de carbono pintura: 2,15 kgCO₂eq/kg, (Circular Ecology, 2024)

Huella de carbono pintura = 10.817 kgCO₂eq

5.2.6.8. Panel yeso (Drywall)

Superficie en cada apartamento con panel yeso (placas de yeso): 15 m², espesor 12,7 mm

Área de panel yeso en 128 apartamentos= 128 x 15 m² = 1.920 m².

Superficie con panel yeso zonas comunes: 81 m².

Área total de panel yeso= 2.001 m².

Volumen de panel yeso= 2.001 m² x 0,0127= 25,4 m³.

Densidad del panel yeso= 700 kg/m³.

Peso del panel yeso en todo el edificio= 25,4 m³ x 700 kg/m³ = 17.780 kg

Parámetro huella de carbono Panel yeso: 0,232 kgCO₂eq/kg, (Circular Ecology, 2024)

Huella de carbono panel yeso = 4.125 kgCO₂eq

Peso de acabados del edificio= 1.755.742 kg

5.2.6.9. Concreto

Volumen de concreto calculado para la superestructura = Vcs

Volumen de muros (sólido de concreto) del edificio= $(14.476,8 \text{ m}^2 \times 0.133) \times 2,65 \text{ m} = 1.925 \times 2,65 \text{ m}^3 = 5.102 \text{ m}^3$.

Anchura promedio de los muros estructurales = volumen del concreto en los muros / Superficie de muros portantes = $5.102 \text{ m}^3 / 20.898 \text{ m}^2 = 0,244 \text{ m} = 24,440 \text{ cm}$. Se anota que el edificio construido tiene muros reforzados con anchuras entre 12 y 40 cm.

Volumen de concreto en losas= $Vcl = 905 \text{ m}^2/\text{piso} \times 16 \text{ pisos} \times 0,2 \text{ m}$ (espesor losas) = 2.896 m^3 .

Volumen total de concreto en la superestructura = $Vtcs = Vcs + Vcl = 5.102 \text{ m}^3 + 2.896 \text{ m}^3 = 7.998 \text{ m}^3$.

Densidad del concreto= $dc = 2.400 \text{ kg/m}^3$.

Peso del concreto de la superestructura del edificio, pisos 1 a 16 = $Pces = Vtcs \times dc = 7.998 \text{ m}^3 \times 2.400 \text{ kg/m}^3 = 19.195.200 \text{ kg} = 19.195,2 \text{ toneladas} = 188.241 \text{ kN}$

5.2.6.10. El peso del acero en la superestructura

El concreto se reforzó con acero corrugado, en promedio, 150 kg/m^3 de concreto, con base en la consideración hecha por parte de los calculistas estructurales de las cargas muertas, cargas vivas, acciones sísmicas (región de elevada amenaza sísmica), fuerza del viento y empuje del suelo.

$Pas = Vtcs \times 150 \text{ kg/m}^3 = 7.998 \text{ m}^3 \times 150 \text{ kg/m}^3 = 1.199.700 \text{ kg}$.

Volumen del acero en la superestructura es $152,6 \text{ m}^3$.

5.2.6.11. Peso total de la superestructura

Peso concreto en la superestructura y acero en la superestructura + peso de los acabados = $19.195.200 \text{ kg} + 1.199.700 \text{ kg} + 1.755.742 \text{ kg} = 22.150.642 \text{ kg} = 217.224 \text{ kN}$

5.2.6.12. Volumen de concreto calculado para la cimentación (subestructura):

Para determinar el volumen de cimentación requerido para un edificio de 16 pisos, se deben considerar varios factores: el peso total del edificio, la capacidad de carga del

suelo en el sitio y el tipo de cimentación. El área requerida para la cimentación depende de la capacidad portante segura del suelo. Por ejemplo, para arcilla compactada (típica de edificios pesados), la capacidad portante segura es de aproximadamente 215–270 kN/m². Se asume 240 kN/m² como promedio. El volumen de la cimentación depende de su espesor y área. En una cimentación típica de losa (balsa) el peso del edificio flota sobre el suelo, como ocurriría si estuviese sostenido por una balsa que flota. (Semenmerahputih.com, 2024)(Bengtsson and Whitaker, 1998). El procedimiento de diseño de la NSR-10 utiliza factores de carga y factores de reducción de resistencia que ya incorporan la filosofía de seguridad estructural. Por ejemplo, para el peso propio y cargas vivas, los factores de carga suelen ser 1.2 y 1.6, respectivamente (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

El espesor de la losa de cimentación puede variar según el diseño y los requisitos locales, pero un rango común es de 0,5 a 1,5 metros para edificios de varias plantas. Puesto que el área del terreno sobre el que asienta el edificio es de 945 m², se puede escoger con seguridad un espesor de losa de 1,0 m, así el volumen de concreto estimado para las bases (subestructura) es de 945 m³. Es de aclarar que en edificios elevados la cimentación más utilizada es la de pilotes o cajones, para incrementar la resistencia del suelo (Kosiakov, 2018); en este caso, el volumen de concreto podría ser menor.

Esfuerzo portante = Peso de superestructura del edificio /área portante = 217.224 kN/ 945 m² = 230 kN/m². Este valor es menor a 240 kN/m² que es la capacidad portante del suelo. Por lo tanto, el área asumida es correcta.

Peso de concreto calculado para la cimentación = 945 m³ x 2.400 kg/m³= 2.268.000 kg

Peso del acero de refuerzo en la cimentación

El peso de acero de la subestructura es de 141.750 kg, que corresponde a 18 m³ de acero.

5.2.6.13. Peso del acero de refuerzo en la estructura (superestructura y bases)

El concreto es reforzado con 150 kg de acero por m³ de concreto, para un volumen de concreto total de 8.943 m³, se tendrá un peso de acero de 1.341.450 kg de acero para todo el edificio. Siendo la densidad del acero de 7.860 kg/m³, el volumen del acero será = 1.341.450 kg /7.860 kg/m³ = 171 m³ de acero en el total del edificio.

Parámetro huella de carbono del acero de refuerzo: 1,72 kgCO₂eq/kg (Circular Ecology, 2024)

Huella de carbono del acero de refuerzo = 2.307.294 kgCO₂eq.

Volumen de concreto en el edificio = 7.998 m³ + 945 m³ = 8.943 m³

Masa total de concreto en la estructura el edificio (superestructura y subestructura) = 19.195.200 + 2.268.000 = 21.463.200 kg

5.2.6.14. Huella de carbono del concreto

Para el análisis de huella de carbono del concreto se toma parámetro el valor de 0,159 kgCO₂eq/kg de concreto, dado por el ICE, para un concreto de alta resistencia con adición media de 14% de material suplementario calcáreo y resistencia a la compresión, RC, de (40/50) MPa. (Circular Ecology, 2024)(Raimondo, Lilavois and Nelson, 2022).

Huella de carbono del concreto para todo el edificio de 16 pisos = 21.463.200 kg x 0,159 kgCO₂eq/kg = 3.412.648,8 kgCO₂eq

Peso de la superestructura= Carga muerta= D= 22.150.642 kg

La carga muerta (D): Incluye el peso propio de la superestructura (losas, vigas, columnas, muros, etc.), acabados permanentes y elementos fijos. La carga viva (L): Corresponde al peso de los ocupantes, mobiliario, equipos y otros elementos variables según el uso del edificio.

Peso de la subestructura= 2.409.750 kg

Peso total del edificio (estructura) = 24.560.392 kg

La huella de carbono de los 24.560.392 kg de materiales que componen el edificio es 6.391.334 kgCO₂eq.

5.2.6.15. Relación carga muerta/área construida

Carga muerta/Atc= 22.150.642 kg/14.476,8 m²= 1530 kg/m²= 15,009 kN/m²= 15 kN/m².

Según la NSR-10, para vivienda, oficinas o usos similares, la carga viva típica es de 2 a 4 kN/m² por piso, aunque para áreas comunes puede ser mayor.

5.2.6.16. Transporte de materiales

Supuestos: Distancia media recorrida:50 km (local).

Emisiones camión diésel: 0.197 kgCO₂eq/t-km (Ragon and Rodríguez, 2021).

Peso total del edificio: 24.560.392 kg

Huella de carbono = $24.560 \text{ t} \times 0,2 \text{ kgCO}_2\text{eq/ton-Km}$ = $4.912 \text{ kgCO}_2\text{eq}$

5.2.6.17. Energía operacional en el proceso de construcción

Supuestos: Energía en maquinaria (grúas, mezcladoras): 15 kWh/m^2

Parámetro emisiones eléctricas: $0,164 \text{ kgCO}_2\text{eq/kWh}$ (XM, 2020).

Huella de carbono proceso de construcción = $14.476,8 \text{ m}^2 \times 15 \text{ kWh/m}^2 \times 0,164 \text{ kgCO}_2\text{eq/kWh}$ = $35.613 \text{ kgCO}_2\text{eq}$

5.2.6.18. Residuos de construcción y de demolición (RCD)

En cada construcción el volumen de los RCD de la obra y sus emisiones de CO_2 asociadas a cada uno de los materiales y elementos de construcción pueden variar de acuerdo con los procesos implementados y las tecnologías utilizadas durante la construcción. Generalmente los valores de los RCD generados pueden estar entre el 1% y el 6%, sin embargo, en algunas construcciones se pueden alcanzar hasta un 13% cuando por precaución o mala planificación se realizan un pedido excesivo de concreto, igualmente, se deben tener en cuenta algunas obras temporales, las reparaciones pos venta y aquellos elementos que permiten el vaciado del concreto, incluido el encofrado y los andamios cimbra (Arup, Limited and Kingdom, 2023).

La composición de los RCD está compuesta de: concreto que proviene de la superestructura y de la subestructura, mortero de repello, material de estuco, retales de piso cerámico, pintura y retales de panel yeso, estos reportan un peso de $23.129.726 \text{ kg}$ en el edificio, se asume que la proporción de cada material se mantiene en los RCD; del total de estos, se asume que el 2% son RCD y corresponde a 462.595 kg . El acero no se incluye por ser totalmente reciclable. La energía incorporada en los materiales que componen el RCD es $125.370 \text{ kgCO}_2\text{eq}$, que corresponde a la del 2% de la de los materiales de la edificación, no están incluidos en la composición de los RCD la carpintería de aluminio (ventanas de aluminio y vidrio) y la carpintería de madera, que son instalados por proveedores externos. El cálculo del parámetro de la huella de carbono de RCD para el edificio de 16 pisos se presenta en la Tabla 28 con los cálculos realizados y corresponde a $11,39 \text{ kgCO}_2\text{eq/t}$, que es del mismo orden de reportados en la literatura, $0.016 \text{ kgCO}_2\text{eq}$ (Wang *et al.*, 2022) (Gibbons *et al.*, 2022) (Townsend and Anshassi, 2023).

Tabla 28. Huella de carbono de RCD por acciones a vertedero (por tonelada)

RCD GENERADOS	PESO kg	Porcentaje en peso de materiales RCD (%)	HUELLA DE CARBONO (kgCO ₂ eq)	HUELLA DE CARBONO POR 1t DE RCD kgCO ₂ eq
Concreto	21.463.200	92,80	11,14 ^a	10,34
Mortero de repello	1.254.000	5,42	11,14 ^a	0,60
Estuco	97.803	0,42	0,31 ^b	0,00
Piso cerámico	291.912	1,26	35,95 ^a	0,45
Pintura	5.031	0,02	0,00 ^a	0,00
Panel yeso	17.780	0,08	0,03 ^b	0,00
TOTALES	23.129.726	100		11,39

a: (Wang *et al.*, 2022) b: (Townsend and Anshassi, 2023)

Fuente: Elaboración propia

Huella de carbono de RCD (Q_{RCD})

Peso de los RCD = 23.129.726 kg x 0,02 = 462.600 kg = 462,6 t

Peso de RCD/ m² de área construida = 462.600 kg/14.476,8 m² = 32 kg/m².

El valor encontrado se compara muy cercano con el de un estudio de los RCD generados en un edificio elevado en Malasia, que reporta un factor de ~32,9 kg de residuos/m² de RCD (Mah, Fujiwara and Ho, 2016)

Parámetro emisiones en vertedero: 11,39 kgCO₂eq/t (Wang *et al.*, 2022)(Gibbons *et al.*, 2022).

La Huella de carbono de los RCD del edificio de 16 pisos por perjuicio ambiental al ir a vertedero y no ser reciclados es de = 462,6t × 11,39 kgCO₂eq/t = 5.269 kgCO₂eq.

La energía incorporada en el material de los RCD generados y gestionados en obra es la que resulta de sumar cada uno de los materiales que componen los RCD, y equivale a 3.853.000 kgCO₂eq, los cuales en 14.476,8 m² de área construida reportan un valor de 266,2 kgCO₂eq/m² en sus emisiones.

5.2.6.19. Huella de carbono del edificio por metro cuadrado construido

En la Tabla 29 se resumen los valores de volumen, peso, parámetro de kgCO₂eq, huella de carbono y porcentaje de participación de cada uno de los elementos de construcción del edificio y otros considerados. La Huella de carbono del edificio de 16 pisos al sur del Distrito Especial de Santiago de Cali es 442 kgCO₂eq/m² y la de los RCD corresponde a 82,329 kg/m². Para otros procesos generadores de huella como transporte de materiales y energía operacional en el proceso de construcción.

Tabla 29. Huella de carbono de componentes del edificio al sur del Distrito Especial de Santiago de Cali kgCO₂eq/(m² construido)

PARTE EDIFICACIÓN	MATERIAL o ACTIVIDAD CONSTRUCTIVA	VOLUMEN m ³	PESO kg	PARAMETRO kgCO ₂ eq	HUELLA DE CARBONO kgCO ₂ eq/m ² (construido)	HUELLA DE CARBONO %
Superestructura	Concreto	7.998	19.195.200	0,159	3.052.037	47,661
	Acero de refuerzo	152,6	1.199.700	1,72	2.063.484	32,224
	Mortero de repello	627	1.254.000	0,15	188.100	2,937
	Estuco	54,33	97.803	0,164	16.040	0,250
	Vidrio	10,85	32.550	1,44	46.872	0,732
	Aluminio	0,636	1.716	8,32	14.277	0,223
	Madera	78,5	54.950	0,856	47.037	0,735
	Piso cerámico	121,628	291.912	0,8	233.530	3,647
	Pintura	3,87	5.031	2,15	10.817	0,169
	Panel yeso	25,4	17.780	0,232	4.125	0,064
Subestructura Bases cimientos	Concreto	945	2.268.000	0,159	360.612	5,631
	Acero de refuerzo	18,4	141.750	1,72	243.810	3,807
OTROS	Transporte de materiales (t)		24.560.392	0,2	4.912	0,077
	Energía operacional en el proceso de construcción			0,164	35.613	0,556
	RCD generados y gestionados en obra		462.600	0,16658	77.060	1,203
	RCD en vertederos		462.600	0,01139	5.269	0,082
Huella de carbono total						100,00
Q= Huella de carbono/m²						0
						442

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 30 se presenta un resumen de los resultados relacionados con los resultados de las emisiones, en kgCO₂eq/m², de: los materiales, los procesos de generación y gestión de RCD, la huella de carbono de la totalidad de la construcción del edificio de 16 pisos, la energía operacional durante la fase de construcción, la existencia del marco normativo para deconstruir y la aceptación de la educación y cultura del cambio tecnológico.

Tabla 30. Indicadores ambientales valorados en huella de carbono para edificio de 16 pisos

Indicador	Valor	Unidad
Impacto ambiental por materiales	433	kgCO ₂ eq/m ²
Gestión de RCD	5,7	kgCO ₂ eq/m ²
Huella de carbono (construcción)	442	kgCO ₂ eq/m ²
Energía operacional (construcción)	2,5	kgCO ₂ eq/m ² /año
Marco normativo para deconstrucción	Existe, Limitado	N/A
Educación y cultura para cambio tecnológico	Aceptación mediana	N/A

Fuente: Elaboración propia

Huella de carbono del edificio de 16 pisos = 6.391.334 kgCO₂eq, para una huella de carbono por m² construido del edificio de 16 pisos = 442 kgCO₂eq/m². En estudios similares, la huella de carbono de edificios elevados de concreto está en un rango aproximado entre 400 y 1350 kgCO₂eq/m² construido (Hafez *et al.*, 2024), aunque el rango puede variar según el diseño estructural, el tipo de concreto y la eficiencia en la construcción (Collings, 2020) (Builders for Climate Action, 2019)(Rivera, 2020) (Fenner *et al.*, 2018) (Hart, D'Amico and Pomponi, 2021). En Corea, un complejo de 13 edificios de concreto reforzado de 15- 16 pisos, construido en un lote de 51.184 m², con un área total construida de apartamentos de 208.393 m² y ciclo de vida estimado de 40 años reportó una huella de carbono de 452 kgCO₂eq (Roh *et al.*, 2016). Gan y colaboradores, encontraron una huella de carbono promedio de 537 kgCO₂eq/m² en edificios de hormigón armado (Gan *et al.*, 2017).

Al monitorear el sistema de construcción con concreto monolítico del edificio de 16 pisos con los indicadores ambientales, se puede observar que el concreto y el acero son materiales dominantes, juntos contribuyen con el 89,5% de las emisiones totales (6.391.334 kgCO₂eq/m²), lo que caracteriza a este sistema de construcción como un sistema lejano a los lineamientos de la EC. Se aclara que la huella de carbono se calculó sin años de operación u ocupación del edificio; si se calcula la huella a lo largo del periodo de ocupación de una edificación, construida principalmente con concreto reforzado, el impacto ambiental va disminuyendo con los años de operación, dado que el concreto es captador de CO₂. (Tanzer, Blok and Ramírez, 2021)(Sanjuán *et al.*, 2020).

6. SISTEMA PROPUESTO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICACIONES DECONSTRUIBLES

La propuesta del sistema de construcción vincula etapas, componentes principales y actividades necesarias del sistema de operaciones del subsector de edificaciones para el aprovechamiento de los elementos y materiales de construcción sin destrucción de estos. El sistema propuesto para la construcción de edificaciones deconstruibles se fundamenta en un DfD que integra en marcos rígidos el uso de elementos de construcción prefabricados y estructuras modulares diseñadas para la deconstrucción, las modificaciones, el mantenimiento y la reutilización o segundo uso en escalas diversas. Las características del DfD presentadas en la Figura 38, permiten conocer en cada una de las etapas de trabajo la consolidación de los principios de la EC y el DfD.

CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO PARA DECONSTRUIR



Figura 38. Características del DfD que consolidan los principios de la EC. Fuente. Elaboración propia

La vida útil de las edificaciones se puede prolongar cambiando su vocación, siempre y cuando la edificación pueda adaptarse a los cambios, de lo contrario deberá ser demolida; es por esto que, en el sistema propuesto, es indispensable el DfD para lograr así un mayor uso de las edificaciones y los elementos constructivos.

Los principios de la EC permiten tener una visión holística del ciclo de vida de las edificaciones y de los elementos de construcción, indicándonos que la vida útil de las

edificaciones es dinámica y no estática, con ciertos puntos de inflexión que pondrán a prueba la resiliencia de las edificaciones para adaptarse a los cambios. Se pueden tener estrategias de resiliencia basadas en los principios de la EC para edificios nuevos o existentes desde la comprensión holística de su ciclo de vida. Stewart Brand explico en su libro 'How Buildings Learn: What Happens After They're Built', que las edificaciones deben ser vistas desde cada una de sus capas como se muestra en la Figura 39 para lograr comprender el tiempo de vida útil de ellas.

CAPAS DE LAS EDIFICACIONES Y SU VIDA UTIL

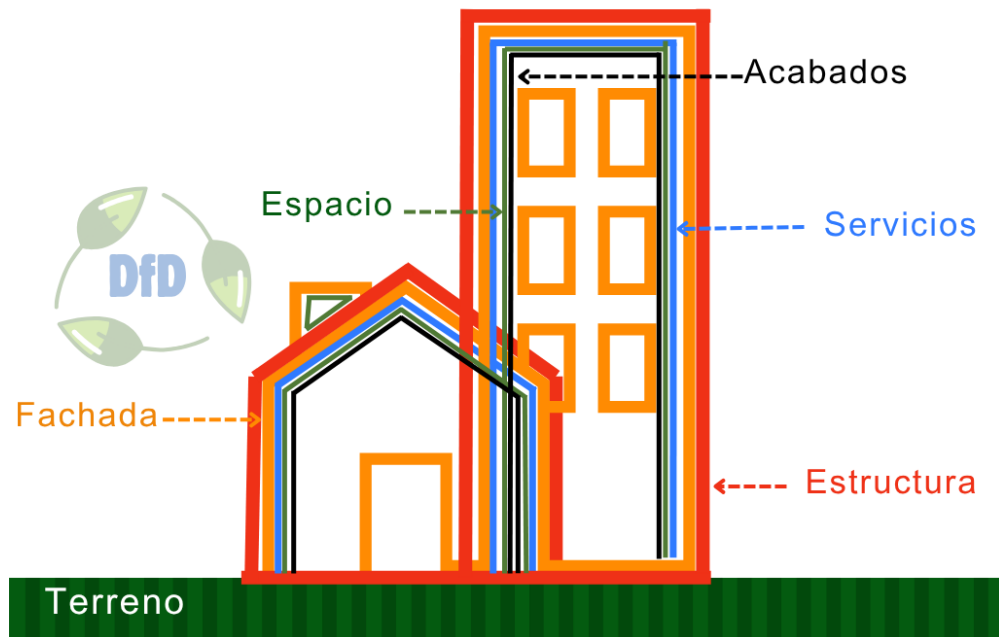


Figura 39. DfD para fortalecer la vida útil de las diversas capas de las edificaciones Fuente. Adaptado de (Brand, 1994)

Cada una de las capas que conforman las edificaciones presentan un ciclo de vida independiente (Brand, 1994), que se determina de acuerdo a la vocación de uso de la edificación, los materiales utilizados y sus cuidados:

- **Terreno:** Ciclo de vida infinito, con alteraciones de la naturaleza o el hombre.
- **Estructura:** Tiene un ciclo de vida entre 30 a 300 años, según el uso y las condiciones ambientales.
- **Fachada:** Con un buen diseño solo requiere de mantenimiento, sus reparaciones son mínimas el cambio se dará por moda, su ciclo de vida es de 20 a 50 años
- **Servicios:** Aquí se agrupan las baterías sanitarias, sistema de redes de acueducto, alcantarillado, eléctrico, gas, calefacción y ascensores con un ciclo de vida de 7 a 15 o hasta 25 años.
- **Espacio:** El ciclo de vida está unido a la vocación de la edificación, si es comercial puede variar entre 3 y 5 años; si es para vivienda varía entre 8 y 30 años.

- **Acabados:** Los acabados y decoración varían de acuerdo a las tendencias del mercado, su ciclo de vida está sujeto a la situación socioeconómica de sus propietarios, se puede tomar como mínimo 1 año en su ciclo de vida

6.1. Componentes principales del sistema de operaciones del subsector de edificaciones propuesto

El sistema de operaciones del subsector de edificaciones propuesto desde su DfD debe considerar los componentes que le den viabilidad a una EC real en el desarrollo de proyectos de edificios para vivienda (ver Figura 40), los principales elementos de construcción se caracterizan por su facilidad de ensamblado y posterior desmonte. En el sistema de operaciones del subsector de edificaciones propuesto, los principales elementos de construcción son: los cimientos, las uniones, las columnas, las vigas y las placas de encerramiento o mampostería; cuyas características deben estar dadas por su facilidad de manejo antes, durante y después de su ensamblaje y deconstrucción.

