

INTEGRACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CIRCULARIDAD AL DISEÑO ARQUITECTONICO MEDIANTE BIM

INTEGRATION OF CIRCULARITY STRATEGIES INTO ARCHITECTURAL DESIGN THROUGH BIM

INTEGRAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE CIRCULARIDADE AO PROJETO ARQUITETÔNICO POR MEIO DO BIM

Viviana Duran-Navarrete

Arquitecta, Estudiante de Postgrado
Departamento de Diseño y Teoría de la Arquitectura, Facultad Arquitectura, Construcción y Diseño
Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
<https://orcid.org/0009-0007-4927-2858>
vduran@egresados.ubiobio.cl (Autora de Correspondencia)

Rodrigo García-Alvarado

Doctor en Representación Arquitectónica, Profesor Titular
Departamento de Diseño y Teoría de la Arquitectura, Facultad Arquitectura, Construcción y Diseño
Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
<https://orcid.org/0000-0003-2216-2388>
rgarcia@ubiobio.cl

Mabel Vega-Coloma

Doctora en Ingeniería, Académica
Departamento de Ingeniería en Maderas, Facultad Ingeniería
Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
<https://orcid.org/0000-0003-1599-6747>
mvega@ubiobio.cl



RESUMEN

La industria de la construcción representa gran parte del consumo de recursos naturales, proyectándose el aumento de residuos de construcción y demolición (RCD) a nivel mundial en un 70% al año 2050 si no se toman medidas urgentes. La aplicación de economía circular en la construcción, requiere selección de productos en base a su potencial circular, en la fase de diseño, para optimizar la reutilización y minimizar residuos. Se propone metodología mixta combinando componentes cualitativos, explorando cómo los actores involucrados en la construcción integran, múltiples factores que influyen en la recuperación del material, asignándoles valores porcentuales que reflejan el potencial circular del producto. Esta información cuantitativa, se visualizará gráficamente en BIM (Building Information Modeling), obteniendo cuantificación sintética en porcentaje de RCD. Se compara la circularidad del modelo de estudio, con uno más favorable, y otro menos favorable. Detectándose diferencias sustanciales en la circularidad, y una determinación en porcentaje de RCD, para formular diseños informados.

Palabras clave

diseño circular, recuperación de materiales, escala transición circular, BIM

ABSTRACT

The construction industry represents a large part of the consumption of natural resources, with construction and demolition waste (CDW) projected to increase worldwide by 70% by 2050 if urgent measures are not taken. Applying circular economy in construction requires product selection in the design phase based on their circular potential, optimizing reuse to minimize waste. A mixed methodology is proposed, combining qualitative components and exploring how the actors involved in construction integrate multiple factors that influence the recovery of the material, assigning them percentage values that reflect the circular potential of the product. This quantitative information will be displayed graphically in BIM (Building Information Modeling), obtaining a synthetic quantification of the percentage of CDW. The circularity of the study model is compared with a more favorable one and a less favorable one, detecting substantial differences in circularity and determining the CDW percentage to formulate informed designs.

Keywords

circular economy, materials recovery, circular transition scale, BIM

RESUMO

O setor de construção é responsável por uma grande parte do consumo de recursos naturais, com a projeção de que os resíduos globais de construção e demolição (CDW) aumentem em 70% até 2050, se não forem tomadas medidas urgentes. A aplicação da economia circular na construção exige a seleção de produtos com base em seu potencial circular, na fase de projeto, para otimizar a reutilização e minimizar o desperdício. Propõe-se uma metodologia mista que combina componentes qualitativos, explorando como os atores envolvidos na construção integram vários fatores que influenciam a recuperação de materiais, atribuindo valores percentuais que refletem o potencial circular do produto. Essas informações quantitativas são visualizadas graficamente no BIM (Building Information Modelling), obtendo-se uma quantificação sintética em porcentagem de RCD. A circularidade do modelo de estudo é comparada com um modelo mais favorável e outro menos favorável. São detectadas diferenças substanciais na circularidade e uma determinação em porcentagem de RCD, para formular projetos informados.

Palavras-chave:

projeto circular, recuperação de materiais, escala de transição circular, BIM

INTRODUCCIÓN

El sistema productivo lineal de la industria de la construcción a nivel mundial ha generado que el planeta transforme modelos de producción insostenibles (Lacouture, 2013) consumiendo grandes volúmenes de materias primas (Fiel, 2022), generando grandes cantidades de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) (Mora, 2021). Esto se traduce en el agotamiento del 40% de los materiales naturales, el consumo del 40% de la energía y el 15% de los recursos de agua dulce (Akanbia et al., 2018).