COMPONENTES QUE DAN VIABILIDAD A UNA ECONOMÍA CIRCULAR REAL

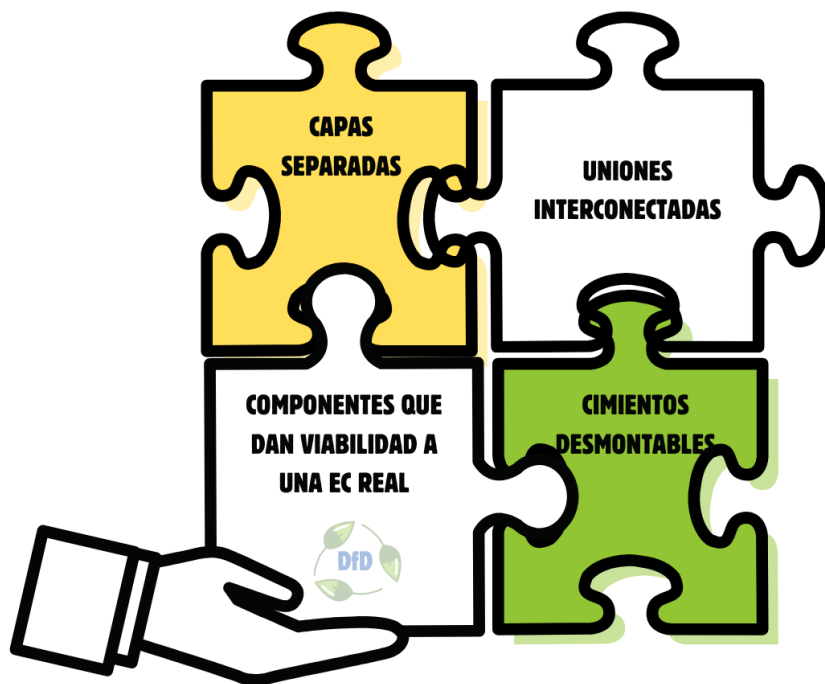


Figura 40. Componentes que dan viabilidad a una EC real. Fuente. Elaboración propia

Los componentes que viabilizarían una EC real en el sistema de operaciones del subsector de edificaciones propuesto, desde su DfD y con los principios de la EC, se reconocen en los elementos de construcción prefabricados por su fácil manejo, por la prolongación de su vida útil y por el cambio de vocación de uso en las edificaciones, lo que caracteriza los elementos de construcción es:

- **Cimientos desmontables:** Permiten recuperar materiales y elementos de construcción al final de la vida útil del edificio.
- **Uniones interconectadas:** Basadas en técnicas de ensamblaje que evitan fijaciones irreversibles.
- **Capas separadas:** Diseños de estructura y mampostería que facilitan el acceso y mantenimiento de servicios, fachadas, espacios y acabados sin afectar la estructura principal.

6.2. Criterios de éxito del sistema de operaciones del subsector de edificaciones desde su DfD propuesto

En la Figura 41 se pueden observar los criterios de éxito del sistema de operaciones del subsector de edificaciones con DfD propuesto, este considera como parte fundamental del diseño las características del DfD y los principios de la EC enfocados en:

- **Estructura Modular:** El sistema de operaciones con DfD propuesto requiere de la implementación de técnicas y mano de obra calificada que permitan incrementar la vida útil de los elementos de construcción y la resistencia estructural de las edificaciones.
- **Flexibilidad:** El sistema de operaciones propuesto se fundamenta en la construcción modular donde debe existir la disposición de ajuste y acople a diferentes usos y tamaños de cada uno de los elementos de construcción, dándole así una mayor flexibilidad al sistema desde su diseño.
- **Escalabilidad:** Los DfD de proyectos de construcción de edificaciones, favorecen la optimización de los tiempos de desarrollo del proyecto, la mano de obra y el uso de materiales y elementos de construcción.
- **Mano de Obra Calificada:** el correcto uso, montaje y desmantelamiento de los materiales y elementos de construcción requiere para el sistema de operaciones propuesto mano de obra tecnificada que garantice el correcto manejo, ensamble y desmonte de estos orientados en su conservación.
- **Deconstrucción:** la mano de obra calificada y las técnicas utilizadas en la deconstrucción son fundamentales para que cada uno de los componentes o elementos de construcción superen las expectativas en resistencia y longevidad de acuerdo con las leyes y normas establecidas para la construcción de edificaciones.
- **Reutilización:** El DfD permite la preservación de elementos de construcción para un segundo uso y el cambio de vocación de las edificaciones, logrando así el incremento del capital natural con un control permanente de los stocks finitos, la recuperación de aproximadamente el 90% de los elementos de construcción y de

las edificaciones que serán utilizados en nuevos proyectos, creando así las condiciones para la regeneración del medio ambiente.

- **Optimizar:** El sistema de operaciones con DfD propuesto permite el rendimiento de los recursos diseñando para reutilizar, renovar, reciclar y reelaborar, lo que permitirá alargar el ciclo de vida útil de los componentes, elementos de construcción las edificaciones.
- **Efectividad:** El DfD del sistema de operaciones propuesto promueve la efectividad del modelo de EC con el objetivo de disminuir las afectaciones causadas a la biodiversidad, que impactan negativamente la vida animal, vegetal y humana.

CRITERIOS DE ÉXITO DEL SISTEMA DE OPERACIONES DEL SUBSECTOR DE EDIFICACIONES DESDE SU DfD

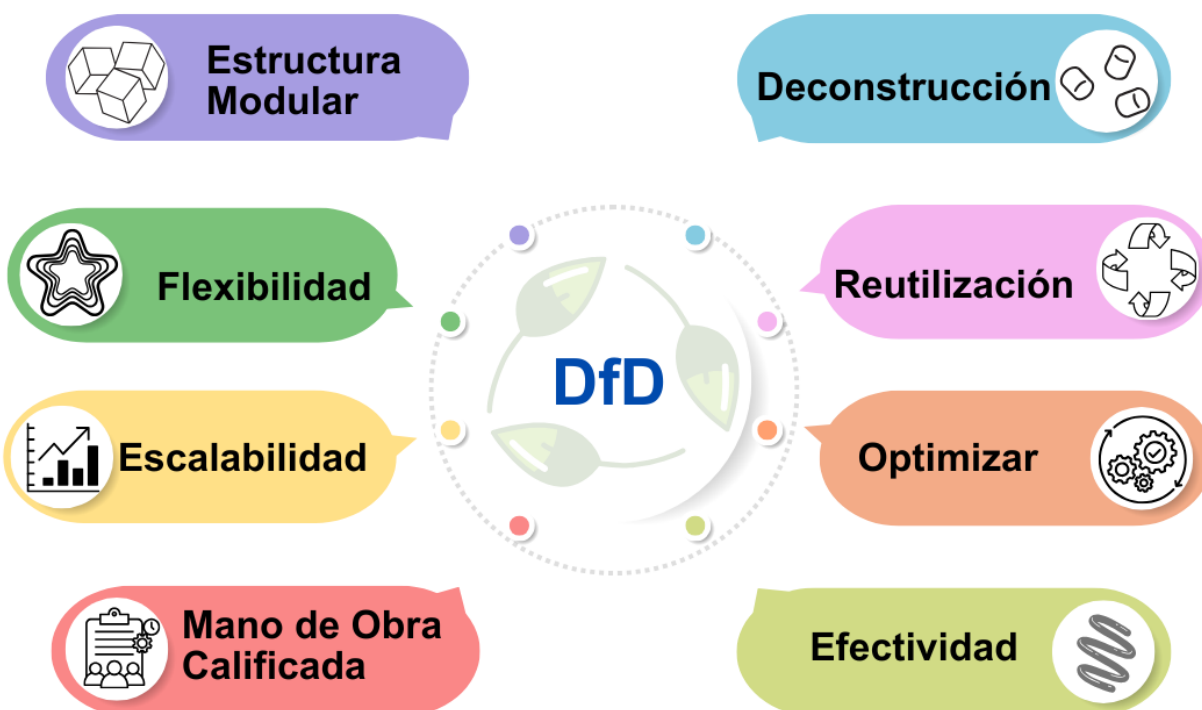


Figura 41. Componentes que dan viabilidad a una EC real. Fuente. Elaboración propia

6.3. Desafíos para la implementación del sistema de operaciones del subsector de edificaciones con el DfD y los principios de la EC propuesto

El sistema de operaciones del subsector de edificaciones con el DfD y los principios de la EC propuesto tiene grandes desafíos para su implementación que inician con:

- Fortalecimiento y desarrollo del marco normativo y legal para el desarrollo de proyectos de construcción de edificaciones deconstruibles.

- Aprobación en la industria de la construcción y del subsector de edificaciones que este unido al conocimiento, familiaridad y grado de responsabilidad con los temas ambientales para encontrar una baja resistencia en su implementación
- Articulación permanente de las características del DfD con los principios de la EC durante el diseño, construcción, mantenimiento, reformas y deconstrucción del proyecto
- Afectación de costos para el desarrollo de proyectos de construcción de edificaciones deconstruibles, principalmente al iniciar la implementación de DfD; sin embargo, vale la pena visualizar que el ahorro será a largo plazo. Con la transformación del sistema de construcción de edificaciones se generarán nuevos empleos y se dinamizara el desarrollo de elementos de construcción modulares prefabricados, que optimizarán todo el proyecto.

6.4. Implementación del sistema de operaciones para el desarrollo de edificaciones con DfD y principios de EC propuesto. Caso de aplicación para proyectos de vivienda rural, desarrollado e implementado por la compañía PREMOLDEADOS SAS.

La información que se presenta fue suministrada por PREMOLDEADOS SAS con la aprobación explícita de inclusión en este documento de investigación doctoral, la empresa PREMOLDEADOS SAS reconoce con ello la inspiración que tuvo la compañía al conocer el concepto de deconstrucción planteado en la investigación y la comunicación simbiótica que se ha tenido con la compañía. Al respecto, específicamente, la empresa PREMOLDEADOS SAS ha acogido el eslogan planteado en la investigación doctoral acerca de: “Sin Prefabricado no hay deconstrucción...sin deconstrucción no hay circularidad”.

El sistema de operaciones del subsector de edificaciones con DfD y principios de la EC desarrollado e implementado por PREMOLDEADOS SAS en el “Proyecto Vivir”, permite realizar un análisis de los resultados obtenidos y el trabajo a desarrollar para su pronta implementación, la imagen de la Figura 42 fue suministrada por PREMOLDEADOS SAS. (Visita a planta en el municipio de Candelaria, 13 julio 2022, 23 agosto 2023, marzo 11 2025, 17 marzo 2025, 11 abril 2025, 15 abril 2025) Este caso deja visualizar algunos alcances futuros, tales como su fuerte potencial de influir en la industria de la construcción por su diseño denominado DfD con principios de la EC, que aporta la adaptabilidad y reutilización de los elementos de construcción prefabricados, proponiendo una alternativa para trabajar en problemas globales como lo son la escasez de recursos, la generación de altos volúmenes de RCD y el cambio climático que afectan la vida y biodiversidad del planeta.



Figura 42. “Proyecto Vivir” Casa piloto sistema de construcción con DfD y los principios de la EC. Fuente. PREMOLDEADOS SAS, 2025

En la Figura 43 se aprecian las imágenes del diseño reticular y planos iniciales del “Proyecto Vivir” de PREMOLDEADOS SAS, el cual inicio en el mes de febrero del 2024 con las actividades de requerimientos y diseño; la producción de los elementos de construcción prefabricados se realizó durante el mes de abril en simultánea con la preparación del área de construcción; la casa inicia su construcción en mayo de 2024 en un terreno en las instalaciones de la compañía, y finaliza en 20 días. Al realizar un análisis de las actividades previas al desarrollado y construcción de la casa se han logrado determinar los logros y limitaciones del “Proyecto Vivir”.

ESPACIOS DINÁMICOS CON DIMENSIONES MÍNIMAS

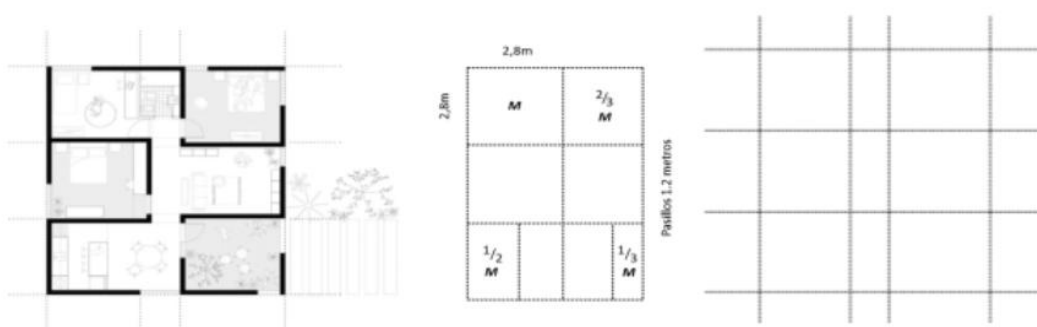


Figura 43. Proyecto Vivir” sistema de construcción reticular con DfD. Fuente: PREMOLDEADOS SAS, 2024

6.4.1. Logros del Proyecto “Vivir”

- **Viabilidad técnica:** El DfD con principios de EC desarrollado junto con los prototipos digitales y físicos confirmaron la practicidad del diseño en su montaje,

luego de su construcción algunas piezas con fisuras fueron desmontadas y permitieron confirmar la viabilidad técnica de la deconstrucción.

- **Modular, flexible y deconstruible:** Su objetivo es conservar todo el diseño modular y permitir una dinámica con los espacios conservando las dimensiones mínimas de confort. Se logra demostrar que el sistema de operaciones con DfD es funcional para diferentes escalas de construcción, el diseño de espacios, los usos, mantenimiento y posterior deconstrucción; su diseño reticular para modificación de espacios permite que este sea confortable y habitable conservando los espacios mínimos 2,8 m x 2,8 m o más amplios si se desea, como se puede apreciar en la Figura 44.
- **Disminución de RCD:** La disminución de RCD se logra con el DfD de cada uno de los elementos de construcción desarrollados y utilizados con un ensamble libre de fijaciones definitivas que permiten su reutilización, en proyectos de construcción de este tipo de edificaciones. Las zapatas son prefabricadas al igual que los otros elementos de construcción utilizados; estas deben ser colocadas en la profundidad especificada y se sujetan a las vigas de cimentación con una fijación Pernada.
- **Segundo uso de los elementos de construcción:** Se utilizaron elementos de construcción prefabricados con los estándares de calidad que permiten la prolongación de su ciclo de vida y segundo uso, actualmente se están desarrollando estos elementos con la adición de RCD de acuerdo con los estándares permitidos.
- **Impacto del sistema con DfD y principios de EC:** El ahorro potencial a largo plazo que representa este proyecto se refleja en: su portabilidad, su sistema modular constructivo con elementos prefabricados, el tiempo de desarrollo del proyecto que está dado en 20 días aproximadamente, la proyección del uso de energía solar, los posibles desarrollos económicos que se pueden adelantar con los espacios que ofrece el proyecto y la desaparición de RCD en obra porque los resultantes aproximadamente, 7%, serán reutilizados en la elaboración de nuevos prefabricados. En la Figura 44 se aprecian planos y la disposición isométrica de los elementos del sistema de construcción con DfD y los principios de la EC, desarrollado para el “Proyecto Vivir”.

Proyecto VIVIR Casa Prefabricada

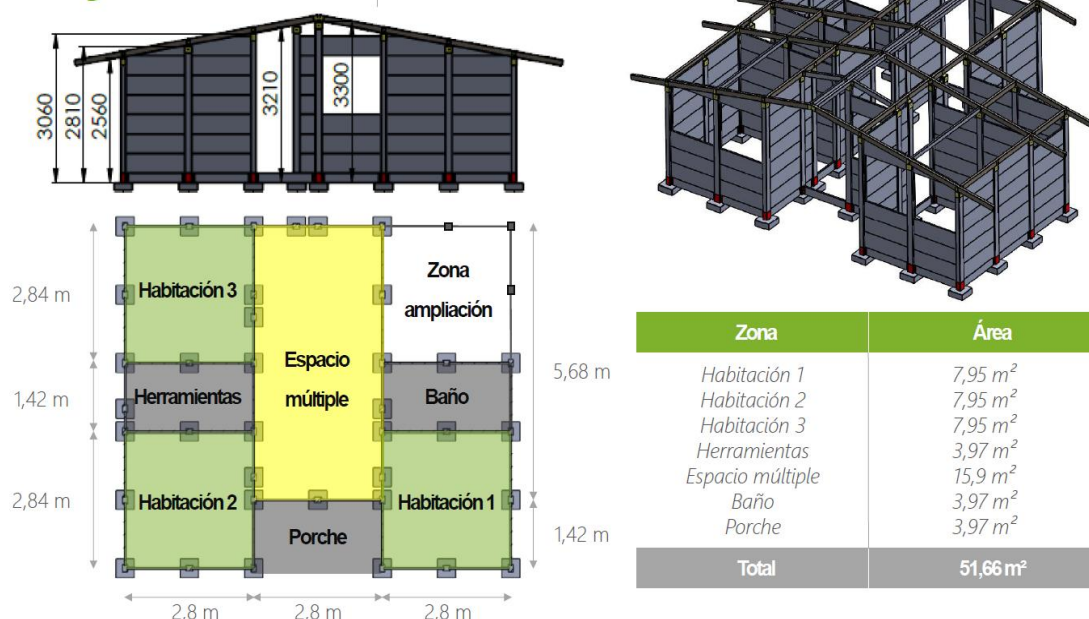


Figura 44. “Proyecto Vivir” modular, flexible y deconstruible “. Fuente: PREMOLDEADOS SAS, 2024

6.4.2. Limitaciones del Proyecto “Vivir”

- **Marco normativo y legal:** Por tratarse de un nuevo desarrollo, el sistema requiere de más desarrollo y ajustes, para cumplir con las normas y leyes de construcción actuales como la NSR- 10, igualmente se necesita la creación de nuevas normas que garanticen la calidad de los elementos de construcción de segundo uso y el cambio de vocación de las edificaciones. Todo esto con el fin de incentivar la implementación de un sistema de operaciones en el subsector de edificaciones con DfD y los principios de la EC. Aún no se cuenta con normas para el segundo uso de los elementos de construcción prefabricados.
- **Desarrollo de pruebas generalizadas:** El sistema de construcción con DfD se ha implementado inicialmente con un prototipo a escala real para una vivienda rural de un piso, se están realizando las actividades y gestiones necesarias para presentar el “Proyecto Vivir” a la certificación de la NSR 10 Título E, inicialmente, para certificar su uso y habitabilidad. Este proyecto requiere de pruebas en otros escenarios de manera gradual para llegar a una construcción de varios pisos de altura, para esto es necesario mejorar los elementos prefabricados con un machihembrado que permita una conexión precisa durante su montaje y logre un sellado en seco; igualmente a las zapatas y vigas estructurales se les debe mejorar su capacidad de carga para una construcción de mayor altura. Estos análisis

realizados al prototipo y la exigencia normativa llevan al proyecto a considerar el uso de muros confinados para hacer factible su certificación.

- **Costos iniciales:** La inversión inicial, a valor presente, para desarrollar el “Proyecto Vivir” en materiales, es de \$38.584.000 COP, posteriormente, al realizar el análisis de viabilidad con el cumplimiento de la normativa NSR 10 Título E, el costo será de \$56.841.000 COP y al realizar el híbrido para el sistema de construcción con DfD se costó en \$51.598.000 COP, estos datos se pueden ver en la Figura 45. La inversión total realizada en la construcción del prototipo de vivienda rural de un piso fue de \$49.519.330 COP, con un costo de la mano de obra de \$10.935.258 COP. Este prototipo se desarrolló en el interior de las instalaciones de PREMOLDEADOS SAS.

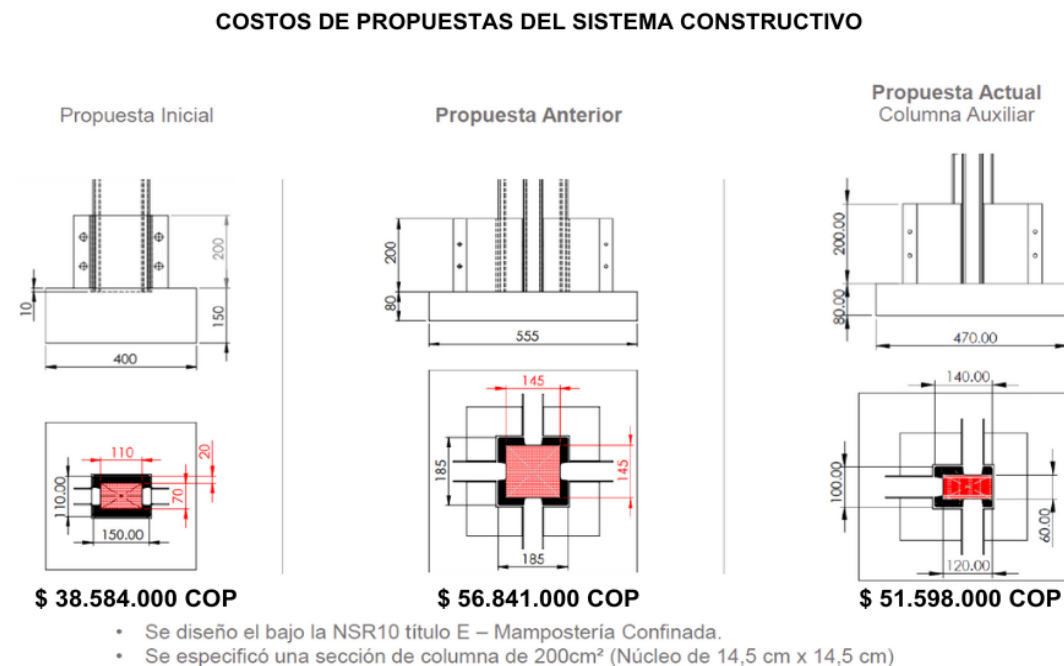


Figura 45. Costos y propuestas del sistema constructivo. Fuente: PREMOLDEADOS SAS, 2024

Ampliación de la investigación: El sistema de construcción con DfD propuesto amerita una amplia investigación en lo relacionado con su integración a tecnologías de construcción avanzadas, al desarrollo de nuevos elementos de construcción modulares, de prefabricados machihembrados, de escenarios que permitan una construcción de varios pisos de altura y sistemas logísticos de transporte, almacenamiento, distribución, ensamble y deconstrucción.

Durante el desarrollo de esta investigación se realizaron visitas y entrevistas a constructoras y a sus proyectos de construcción de vivienda en el Distrito Especial de Santiago de Cali y los municipios de Palmira, Jamundí, Yumbo y Candelaria, igualmente

se visitaron empresas que desarrollan elementos de construcción prefabricados, empresas transformadoras de RCD y sitios de disposición final, encontrando que es necesario para el completo desarrollo e implementación del sistema de operación propuesto para el subsector de edificaciones con DfD y los principios de la EC, involucrar a todos los actores, desde los dueños del proyecto, pasando por los arquitectos, ingenieros, maestros y contratistas hasta el usuario final, capacitándolos y promoviendo en ellos la importancia del DfD y la EC en los proyectos de vivienda.

6.4.3. Sistema estructural y módulos de división de espacios del Proyecto “Vivir”

El sistema de operaciones del subsector de edificaciones con DfD y principios de EC al ser desarrollado e implementado por PREMOLDEADOS SAS se compone de elementos de construcción modulares, prefabricados y estandarizados que conforman el sistema estructural y los módulos de división de espacios. Estos módulos se pueden repetir en cualquier dirección, altura y ancho permitiendo una construcción adaptable, flexible y eficiente para estructuras de vivienda, comerciales, industriales o productivas, como se puede observar en la Figura 46. Los principales componentes o elementos de construcción del sistema de operaciones propuesto y desarrollado en PREMOLDEADOS SAS son:

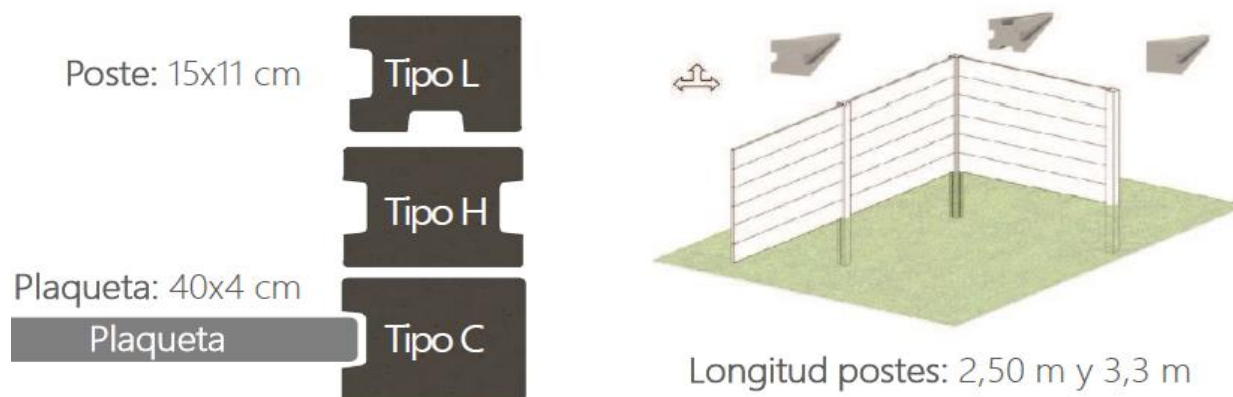


Figura 46. “Proyecto Vivir” Elementos de construcción prefabricados. Fuente: PREMOLDEADOS SAS, 2024

6.4.4. Elementos de construcción modulares, prefabricados y estandarizados del “Proyecto Vivir”

Los elementos de construcción prefabricados de concreto y de concreto pretensado utilizados en el “Proyecto Vivir” se desarrollaron en la empresa PREMOLDEADOS SAS; cada uno de estos elementos cuenta con una ficha técnica donde se reconoce sus características y especificaciones. En la Figura 47 se puede observar su uso y ensamble.

Proyecto VIVIR | Casa Prefabricada

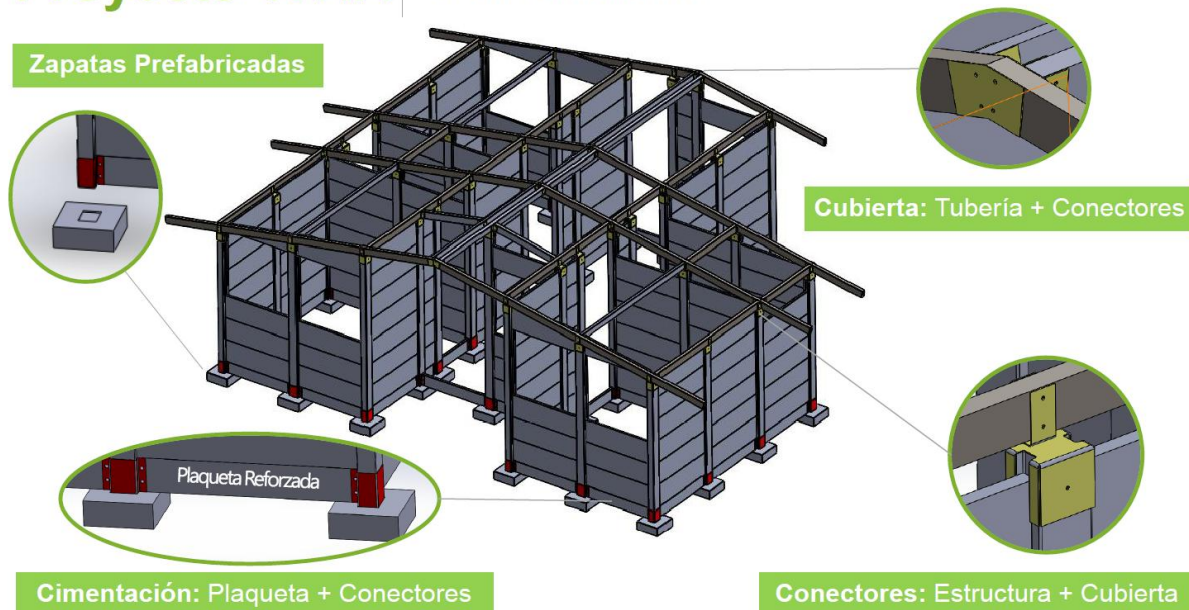


Figura 47. Elementos de construcción modulares, prefabricados y estandarizados del “Proyecto Vivir”. Fuente: PREMOLDEADOS SAS, 2024

6.4.4.1. Cimientos del sistema

El diseño de los cimientos toma como referencia los cimientos tradicionales con zapatas de concreto prefabricadas, adaptados con tecnología moderna para garantizar durabilidad y sostenibilidad. En el “Proyecto Vivir” se utilizaron zapatas centradas que se utilizan como base que se ensamblan con las plaquetas reforzadas y los postes tipo H, L y C, como se puede apreciar en la Figura 48. Estos se unen con precisión para asegurar su rigidez, ampliar la superficie de apoyo y lograr que el suelo soporte la carga transmitida. Es recomendable hacer pruebas de carga que permitan validar el comportamiento durante su uso, las zapatas prefabricadas son una solución técnica, económica y viable para sistemas de construcción con DfD y principios de EC; requieren de un diseño adecuado de acuerdo con el uso, al igual que de una coordinación exacta en su logística de instalación. Los postes tipo H, L y C, llamados también columnas tienen un porcentaje de refuerzo de acero pretensado del 1% del área de la sección transversal. Área de acero = $0,01 \times 0,0196 \text{ m}^2 = 0,000196 \text{ m}^2$ de sección.

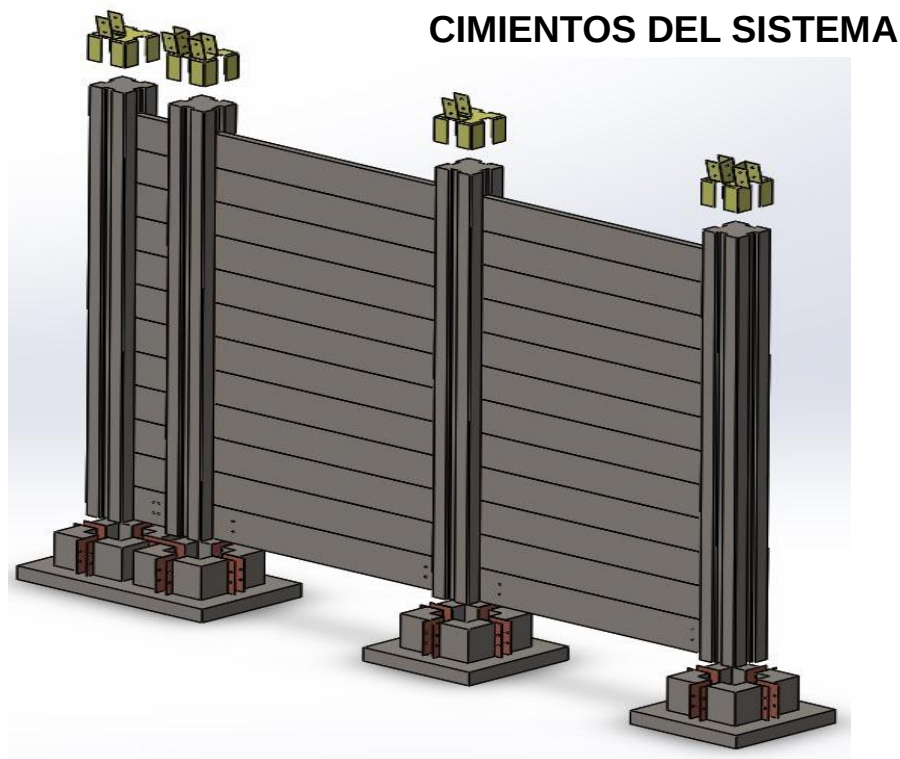


Figura 48. Cimientos del sistema, prefabricados y estandarizados del “Proyecto Vivir”.
Fuente: PREMOLDEADOS SAS, 2024

6.4.4.1.1. Detalles del diseño de los cimientos

- **Cálculo estructural:** Se requiere este análisis para determinar las cargas (muertas, vivas, sísmicas), las dimensiones requeridas en la zapata para su uso y capacidad portante del suelo (ancho, espesor); también, se deben diseñar los refuerzos en acero según normas (parrilla o malla)
- **Moldeado:** por ser un elemento prefabricado se utilizan moldes para su elaboración, vertiendo el concreto en estos, dejando a la vista los ganchos o anclajes para su conexión con los postes.
- **Curado:** El proceso de curado se lleva a cabo de acuerdo a los tiempos establecidos con riegos de mojado con manguera en tiempos establecidas de 4 días para garantizar su resistencia.

6.4.4.1.2. Instalación en obra de los cimientos

- **Preparación del terreno:** La preparación del terreno para instalar las zapatas consiste en la excavación y nivelación del terreno de acuerdo con los planos; esto se complementa con la compactación de la zanja.
- **Extracción de tierra:** De acuerdo con las coordenadas indicadas en el manual de instalación, se deberá marcar sobre el terreno y posterior a esto, realizar el proceso de excavación de los puntos donde se posicionarán las zapatas

prefabricadas para la colocación de las columnas y las plaquetas de cimentación, como se aprecia en la Figura 49.

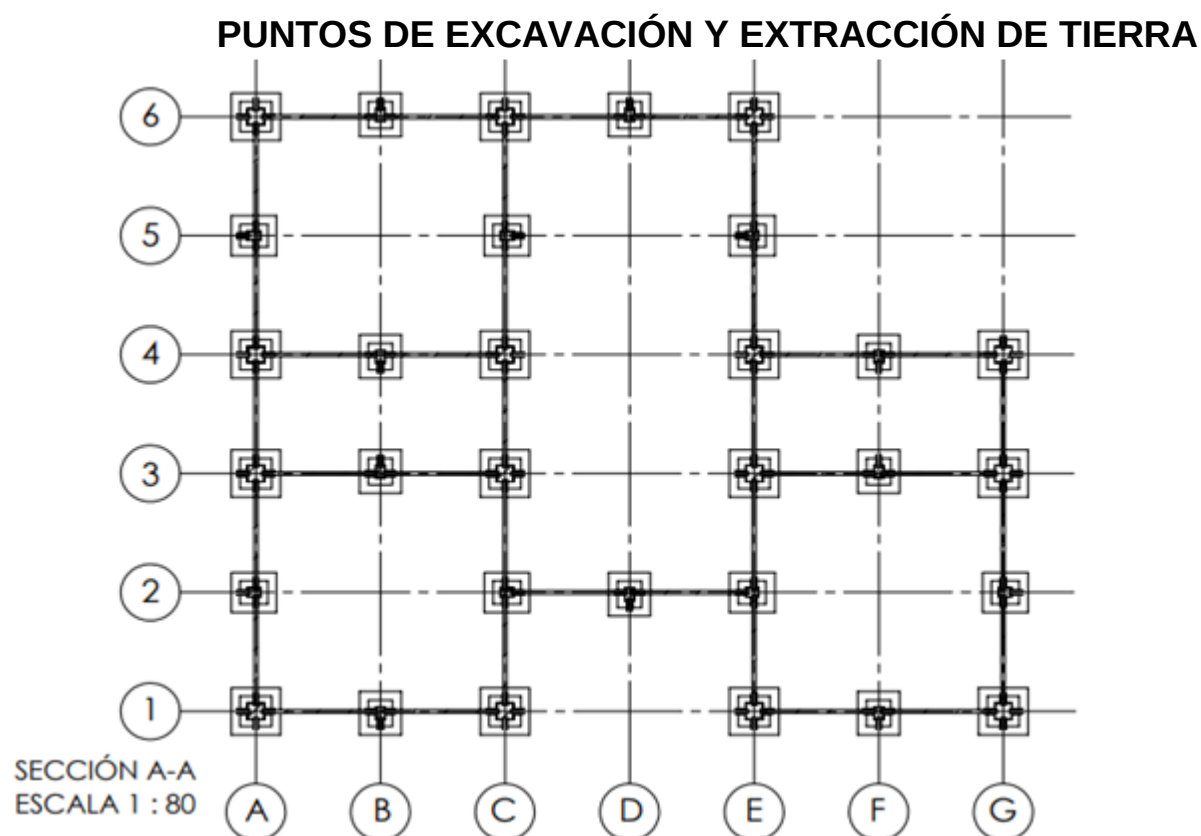


Figura 49. Puntos de excavación y extracción de tierra del “Proyecto Vivir”. Fuente: PREMOLDEADOS SAS, 2024

- **Colocación:** Para posicionar la zapata prefabricada en el terreno se debe rectificar su nivelación y centro buscando con esto la coincidencia exacta del punto de conexión con los postes, que permita su ensamble con las conexiones metálicas embebidas.
- **Conexión con la plaqueta reforzada y los postes:** Estos dos elementos de construcción prefabricados con pretensado, al unirse con la zapata generan un marco estructural rígido que facilita el ensamble y deconstrucción del proyecto. Los postes utilizados en el proyecto son los denominados H, L y C, con dimensiones de 2,50 m hasta 3,30 m de longitud, y 15 X 11 cm de espesor, que pueden apilarse para alcanzar la altura deseada. Para su ensamblaje se utilizan anclajes embebidos y pernos avellanados que generan una alta resistencia en cada una de las uniones.

- **Revisión final:** Se verifica la nivelación, la alineación vertical y horizontal de todos estos componentes junto con la precisión y ajuste de los anclajes embebidos y pernos avellanados antes de iniciar el ensamble de las placas.
- **Acabados:** Una vez teniendo la estructura principal armada, se procede a instalar los conectores de cubierta, se posicionarán encima de las columnas y a través de una conexión pernada, se instalará la tubería estructural para conformar la base en donde reposará la cubierta de UPVC

6.4.4.2. Placas de concreto

En el “Proyecto Vivir”, desarrollado por PREMOLDEADOS SAS, los elementos de construcción prefabricados que se utilizaron para la mampostería son en un 90% desarrollo propio. Las placas de concreto son módulos prefabricados pretensados que se utilizan para formar las paredes de fachada y divisiones de espacios internos; sus dimensiones son 40 cm de altura X 4 cm de espesor y hasta 250 cm de longitud. Durante la construcción del proyecto estas se ensamblan con la ayuda de los postes H, L y C que funcionan como marcos rígidos. La densidad del concreto utilizado es de 2.400 kg/m³ y el consumo de acero para el pretensado es de 10 kg sobre m³ de concreto.

6.4.4.2.1. Detalles del diseño de las placas de concreto

- **Pretensado con cable acerado de 3 mm:** Antes del vaciado de concreto es preciso colocar el acero para ser previamente tensado.
- **Vaciado de concreto:** Para esta actividad es necesario que el concreto cumpla con la normativa y los requisitos de calidad en el desarrollo de las placas de concreto. Al ser una mezcla con bajo asentamiento, podría tener una textura porosa.
- **Curado acelerado:** El proceso de curado se lleva a cabo de acuerdo con los tiempos establecidos en la pista de pretensado. Este proceso se realiza en 4 días aproximadamente.
- **Liberación del pretensado:** Luego del proceso de curado se realiza la fragua, se cortan los cables y se genera compresión en el concreto.
- **Control de calidad:** Se verifica el cumplimiento del marco normativo con ensayos de resistencia a la compresión de 28 MPa, al igual que se revisa la calidad de sus textura, color, peso y dimensiones.

6.4.4.2.2. Instalación en obra de las placas de concreto

- **Verificación de la amplitud de los postes y su nivelación:** Dado que el margen de tolerancia es de $\pm 0,5$ en sus dimensiones, se requiere verificar su amplitud y el nivel para iniciar el ensamble de las placas de concreto.

- **Trasiego de elementos:** El sistema de Casa Prefabricada está pensado y diseñado para poder ser construido sin herramientas complejas como lo son grúas o gatos. Cada elemento puede ser transportado por 2 operarios.
- **Juntas y sellado:** El prototipo instalado para el “Proyecto Vivir” se realizó en seco, lo que deja como una mejora a implementar en las plaquetas, y es el desarrollo del machihembrado de estas que permita un sellado hermético.

6.4.4.3. Conexiones metálicas embebidas

En el “Proyecto Vivir” son fundamentales las conexiones metálicas embebidas dado que estas son un componente decisivo en el ensamble de los elementos de construcción prefabricados, porque permiten la integración eficiente de cada uno de ellos con los elementos estructurales; garantizan una superficie de contacto máxima entre los componentes para una mayor resistencia y seguridad. Se utilizaron en el proyecto conexiones metálicas embebidas que coinciden con las dimensiones de los postes, las plaquetas reforzadas, las zapatas y la estructura del techo permitiendo así un ensamble adecuado con pernos avellanados.

6.4.4.3.1. Detalles del diseño de las conexiones metálicas embebidas

- **Verificación de parámetros:** Se requiere de un cuidadoso análisis en la verificación de los requisitos de tamaño y dimensiones al igual que de los factores de seguridad, de acuerdo a la norma ACI 318S14 (American Concrete Institute, 2015).
- **Localización ideal:** Para conservar las características y requisitos normativos de los elementos de construcción prefabricados que requieren asegurar, es necesario tener en cuenta la distancia mínima, el diámetro del anclaje y las separaciones entre uno y otro.

6.4.4.3.2. Instalación en obra de las conexiones metálicas embebidas

- **Alistamiento de los conectores:** Se verifica su estado, apariencia física y las dimensiones para tener una marcación precisa de la ubicación de cada uno de los pernos avellanados.
- **Fijación de los conectores:** inicialmente se hace una fijación temporal para el posicionamiento de los conectores con un rango de tolerancia de ± 1.5 mm.
- **Verificación elementos prefabricados y conectores:** Se requiere una verificación que garantice la calidad y vida útil de cada uno de los elementos que serán unidos con los conectores embebidos para evitar fallas prematuras por corrosión, desviaciones de medidas o rechazos durante el montaje.

6.4.4.4. Estructura metálica del techo

Para la construcción y ensamble del techo se utiliza una cubierta metálica con perfiles de 120 cm x 60 cm x 3 mm espesor en tubería estructural rectangular ACESCO. Un techo metálico seguro, eficiente y duradero, debe garantizar la configuración estructural, las cargas a considerar, componentes como correas, vigas principales, cerchas, las conexiones críticas, los cálculos estructurales, la protección contra la corrosión y su integración con los otros sistemas del proyecto.

6.4.4.4.1. Detalles del diseño de la estructura metálica del techo

- **Configuraciones estructurales típicas:** Se utilizaron 15 perfiles de 120 cm x 60 cm x 3 mm espesor, cada uno de acuerdo con la necesidad del espacio y el ángulo de caída del techo.
- **Cargas a considerar:** Las cargas tienen en cuenta su peso propio más el peso de la cubierta, que equivalen a las cargas muertas; las cargas vivas pueden oscilar entre, la presión y la succión del viento, y la carga sísmica cumpliendo con la norma ASCE/SEI 7-10 (American Society of Civil Engineers, 2010).
- **Materiales y secciones estándar:** Los perfiles utilizados cumplen con la normatividad de los aceros de acuerdo con su espesor y grado, siguen la norma ASTM 653/a-653M (American Society for Testing and Materials, 2000).
- **Detalles constructivos:** El control de los detalles pueden dar mayor seguridad al diseño ya que contempla la unión poste-placa de concreto, los apoyos, separaciones, fijaciones, conexiones, el análisis de flexión, deflexión, la protección contra la corrosión y su integración con las cubiertas, drenajes y claraboyas.

6.4.4.4.2. Instalación en obra de la estructura metálica del techo

- **Preparación Previa:** Es necesario realizar la verificación de los planos, confirmar las medidas reales con la tolerancia máxima de ± 5 mm, la ubicación de anclajes y organizar la logística de ensamble.
- **Secuencia de montaje:** Se deben considerar de forma sucesiva los pasos de anclaje, izada y plomada de postes, unión de placas de concreto, montaje e izada de cerchas, colocación de correas y fijación de cubierta.
- **Pruebas post-instalación:** Posterior a la instalación se deben realizar las pruebas de carga estática, prueba de agua y ensayos no destructivos.

6.4.4.5. Piso adoquinado de concreto

Los adoquines son elementos de construcción prefabricados que permiten la construcción de pisos segmentados, versátiles y duraderos conformados por piezas independientes, acomodadas de acuerdo a los movimientos del terreno y

el área a cubrir. Sus aspectos favorables están reflejados en la ausencia de dilataciones, su recuperación cuando se hacen inspecciones de redes, ampliaciones, empalmes, fallas del terreno y para segundo uso.

6.4.4.5.1. Detalles del diseño del piso adoquinado de concreto (NTC 2017)

- **Absorción máxima:** 7%
- **Resistencia a compresión:** No exige MPa
- **Resistencia al desgaste:** 4,2 MPa
- **Dimensiones toleradas:** ± 2 mm en largo/ancho

6.4.4.5.2. Instalación en obra del piso adoquinado de concreto

- **Preparación Previa:** Es necesario realizar la verificación de los planos, confirmar las medidas reales con la tolerancia máxima de ± 2 mm, realizar la excavación hasta la cota de proyecto, realizar la compactación en capas ≤ 20 cm prueba de densidad (American Society for Testing and Materials, 2021a), verificar la ubicación de los bordillos y organizar la logística de colocación, de acuerdo al diseño propuesto.
- **Secuencia de montaje:** Instalación de bordes guías de concreto prefabricados considerando las juntas de expansión, posteriormente se realiza la compactación del terreno con una placa vibratoria (300-500 kg) 2-3 pasadas con geo membrana protectora y se inicia la instalación de los adoquines considerando la forma sucesiva y los pasos de acuerdo con el diseño que se quiere dar (espina de pez, sogá, trenza, hilera, diagonal, bloques etc.), realizar los cortes necesarios para ajustes, la tolerancia de nivel es de ± 3 mm/3 m.
- **Pruebas post-instalación:** Posterior a la instalación, puede ser puesto en servicio. Las superficies adoquinadas dan un aspecto más estético y dinámico por ser una superficie con una configuración decorativa. Son recuperables en caso de inspección de redes, ampliaciones, empalmes, fallas del terreno y no presentan problemas de dilatación.

6.4.5. Etiquetado de los elementos de construcción modulares, prefabricados estandarizados del “Proyecto Vivir”

El etiquetado o denominación de cada uno de los elementos de construcción prefabricados que se utilizaron en el “Proyecto Vivir”, dan facilidad al manejo de su inventario durante su almacenamiento, durante la construcción, deconstrucción de la

edificación, almacenamiento y segundo uso. Durante la investigación se asignó a cada componente un código alfanumérico único que facilita su identificación para el inventario y uso:

- **Zapatas:** Se cuenta con dos referencias PZ-01 y PZ-02
- **Placas de cimentación:** Se cuenta con tres referencias las cuales están codificadas como PC-01, PC-02 y PC-03.
- **Placas divisorias o de cerramiento:** Se cuenta con tres referencias las cuales están codificadas como PD-01, PD-02 y PD-03.
- **Postes o columnas:** Se cuenta con siete referencias las cuales están codificadas como CA-0, CA-01A, CB-01A, CC-01, CC-01A, CD-01 y TE-01.
- **Pisos:** Se cuenta con tres referencias las cuales están codificadas como AP-01, AP-02 y AP-03.
- **Delimitantes:** Se cuenta con cinco referencias que hacen parte de los bordillos y sardineles, estas están codificadas como BC-01, BB-01, SA-01, SA-02 y SA-03.
- **Alistamiento terreno:** para esta actividad se requiere de cuatro elementos los cuales están codificados como HA-01, EM-01, AN17-01 y PA-01.
- **Conexiones embebidas:** Se cuenta con once referencias las cuales están codificadas como PG-01, CP-01, CA-01, CCH-01, CCH'-02, CCU-01, CCT-01, CCT-02, CCT-03, CCC-01 y CCC-02.
- **Elementos de fijación:** Se cuenta con cinco referencias las cuales están codificadas como TH-01, TF-01, TU-01, WA-01 y JY-01.
- **Cubierta techo:** Se cuenta con tres referencias las cuales están codificadas como TC-01, CU-01 y CH-01.
- **Sistema eléctrico:** Se cuenta con diez referencias las cuales están codificadas como PF-01, BB-01, CO-01, CE-01, CK-01, TP-01, IS-01, TC-01, C12-01 y TM-01.
- **Sistema hidráulico y sanitario:** Se cuenta con ocho referencias las cuales están codificadas como TEP-01, TEE-01, LPP-01, CD-01, CD-02, CD-03, YS-01 y TS-01.
- **Elementos complementarios:** Se cuenta con ocho referencias las cuales están codificadas como KB-01, KL-01, MA-01, MC-01, LP-01, GL-01, GD-01 y EP-01
- **Prefabricados de acero:** Se cuenta con seis referencias las cuales están codificadas como PP-01, PR-01, PB-01, VT-01, VT-02 y VT-03.

El sistema de servicios del “Proyecto Vivir” comprende los sistemas eléctricos, de acueducto y alcantarillado en un diseño de construcción en sitio. En la Tabla 31 se aprecia la lista de elementos de construcción y accesorios necesarios para el desarrollo del proyecto.

Tabla 31. Elementos de construcción y accesorios necesarios para el “Proyecto Vivir”

PROYECTO VIVIR CASA DE 53,42 m ²				
No	TIPO DE MATERIAL	REFERENCIA	CODIGO	UND DE CONSUMO
1	ESTRUCTURA	Columna A	CA-01	Und
2	ESTRUCTURA	Columna A - Auxiliar	CA-01A	Und
3	ESTRUCTURA	Columna B - Auxiliar	CB-01A	Und
4	ESTRUCTURA	Columna C	CC-01	Und
5	ESTRUCTURA	Columna C - Auxiliar	CC-01A	Und
6	ESTRUCTURA	Columna D - Auxiliar	CD-01	Und
7	CUBIERTA	TUBO ESTRUCTURAL 60*1.20*2MM	TE-01	ML
8	CIMENTACIÓN	PEDESTAL TIPO ZAPATA 55,5 x 55,5 x 28CM	PZ-01	Und
9	CIMENTACIÓN	PEDESTAL TIPO ZAPATA AUXILIAR	PZ-02	Und
10	CIMENTACIÓN	PLATINA GALVANIZADA PARA PEDESTAL DE 3MM GALV	PG-01	Und
11	CIMENTACIÓN	Plaqueta de cimentación (0,20 h) x 1,24	PC-01	Und
12	CIMENTACIÓN	Plaqueta de cimentación (0,20 h) x 0,255	PC-02	Und
13	CIMENTACIÓN	Plaqueta de cimentación (0,20 h) x 0,825	PC-03	Und
14	CERRAMIENTO / DIVISORIOS	Plaqueta de cerramiento (0,20 h) x 1,24	PD-01	Und
15	CERRAMIENTO / DIVISORIOS	Plaqueta de cerramiento (0,20 h) x 0,255	PD-02	Und
16	CERRAMIENTO / DIVISORIOS	Plaqueta de culatas (0,20 h) x 1,24	PD-03	Und
17	PISOS	ADOQUINES 20106 (20 x 10 x 6)	AP-01	Und
18	PISOS	ADOQUINES 20206 (20 x 20 x 6)	AP-02	Und
19	PISOS	ADOQUINES 20108 (20 x 10 x 8)	AP-03	Und
20	DELIMITANTES	Bordillo Cinta (100 x 20 x 10)	BC-01	Und
21	DELIMITANTES	Bordillo Bocic U60 (80 x 35 x 15)	BB-01	Und
22	DELIMITANTES	Sardinell A85 (79 x 35 x 20)	SA-01	Und
23	DELIMITANTES	Sardinell A100 (50 x 50 x 20)	SA-02	Und
24	DELIMITANTES	Sardinell A105 (80 x 35 x 20)	SA-03	Und
25	ALISTAMIENTO TERRENO	HILO X 165 m	HA-01	Und
26	ALISTAMIENTO TERRENO	ESTACA DE MADERA	EM-01	Und
27	ALISTAMIENTO TERRENO	ALAMBRE NEGRO No.17	AN17-01	Kg
28	ALISTAMIENTO TERRENO	PUNTILLAS 2"	PA-01	Kg
29	CUBIERTA	CONECTOR PRINCIPAL	CP-01	Und
30	CUBIERTA	CONECTOR AUXILIAR	CA-01	Und
31	CUBIERTA	CONECTOR CUBIERTA H	CCH-01	Und
32	CUBIERTA	CONECTOR CUBIERTA H'	CCH'-02	Und
33	CUBIERTA	CONECTOR CUBIERTA U	CCU-01	Und
34	CUBIERTA	CONECTOR CUBIERTA T1	CCT-01	Und
35	CUBIERTA	CONECTOR CUBIERTA T2	CCT-02	Und
36	CUBIERTA	CONECTOR CUBIERTA T3	CCT-03	Und
37	CUBIERTA	CONECTOR CUBIERTA C1	CCC-01	Und
38	CUBIERTA	CONECTOR CUBIERTA CUMBRERA	CCC-02	Und
39	CUBIERTA	TORNILLO HEX G-8 R.O 3/8" x 3"	TH-01	Und
40	CUBIERTA	TORNILLO FIJACION TEJA	TF-01	Und
41	CUBIERTA	TUERCA HEX G-8 R.O 3/8"	TU-01	Und
42	CUBIERTA	WASA 3/8"	WA-01	Und
43	CUBIERTA	JUNTA YUMBOLO 3/8"	JY-01	ML
44	CUBIERTA	TEJA UPVC CRETA BAJA	TC-01	Und
45	CUBIERTA	CABALLETE EN UPVC	CU-01	Und
46	CUBIERTA	CAPELOTE PARA HOJA UPVC	CH-01	Und
47	SISTEMA ELÉCTRICO	PLAFONES	PF-01	Und
48	SISTEMA ELÉCTRICO	BOMBILLOS	BB-01	Und
49	SISTEMA ELÉCTRICO	CAJA OCTAGONAL 100X100X47mm	CO-01	Und
50	SISTEMA ELÉCTRICO	CAJA ELECTRICA 2 X 4	CE-01	Und

Tabla 31. Continuación- Elementos de construcción y accesorios necesarios para el “Proyecto Vivir”

PROYECTO VIVIR CASA DE 53,42 m²

No	TIPO DE MATERIAL	REFERENCIA	CODIGO	UND DE CONSUMO
51	SISTEMA ELÉCTRICO	CAJA BREKETS	CK-01	Und
52	SISTEMA ELÉCTRICO	TACO 1 POLO	TP-01	Und
53	SISTEMA ELÉCTRICO	INTERRUPTOR SENCILLO	IS-01	Und
54	SISTEMA ELÉCTRICO	TOMACORRIENTES	TC-01	Und
55	SISTEMA ELÉCTRICO	CABLE 12	C12-01	ML
56	SISTEMA ELÉCTRICO	TUBERIA MET 1/2"	TM-01	ML
57	SISTEMA HIDRÁULICO	TUBERIA DE PRESIÓN 1/2"	TEP-01	ML
58	SISTEMA HIDRÁULICO	TEE 1/2" PVC PRESIÓN	TEE-01	Und
59	SISTEMA HIDRÁULICO	LLAVE DE PASO DE PRESIÓN LISA PVC 1/2	LPP-01	Und
60	SISTEMA HIDRÁULICO	CODO 1/2" 90°	CD-01	Und
61	SISTEMA HIDROSANITARIO	CODO 45° 6"	CD-02	Und
62	SISTEMA HIDROSANITARIO	CODO 90° 6"	CD-03	Und
63	SISTEMA HIDROSANITARIO	Y SANITARIA 6"	YS-01	Und
64	SISTEMA HIDROSANITARIO	TUBO SANITARIO DE 6"	TS-01	ML
65	COMPLEMENTARIOS	KIT BAÑO	KB-01	Und
66	COMPLEMENTARIOS	KIT LAVAMANOS	KL-01	Und
67	COMPLEMENTARIOS	MESON ACERO	MA-01	Und
68	COMPLEMENTARIOS	MUEBLE COCINA	MC-01	UND
69	COMPLEMENTARIOS	LAVADERO PLASTICO	LP-01	Und
70	COMPLEMENTARIOS	GRIFERIA LVP	GL-01	KIT
71	COMPLEMENTARIOS	GRIFERIA DE DUCHA	GD-01	KIT
72	COMPLEMENTARIOS	ESPEJO 40 CM	EP-01	UND
73	PREFABRICADO DE ACERO	PUERTA PRINCIPAL	PP-01	Und
74	PREFABRICADO DE ACERO	PUERTA REJA (INCLUIDA INSTALACIÓN)	PR-01	Und
75	PREFABRICADO DE ACERO	PUERTA BAÑO	PB-01	Und
76	PREFABRICADO DE ACERO	VENTANAS	VT-01	Und
77	PREFABRICADO DE ACERO	VENTANA BAÑO	VT-02	Und
78	PREFABRICADO DE ACERO	VENTANA COCINA	VT-03	Und

Fuente. Elaboración propia con información entregada por PREMOLDEADOS SAS

6.4.6. Actividades para la construcción de la vivienda del “Proyecto Vivir” con el sistema de operaciones propuesto

En el “Proyecto Vivir” se desarrollaron actividades que se enmarcan en dos etapas, la primera es la de excavación y la segunda es la de construcción, actividades que son sucesivas y coordinadas como se aprecia en la Figura 50, para lograr ensamblar cada uno de los elementos de construcción prefabricados y llegar paso a paso al objetivo inicialmente trazado, construir una vivienda 100% con elementos de construcción prefabricados y deconstruible, que da apertura a un sistema de construcción con DfD y los principios de la EC.

- **Paso 1. Definición del área:** Esta debe ser adecuada para desarrollar la construcción de la vivienda, se estableció en el “Proyecto Vivir” que debe de ser como mínimo de 92 m² con dimensiones de 81 m de ancho x 11.4 m de profundidad; además de requerir un espacio temporal para el almacenamiento de los elementos de construcción y equipos.
- **Paso 2. Demarcación y excavación para cimentación:** En esta actividad se realizarán las marcaciones con la ayuda de cinta métrica, cal, hilo, estacas de madera, alambre negro y puntillas, para demarcar de acuerdo al plano la ubicación precisa de los puntos a excavar. En total se requieren 46 perforaciones, con un diámetro de mínimo 30 cm y una profundidad de 60 cm.
- **Paso 3. Fijación columnas:** De acuerdo con el plano se deben fijar las columnas sobre las zapatas instaladas previamente en cada uno de los puntos de perforación, teniendo en consideración siempre la distancia correcta entre columna y columna, que garanticen el espacio requerido para la colocación de las placas. Para su fijación, estas deben quedar milimétricamente ensambladas con las platinas galvanizadas o empalmes tipo X para ser aseguradas posteriormente con tornillos, tuercas y arandelas.
- **Paso 4. Instalación placas de cimentación reforzadas:** Luego de fijar las columnas se instalan las placas de cimentación reforzadas, hechas con concreto pretensado que cumplen la función de las vigas de cimentación. Estas se instalan una a una en la primera fila por todos los muros de la casa.
- **Paso 5. Excavación e instalación sistema hidrosanitario interno y externo:** En este paso se deben realizar las excavaciones teniendo en cuenta la ubicación en el plano de los servicios sanitarios y, la profundidad e inclinación de la excavación para garantizar el buen flujo de las aguas potables y servidas en toda la red.
- **Paso 6. Instalación adoquines articulados:** Se debe preparar el área de manera consecutiva rellenando con base, sub base y arena de asiento. Cada una de estas capas debe estar compactada antes de la siguiente dejando un espacio de 5,5 cm entre la parte superior de la placa de cimentación reforzada y el material compactado para iniciar la instalación de los adoquines al interior y exterior de la vivienda, con el diseño deseado y la correcta nivelación con la placa de cimentación.
- **Paso 7. Instalación placas de cerramiento:** Con las columnas y las placas de cimentación ya instaladas se tiene un marco rígido para la instalación de las placas de cerramiento; Estas están hechas en 2 dimensiones de acuerdo al área donde

deben ser instaladas siguiendo desde la parte superior la guía dada por las ranuras de las columnas.

- **Paso 8. Instalación vigas de cubierta:** Se inicia con la instalación de los empalmes que unirán las vigas de la cubierta del techo con las columnas. Al ubicar las piezas se da mayor firmeza cuando se logra ubicar la arandela, la guaza, y la tuerca con la presión requerida. Esto se debe realizar en cada uno de los empalmes y columnas.
- **Paso 9. Instalación perfiles y soportes auxiliares de cubierta:** El techo para la casa no requiere de soldaduras para su instalación. Este tiene 2 caídas con inclinaciones diferentes. Se debe tener cuidado en las dimensiones de cada perfil para dar forma a la cubierta y lograr su firmeza con los tornillos correspondientes. Los soportes auxiliares otorgan mayor rigidez estructural al techo. Su ubicación se debe realizar en el esparrago de algunas columnas que están demarcadas en el plano.
- **Paso 10. Instalación tejas de cubierta:** Para la instalación de las tejas es importante considerar el espacio perimetral de la cubierta al realizar los cortes a las tejas para darle forma y fijarla a la estructura previamente instalada con el uso de tornillos punta broca o auto perforantes.
- **Paso 11. Instalación ventanas:** Para la casa se tiene un total de diez ventanas que deben ser fijadas con tornillos, cuya demarcación está previamente en estas. Su fijación se puede realizar sobre elementos prefabricados de concreto o en otros perfiles metálicos.
- **Paso 12. Instalación puertas:** Se tienen para instalar dos puertas en ejes opuestos, con alineación frontal para entrada y salida, una puerta exterior del cuarto de herramientas, cuatro puertas interiores para las habitaciones y baño
- **Paso 13. Instalación sistema eléctrico interno y externo:** Para las instalaciones del sistema eléctrico se deben tener en consideración las buenas prácticas de instalaciones eléctricas y el plano del sistema eléctrico de la casa.
- **Paso 14. Instalación carpintería metálica y mobiliario:** Se tienen para instalar un mueble mesón en la cocina y un lavadero prefabricado. Cada uno de estos elementos cuenta con las indicaciones de armado e instalación.
- **Paso 15. Instalación porcelana sanitaria aparatos para baños y accesorios:** Para las instalaciones de la batería sanitaria y accesorios se deben tener en consideración las buenas prácticas de instalación y el plano del sistema hidrosanitario de la casa.

- **Paso 16. Varios obra gris acabados:** En este paso se realizan las actividades de acabado necesarias en las áreas de empalme entre todos los elementos de construcción prefabricados instalados, dejando todos los espacios completamente cubiertos, con el cerramiento adecuado y la correcta instalación de todos los elementos que conforman la vivienda interna y externamente.
- **Paso 17. Verificación:** En este paso es esencial hacer una inspección detallada en la casa de todos los elementos instalados y de las redes de servicios para realizar los ajustes que se requieran, es esencial realizar las pruebas correspondientes a los sistemas hidrosanitarios y eléctrico.
- **Paso 18. Aseo y detallado:** En este paso se deben realizar las actividades de limpieza en cada una de las áreas de la casa, detallando el correcto estado de todos sus elementos interna y externamente, y finalizando con la recolección de los elementos sobrantes.



Figura 50. Actividades del sistema de construcción con DfD “Proyecto Vivir”. Fuente. Elaboración propia

6.4.7. Deconstrucción y reutilización de los elementos de construcción del “Proyecto Vivir”

- **Restaurar:** Este sistema de construcción con DfD y los principios de EC, permite reparar los componentes dañados tras su deconstrucción teniendo en cuenta los estándares de calidad para ser reutilizados y extender su vida útil.

- **Viabilidad logística:** Teóricamente se conocen métodos de almacenamiento y transporte que apoyan este sistema de construcción con DfD y los principios de EC.
- **Implicaciones de costos:** Es necesario considerar para la deconstrucción el estimado del tiempo y los recursos que se requieren para desarrollar las actividades de deconstrucción, teniendo en cuenta que este proyecto contó con un DfD que se fundamenta con los principios de la EC. El almacenamiento es otro factor para considerar, se puede pensar en el uso de contenedores marítimos ya que ofrecen una alternativa para la protección de los elementos de construcción prefabricados que tendrán un segundo uso. Se puede considerar el costo de la mano de obra durante la construcción de la casa como un parámetro del costo de la deconstrucción con mano de obra tecnificada.
- **Problemas logísticos:** Se hace necesario desarrollar una cadena de suministro regional para este proyecto que garantice la distribución óptima de los elementos de construcción prefabricados; actualmente se trabaja con un almacenamiento estructural de acuerdo a la capacidad de proceso de la compañía. El manejo de los container puede ser una alternativa de almacenamiento de múltiples proyectos trabajados a gran escala.
- **Siguientes pasos para otra investigación:** Vale la pena calcular los costos reales de transporte y almacenamiento, optimizar el uso de los elementos de construcción prefabricados para facilitar su transporte y explorar el rediseño, reacondicionamiento y múltiples usos de los elementos de construcción modulares como piezas de fácil acondicionamiento.

6.5. Implementación residencial del sistema de operaciones del subsector de edificaciones propuesto.

Este sistema de construcción con DfD y principio de EC debe evaluar su capacidad para adaptarse a un entorno residencial en áreas urbanas y rurales

6.5.1. Detalles del sitio

- **Ubicación:** Área concurrida con tráfico peatonal y cercano a espacios verdes.
- **Uso propuesto:** Vivienda de 1 piso, locales comerciales, cerramientos para desarrollos avícola, porcícola o invernaderos.

6.5.2. Características del diseño

- **Estructura:** Espacios reticulares modulares de 2,8 m² x 2,8 m² con paredes externas de 1,42 m por módulo
- **Entradas:** Diseño separado para acceso residencial y comercial si se desea tener un área productiva.

- **Adaptabilidad:** Los sitios estrechos limitan la flexibilidad del diseño interno.

6.5.3. Propuestas de mejora

El “Proyecto Vivir” debe fortalecerse continuamente con rediseños que le permita su adaptación a cambios de acuerdo con el uso que tenga, generando espacios productivos, reduciendo costos y maximizando la practicidad. Entre las acciones que se pueden contemplar, están:

- Implementaciones a una escala que considere una construcción de dos pisos o más, explorar posibles desarrollos adicionales, como un conjunto de casas o una aldea forestal.
- Para el proceso de marcación y ubicación de zapatas, pilotes y columnas se sugiere crear una herramienta tipo plantilla, con diagonales que impidan desviaciones en el levantamiento de muros.
- En el evento de construir la casa en un terreno con características diferentes a las existentes en el departamento del Valle de Cauca, se considera necesario diseñar un kit con sistemas complementarios para la cimentación.
- Buscando una mayor circulación de aire al interior de la casa, es necesario considerar la instalación de ventanas de 3 módulos; un módulo móvil, un módulo fijo y un tercer módulo en la parte superior, el cual permitirá el ingreso de corrientes de aire permanentemente.
- La experiencia obtenida con el desarrollo del proyecto piloto en las instalaciones de la compañía, muestran la necesidad de implementar un plan contra la humedad por capilaridad, donde se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones: los conectores metálicos deben ser galvanizados para evitar corrosión, las placas de 20 cm que conforman las vigas de cimentación deberán fundirse adicionando un aditivo hidrofugante, en la ranura del poste antes de instalar la primera plaqueta se aplicará un sellante, igualmente se realizará en la juntas de las demás plaquetas después de su instalación. Buscando una solución a la situación de humedad de las juntas se propone utilizar un impermeabilizante perimetral, posiblemente silicona o algún producto de Sika.
- Se propone para las plaquetas de cimentación y de cerramiento mejorar su diseño, empalme, realizando en cada una de ellas el diseño de machihembrado que les permita minimizar las situaciones de humedad, plagas y circulación de aire.
- Se considera impermeabilizar las plaquetas de las zonas Húmedas que tendrán contacto permanente con el agua. Es posible incluir en el proyecto pocetas de

duchas prefabricadas listas para instalar, emplear papel de colgadura o fibra de vidrio. Se buscará asesoría técnica por parte de los proveedores de SIKA, Toxement y Mapei para contrarrestar las situaciones de humedad que se presentan.

- Para mejorar la estética de la casa se recomienda el uso de columnas tipo T donde se pueden instalar los sistemas de servicio eléctrico, también se sugiere explorar ideas para mejorar el piso, buscando un mortero pigmentado que de una mejor imagen a las áreas internas de la casa.
- En la búsqueda de una mayor seguridad en la estructura del techo se recomienda soldar una tuerca en los conectores de cubierta - columna de las esquinas de las habitaciones, pasillos, baño y cuarto de herramientas con una sujeción pernada que ayude a evitar un posible levantamiento de la cubierta.
- La experiencia obtenida con el proyecto piloto permite plantear el ajuste en algunas áreas de la casa para generar mayor confort, en este caso el área del cuarto de herramientas se puede tomar para instalar un baño de uso privado para los dos cuartos, igualmente, se sugiere un desarrollo donde se logre dividir ese espacio en dos, dándole a la cocina un espacio como alacena, estos ajustes que se sugieren le pueden dar mayor funcionalidad a la casa.
- Posibles aplicaciones futuras del sistema de construcción 100% prefabricado en diversos contextos, incluyen: agricultura con invernaderos o cobertizos reutilizables, casas de playa modulares, albergues temporales, aulas prefabricadas para escuelas temporales diseñadas con montaje y desmontaje rápido, garajes o salas de exposición con espacios comerciales reutilizables, alivio en desastres como soluciones de emergencia para viviendas en zonas afectadas por desastres naturales.
- Con la ayuda de un simulador se realizará un amueblamiento a la casa que permita guiar al usuario en la mejor ubicación del inmobiliario, las áreas de circulación y las áreas de servicios.
- Quedan inquietudes con relación a los niveles de acabado como, por ejemplo: ¿Se debe entregar con piso? ¿Se debe pintar? ¿Se deben ampliar o reducir algunos espacios?

Para PREMOLDEADOS SAS es esencial el acompañamiento durante la construcción de la vivienda, es por esto que al emplear el concepto de “autoconstrucción dirigida” se liderará desde la compañía su desarrollo con un equipo capacitado

conformado por maestro de obra, auxiliar, cuadrilla de instalación de hidrosanitario y sistema eléctrico.

6.5.4. Desafíos

La construcción del proyecto piloto y el desarrollo del 90% de los elementos de construcción prefabricados por PREMOLDEADOS SAS dejan grandes desafíos en la consolidación de un sistema de construcción 100% prefabricados, entre ellos se pueden reconocer:

- **Durabilidad de materiales:** El entorno plantea condiciones significativas para los componentes, que necesitarían ajustes en su diseño, materias primas y desarrollo para cumplir con el marco normativo y soportar condiciones extremas.
- **Costos de transporte:** La ubicación remota incrementará los costos de envío y construcción.
- **Características del diseño:** El diseño debe permitir una integración armoniosa con el entorno, mantener vistas y luz natural con acristalamiento en sus ventanas, con áreas comunes amplias y cómodas.
- **Reutilización limitada:** La humedad, las condiciones climáticas, ambientales y sociales pueden reducir la vida útil de los componentes.

6.6. Éxito del sistema frente a los objetivos originales de la investigación

Durante la investigación se analizaron diferentes sistemas de construcción donde cada uno de ellos presenta situaciones de consideración con relación a la generación de RCD y su huella de CO₂, al lograr el desarrollo de un proyecto con DfD basado en principios de EC se pueden visualizar las variables que dan fortaleza al sistema propuesto

- **Diseño para la deconstrucción DfD con los principios de EC:** Se cumplieron todos los criterios fundamentales, incluidas conexiones accesibles, modularidad y separación de sistemas mecánicos.
- **Adaptabilidad a múltiples escalas:** El proyecto piloto permite demostrar que el sistema puede aplicarse a escenarios comerciales, residenciales y rurales.
- **Pruebas físicas:** Aunque el diseño ha sido evaluado teórica y físicamente, aún necesita pruebas prácticas para confirmar su rendimiento estructural y funcional.
- **Asesoramiento experto:** Se requiere la colaboración con ingenieros y arquitectos para precisar en ciertos aspectos del diseño y cumplimiento del marco normativo y legal.
- **Impacto futuro:** Este trabajo establece el DfD con principios de EC como una base para la investigación futura en sistemas de construcción sostenibles, promoviendo los principios de la EC, el DfD, el segundo uso de los elementos de construcción y el cambio de vocación de las edificaciones.

6.7. Análisis de emisiones de CO₂ de la casa prototipo del “Proyecto Vivir”

Para calcular las emisiones de CO₂ del prototipo de vivienda del “Proyecto Vivir” se considero la información entregada por la compañía PREMOLDEADOS SAS, además de las características de su sistema de construcción el cual se fundamenta en el DfD, los principios de EC y el uso de elementos de construcción 100% prefabricados y desmontables. El área total construida para la casa prototipo del “Proyecto Vivir” es de 53,42 m².

6.7.1. Huella de carbono del concreto

Para el análisis de huella de carbono del concreto se toma como parámetro el valor de 0,159 kgCO₂eq/kg de concreto, dado por el ICE, para un concreto de alta resistencia con adición media de 14% de material suplementario calcáreo y resistencia a la compresión, RC, de (40/50) MPa. (Circular Ecology, 2024)(Raimondo, Lilavois and Nelson, 2022). En la Tabla 32 se aprecia el cálculo del peso del concreto utilizado en la casa del “Proyecto Vivir”.

Tabla 32. Peso del concreto casa unifamiliar prototipo de vivienda del “Proyecto Vivir” 53,42 m²

TIPO DE MATERIAL	REFERENCIA DE COMPONENTES	CANTIDAD Unidades	DIMENSIONES m	VOLUMEN m ³	PESO und. kg	PESO kg
Estructura / Postes	Columna A	6	2,55 x 0,14 x 0,14	0,049980	120	720
Estructura / Postes	Columna B	4	2,80 x 0,14 x 0,14	0,054880	132	528
Estructura / Postes	Columna C	6	3,04 x 0,14 x 0,14	0,059584	143	858
Estructura / Postes	Columna D	2	3,30 x 0,14 x 0,14	0,064680	155	310
Estructura / Postes	Columna E	6	3,04 x 0,14 x 0,14	0,059584	143	858
Estructura / Postes	Columna F	3	2,80 x 0,14 x 0,14	0,054880	132	396
Estructura / Postes	Columna G	4	2,55 x 0,14 x 0,14	0,049980	120	480
Cerramiento / Divisores	Plaqueta de cerramiento PTA	99	0,91 x 0,4 x 0,04	0,014560	35	3465
Cerramiento / Divisores	Plaqueta de cerramiento PTB	105	1,42 x 0,4 x 0,04	0,022720	55	5775
Piso (losa o adoquín)	Adoquín	2.671	20 x 10 x 6 cm	0,0012	2,9	7700
PESO TOTAL CONCRETO						21090

Fuente. Elaboración propia

La densidad del concreto utilizado es de 2.400 kg/m³ y el consumo de acero para el pretensado es de 10 kg sobre m³ de concreto. La huella de carbono del concreto para la casa del proyecto Vivir = 21.090 kg x 0,159 kgCO₂eq/kg = 3.353 kgCO₂eq.

6.7.2. Huella de carbono de mortero de repello

No aplica para el proyecto

6.7.3. Huella de carbono del estuco

No aplica para el proyecto

6.7.4. Huella de carbono de vidrio en ventanas y puertas

Dos puertas metálicas de acceso y una en el depósito de 90 cm x 2 m.

Tres ventanas en habitaciones con dimensiones de 1,6 m x 1,40 m (dividido en dos partes), tienen vidrio plano.

Una ventana de sala batiente con dimensiones de 1,6 m x 0,9 m, vidrio plano de 4 mm. Anchura del marco de acero: 9 cm.

Una ventanilla de cocina, batiente, con dimensiones de 0,4 x 0,89 m, espesor del vidrio 4 mm.

Una ventanilla de baño, batiente, con dimensiones de 0,4 x 1,4 m, espesor del vidrio 4 mm. Marco de acero de 9 cm de anchura.

Espesor del vidrio de las ventanas 4 mm. Anchura del marco de aluminio de 9 cm.

Volumen de vidrio= 0,029 m³ de vidrio

Densidad del vidrio: 2.500 kg/m³.

Peso de vidrio = 72 kg de vidrio plano.

Se considera un 20% en excedente para total de 86 kg

Parámetro huella de carbono del vidrio 1,44 kgCO₂eq/kg (Circular Ecology, 2024).

Huella de carbono del vidrio = 124 kgCO₂eq.

6.7.5. Huella de carbono de las partes metálicas en ventanas y puertas

Lamina de acero calibre 18 (1,2 mm) en marcos de ventanas y puertas, anchura de cada marco: 9 cm. Dos puertas metálicas, en acceso y depósito, de 90 cm x 200 cm, en lámina calibre 22. Una puerta metálica de 80 x 200 cm en oficinas. La lamina de los cuerpos de puertas tiene un calibre 22 (0,76 mm).

4 puertas de madera en habitaciones, todas con marco metálico calibre 18, dimensiones de 80 x 200 cm

Tres ventanas en habitaciones con dimensiones de 160 cmx140 cm (dividido en dos partes).

Una ventana de sala batiente con dimensiones de 160 cm x 90 cm.

Una ventanilla de cocina, batiente, con dimensiones de 40 x 89 cm.

Una ventanilla de baño, batiente, con dimensiones de 40 x 140 cm.

Perímetro puerta y ventanas: $G = 9 \text{ m}$

Anchura de cada perfil: 9 cm

Lamina de acero en marcos de ventanas y puerta = $9 \text{ m} \times 0,09 \text{ m} = 0,81 \text{ m}^2$

Espesor de cada perfil de marco= 1,21 mm

Volumen de acero en marcos= $0,0009801 \text{ m}^3$

Área de lámina de acero en cuerpos de 3 puertas= 52.000 cm^2 .

Volumen de acero en cuerpos de 3 puertas= $52.000 \text{ cm}^2 \times 0,076 \text{ cm} = 3.952 \text{ cm}^3$.

Densidad del acero= $7,86 \text{ g/cm}^3$.

Peso del acero en marcos= 7,7 kg.

Peso del acero en cuerpos de puertas= 31,1 kg

Peso total del acero en marcos y ventanas= 38,8 kg

Parámetro huella de carbono del acero: $1,72 \text{ kgCO}_2\text{eq/kg}$ (Circular Ecology, 2024)

Huella de carbono del acero en marcos y puertas: $38,8 \text{ kg acero} \times 1,72 \text{ kgCO}_2\text{eq por kg de acero} = 67 \text{ kgCO}_2\text{eq}$

6.7.6. Huella de carbono del acero

En la Tabla 33 se muestra el cálculo del acero usado en el proyecto, incluso el del alambre de acero de 3 mm de diámetro usado para el pretensado, que es de 10 kg por cada m^3 de concreto usado en los componentes pretensados

Tabla 33. Peso del acero y del techo de UPVC de la casa unifamiliar prototipo de vivienda del “Proyecto Vivir”

REFERENCIA DE OTROS COMPONENTES	MATERIAL	PESO kg
Empalmes vigas superiores	Lamina acero cold rolled	33,3
Columnas de cubierta	Lamina acero cold rolled	89,0
Vigas superiores	Perfil acero 90x50 mm	405,4
Aguas de cubierta	Perfil acero 90x50 mm	313,8
Correas de cubierta	Perfil acero 90x50 mm	671,5
Empalmes de cubierta	Lamina A36 acero	112,2
Soportes auxiliares	Lamina A36 acero	19,2
Acero pretensado	alambre de 3 mm	56,0
ACERO, total		1700,4
Teja termoacústica, 31 unidades	UPVC- 5,9 x 0,82 m	310,0
Caballote, 9 unidades	UPVC- 0,92 x 0,4 m	36,0
UPVC, total		346,0

Fuente. Elaboración propia

La cantidad total de acero utilizado fue 1.700,4 kg.

El Parámetro de huella de carbono del acero: 1,72 kgCO₂eq/kg (Circular Ecology, 2024)

Huella de carbono del acero = 1.700, 4 kg x 1,72 kgCO₂eq/kg = 2.925 kgCO₂eq.

6.7.7. Huella de carbono de La madera (MDF)

Cuatro (4) puertas al interior de la casa, dimensiones: 4 (0,8 m x 2,0 m x 0,04 m)

Total, volumen madera= 0,256 m³.

Densidad de la madera MDF = 700 kg/m³.

Peso de la madera en puertas= 180 kg

Parámetro huella de carbono de la madera (MDF): 0,856 kgCO₂eq/kg de la madera MDF, (Circular Ecology, 2024).

Huella de carbono de la madera (MDF) = 154 kgCO₂eq

6.7.8. Huella de carbono piso cerámico (porcelanato)

No aplica para el proyecto

6.7.9. Huella de carbono pintura

No aplica para el proyecto

6.7.10. Huella de carbono panel yeso

No aplica para el proyecto

6.7.11. Huella de carbono del UPVC

Parámetro huella de carbono del UPVC: - ~1,5–2,5 kgCO₂eq/kg de UPVC. Se toma el valor medio, 2 kgCO₂eq/kg de UPVC (Trade Windows Bristo, 2025).

Para 346 kg de UPVC (Tabla 33), la huella es de 692 kgCO₂eq.

6.7.12. Huella de carbono transporte de materiales

Supuestos: Distancia media recorrida: 50 km (local).

Emisiones camión diésel: 0,197 kgCO₂eq/t-km (Ragon and Rodríguez, 2021).

Peso total de la casa: 23.042 kg= 23 toneladas.

Huella de carbono = 23 t x 0,2 kgCO₂eq/t-Km = 4,6 kgCO₂eq

6.7.13. Huella de carbono energía operacional en el proceso de construcción

Supuestos: Energía en maquinaria (grúas, mezcladoras): 15 kWh/m²

Parámetro emisiones eléctricas: 0,164 kgCO₂eq/kWh (XM, 2020).

Área construida= 53,42 m².

Huella de carbono energía operacional proceso de construcción = 53,42 m² × 15 kWh/m² × 0,164 kgCO₂eq/kWh = 131 kgCO₂eq.

6.7.14. Huella de carbono RCD

No hay RCD en el proyecto, pues todo es reciclado en el proceso de fabricación de los elementos prefabricados.

6.7.15. Huella de carbono del concreto y el acero de cimentación

Igual que para determinar el volumen de cimentación requerido para un edificio, se deben considerar varios factores: el peso total de la casa, la capacidad de carga del suelo en el sitio y el tipo de cimentación. El área requerida para la cimentación depende de la capacidad portante segura del suelo. Por ejemplo, para arcilla compactada (típica de edificios pesados), la capacidad portante segura es de aproximadamente 215–270 kN/m². Se asume los mismos 240 kN/m² como promedio. El volumen de la cimentación depende de su espesor y área. En una cimentación típica de losa (balsa) el peso de la edificación flota sobre el suelo, como

ocurriría si estuviese sostenido por una balsa que flota (Semenmerahputih.com, 2024)(Bengtsson and Whitaker, 1998). El procedimiento de diseño de la NSR-10 utiliza factores de carga y factores de reducción de resistencia que ya incorporan la filosofía de seguridad estructural (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

En el “Proyecto Vivir” se utilizaron zapatas centradas que se utilizan como base que se ensamblan con las plaquetas reforzadas y postes tipo H, L y C, llamados también columnas, que tienen un porcentaje de refuerzo de acero pretensado del 1% del área de la sección transversal. Área de acero = $0,01 \times 0,0196 \text{ m}^2 = 0,000196 \text{ m}^2$ de sección.

Peso de concreto calculado para la cimentación: $6960 \text{ kg} = 2,9 \text{ m}^3$, dato de catálogo de la empresa.

Huella de carbono del concreto en cimentación = $6960 \text{ kg} \times 0,159 \text{ kgCO}_2\text{eq/kg} = 1.107 \text{ kgCO}_2\text{eq}$.

Peso del acero de refuerzo en la cimentación. Pretensado (1%): 70 kg, acero de refuerzo ordinario: 80 kg de acero por m^3 de concreto. Se usaron 232 kg de acero ordinario para refuerzo. Acero total: 302 kg.

Huella de carbono del acero en cimentación = $302 \text{ kg} \times 1,72 \text{ kgCO}_2\text{eq/kg} = 2.925 \text{ kgCO}_2\text{eq}$

6.7.16. Huella de carbono de la casa por metro cuadrado construido

En la Tabla 34 se resumen los valores de volumen, peso, parámetro de kgCO_2eq , huella de carbono y porcentaje de participación de cada uno de los elementos de construcción de la casa y otros considerados.

Tabla 34. Huella de carbono kgCO₂eq/m² construido de los componentes de la casa unifamiliar prototipo de vivienda del “Proyecto Vivir” 53,42 m²

PARTE EDIFICACIÓN	MATERIAL O ACTIVIDAD CONSTRUCTIVA	PARAMETRO kgCO ₂ eq/kg	HUELLA DE CARBONO kgCO ₂ eq
Superestructura	Concreto	0,159	3.353
	Acero	1,72	2.925
	Mortero de repello	0,15	N/A
	Estuco	0,164	N/A
	Vidrio	1,44	124
	Aluminio	8,32	N/A
	Madera	0,856	154
	Piso cerámico	0,8	N/A
	Pintura	2,15	N/A
	Panel yeso	0,232	N/A
	UPVC	2,00	692
Total Superestructura			7.124
Subestructura Bases o cimientos	Concreto	0,159	1.107
	Acero de refuerzo	1,72	519
OTROS	Transporte de materiales (t)	0,2	4,6
	Energía operacional en el proceso de construcción	0,164	131
	RCD generados y gestionados en obra	0,16658	N/A
	RCD en vertederos	0,0114	N/A
Huella de carbono total: 9.010 kgCO₂eq			
Q= Huella de carbono/m² : 169 kgCO₂eq/m² construido			

Fuente. Elaboración propia

6.8. Análisis estimado de emisiones de CO₂ del “Proyecto Vivir”

Durante la investigación se realizó un análisis estimado de emisiones de CO₂ a los elementos prefabricados con concreto reforzado para el sistema de construcción 100% prefabricado y deconstruible del “Proyecto Vivir”, tomando como área construida 53,42 m² y una huella típica de CO₂ entre 200–350 kgCO₂eq/m² de acuerdo con referencias internacionales, (ver Tabla 23 y 37) para realizar el cálculo estimado de emisiones totales se trabajó con la siguiente formula:

Emisiones Totales = área x emisiones/m²)

ET =53,5 m² × (200 a 350 kgCO₂eq/m²) (Ver Tabla 37)

Se estimaron los valores máximos, mínimo y el rango probable de emisiones para el sistema 100% prefabricados obteniendo los siguientes resultados:

Mínimo: 10.700 kgCO₂eq (53,5 m² × 200 kg/m²).

Máximo: 18.725 kgCO₂eq (53,5 m² × 350 kg/m²).

Rango probable: 10,7–18,7 toneladas de CO₂eq para el proyecto completo.

El análisis estimado de emisiones de CO₂ al sistema de construcción 100% prefabricados deconstruible del “Proyecto Vivir” se realizó a los materiales, la fabricación, el transporte y el montaje en obra, ver Tabla 35, encontrando que el sistema es amigable con el ambiente por que se tienen entre un 40 y 60% menos emisiones de CO₂ comparando con el sistema de concreto monolítico que emitiría: ~26.750–37.450 kgCO₂eq (500–700 kg/m² × 53,5 m²).

Tabla 35 Análisis estimado de emisiones de CO₂ del “Proyecto Vivir” con sistema de construcción 100% prefabricado deconstruible-área: 53,5 m².

ITEM	CONTRIBUCIÓN (%)	EMISIONES (kgCO ₂ eq)	FACTORES CLAVE
MATERIALES HORMIGÓN, ACERO, AISLANTES	60–70%	6.420–13.100	Cemento bajo en carbono (LC3). Acero reciclado.
FABRICACIÓN EN PLANTA	20–25%	2.140–4.680	Energía renovable en planta reduce impacto.
TRANSPORTE	5–10%	535–1.870	Distancia entre planta y obra.
MONTAJE EN OBRA	5%	535–935	Uso de grúas eficientes.

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos en los análisis de huella de CO₂ del “Proyecto Vivir” de forma directa y con el estimado, acerca esta investigación a la literatura investigada.

Al realizar un comparativo de las emisiones calculadas de CO₂ de la superestructura de la casa del “Proyecto Vivir” como un sistema de construcción 100% prefabricado deconstruible (7.124 kgCO₂eq) frente a las emisiones del proyecto de vivienda de dos plantas de Jamundí como un sistema de construcción tradicional con mampostería (9.810 kgCO₂eq); se observa que el total de las emisiones son 27,4% más bajas con el sistema de construcción 100% prefabricado deconstruible.

7. VALORACIÓN DE LOS INDICADORES DE IMPACTO AMBIENTAL DEL MODELO CIRCULAR

Con base en los resultados obtenidos de la literatura acerca de emisión de CO₂, aplicados a una edificación de 16 pisos para cada uno de los sistemas de construcción estudiados, se realizó inicialmente un análisis comparativo del total de las emisiones de cada uno de estos sistemas (ver Tabla 36), posteriormente se logra realizar la valoración de los indicadores del modelo circular planteados en la Tabla 22 del capítulo 4; con cada uno de los sistemas de construcción analizados durante esta investigación: concreto monolítico, aporricado en concreto, mixto (concreto + prefabricados), mixto (concreto + prefabricados con adición de RCD), totalmente prefabricado deconstruible con Módulos industrializados desmontables (ver Tabla 37), los valores estimados en los indicadores se realizaron por m² construido. La valoración de los indicadores ambientales en cada uno de los sistemas de construcción para un edificio de altura de 16 pisos se trabajó con los referentes cuantitativos consultados anteriormente.

7.1. Valoración de los indicadores del modelo circular para los sistemas tecnológicos de construcción

Existen en cada uno de los sistemas de construcción analizados factores que generan variaciones como, por ejemplo: el origen de materiales que incide directamente en el transporte, debe considerarse que a mayor distancia mayor serán las emisiones de CO₂; el tipo de cemento que se utilice, hacer uso de algunas adiciones permitidas, los prefabricados con adición de RCD, entre otros reducen las emisiones y son gradualmente generadores de la EC en el sector de la construcción (Arenas and Shafique, 2024)(Berfin, 2023).

La información de cada uno de los indicadores ambientales permite resaltar su incidencia desde los sistemas constructivos analizados encontrando: un impacto ambiental en el sistema de prefabricado con adición de RCD con una reducción entre el 30 y 50% de la huella de carbono al adicionar áridos reciclados o sustitutos del cemento, mientras que el sistema de concreto monolítico tiene un impacto negativo por el uso de los aceros y el cemento (Drewniok *et al.*, 2023)(Häkkinen *et al.*, 2015)(Maierhofer *et al.*, 2022)(Berfin, 2023). Los resultados de la ponderación de los indicadores ambientales para los cinco Sistemas Constructivos de un Edificio de 16 pisos (ver Tabla 38) permiten observar como las emisiones de CO₂ se reducen en los sistemas mixtos con prefabricados y 100% prefabricados deconstruibles, esto se logra en parte por la optimización industrial en el desarrollo de los prefabricados. El uso de los prefabricados permite disminuir un 20% la huella de carbono. La gestión de los RCD en el sistema de concreto monolítico es mayor porque genera RCD de los encofrados, los cortes y los excesos de concreto, mientras que los prefabricados con adición de RCD reutilizan hasta un 60% de hormigón triturado (Maierhofer *et al.*, 2022).

Tabla 36. Análisis comparativo de las Emisiones de CO₂ en Sistemas Constructivos para un Edificio de 16 pisos

SISTEMAS DE CONSTRUCCIÓN	EMISIONES (kgCO ₂ /m ²)	FUENTES DE EMISIONES	VENTAJAS Y DESVENTAJAS AMBIENTALES
CONCRETO MONOLITICO	~500 – 700	Cemento (70%). Acero de refuerzo (20%). Transporte y energía en la obra.	Alta resistencia. Máximo impacto ambiental por uso del cemento.
APORTICADO EN CONCRETO	~400 – 600	Menor volumen de concreto que en sistema monolítico. Uso optimizado de vigas/columnas.	Mejor eficiencia estructural. Dependientes del cemento.
MIXTO CONCRETO PREFABRICADOS	~350 – 500	Con prefabricados se reducen los desperdicios. Menor tiempo de obra Menos consumo de energía en obra.	Reducción de RCD Logística de transporte.
MIXTO CONCRETO PREFABRICADO CON ADICIÓN RCD	~250 – 400	Reutilización de materiales áridos reciclados Cemento con sustitutos como ceniza volante, escoria, etc.	Economía Circular. Limitaciones normativas
TOTALMENTE PREFABRICADOS DECONSTRUIBLES Y MODULARES INDUSTRIALIZADOS DESMONTABLES	~200 – 350	Fabricación en planta optimizada. Menos RCD Menos consumo de energía en obra.	Economía Circular Menor huella de carbono Alto costo inicial.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37. Indicadores ambientales estimados por m². Sistemas constructivos para un edificio de 16 pisos.

INDICADOR	CONCRETO MONOLÍTICO	APORTICADO EN CONCRETO	MIXTO CONCRETO PREFABRICADOS	MIXTO CON PREFABRICADOS DE RCD	100% PREFABRICADOS DECONSTRUIBLES
IMPACTO AMBIENTAL POR MATERIALES (kgCO ₂ eq/m ²)	500–700	400–600	350–500	250–400	200–350
USO DE PREFABRICADOS (% del total)	25%	30%	50%	60%	100%
GESTIÓN DE RCD (kg residuos/m ²)	50%	40%	50%	60%	70%
HUELLA DE CARBONO (CO₂) (kgCO ₂ eq/m ²)	550–750	450–650	400–550	300–450	250–400
CONSUMO TOTAL DE AGUA (litros/m ²)	800–1,200	700–1,000	600–900	500–800	400–700
CONSUMO TOTAL DE ENERGÍA NO RENOVABLE (kWh/m ²)	1,200–1,600	1,000–1,400	900–1,200	700–1,000	600–900
Aplicación en el proyecto constructivo de tecnología para deconstrucción (DfD)*	Bajo Tiene un mayor enfoque en demolición	Media Algunos requisitos de reciclaje	Media-Alta Estándares para reutilización	Alta Normativas específicas para RCD	Muy Alta Protocolos de desmontaje y circularidad
Educación y cultura para el cambio tecnológico*	Limitada conserva lo Tradicional	Moderada existe Capacitación en eficiencia	En crecimiento Talleres de prefabricación	Avanzada Programas de Economía Circular	Líderazgo Formación en industrialización

* Depende de la evaluación de cada compañía constructora.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 38. Ponderación de los indicadores ambientales para los cinco sistemas constructivos de un edificio de 16 pisos.

INDICADOR	CONCRETO MONOLÍTICO	APORTICADO EN CONCRETO	MIXTO CONCRETO PREFABRICADOS	MIXTO CON PREFABRICADOS DE RCD	100% PREFABRICADOS DECONSTRUIBLES
IMPACTO AMBIENTAL POR MATERIALES (kgCO ₂ eq/m ²)	46%	55%	65%	85%	100%
USO DE PREFABRICADOS (% del total)	25%	30%	50%	60%	100%
GESTIÓN DE RCD (kg residuos/m ²)	50%	40%	50%	60%	70%
HUELLA DE CARBONO (CO₂) (kgCO ₂ eq/m ²)	50%	59%	68%	87%	100%
CONSUMO TOTAL DE AGUA (litros/m ²)	55%	65%	73%	85%	100%
CONSUMO TOTAL DE ENERGÍA NO RENOVABLE (kWh/m ²)	54%	63%	71%	88%	100%
Marco normativo para deconstrucción (Existencia y rigurosidad)	Bajo Tiene un mayor enfoque en demolición 0%	Media Algunos requisitos de reciclaje 0%	Media-Alta Estándares para reutilización 0%	Alta Normativas específicas para RCD 0%	Muy Alta Protocolos de desmontaje y circularidad 100%
Educación y cultura para el cambio tecnológico (Adopción y capacitación)	Limitada conserva lo Tradicional 50%	Moderada existe Capacitación en eficiencia 60%	En crecimiento Talleres de prefabricación 80%	Avanzada Programas de Economía Circular 90%	Líderazgo Formación en industrialización 100%
$IS = (\frac{1}{100N}) \sum (Ii)$	0,47	0,52	0,63	0,78	0,95

Fuente: Elaboración propia con indicadores y variables definidas en la Tabla 22 y datos referenciados de autores de la Tabla 23

La industria de la construcción aporta al ambiente alrededor del 39% de las emisiones brutas de carbono, según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, esta cifra incluye tanto el carbono operativo (las emisiones continuas de carbono derivadas de su uso diario) como el carbono incorporado (todo el CO₂ emitido durante la producción de materiales); el carbono incorporado se calcula a partir de la energía utilizada para extraer y transportar materias primas, así como de las emisiones de los procesos de fabricación (World Economic Forum, 2022). Por esto, es fundamental que los actores involucrados en el sector de la construcción (profesionales, investigadores, gobiernos, constructores, bancos, entre otros) incorporen nuevas tecnologías y materiales para reducir el impacto de los procesos constructivos en la huella de carbono. Una de estas tecnologías es deconstrucción, con un diseño apropiado para hacerlo, DfD, con uso de menor consumo de masa en los materiales para prefabricados, tales como, cementos altamente adicionados, elementos de construcción ensamblables, tipo lego, que permitan su desmonte para dar segundo uso al cabo de la vida útil de una edificación, que se pueda llevar para acometer otro tipo de obra posterior.

En el sistema con 100% Prefabricados deconstruibles son menores las emisiones por la eficiencia en la industrialización de los elementos de construcción y la optimización de su transporte. El consumo de agua en el sistema de concreto monolítico es alto por su uso durante la etapa del curado y la elaboración de mezclas in situ, mientras que en los sistemas que utilizan prefabricados se puede lograr un ahorro entre 30 y 50% por el manejo de recirculación dado en planta para el curado. El consumo de energía es mayor en los sistemas tradicionales, caso contrario sucede en los sistemas con prefabricados que reducen entre 25 y 40% el consumo de energía (Myint and Shafique, 2024).

El marco normativo para la deconstrucción tiene avances para los sistemas con prefabricados que impulsan la reutilización, en países europeos como Alemania y Holanda, es un requisito los planes de deconstrucción selectiva de las edificaciones, sin embargo, y contrario a esto, está el sistema de concreto monolítico que se rige por normas para la demolición o implosión y la disposición final de los RCD. La educación y cultura son necesarias para avanzar en el cambio tecnológico de los sistemas de construcción, los sistemas con adición de RCD en sus componentes, los programas y capacitaciones en EC, circularidad, uso de prefabricados, diseño modular, DfD y logística son un camino al cambio gradual que se requiere de los sistemas de construcción, que como el sistema de concreto monolítico, generan una fuerte resistencia al cambio por prácticas tradicionales que afectan el medio ambiente.

De acuerdo con los análisis realizados a cada uno de los sistemas de construcción frente a los indicadores de EC, se considera que los sistemas actuales de construcción no cumplen con los principios de EC, la gran afectación al medio ambiente y a la calidad de vida humana que deja cada una de sus actividades por las altas emisiones de CO₂ y los volúmenes de RCD generados y gestionados inadecuadamente, permiten confirmar

que el sistema de construcción de edificaciones requiere de un sistema de construcción amigable con el medio ambiente.

El análisis realizado al proyecto de construcción de vivienda unifamiliar Manzanares deja en evidencia los volúmenes de RCD generados y gestionados, al igual que su impacto ambiental y los costos de disposición final. Los sistemas de construcción actuales permanecen bajo los lineamientos de una Economía Lineal puesto que aún se tiene un sistema de construcción con procesos que no adoptan los principios de la EC.

Los diseños y tecnología de construcción utilizados actualmente no se alinean en su totalidad con los principios de EC, sus prácticas de demolición, implosión y fragmentación de los elementos de construcción y edificaciones los dejan en una posición lejana a los principios de la EC, a pesar de los avances tecnológicos.

Se puede establecer gradualidad entre los sistemas de construcción en relación con la EC, partiendo del sistema de construcción tradicional y pasando por cada uno de los sistemas analizados en esta investigación hasta llegar al sistema de investigación propuesto, se logró establecer una gradualidad de apropiación de la EC sobre todo en los sistemas de construcción mixtos, con prefabricados y con prefabricados con adición de RCD.

Al valorar los indicadores, se resalta la sentida y urgente necesidad de migrar hacia un sistema de construcción de edificaciones sostenible, fundamentado en un DfD que se integra con los principios de la EC para prolongar la vida útil de los elementos de construcción y de las edificaciones.

Es necesario realizar un trabajo en conjunto con los entes gubernamentales, las empresas constructoras, las empresas de prefabricados, los sitios de disposición final y la sociedad para que el sistema de construcción con DfD y con los principios de EC se pueda trabajar e implementar de manera gradual logrando con la deconstrucción valorizar los elementos de construcción de segundo uso, las edificaciones con cambio de vocación de uso y recuperar el medio ambiente.

Los resultados relevantes del sistema de construcción propuesto se dan porque el sistema permite el cambio de vocación de uso, la deconstrucción y reutilización de sus elementos de construcción. Se implementó al desarrollar el “Proyecto Vivir” como un proyecto piloto que puede ser realizado con propósitos comerciales, residenciales, productivos a escala real.

El sistema propuesto es lógico y está fundamentado en criterios de éxito, desarrollados a partir de la revisión literaria, las visitas a proyectos de construcción de edificaciones, las entrevistas con profesionales del sector de la construcción (constructoras, industrias de prefabricados, expertos en deconstrucción. Sitios de

disposición final de RCD). El sistema de construcción propuesto con DfD y los principios de EC, hoy día se puede decir que es algo más que un concepto teórico debido a que se desarrolló un proyecto piloto llamado “Proyecto Vivir” por PREMOLDEADOS SAS.

7.2. Limitaciones prácticas del prototipo “Vivir”

Se requiere de ajustes en algunos de sus elementos de construcción prefabricados para lograr inicialmente la certificación NSR 10 Título E, no es adaptable a formas no lineales, requiere de un ajuste en el diseño de algunos componentes para que tengan machihembrado, puede estar sobredimensionado para estructuras a pequeña escala, carece de elegancia o delicadeza para aplicaciones arquitectónicas específicas.

7.3. Escalabilidad del prototipo “Vivir”

El escenario en el que se desarrolló el proyecto piloto “Vivir” deja abierta la posibilidad de trabajar este sistema de operaciones con DfD y los principios de EC, en otro tipo de escenarios con el cumplimiento de todos los requisitos estructurales, normativos y legales de habitabilidad y uso. Este proyecto, presentado con autorización expresa de la gerencia de la empresa PREMOLDEADOS S.A.S se incluyó para ilustrar la metodología que se siguió en un proyecto de construcción deconstruible, que incluyó DfD, cuyos elementos se pueden retirar y usar si modificación de estos en otro proyecto, lo cual garantiza, descontando la durabilidad de los materiales que los componen, la de las edificaciones en el tiempo, aspecto este que hace tender a cero la huella de carbono en el tiempo.

En síntesis, el sistema de construcción propuesto, tipo “Proyecto Vivir” es completamente deconstruible, es decir desmontable y reutilizable, elimina los RCD y el alto consumo de agua, utiliza elementos de construcción prefabricados modulares duraderos, está diseñado para integrarse fácilmente a diferentes tipos y escalas de edificaciones, minimiza el impacto en el sitio y el entorno circundante, sus componentes son transportables y compactos.

7.4. Futuro del sistema de construcción 100% prefabricado

El sistema del proyecto piloto “Vivir” necesita ser probado dentro de la estructura normativa y legal para evaluar su viabilidad en contextos reales.

Esta investigación sirve como base para futuros trabajos con potencial, para crear productos específicos del sector, generar la base de una empresa constructora circular que implemente el DfD con los principios de EC, además de futuros proyectos de investigación a nivel de maestría o doctorado.

7.5. Lecciones aprendidas

La investigación representa un avance hacia una solución sostenible en la industria de la construcción. Es un paso en la dirección correcta y una contribución al discurso global sobre sostenibilidad y EC.

El sistema de construcción propuesto es completamente deconstruible, su característica es la de ser un sistema desmontable y reutilizable, donde se elimina la generación de RCD y el alto consumo de agua. Este sistema utiliza elementos de construcción prefabricados modulares duraderos, está diseñado para integrarse fácilmente a diferentes tipos y escalas de edificaciones, minimiza el impacto en el sitio y el entorno circundante, sus componentes son transportables y compactos.

En el “Proyecto Vivir” se busca la implementación del sistema de construcción propuesto, buscando con esto una mayor sostenibilidad y la integración de la EC en el sector de la construcción, trabajando inicialmente en proyectos de vivienda unifamiliar.

CONCLUSIONES

Con base en los análisis y resultados de esta investigación, se concluye:

Los análisis realizados a cada uno de los sistemas de construcción, frente a los indicadores de EC, dejan ver la gran afectación al medio ambiente por las altas emisiones de CO₂, y los volúmenes de RCD generados y gestionados inadecuadamente; esto confirma que, en general, los actuales sistemas tecnológicos de construcción que se ejecutan en el medio corresponden a modelos de economía lineal donde prima el comprar, consumir y desechar. Estos modelos deben ser superados en aras de hacer viables, con base en criterios de deconstrucción, los principios de la EC en el subsector de edificaciones para vivienda.

El impacto de múltiples variables interdependientes y asociadas a un sistema constructivo se deben analizar integralmente para determinar su contribución a la sostenibilidad de un proyecto de edificación construido con la tecnología de ese sistema, entre las variables determinantes se encuentran: La altura del edificio; el tipo de materias primas y de los elementos de construcción utilizados; los cuales varían en su huella de CO₂ según sus características (materiales, durabilidad, eficiencia, etc.); el área construida; el consumo de energía; el consumo de agua; el cumplimiento de un marco normativo; la cultura y adaptación a nuevas tecnologías.

La EC en la industria de la construcción actual está lejos de llegar al punto cero de emisiones. No basta reducir los volúmenes de RCD, que posteriormente son reprocesados con consumos adicionales de energía, agua, mano de obra y recursos naturales (vírgenes). Sin embargo, siendo realistas, no se debe caer en maximalismos, se reconocen limitaciones para lograr una EC completa con base en deconstruir, y cabe aceptar la progresividad en los caminos para acercarse a su cumplimiento. La reducción de implosiones en masa, el aprovechamiento de los RCD, entre otros, están comprendidos dentro de esa progresividad gradual. Se evidencia una gradualidad de apropiación de la EC sobre todo en los sistemas de construcción mixtos, con prefabricados y con prefabricados con adición de RCD.

Un sistema de construcción con lineamientos de EC debe sustituir el concepto de “final de vida” al incorporar alternativas de repensar, rediseñar, reducir, reutilizar, reparar, remanufacturar, revalorizar, reciclar, reprocesar y recuperar los materiales durante los procesos de producción y consumo. Urge que el subsector de las edificaciones de la industria de la construcción aproveche integralmente los materiales y/o elementos de construcción, optimizando su uso e incrementando su ciclo de vida; esta es otra manera de disminuir el volumen de los RCD y del CO₂ que se generan actualmente.

Inevitablemente, eventos futuros (obsolescencia, corrosión, catástrofes naturales, remodelación urbanística, acciones humanas impropias, etc.) serán más soportables,

desde el plano ambiental, si se dispone de elementos constructivos desmantelables de las edificaciones afectadas para, rápidamente, construir nuevas edificaciones con estos. Si se empieza ahora, los frutos serán visibles a lo largo del tiempo, y más cuando las edificaciones cumplan su ciclo de vida.

En el Distrito Especial de Santiago de Cali y los municipios de Palmira, Jamundí, Yumbo y Candelaria, es muy limitado el estado actual del marco normativo de los proyectos de vivienda en lo relacionado con el diseño, la construcción, la rehabilitación, la demolición o implosión, el desmantelamiento, y disposición o mejor aprovechamiento de los residuos al final del ciclo de vida de las construcciones. No hay consideraciones normativas sobre desmantelamiento, montaje y ensamble de elementos constructivos de segundo uso.

Las etapas y actividades necesarias para que el sistema de operaciones del subsector de edificación realice un aprovechamiento óptimo de los elementos y materiales de construcción sin destrucción de estos, inicia con un DfD, que se debe articular con el uso de elementos de construcción prefabricados y coordinados modularmente, actividades que posteriormente se articularan con la deconstrucción, el segundo uso de los elementos de construcción y el cambio de vocación al uso de las edificaciones.

En un modelo de deconstrucción, los materiales de construcción conformados (prefabricados) como elementos constructivos, tales como bloques, viguetas, plaquetas, adoquines, columnas, zapatas, etc., en lugar de ser considerados desechos al final de su vida útil, se revalorizan y reincorporan al proceso productivo como elementos constructivos de segundo uso.

El sistema tecnológico de construcción que está prevaleciendo en construcción formal es de edificios cada vez de mayor altura que usan principalmente concreto monolítico, cuyos elementos estructurales y de cerramiento solamente pueden ser demolidos o implosionados cuando se requiera eliminar la edificación al final de su vida útil, al hacerlo se genera un gran volumen de residuos y consumo de energía significativo.

La gestión de los RCD con lineamientos de EC permite el reciclaje de concreto, metales y otros materiales que son incorporados nuevamente en los procesos y reduciendo así las emisiones de los concretos y aceros que contienen adición de RCD; todo esto unido a la optimización del transporte de los materiales con rutas locales y una logística eficiente, permiten una disminución aproximada de 15 kgCO₂eq/m² en la huella de carbono.

La valoración de las emisiones de CO₂ en cada uno de los sistemas de construcción revisados y en el propuesto, evidenciaron, de acuerdo con los indicadores

de EC, que el sistema de construcción con mampostería de arcilla cocida tiene un mayor porcentaje de emisión de CO₂. La sustitución de este sistema con mampostería por elementos de construcción prefabricados mostró disminución del 45% en la huella de CO₂.

En el sistema de concreto monolítico la gestión de los RCD es mayor debido a los RCD generados por los encofrados, los cortes y los excesos de concreto, mientras que los prefabricados con adición de RCD reciclan incluso el concreto.

La Huella de carbono del edificio de 16 pisos construido con concreto monolítico reforzado, estudiado como caso, es de 442 kgCO₂eq/m², que, al compararse con la literatura, se encuentra dentro del rango de la huella de carbono de edificios elevados de concreto (400 - 1350 kgCO₂eq/m² construido).

Al monitorear el sistema de construcción con concreto monolítico del edificio de 16 pisos con los indicadores ambientales definidos durante esta investigación, se puede observar que el concreto y el acero son materiales dominantes, juntos contribuyen con más del 90% de las emisiones totales.

Un punto de partida para iniciar procesos de deconstrucción en el subsector de las edificaciones de la industria de la construcción en el medio, es la acogida brindada por la empresa PREMOLDEADOS SAS al sistema de construcción con deconstrucción planteado en esta investigación doctoral, al desarrollar el “Proyecto Vivir”.

El sistema de construcción de edificaciones de vivienda propuesto se basa en el uso de elementos de construcción 100% prefabricados, tal como el del proyecto “Vivir”, con un diseño en cada uno de los elementos machihembrados que facilite su ensamblaje, disminuya el consumo de agua, energía y mezclas. Así, la industria de la construcción puede disminuir la generación de RCD e incrementar su adaptabilidad al implementar una EC real, con un DfD y el uso de elementos de construcción modulares 100% prefabricados.

Al utilizar elementos de construcción prefabricados con una incorporación del 17% de RCD, las emisiones totales fueron de 5.913 kgCO₂eq, esto representa una reducción del 12% de emisiones de CO₂, en comparación con el método donde se utilizaron elementos de construcción prefabricados con materias primas vírgenes. Se suma a esto, la optimización lograda en las actividades de transporte y preparación del terreno que se alinean con los principios de la EC.

Los resultados de los indicadores evidencian una mayor sostenibilidad ambiental con los sistemas de construcción con prefabricados y con prefabricados con adición de RCD, este último, muestra una reducción entre el 30 y 50%, de la huella de carbono al

adicionar áridos reciclados o sustitutos del cemento mientras que el desempeño ambiental con mayor impacto negativo lo genera el sistema de construcción de concreto monolítico reforzado.

En los sistemas de construcción mixtos con prefabricados y 100% prefabricados, se observa que las emisiones de CO₂ se reducen en al menos el 20% debido a la optimización industrial en el desarrollo de los pré-fabricados.

El sistema de operaciones del subsector de edificaciones con DfD y principios de la EC, desarrollado e implementado por PREMOLDEADOS SAS en el “Proyecto Vivir”, permite inferir la influencia que tendrá en la industria de la construcción por su diseño denominado DfD con principios de la EC, que aporta la adaptabilidad y reutilización de los elementos de construcción prefabricados, proponiendo una alternativa para trabajar en problemas globales como lo son la escasez de recursos, la generación de altos volúmenes de RCD y el cambio climático que afectan la vida y biodiversidad del planeta.

RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

Con base a la experiencia obtenida en la presente investigación se recomienda:

- Realizar un estudio de factibilidad económico-ambiental que permita definir la viabilidad de incorporar DfD con los principios de EC en los sistemas tecnológicos constructivos del medio.
- Investigar la logística necesaria para llevar a cabo procesos de construcción y deconstrucción de proyectos 100% con prefabricados.
- Obtener indicadores ambientales propios mediante investigaciones de cada uno de los sistemas tecnológicos de construcción utilizados en el medio.
- Establecer con carácter urgente normativas dirigidas a lograr la implementación de un sistema tecnológico basado en DfD y con los principios de EC.
- Establecer bancos de elementos de construcción y materiales de segundo uso con normativas que apoyen la circularidad.

CONTRIBUCIÓN A LA REDUCCIÓN DEL CAMBIO CLIMATICO



DISMINUCIÓN DE EMISIONES DE
CARBONO EN CONSTRUCCIONES

SIN PREFABRICACIÓN NO HAY DECONSTRUCCIÓN

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de impacto ambiental del Proyecto de Constructora Bolivar.

COMPONENTE AMBIENTAL	ASPECTO AMBIENTAL	IMPACTO AMBIENTAL	NATURALEZA (Beneficioso + Perjudicial)	INTENSIDAD (I) Baja 1 Media 2 Alta 4 Muy alta 8 Total 12	EXTENSION (EX) Puntual 1 Parcial 2 Extenso 4 Total 8 Crítica (+4)	MOMENTO (MO) Largo plazo 1 Medio plazo 2 Inmediato 4 Crítica (+4)	PERSISTENCIA (PE) Fugaz 1 Temporal 2 Permanente 4	REVERSIBILIDAD (RV) Corto plazo 1 Medio plazo 2 Irreversible 4	SINERGIA (SI) Sin sinergismo 1 Sinergismo 2 Muy sinérgico 4	ACUMULACIÓN (AC) Simple 1 Acumulativo 4	EFFECTO (EF) Indirecto 1 Directo 4	PERIODICIDAD (PR) Irregular 1 Periódico 2 Continuo 4	RECUPERABILIDAD (RB) De manera inmediata 1 A medio plazo 2 Mitigable 4 Irrecuperable 8	TOTAL	CALIFICACIÓN
	AGUA	contaminación en aguas subterráneas	-	4	2	2	2	4	2	1	4	2	8	31	Moderado
		Consumo de agua potable	-	8	8	4	2	4	2	4	4	4	8	48	Moderado
		Generación de aguas residuales domésticas	-	2	2	2	2	4	2	1	4	2	4	25	Moderado
	AIRE	Emisiones de contaminantes atmosféricos	-	4	4	4	2	2	2	1	4	4	8	35	Moderado
		Incremento de niveles de ruido	-	4	2	4	2	4	2	1	4	4	4	31	Moderado
		Emisión de material particulado	-	8	4	4	2	2	2	1	4	2	4	33	Moderado
	SUELO	Contaminación del suelo	-	8	2	4	2	2	4	4	4	2	2	34	Moderado
		Generación de escombros	-	4	1	2	2	2	2	4	4	2	4	27	Moderado
		Generación de residuos sólidos	-	4	2	4	2	2	4	4	4	4	4	34	Moderado
	PAISAJE	Alteración del paisaje	+	4	4	2	2	2	2	1	4	2	4	27	Moderado
		Impacto visual	-	4	2	4	2	2	2	1	4	2	4	27	Moderado
MEDIO BIOTICO	FAUNA	Siembra de vegetación	+	2	2	4	2	4	1	1	4	2	2	24	Moderado
		Alteración de hábitats	-	2	2	2	2	2	1	1	4	1	8	25	Irrelevante
		Desplazamiento de especies	-	2	2	4	2	4	2	4	1	2	4	27	Irrelevante
SOCIOCULTURAL	TRABAJO	Generación de empleo	+	8	2	4	2	1	2	1	4	4	1	29	Moderado
		Seguridad y salud en el trabajo	+	8	2	4	2	1	2	1	4	4	1	29	Irrelevante
	COMUNIDAD	Molestias por las obras	-	2	4	2	2	2	2	1	4	2	2	23	Irrelevante
		Alteración del tráfico	-	4	8	4	2	2	2	1	4	2	4	33	Irrelevante

Impacto	Valor de Importancia
Irrelevante	Inferior o igual a 25
Moderado	Entre 26 y 50
Severo	Entre 51 y 75
Crítico	Superior a 75

Fuente: Matriz de impactos del proceso constructivo (Green Assistance, 2020)

Anexo 2: Extracción de Matriz de impacto ambiental del Proyecto de Constructora Bolívar.

	ASPECTO AMBIENTAL	IMPACTO AMBIENTAL	NATURALEZA	INTENSIDAD	EXTENSIÓN	MOMENTO	PERSISTENCIA	REVERSIBILIDAD	SINERGIA	ACUMULACIÓN	EFFECTO	PERIODICIDAD	RECUPERABILIDAD	TOTAL	CALIFICACIÓN
COMPONENTE AMBIENTAL	AGUA	Consumo de agua potable	-	8	8	4	2	4	2	4	4	4	8	48	Moderado
	AIRE	Emisiones de contaminantes atmosféricas	-	4	4	4	2	2	2	1	4	4	8	35	Moderado
	SUELO	Contaminación del suelo	-	8	2	4	2	2	4	4	4	2	2	34	Moderado
		Generación de residuos sólidos	-	4	2	4	2	2	4	4	4	4	4	34	Moderado

Fuente: Matriz de impactos del proceso constructivo (Green Assistance, 2020)

REFERENCIAS

Acermetal (2022) *Las emisiones de la industria siderúrgica disminuirán un 30% para 2050*, <https://www.acermetal.es/>. Available at: <https://www.acermetal.es/las-emisiones-de-la-industria-siderurgica-disminuiran-un-30-para-2050/> (Accessed: 22 March 2025).

Akinade, O.O. et al. (2017) 'Design for Deconstruction (DfD): Critical success factors for diverting end-of-life waste from landfills', *Waste Management*, 60, pp. 3–13. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.017>.

Alcaldia de Cali Equipo Patrimonio Cultural Material Secretaría de Cultura. (2021) 'Así es la historia de nuestra amada Cali, 485 años soñados, vividos, bailados, resilientes www.cali.gov.co'. Available at: https://www.cali.gov.co/gobierno/publicaciones/1335/nuestra_historia_santiago_de_cali_tiene_477_aos/.

Alcaldia Municipio de Candelaria (2017) 'Pgirs 2017-2027'. Candelaria, p. 399.

Alcaldia Municipio de Palmira (2016) 'Plan De Gestión Integral De Residuos Solidos 2016 - 2027'. Palmira, p. 146. Available at: <http://www.cali.gov.co/publico2/documentos/varios/pgiris.pdf>.

Alcaldia Municipio de Yumbo (2016) 'PGIRS YUMBO'. Yumbo, p. 399.

Alpha- Hardin Comp (2021) 'revolucionan la industria de la Innovación en la construcción : tecnologías que cambian los modelos de la industria', pp. 1–8. Available at: <https://www.alpha-hardin.com/innovacion-tecnologica-en-la-industria-de-la-construccion/>.

Alzate, A. (2022) 'Análisis comparativo de la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en cuatro países latinoamericanos', *Universidad del Valle*, p. 84.

Amarasinghe, I. et al. (2025) 'Paving the way for lowering embodied carbon emissions in the building and construction sector', *Clean Technologies and Environmental Policy*, 27(4), pp. 1825–1843. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10098-024-03023-6>.

Amarilo S.A.S. et al. (2022) 'Evaluación de impactos ambientales', *Secretaría de Planeación Distrital* [Preprint]. Bogotá D.C.

Amarilo S.A.S. et al. (no date) 'Evaluación de impactos ambientales', in *Ciudad Lagos de Torca*. Bogotá D.C.: Plan parcial No. 7.

American Concrete Institute (2015) *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-14)*, *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*. ACI. Available at: [https://doi.org/10.1016/0360-3016\(84\)90476-0](https://doi.org/10.1016/0360-3016(84)90476-0).

American Concrete Institute (2019) *ACI 318-19 Building Code Requirements for Structural Concrete*, ACI. ACI. Available at: <https://doi.org/10.14359/51716937>.

American Concrete Institute (2021) 'ACI 308 Curado del Concreto', pp. 1–15. Available at: <https://ingenieriaymas.com/2022/03/aci-308-curado-del-concreto-en-espanol.html>.

American Society for Testing and Materials (2000) 'Designation: A 653/A 653M-00

Standard Specification for Steel Sheet, Zinc-Coated (Galvanized) or Zinc-Iron Alloy-Coated (Galvannealed) by the Hot-Dip Process', *ASTM International* [Preprint].

American Society for Testing and Materials (2021a) 'ASTM D1557 – 12 (Reapproved 2021): Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))', *ASMT International*, pp. 1–2. Available at: <https://doi.org/10.1520/C1709-18>.

American Society for Testing and Materials (2021b) 'ASTM D698 - 12: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort', *ASTM International*, D698 – 12, p. 7. Available at: <https://doi.org/10.1520/D0698-12R21>.

American Society for Testing and Materials (2022) *Standard Test Methods for In Situ Measurement of Masonry Mortar Joint Shear Strength Index C1531-22*, *ASTM International*.

American Society for Testing and Materials (2023) 'Standard Specification for Concrete Facing Brick and Other Concrete Masonry Facing Units', *ASTM International*, p. 2. Available at: <https://doi.org/10.1520/C1634-23>.

American Society of Civil Engineers (2010) *ASCE/SEI 7-10 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Structural Engineering Institute (SEI).

Anastasiades, K. *et al.* (2023) 'Stakeholder perceptions on implementing design for disassembly and standardisation for heterogeneous construction components', *Waste Management and Research*, 41(8), pp. 1372–1381. Available at: <https://doi.org/10.1177/0734242X231154140>.

Anipac *et al.* (2022) *3er INFORME DEL ACUERDO NACIONAL PARA LA NUEVA ECONOMÍA DEL PLÁSTICO EN MÉXICO*.

Ansah, M.K. *et al.* (2021) 'Developing an automated BIM-based life cycle assessment approach for modularly designed high-rise buildings', *Environmental Impact Assessment Review*, 90(April). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106618>.

Antonov, A.A., Molodtsov, M. V. and Molodtsova, V.E. (2016) 'Framing Systems in Residential Construction', *Procedia Engineering*, 150, pp. 2138–2145. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.254>.

Arancibia, F. (2013) *Vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe, Ingeniería Sísmica y Construcción Civil*. Available at: https://ingenieriasismicaylaconstruccioncivil.blogspot.com/2013/04/vulnerabilidad-sismica-rehabilitacion-y.html?utm_source=chatgpt.com (Accessed: 6 April 2025).

Arce Gálvez, P. and Serrano López, Á. (2015) *El mercado de Materiales Construcción en Colombia, ICEX España, Exportación e Innovación*.

Área metropolitana del Valle de Aburra *et al.* (2010) *Manual de gestión socio-ambiental para obras de construcción*. Medellín.

Arenas, N.F. and Shafique, M. (2024) 'Reducing embodied carbon emissions of buildings – a key consideration to meet the net zero target', *Sustainable Futures*,

7(October 2023), p. 100166. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2024.100166>.

ARGOS (2025) *Construir más rápido y obtener mayor rentabilidad ahora es posible con prefabricados en concreto y steel framing*, ARGOS Colombia. Available at: <https://colombia.argos.co/descubre-soluciones-para-construir-mas-rapido-con-innovacion-y-calidad-argos/> (Accessed: 12 April 2025).

Arup, O., Limited, P. and Kingdom, U. (2023) 'Embodied Carbon', *Buildings & Infrastructure Priority Actions for Sustainability*, (077620), p. 17.

Asociación Mexicana de Bebidas (2021) *¿Sabías que México es líder de reciclaje de PET en el continente americano?* Available at: <https://mexbeb.org/sabias-que-mexico-es-lider-de-reciclaje-de-plastico-en-el-continente-americano/>.

ASTM International (2000) 'Determining Uniformity of Ingredients of Concrete From a Single Source. Designation C 1451-99', *ASTM International*, 08(Reapproved 1989), pp. 3–4. Available at: <https://doi.org/10.1520/C1709-18>.

ASTM International (2013) 'ASTM C926 - Standard Specification for Application of Portland Cement-Based Plaster', *American Society for Testing Materials*, p. 10. Available at: <https://doi.org/10.1520/C0926-11A.2>.

ASTM International (2018) 'Standard Specification for Mortar for Unit Masonry', *ASMT International*, pp. 3–5. Available at: <https://doi.org/10.1520/C0270-19.2>.

Baduel, G. (2019) *Colombia: Una maravilla de la coordinación*, AUTODESK. Available at: <https://www.autodesk.com/es/design-make/articles/atirio-bogota> (Accessed: 6 April 2025).

Baraya, S. (2020) *Máquina Verde: prototipo de vivienda social modular adaptable*, *ArchDaily*. Available at: <https://www.archdaily.co/co/947234/maquina-verde-prototipo-de-vivienda-social-modular-adaptable>.

Barrett, P.S. (2003) 'Hybrid concrete: Improved processes and performance', *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 156(2), pp. 193–203. Available at: <https://doi.org/10.1680/stbu.2003.156.2.193>.

Barroso, V. (2013) *Análisis de la gestión de RCD en la Comunidad Autónoma de Andalucía, España*.

Bart, J. and Kowalczyk, T. (2010) *Design for Recycling*, (Delft University of Technology, Faculty of Architecture, Environmental Technical Design. Available at: <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2010.00229.x>.

Bechmann, R. and Weidner, S. (2021) 'Reducing the Carbon Emissions of High-Rise Structures from the Very Beginning', *CTBUH Journal*, 2021(4), pp. 30–35.

Bengtsson, L.P. and Whitaker, J.H. (1998) 'Farm structures in tropical climates', in 5. 1st edn. Roma: FAO. Available at: <https://www.fao.org/4/s1250e/s1250e0h.htm>.

Berfin, B.K.G. (2023) 'life cycle assessment on construction and demolition wastw recycling: a systematic review analyzing there important quality aspects'.

Bienes Inmuebles de Interés Cultural de Santiago de Cali (2020) 'Hospital San Juan de Dios', *Departamento Administrativo de Planeación Municipal Bienes Inmuebles de Interés Cultural de Santiago de Cali*, pp. 1–45. Available at: <https://hsjdzaragoza.es/>.

Blog, C. (2023) *Ventajas de los Módulos Prefabricados en Proyectos de Edificación*, *econtainers.co*. Available at: <https://econtainers.co/blog/ventajas-de-los-modulos-prefabricados-en-proyectos-de-edificacion/> (Accessed: 12 April 2025).

Van den Brand, G.-J. et al. (2003) 'IFD Building in Europe: A blueprint for production and delivery of customer satisfaction oriented buildings', *20th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, pp. 55–60.

Brand, S. (1994) *What happens after they 're built*. Viking.

Braune, A., Ekhvaia, L. and Quante, K. (2021) 'Benchmarks for Greenhouse Gas Emissions From Building Construction', *Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen –DGNB* [Preprint].

Builders for Climate Action (2019) *Low-Rise Buildings as a Climate Change Solution*, *Builders for Climate Action*. Peterborough, Ontario, Canada. Available at: <https://doi.org/10.31080/asmi.2020.03.0514>.

Caasa (2024) *Construcción Tradicional*, *Caasa.es*. Available at: <https://caasa.es/construccion-tradicional/> (Accessed: 6 April 2025).

CAMACOL (2023) *El PIB de edificaciones se contrajo 5 % en el tercer trimestre del 2023*. Available at: <https://camacol.co/prensa/noticias/el-pib-de-edificaciones-se-contrajo-5-en-el-tercer-trimestre-del-2023>.

CAMACOL, A. (2018) '4.4.3. Coordinación Modular', (20), p. 2332.

Castro, F. (2018) *The Green House / architectenbureau cepezed*, *ArchDaily*. Available at: <https://www.archdaily.com/896630/the-green-house-architectenbureau-cepezed>.

Castro, J. (2022) *Lo que queda de Qatar tras el Mundial*, *Marca*. Available at: <https://www.marca.com/futbol/futbol-internacional/2024/02/12/65c9106e46163f690b8b4576.html>.

Cemento Ultracem (2023) *Durabilidad del concreto: ¿Cuánto debería durar una estructura de concreto?* Available at: <https://ultracem.co/durabilidad-del-concreto/#:~:text=En general%2C se espera que,la exposición a condiciones agresivas>.

Centro Uc del Hormigón (2024) *Nueva actualización de la Norma NCh 163 permitirá el uso de escorias y relaves en el hormigón*. Available at: <https://centrohormigon.uc.cl/actualidad/noticias/935-nueva-actualizacion-de-la-norma-nch-163-permitira-el-uso-de-escorias-y-relaves-en-el-hormigon>.

Cerdá, E. and Khalilova, A. (2015) 'Economía Circular', *Economía Circular, Estrategia Y Competitividad Empresarial Economía Circular*, pp. 11–20.

Chamasemani, N.F. et al. (2024) 'Environmental Impacts of Reinforced Concrete Buildings: Comparing Common and Sustainable Materials: A Case Study', *Construction Materials*, 4(1), pp. 1–15. Available at: <https://doi.org/10.3390/constrmater4010001>.

Chavez Brenes, K. (2020) *Apuntes hacia una economía circular: la experiencia de los Países Bajos*. Available at: <https://delfino.cr/2020/01/apuntes-hacia-una-economia-circular-la-experiencia-de-los-paises-bajos>.

Chavez, M.V. (2017) 'Manejo de Residuos en los Países Bajos Breve descripción'. Available at: https://www.b2match.eu/system/holanda/files/Brochure_pags_1_12.pdf?1367683323%5Cn.

Chopra, A.K. (1995) *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*, University of California at Berkeley. San Francisco: Pearson. Available at: <https://doi.org/10.5860/choice.33-0948>.

Cimento Itambé. (2021) *Norma admite agregados reciclados em concreto estrutural*, *Cimentoitambe.com*. Available at: <https://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/norma-admite-agregados-reciclados-%0Aem-concreto-estrutural/> 117 (Accessed: 10 August 2024).

Circular Colab (2018) *The State of the Circular Economy in America*. Available at: <https://www.circularcolab.org/us-circular-economy-report>.

Circular Ecology (2024) 'ICE DB Advanced V4'. Circular Ecology. Available at: <https://circularecology.com/wsvequ34n0.html>.

Collings, D. (2020) 'Carbon footprint benchmarking data for buildings', *thestructuralengineer.org*, (December), pp. 10–13.

Conseil International du Bâtiment (2021) *2021 International Building Code (IBC)*, ICC Digital Codes. Available at: <https://codes.iccsafe.org/content/IBC2021P2> (Accessed: 10 April 2025).

Consejo Superior de la Judicatura - Dirección Ejecutiva Seccional de Administración Judicial (2024) 'ANÁLISIS ECONÓMICO DEL SECTOR', *Republica de Colombia*. Medellin, p. 26.

Construcia (2020) *¿Qué países lideran el cambio en economía circular?* Available at: <https://www.construcia.com/noticias/paises-lideran-cambio-economia-circular/>.

Cosme Da Costa, C. (2022a) 'Economía circular y responsabilidad social corporativa en Brasil', *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(3), pp. 159–178. Available at: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i3.2208.

Cosme Da Costa, C. (2022b) 'La Economía Circular como eje de desarrollo de los países latinoamericanos', *Revista Economía y Política*, (35), p. 18. Available at: <https://www.redalyc.org/journal/5711/571169753001/html/>.

Cotec et al. (2021) 'Situación y Evolución de la Economía Circular en España'.

Cotec et al. (2023) *Situación Y Evolución de la EC en España*.

Cutieru, A. (2021) *Una guía para proyectos de arquitectura desmontables*, *ArchDaily Colombia*. Available at: <https://www.archdaily.co/co/944378/una-guia-para-proyectos-de-arquitectura-desmontables> (Accessed: 15 March 2025).

Dakir, O. et al. (2024) 'Review Paper on Integrated Circular Economy in the Construction Sector', in M. Ezziyyani, J. Kacprzyk, and V.E. Balas (eds). Cham: Springer Nature Switzerland, pp. 283–292. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-54288-6_27.

Damtoft, J.S. et al. (2008) 'Sustainable development and climate change initiatives', *Cement and Concrete Research*, 38(2), pp. 115–127. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.008>.

DANE (2020) 'La Información del DANE en la Toma de Decisiones de los Municipios del País: Candelaria-Yumbo-Jamundí-Palmira'. Available at: <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/planes-desarrollo-territorial/100320-Info-Alcaldias-Candelaria-Yumbo-Jamundí-Palmira.pdf>.

David Dominguez y David Serna (2020) *certificacion-edge-colombia @ www.grupobancolombia.com*. BOGOTA. Available at: https://www.grupobancolombia.com/wps/portal/empresas/capital-inteligente/tendencias/sostenibilidad/certificacion-edge-colombia?_ga=2.172767139.1015568215.1636640242-844740723.1586315952.

David Dominguez y Ramiro Buitrago Issa (2020) *construccion-sostenible-vivienda-vis-colombia @ www.grupobancolombia.com*. BOGOTA. Available at: https://www.grupobancolombia.com/wps/portal/empresas/capital-inteligente/tendencias/sostenibilidad/construccion-sostenible-vivienda-vis-colombia?_ga=2.179903268.1015568215.1636640242-844740723.1586315952.

Delta Arquitectura (2025) *Torre Jardines de Babilonia primer edificio ecológico al sur de Cali que se suma al propósito de construir un futuro sostenible*, *Delta Arquitectura digital*. Available at: <https://www.deltaarquitecturadigital.com/avanza-en-cali-la-imponente-torre-jardines-de-babilonia-un-proyecto-que-transformara-el-perfil-urbano-del-sur-de-la-ciudad/> (Accessed: 19 July 2025).

Drewniok, M.P. et al. (2023) 'Mapping material use and embodied carbon in UK construction', *Resources, Conservation and Recycling*, 197(June 2022). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107056>.

Duurzaamheid, P. (2022) 'Afval en grondstoffen', (stadsmonitor).

Eberhardt, L.C.M., Birgisdóttir, H. and Birkved, M. (2019) 'Life cycle assessment of a Danish office building designed for disassembly', *Building Research & Information*, 47(6), pp. 666–680. Available at: <https://doi.org/10.1080/09613218.2018.1517458>.

Elejalde López, H.D. et al. (2015) *Guía para el diseño de edificaciones sostenibles, Política De Construcción Sostenible Del Área Metropolitana Del Valle De Aburrá*. Universidad Pontificia Bolivariana.

Elengical, J. (2022) *FIFA Arenas: Stadium 974 by Fenwick Iribarren Architects in Ras Abu Aboud, Qatar, Stir World*. Available at: <https://www.stirworld.com/see-features-fifa-arenas-stadium-974-by-fenwick-iribarren-architects-in-ras-abu-aboud-qatar>.

Environmental Protection Agency (2021) *Estrategia Nacional de Reciclaje, EPA Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos*.

EPA (2009) 'OSWER Innovation Project Success Story: Deconstruction', pp. 1–4.

EPA (2022) 'EPA Strategic Plan 2022-2026', (112).

Equipo tecnico Departamento Administrativo de Planeación Distrital Cali (2020) 'Revisión - Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos - PGIRS " Separar para Reciclar "' . Distrito Especial Santiago de Cali, p. 555.

Escuela de unidad editorial (2023) *Qué países lideran el cambio en economía circular*. Available at: <https://www.escuelaunidadeditorial.es/blog/marketing-y-comunicacion/economia-circular-en-europa>.

Eurostat (2024) *Waste statistics*, <https://ec.europa.eu/>. Available at: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics (Accessed: 27 July 2025).

Farhadi, F. (2024) *Huella de Carbono en la Construcción: Guía Definitiva en 2024*, *neuroject.com*. Available at: https://neuroject.com/carbon-footprint-in-construction/#Factors_Contributing_to_Carbon_Footprint_in_Construction (Accessed: 5 January 2024).

Federación Interamericana del Cemento and Cámara nacional del cemento (2023) *Hoja de Ruta México - Industria del cemento*.

Federal Emergency Management Agency (2012) 'Seismic Performance Assessment of Buildings: FEMA P-58-1'. FEMA. Available at: <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-2186-2>.

Fenner, A.E. *et al.* (2018) 'The carbon footprint of buildings: A review of methodologies and applications', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94(July), pp. 1142–1152. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.012>.

Fernandes Rocha, P. *et al.* (2022) 'Impacts of Prefabrication in the Building Construction Industry', *Encyclopedia*, 3(1), pp. 28–45. Available at: <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3010003>.

Fernando Silva, Y. *et al.* (2024) 'Performance of Self-Compacting Concrete with Residue of Masonry and Recycled Aggregate under Sulfate Attack', *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(1). Available at: <https://doi.org/10.1061/JMCEE7.MTENG-15741>.

Fortuna, L.M. and Diyamandoglu, V. (2016) 'A novel method for material characterization of reusable products', *Waste Management*, 52, pp. 14–24. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.037>.

Friedrich, T. (2021) 'Extrem kurze Bauzeiten dank vorgefertigter Deckenelemente mit integrierten Haustechnikkomponenten'. Available at: <https://doi.org/10.1002/best.202100068>.

FUNCIONA (2021) 'a829893197e4c61728c48ccc04668ecf308c8fea @ como-funciona.com'. Available at: <https://como-funciona.com/elementos-constructivos/>.

Fundación Conama, G.B.C.E. (GBCe) y R.A. (2018) *ECONOMÍA CIRCULAR EN EL*

- SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN. Available at:
http://www.conama.org/conama/download/files/conama2018/GTs_2018/6_final.pdf.
- Gaiker (2007) 'Reciclado De Materiales : Perspectivas , Tecnologías y Oportunidades', *Bizkaiko Foru Aldundia Diputación Foral de Bizkaia (BFA DFB)*, p. 100. Available at:
http://www.bizkaia21.net/fitxategiak/09/bizkaia21/Territorio_Sostenible/dokumentuak/20100902123356112_Informe_Reciclaje.pdf.
- Gan, V.J.L. *et al.* (2017) 'Sustainability analyses of embodied carbon and construction cost in high-rise buildings using different materials and structural forms', *HKIE Transactions Hong Kong Institution of Engineers*, 24(4), pp. 216–227. Available at:
<https://doi.org/10.1080/1023697X.2017.1375436>.
- Garay, N. (2022) 'Factor de quantificación de residuos de construcción civil en chile', *INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E TERRITÓRIO (ILATIT)* [Preprint], (Sinader 2019).
- García, J. (2014) 'Gestión de residuos de construcción y demolición en los Estados Unidos de Norte América', 1976, pp. 1–7.
- Garrone, P., Baudino, M. and Vicente, D. (2019) 'Sensor embebido basado en etiqueta RFID pasiva', *CASE* [Preprint].
- Geissdoerfer, M. *et al.* (2017) 'The Circular Economy – A new sustainability paradigm?', *Journal of Cleaner Production*, 143, pp. 757–768. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>.
- GeoCVC (2019) 'group @ geo.cvc.gov.co'. Available at:
<https://geo.cvc.gov.co/arcgis/home/group.html?id=1b1c866d5e1d4d958bbdeba5b38298ec#overview>.
- Geoff Craighead (2009) *High-Rise Building Definition, Development, and Use*. 3rd edn. Elsevier Inc. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-555-5.X0001-6>.
- Gervasio, H. and Dimova, S. (2018) *Environmental Benchmarks for buildings, 71st LCA Forum - Environmental benchmarks for buildings: Needs, challenges and solutions*. European Union. Available at: <https://doi.org/10.2760/90028>.
- Ghisellini, P., Cialani, C. and Ulgiati, S. (2016) 'A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems', *Journal of Cleaner Production*, 114, pp. 11–32. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>.
- Gibbons, O.P. *et al.* (2022) *How to calculate Embodied Carbon, The Institution of Structural Engineers*. London: Institution of Structural Engineers. Available at:
<https://www.istructe.org/IStructE/media/Public/Resources/istructe-how-to-calculate-embodied-carbon.pdf>.
- Gobierno de Colombia (2021) 'Estrategia climática de largo plazo de Colombia E2050 para cumplir con el Acuerdo de París', pp. 1–39. Available at:
www.cambioclimatico.gov.co.
- Gobierno de la Ciudad de Mexico (2023) *LEY DE ECONOMÍA CIRCULAR DE LA*

CIUDAD DE MÉXICO.

Gómez, M. (2022) *Medición de la huella de CO2 en tres sistemas de construcción local de viviendas desde el tradicional al prefabricado con elementos constructivos basados en residuos de construcción*. Universidad del Valle- Colombia.

Green Assistance (2020) *Evaluación de impactos ambientales*. Santiago de Cali.

Grupo banco mundial (2024) *Emisiones de CO2 (kt) - China, Grupo banco mundial*.

Available at:

https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.KT?locations=CN&most_recent_year_desc=true.

Hafez, H. et al. (2024) 'Parametric study on the decarbonization potential of structural system and concrete mix design choices for mid-rise concrete buildings', *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 57(4), pp. 1–15. Available at: <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02367-1>.

Häkkinen, T. et al. (2015) 'Reducing embodied carbon during the design process of buildings', *Journal of Building Engineering*, 4, pp. 1–13. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.06.005>.

Hanemaaijer, A. et al. (2023) *Integral Circular Economy Report 2023 Assessment for the Netherlands - Summary and Main Findings*.

Hart, J., D'Amico, B. and Pomponi, F. (2021) 'Whole-life embodied carbon in multistory buildings: Steel, concrete and timber structures', *Journal of Industrial Ecology*, 25(2), pp. 403–418. Available at: <https://doi.org/10.1111/jiec.13139>.

Hernán Darío Elejalde López, Ana Milena Joya Camacho, Pbro. Julio Jairo Ceballos Sepúlveda, A.G.C. (2015) *Guía 4 Para el diseño de edificaciones sostenibles*. Primera. Medellín.

Hernández, H., Díaz, L. and Rodríguez-Grau, G. (2025) 'Examining building deconstruction: Introducing a holistic index to evaluate the ease of disassembly', *Resources, Conservation and Recycling*, 218, p. 108215. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108215>.

Hornyak, T. (2024) *La imparable reconstrucción de pieza por pieza de la torre Nakagin Casule*, *www.eltiempo.com*. Available at: <https://www.eltiempo.com/mundo/new-york-times-international-weekly/como-fue-renacimiento-de-la-nakagin-capsule-tower-que-fue-reconstruida-pieza-por-pieza-849880> (Accessed: 26 March 2025).

Hosseinian, S.M. and Ghahari, S.M. (2021) 'The relationship between structural parameters and water footprint of residential buildings', *Journal of Cleaner Production*, 279, p. 14. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123562>.

Huang, L. et al. (2018) 'Carbon emission of global construction sector', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(November 2016), pp. 1906–1916. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.001>.

ICONTEC (2000) 'Norma Técnica Colombiana NTC 174. Concretos. Especificaciones De Los Agregados Para Concreto V5.' Bogotá D.C.: ICONTEC, p. 22. Available at:

<https://doi.org/10.1002/9781119111111.ch91>.

INE Instituto Nacional de Estadística (2022) 'Cuentas medioambientales: Cuenta de residuos 2020', 2022, pp. 1–7. Available at: <http://cotec.es/media/informe-CotecISBN-1.pdf>.

ING group (2019) *Opportunity and Disruption: How Circular Thinking Could Change US Business Models*.

Iresiduo (2019) *Países Bajos, líder en economía circular*. Available at: <https://iresiduo.com/noticias/paises-bajos/world-economic-forum/19/02/08/paises-bajos-lider-economia-circular>.

ISO (2015) 'ISO 9001:2015', *Universidad Autónoma de Guerrero*, 2015, pp. 1–42. Available at: www.iso.org.

ISO (2025) *ISO/CD 2768*. Available at: <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/08/57/85741.html>.

Jacob, C., Nandra, A. and Gupta, J. (2025) 'Strategic Concepts, Challenges, and Life-cycle Assessment for Sustainable Construction and Building Circularity in the real Estate Sector', *Circular Economy and Sustainability*, 5(2), pp. 1201–1217. Available at: <https://doi.org/10.1007/s43615-024-00466-3>.

Jamundi Secretaria de Ambiente y Desarrollo Agropecuario Sostenible (2016) 'Actualización del plan de gestión integral de residuos sólidos – PGIRS del municipio de Jamundí 2016-2027'. Jamundi, p. 270.

Jiang, X. and Bai, X. (2024) 'Carbon emissions of cast-in-place and prefabricated buildings: a comparative analysis and carbon reduction strategy', *E3S Web of Conferences*, 546, pp. 0–5. Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202454601009>.

Jonas Roche, D. (2025) *Dave Bennink announces New York City Reuse Innovation Center to help boost circular economy*, *The Architect's Newspaper*. Available at: <https://www.archpaper.com/2025/04/new-york-city-reuse-innovation-center/> (Accessed: 27 July 2025).

KaiMBA, Z. (2021) *La apuesta por la economía circular y la minería urbana impulsan el reciclaje del cobre en China*, *Copper Alliance*. Available at: <https://internationalcopper.org/es/resource/commitment-to-the-circular-economy-and-urban-mining-drives-copper-recycling-in-china/>.

Kanavaris, F. et al. (2024) 'Reducing the embodied carbon of concrete-framed buildings through improved design and specification: Influence of building typologies, construction types and concrete mix', *Structures*, 67, p. 107005. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107005>.

Kisho Kurokawa (2015) *Nakagin Capsule Tower*, www.kisho.co. Available at: <https://www.kisho.co.jp/page/209.html> (Accessed: 10 April 2025).

Kosiakov, E. (2018) *Foundation calculation for multi-storey residential building*. Saimaa University of Applied Sciences Technology, Lappeenranta.

KREANDO (2021) 'elemento_constructivo @ www.kreando.cl'. Available at: http://www.kreando.cl/elemento_constructivo.html.

Kröhnert, H., Itten, R. and Stucki, M. (2022) 'Comparing flexible and conventional monolithic building design: Life cycle environmental impact and potential for material circulation', *Building and Environment*, 222(June). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109409>.

Langmaack, H. *et al.* (2021) 'Climate and employment impacts of sustainable building materials in the context of development cooperation'. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), pp. 1–99. Available at: www.giz.de/en.

LEOPOLD LB *et al.* (1971) 'Procedure for evaluating environmental impact', *US Geological Survey Circular*, 2.

Liu, M., Li, B. and Yao, R. (2010) 'A generic model of Exergy Assessment for the Environmental Impact of Building Lifecycle', *Energy and Buildings*, 42(9), pp. 1482–1490. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.018>.

Liu, Zhenggang *et al.* (2025) 'Carbon emission reduction in cement production catalyzed by steel solid waste', *National Science Review*, 12(5), pp. 12–15. Available at: <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaf109>.

Lopes de Sousa Jabbour, A.B. *et al.* (2019) 'Circular economy business models and operations management', *Journal of Cleaner Production*, 235, pp. 1525–1539. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.349>.

Lourenço, P.B. (2014) 'Masonry Structures, Overview', in *Encyclopedia of Earthquake Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 1–9. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-642-36197-5_111-1.

Lu, M. *et al.* (2024) 'Methods for Calculating Building-Embodied Carbon Emissions for the Whole Design Process', *Fundamental Research* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2022.07.015>.

Lu, W. *et al.* (2021) 'Revisiting the effects of prefabrication on construction waste minimization: A quantitative study using bigger data', *Resources, Conservation and Recycling*, 170(April), p. 105579. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105579>.

Luz M. Murillo, S.D. and M.G. (2017) 'A study of a hybrid binder based on alkali-activated ceramic tile wastes and portland cement. Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites'. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-102001-2.00013-9>.

Ma, W. *et al.* (2023) 'Towards a circular economy for construction and demolition waste management in China: Critical success factors', *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 35, p. 101226. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101226>.

MacAskill, S. *et al.* (2021) 'Offsite construction supply chain strategies for matching affordable rental housing demand: A system dynamics approach', *Sustainable Cities and Society*, 73(June). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103093>.

Mah, C.M., Fujiwara, T. and Ho, C.S. (2016) 'Construction and demolition waste generation rates for high-rise buildings in Malaysia', *Waste Management and Research*, 34(12), pp. 1224–1230. Available at: <https://doi.org/10.1177/0734242X16666944>.

Maierhofer, D. et al. (2022) 'Critical life cycle assessment of the innovative passive nZEB building concept "be 2226" in view of net-zero carbon targets', *Building and Environment*, 223(August). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109476>.

Mao, S. and Cao, W.-J. (2025) 'Evaluating material passports for circularity in the construction industry', *Sustainable Production and Consumption*, 54, pp. 88–101. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.12.021>.

Marti, S. (2017) 'La Construcción Industrializada: ¿A qué nos referimos?' Available at: <https://nibug.com/que-es-la-construccion-industrializada/>.

Martínez, C. (2017) *¿A dónde van los residuos de la construcción y la demolición?*, Universidad Nacional Autonoma de Mexico. Available at: <https://ciencia.unam.mx/leer/666/-a-donde-van-los-residuos-de-la-construccion-y-la-demolicion-119>.

McCormac, J.C. and Brown, R.H. (2014) *Desing of Reinforced Concrete*, Wiley. Wiley. Available at: http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMBETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI.

De Meester, B. et al. (2009) 'Exergetic life-cycle assessment (ELCA) for resource consumption evaluation in the built environment', *Building and Environment*, 44(1), pp. 11–17. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.01.004>.

Merli, R., Preziosi, M. and Acampora, A. (2018) 'How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review', *Journal of Cleaner Production*, 178, pp. 703–722. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.112>.

Mesa de noticias de El Mostrador (2023) *Alcaldes y parlamentarios logran acuerdo para sancionar vertederos ilegales en Chile*, www.elmostrador.cl. Available at: <https://www.elmostrador.cl/noticias/pais/2023/11/20/alcaldes-y-parlamentarios-logran-acuerdo-para-sancionar-vertederos-ilegales-en-chile/> (Accessed: 5 July 2024).

De Miguel, C. et al. (2022) *Economía circular en América Latina y el Caribe: Oportunidad para una recuperación transformadora*, CEPAL. Available at: <https://doi.org/10.12804/urosario9789587849653.01>.

Ministerio de Ambiente (2023) *Estrategia Nacional de Economía Circular*. Available at: <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/estrategia-nacional-de-economia-circular/>.

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (2010) 'Norma Sismo Resistente-10', *Republica de Colombia*, pp. 530–827.

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (2017) *Resolución No. 0472 de 2017*. Resolución.

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (2023) *Estrategia Nacional de Economía Circular*. Available at: <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/estrategia-nacional-de-economia-circular/>.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017) 'Resolución 0472 de 2017', *Resolución No. 0472*. Bogotá D.C.: Ministerio de Medio Ambiente, p. 18. Available at: <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/3a-RESOLUCION-472-DE-2017.pdf>.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2021) 'Resolución 1257 de 2021'. Bogotá D.C.: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, p. 8. Available at: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Resolucion-1257-de-2021.pdf>.

Ministerio de Ciencias (2017) *Los negocios verdes impulsan el desarrollo de Colombia*. Available at: https://minciencias.gov.co/sala_de_prensa/los-negocios-verdes-impulsan-el-desarrollo-colombia#:~:text=En Colombia se han identificado,millones de pesos en ventas.

Ministerio de vivienda Ciudad y Territorio (2015) 'Resolución 0549 - 2015.pdf'. BOGOTA, p. 10. Available at: <http://www.minvivienda.gov.co/ResolucionesVivienda/0549 - 2015.pdf>.

Ministerio del Medio Ambiente (MMA) et al. (2021) 'Hoja de Ruta para un Chile Circular al 2040', *Ministerio del Medio Ambiente* [Preprint]. Ministerio de medio ambiente.

Moshood, T.D., Rotimi, J.O.B. and Shahzad, W. (2024) 'Enhancing sustainability considerations in construction industry projects', *Environment, Development and Sustainability* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04946-2>.

Muguruza, A. (2022) 'Gestión de residuos sólidos en Brasil', *ICEX*, (2020), p. 12.

Myint, N.N. and Shafique, M. (2024) 'Embodied carbon emissions of buildings: Taking a step towards net zero buildings', *Case Studies in Construction Materials*, 20(February). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03024>.

Myllyvirta, L. et al. (2023) *China 's Climate Transition : Outlook 2023* .

Ñáñez, D.A. (2021) *Impacto económico y ambiental de la economía circular en las actividades conjuntas de una empresa constructora y una empresa manufacturera de materiales de construcción y demolición en Candelaria, Universidad de Valle*. Universidad del Valle-Colombia. Available at: https://oa.upm.es/71063/1/TFG_Enero22_Fernandez_Garcia_Roberto.pdf.

National Institute of Building Sciences Building Seismic Safety Council and Federal Emergency Management Agency (2010) 'Earthquake-Resistant Design Concepts, An Introduction to the NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures', *National Institute of Building Sciences*, pp. 1–110.

Neville, A.M. and Brooks, J.. (2010) *Concrte Technology*. 2nd edn, *JNCCN Journal of the National Comprehensive Cancer Network*. 2nd edn. Londres: Pearson. Available at: <https://doi.org/10.6004/jnccn.2015.0201>.

Olanrewaju, A. (2025) 'Nature of the Construction Sector BT - Sustainable Construction Management: Research and Practice Companion: Integrating Sustainability Target in Construction', in A. Olanrewaju (ed.). Singapore: Springer Nature Singapore, pp. 1–25. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-96-4910-5_1.

Oliveira Neto, R. et al. (2017) 'An economic analysis of the processing technologies in CDW recycling platforms', *Waste Management*, 60(2016), pp. 277–289. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.011>.

Orgaz, C. (2021) *Las radicales propuestas de la 'economía de la dona' (y cómo quieren transformar el mundo)*, *BBC News Mundo*. Available at: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-56283169>.

Ossio, F., Salinas, C. and Hernández, H. (2023) 'Circular economy in the built environment: A systematic literature review and definition of the circular construction concept', *Journal of Cleaner Production*, 414, p. 137738. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137738>.

El País (2023) *El sector de la construcción, un motor de progreso en el Valle del Cauca*, www.elpais.com.co. Available at: <https://www.elpais.com.co/valle/el-sector-de-la-construccion-un-motor-de-progreso-en-el-valle-del-cauca.html> (Accessed: 18 July 2025).

Peng, J. et al. (2012) 'CO2 Emission Calculation and Reduction Options in Ceramic Tile Manufacture-The Foshan Case', *Energy Procedia*, 16, pp. 467–476. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.076>.

Peng, L. and Cao, W.-J. (2025) 'Measuring circularity in the construction industry: A systematic literature review from the stakeholder perspective', *Journal of Cleaner Production*, 496, p. 144805. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144805>.

Perez O., B.D. and Leal Giraldo, Z.L. (2017) '¿Cómo aplicar el árbol causa-efecto a las PyMEs en Colombia?', *Dictamen Libre*, (20), pp. 51–56. Available at: <https://doi.org/10.18041/2619-4244/dl.20.2889>.

Poo Rubio, A. (2004) 'El sector de la construcción en México', in *Administración para el diseño*. Mexico: UAM Azcapotzalco, CyAD, Departamento de Procesos y Técnicas de Realización, pp. 120–140. Available at: https://administracionytecnologiaparaeldisenio.azc.uam.mx/publicaciones/2003/6_2003.pdf.

Porcelli, A.M. and Martínez, A.N. (2018) 'Análisis legislativo del paradigma de la economía circular', *Revista Direito GV*, 14(3), pp. 1067–1105. Available at: <https://doi.org/10.1590/2317-6172201840>.

Portafolio (2015) *Vea cuáles ciudades de Colombia tendrán rascacielos*, www.portafolio.co. Available at: <https://www.portafolio.co/economia/finanzas/vea-ciudades-colombia-tendran-rascacielos-35314> (Accessed: 18 July 2025).

Potting, J. et al. (2017) 'Circular Economy: Measuring innovation in the product chain - Policy report', *PBL Netherlands Environmental Assessment Agency*, (January), p. PBL

publication number 2544. Available at:

<http://www.pbl.nl/sites/default/files/cms/publicaties/pbl-2016-circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains-2544.pdf>.

Potting, J. *et al.* (2018) 'Circular Economy : What We Want To Know and Can Measure', *Planbureau voor de Leefomgeving (PBL)*, p. 20.

Precast/ Pretessed Concrete Institute (2010) *PCI DESIGN HANDBOOK*. 7th edn. Chicago: PCI.

Prestressed Concrete Institute (2021) *PCI Design Handbook: Precast and Prestressed Concrete*. 9th edn. Precast.

Prieto, A.J., Torres-González, M. and Carpio, M. (2024) 'Virtual web-based instruments in the evaluation of functional degradation of heritage timber buildings', *Building Research & Information*, 52(1–2), pp. 181–193. Available at: <https://doi.org/10.1080/09613218.2023.2214826>.

Proceso Invest in Bogotá (2019) 'Bogotá, una oportunidad para el sector de materiales de construcción', p. 2. Available at: <https://es.investinbogota.org/sectores-de-inversion/materiales-de-construccion>.

Pulaski, M. *et al.* (2004a) 'Design for deconstruction', *Modern Steel Construction*, 44(6), pp. 33–37.

Pulaski, M. *et al.* (2004b) 'Design for deconstruction', *Modern Steel Construction*, 44(6), pp. 33–37.

Ragon, P. and Rodríguez, F. (2021) 'CO2 emissions from trucks in the EU : An analysis of the heavy-duty CO2 standards baseline data', *2021 International Council on Clean Transportation*, 35(September). Available at: <https://theicct.org/publication/co2-emissions-from-trucks-in-the-eu-an-analysis-of-the-heavy-duty-co2-standards-baseline-data/>.

Raimondo, S., Lilavois, C.R. and Nelson, S.L. (2022) *ICE Aquatic Toxicity Database Version 4 . 0 Documentation*.

Redacción 360 En Concreto (2022) *CINCO COSAS QUE DEBES SABER DEL CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPEÑO*, *360 En Concreto*. Available at: <https://360enconcreto.com/blog/detalle/cinco-cosas-que-debes-saber-del-concreto-de-ultra-alto-desempeno/> (Accessed: 6 April 2025).

Republica (2020) *Conozca cuál es el modelo económico que busca llegar a transformar el mundo en una dona*. Available at: <https://www.larepublica.co/globoeconomia/conozca-cual-es-el-modelo-economico-que-busca-llegar-a-transformar-el-mundo-en-una-dona-3072643>.

Residuos Profesional (2020) *China prohíbe la importación de residuos sólidos a partir de 2021*. Available at: <https://www.residuosprofesional.com/china-prohibe-importacion-residuos-2021/>.

Rivera, F. (2020) *Carbono incorporado en la construcción : estimación de emisiones asociadas a nuevas Viviendas de Interés Social y Prioritario en Bogotá , 2020-2030*.

Universidad de Los Andes. Available at: <http://hdl.handle.net/1992/50972>.

Robayo-Salazar, R., Valencia-Saavedra, W. and Mejía de Gutiérrez, R. (2022) 'Recycling of concrete, ceramic, and masonry waste via alkaline activation: Obtaining and characterization of hybrid cements', *Journal of Building Engineering*, 46. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103698>.

Rodríguez-Espíndola, O. et al. (2022) 'The role of circular economy principles and sustainable-oriented innovation to enhance social, economic and environmental performance: Evidence from Mexican SMEs', *International Journal of Production Economics*, 248, p. 108495. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108495>.

Rodríguez, O. et al. (2023) 'Modelamiento de los efectos macroeconómicos de la transición a la economía circular en América', *Cepal* [Preprint]. Available at: www.issuu.com/publicacionescepal/stacks.

Roh, S. et al. (2016) 'Development of a building life cycle carbon emissions assessment program (BEGAS 2.0) for Korea's green building index certification system', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, pp. 954–965. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.048>.

Rosemback Miranda, L., Cirelli, S. and Duduchi, É. (2009) 'A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. Recycling of construction and demolition waste in Brazil: 1986-2008', *Ambiente Construído*, (1), pp. 57–71.

Salvatierra Arraño, R.A. (2019) *Economía Circular: desafíos del modelo en Chile*, Universidad del Desarrollo. Universidad del Desarrollo.

Samaniego, J. and Galindo, L. (2021) *La gestión y manejo de residuos sólidos y sus propuestas regulatorias e impositivas*, Naciones Unidas: CEPAL Cooperación Alemana. Available at: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45252/1/S1700148_es.pdf.

Sánchez, L. and Fúster, A. (2024) *Nuevas Técnicas de Deconstrucción: El Diseño para el Desmontaje*. Universidad de Alcalá.

Sanjuán, M.Á. et al. (2020) 'Carbon dioxide uptake by mortars and concretes made with Portuguese cements', *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(2). Available at: <https://doi.org/10.3390/app10020646>.

Santacruz, N. (2020) *Estos son los planes de las constructoras en Cali para seguir adelante*, *El País*. Available at: <https://www.elpais.com.co/elpaispalante/planes-de-las-constructoras.html> (Accessed: 18 July 2025).

Santos, D., Monercillo, B. and García, A. (2011) *Gestión de residuos en las obras de construcción y demolición*. España.

Sarria, J.G. (2020) *Pasado y presente de los prefabricados*. Available at: <https://aconcretas.com/2020/08/26/pasado-y-presente-de-los-prefabricados/#:~:text=Al final de los años 20%2C y,la actualidad continúa utilizándose con algunas variaciones.&text=Del año 70 al 80 algunas empresas,celular impulsado por el ingeniero Doménico>.

Secretaría de Medio Ambiente (2021) *En marcha Programa de Recolección de Residuos de la Construcción y Demolición (RCD) en la Ciudad de México, Gobierno de Mexico*. Available at: <https://www.sedema.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/en-marcha-programa-de-recoleccion-de-residuos-de-la-construccion-y-demolicion-rcd-en-la-ciudad-de-mexico>.

Secretaría de Vivienda de Cali (2023) *Constructoras registradas para promocionar y construir proyectos de vivienda nueva en Cali, Alcaldía de Santiago de Cali*. Available at: <https://www.cali.gov.co/vivienda/publicaciones/174961/conoce-las-constructoras-registradas-y-sus-proyectos-de-vivienda-en-cali/> (Accessed: 18 July 2025).

Secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá (SDA) - Alcaldia de Bogotá (2015) 'Guía para la elaboración del Plan de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición - RCD en la Obra', *Guía para la elaboración del Plan de Gestión de Residuos de Construcción y Demolición - RCD en la Obra*, p. 45. Available at: <http://www.ambientebogota.gov.co/web/publicaciones-sda/cartilla-rcd>.

semenmerahputih.com/ (2024) *Cómo calcular el volumen de una base según su tipo, semen merah putih*. Available at: <https://semenmerahputih.com/en/news/tips-and-trick/how-to-calculate-foundation-volume> (Accessed: 24 May 2025).

Sert, E. (2023) *La arquitectura y la economía circular, unidas por la descarbonización*. Available at: <https://www.escolasert.com/es/blog/ejemplos-economia-circular-arquitectura> (Accessed: 20 February 2025).

Silva-Urrego, Y. and Delvasto-Arjona, S. (2020) 'Uso de residuos de construcción y demolición como material cementicio suplementario y agregado grueso reciclado en concretos autocompactantes', *Informador Técnico*, 85(1). Available at: <https://doi.org/10.23850/22565035.2502>.

Silva, R. V, de Brito, J. and Dhir, R.K. (2019) 'Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications', *Journal of Cleaner Production*, 236, p. 117629. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117629>.

Silva, Y.F. et al. (2024) 'Carbonation and chloride penetration performance of self-compacting concrete with masonry and concrete wastes', *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 29(4), pp. 744–758. Available at: <https://doi.org/10.1080/19648189.2024.2414221>.

Silveira Da Lima, A. and Ferrerira Da Cruz, L. (2019) 'Circular economy in the civil construction sector - waste class A', *Procienci@s* [Preprint].

Singapore Standards Council (2022) 'Execution of concrete structures EN 13670:2022', *Ss En 13670:2009* [Preprint], (November). Available at: <http://www.cscses.com/uploads/2016328/20160328110518251825.pdf>.

Socarrás Cordoví, Y. and Vidaud Quintana, I.N. (2017) 'Desde la tecnología del prefabricado actual hasta la prefabricación contra pedido', pp. 104–115.

Soto Ardila, C.C. (2022) *Sistema Constructivo Prefabricado (Off Site) Análisis Técnico Para Desarrollar Su Uso En La Construcción De Edificaciones En Colombia: "Estudio*

de caso un proyecto diseñado y construido en la ciudad de Bogotá”, Universidad Nacional de Colombia Facultad. Available at: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/82159>.

Souza, E. (2021) *Hay vida después de la demolición: Mass Timber, circularidad y diseño para la deconstrucción*, ArchDaily Colombia. Available at: <https://www.archdaily.co/co/965489/hay-vida-despues-de-la-demolicion-mass-timber-circularidad-y-diseno-para-la-deconstruccion> (Accessed: 15 March 2025).

Staff, F. (2022) *La economía circular es el futuro de los negocios; México tiene que acelerar el paso*. Available at: <https://forbes.com.mx/la-economia-circular-es-el-futuro-de-los-negocios-mexico-tiene-que-acelerar-el-paso/>.

Standardization, I.O. for (1989) ‘ISO 2768-1’, ISO, p. 8.

Stenformwork (2025) *Torre Jardines de Babilonia*, www.stenformwork.com. Available at: <https://www.stenformwork.com/es/proyectos/torre-jardines-de-babilonia> (Accessed: 18 July 2025).

Sun, Z. et al. (2014) ‘Experimental study on seismic behaviors of assembled monolithic concrete shear walls built with precast two-way hollow slabs with various details’, *The Open Civil Engineering Journal*, 8(1), pp. 161–165.

Tan, T. et al. (2021) ‘Integrated Approaches to Design for Manufacture and Assembly: A Case Study of Huoshenshan Hospital to Combat COVID-19 in Wuhan, China’, *Journal of Management in Engineering*, 37(6), p. 05021007. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(asce\)me.1943-5479.0000972](https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000972).

Tanzer, S.E., Blok, K. and Ramírez, A. (2021) ‘Curing time: A temporally explicit life cycle CO₂ accounting of mineralization, bioenergy, and CCS in the concrete sector’, *Faraday Discussions*, 230, pp. 271–291. Available at: <https://doi.org/10.1039/d0fd00139b>.

Tchobanoglous, G. (2002) *Solid Waste*. 2nd edn, *Environmental Health, Third Edition*. 2nd edn. McGRAW-HILL. Available at: <https://doi.org/10.2307/j.ctvjz80w7.13>.

TheCircularLab (2022) *China también quiere ser líder en economía circular*. Available at: <https://www.thecircularlab.com/economia-circular-china/>.

Thneibat, M. (2025) ‘Planning Construction Projects from a System-of-Systems Perspective BT - Proceedings of the International Conferences on Digital Technology Driven Engineering 2024’, in N.D. Lagaros et al. (eds). Cham: Springer Nature Switzerland, pp. 53–61.

Tierra Armada (2012) ‘Precast & Prestressed Beam Bridges’, pp. 1–16.

Tokio Art Beat (2023) *El futuro de la torre de cápsulas Nakagin: 23 cápsulas extraídas y restauradas*, tokyoartbeat.com. Available at: <https://www.tokyoartbeat.com/en/articles/-/nakagin-capsule-tower-metabolism-news-en-202305> (Accessed: 10 April 2025).

Torres, L. (2021) *Encontro Nacional das Usinas de Reciclagem de RCD apresenta dados inéditos sobre a reciclagem de entulho no Brasil*, Abrecon. Available at: <https://abrecon.org.br/noticias/encontro-nacional-das-usinas-de-reciclagem-de-rcd->

apresenta-dados-ineditos-sobre-a-reciclagem-de-entulho-no-brasil.

Townsend, T.G. and Anshassi, M. (2023) *Construction and Demolition Debris*. 1st edn. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-031-25013-2>.

Trade Windows Bristo (2025) *Environmental Impact of uPVC: How Sustainable is it for Trade Projects?*, www.tradewindowsbristol.com. Available at: <https://www.tradewindowsbristol.com/news/upvc-windows-environmental-impact> (Accessed: 31 July 2025).

U.S. Green Building Council (USGBC) (2025) *LEED v4.1 BUILDING DESIGN AND CONSTRUCTION*. Available at: https://doi.org/10.1007/978-94-009-5652-0_4.

del Valle García, I. and Esteban-Ibáñez, M. (2023) 'Economía Circular en las áreas de gestión, negocios y economía: un análisis bibliométrico', *INNOVA Research Journal*, 8(2), pp. 129–154. Available at: <https://doi.org/10.33890/innova.v8.n2.2023.2254>.

Vaz-Serra, P., Wasim, M. and Egglestone, S. (2021) 'Design for manufacture and assembly: A case study for a prefabricated bathroom wet wall panel', *Journal of Building Engineering*, 44(April). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102849>.

Vivendo (2025) *Constructoras en esta ciudad*, www.vivendo.co. Available at: <https://www.vivendo.co/constructoras/ciudad/cali> (Accessed: 18 July 2025).

Wang, D. and Lin, Y. (2025) 'A comprehensive review on definitions, development, and policies of net-zero carbon buildings (nZCBs)', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 217(February). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115750>.

Wang, T. et al. (2022) 'Estimating the Carbon Emission of Construction Waste Recycling Using Grey Model and Life Cycle Assessment: A Case Study of Shanghai', *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(14). Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph19148507>.

World Economic Forum (2022) *Sustainable development-impact meetings*. Available at: <https://www.weforum.org/meetings/sustainable-development-impact-meetings-2022/themes/>.

Wu, X. et al. (2025) 'Comparative cradle to end-of-use embodied carbon analysis of high-rise concrete buildings using volumetric modular and panelized construction', *Journal of Building Engineering*, 100, p. 111736. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111736>.

Wu, Z. et al. (2021) 'An Analysis on Promoting Prefabrication Implementation in Construction Industry towards Sustainability'.

XM (2020) *En Colombia Factor de emisión de CO2 por generación eléctrica del Sistema Interconectado: 164.38 gramos de CO2 por kilovatio hora*, <https://www.xm.com.co/>. Available at: <https://www.xm.com.co/noticias/en-colombia-factor-de-emision-de-co2-por-generacion-electrica-del-sistema-interconectado> (Accessed: 24 May 2025).

Zhang, X. et al. (2023) 'Characteristics of embodied carbon emissions for high-rise building construction: A statistical study on 403 residential buildings in China',

Resources, Conservation and Recycling, 198(June), p. 107200. Available at:
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107200>.