Según Kibert (2008), el 50% de los residuos generados por la industria de la construcción a nivel mundial se deben a demolición (Ghisellini et al., 2018), mientras que sus impactos indirectos están relacionados con la eliminación de residuos de construcción (Ossio, 2021). Por lo tanto, es considerada una de las industrias clave para una transición hacia la economía circular (EC) (Prieto-Sandoval et al., 2017).

Según un informe del Banco Mundial, "si no se adoptan medidas urgentes, los desechos a nivel mundial aumentarán en un 70% para 2050" (Climent Salvador, 2021). El objetivo es hacerse cargo de la sobreexplotación de materias primas y los residuos antes de que se produzcan, e implementar conceptos de sustentabilidad y circularidad en el proceso de diseño (Mora, 2021).

La Economía Circular busca el desarrollo sostenible a través de un trabajo colaborativo y el cierre de los flujos de energía y materiales (Mercader Moyano et al., 2019), diseñando productos para ser reutilizados y reciclados (Climent, 2021). Para lograrlo, debe considerar indicadores que promuevan circularidad (Corantioquia, 2022) en diseño y uso de materiales reciclables (Potting et al., 2017).

La evaluación de la capacidad de recuperación de los materiales, centrada en la percepción y experiencia de los representantes de las empresas constructoras, puede ser un método innovador que respalde un marco holístico para definir el potencial circular de los recursos (Ulgiati, 2018). Sin embargo, muchas empresas carecen de la información (Ca et al., 2013) necesaria para seleccionar las herramientas y técnicas adecuadas a sus necesidades (Enshassi et al., 2014).

La integración de estrategias circulares en el diseño conceptual a través del entorno BIM (Building Information Modeling) software Revit, facilitaría la visualización gráfica de circularidad de los materiales permitiendo una mejor elección, a través de una base de datos integrada de geometría con datos numéricos (Climent, 2021).

Esta investigación desarrolla un estudio y aplicación de estrategias circulares (EC), mediante BIM, para medir el

potencial circular (Salehabadi y Ruparathna, 2022) de los elementos constructivos, considerando factores que ayuden a optimizar la reutilización y reciclaje con el fin de minimizar el volumen de residuos y la complejidad del reciclado de materiales (Zhang & Jia, 2021).

Es por ello que, se sondea una Metodología sencilla que integre base de datos de una encuesta de percepción aplicada a los representantes de las empresas constructoras, quienes poseen el conocimiento holístico de los valores locales y de los proyectos, pudiendo converger en un solo indicador múltiples factores que influyen en la recuperación de los materiales (Mesa & Esparragoza, 2018). Luego, la información cuantitativa resultante será integrada en el entorno BIM para una visualización gráfica en los modelos y una cuantificación sintética en porcentaje de RCD, mediante una aplicación genérica.

METODOLOGÍA

La investigación adoptará un enfoque mixto que combina componentes cualitativos y cuantitativos para comprender la viabilidad de incorporar (EC) a partir del diseño conceptual BIM.



Los diseñadores sostenibles deben medir el potencial circular de los materiales, mediante métodos y herramientas disponibles.

Linder et al. (2017) y (Prieto-Sandoval et al., 2017) recomiendan que una métrica de circularidad se centre en medir la circularidad; "la fracción recuperable de un producto que proviene de productos usados", como atributo único de la calidad de cada material (Lacouture, 2013).

Para medir circularidad, consideraremos propuesta del Informe de Potting et al. (2017), que declara "recopilar datos semicuantitativos y compilarlos en indicadores que brinden información significativa. Los indicadores semicuantitativos pueden organizarse en clases; "rojo, amarillo, verde" (Mora, 2021).

En base a lo anterior la medición de la fracción recuperable del material, se determinará en tres atributos (Nieroa & Kalbar, 2019) que definirán el potencial circular; (a) Casi todo es recuperable (b) Algunas partes son recuperables (c) Casi nada es recuperable. La información sobre los potenciales circulares de los materiales se obtiene por medio de un trabajo de campo, aplicando una encuesta de percepción a los representantes de las empresas constructoras, por su conocimiento holístico en los múltiples factores que afectan la capacidad de recuperación de un material.

Tabla 1. Estrategias de circularidad. Fuente: Informe político Potting et al. (2017).

Economía Circular		Estrategias Circulares	Conceptos Estrategias circulares
<p>Creciente circularidad</p> 	<p>Uso y fabricación de productos más inteligente</p>	<p>R0 Rechazar</p>	<p>Utilizar el producto desechado o sus partes en un nuevo producto con una función diferente.</p>
		<p>R1 Repensar Rediseñar</p>	<p>Hacer que el uso del producto sea más intensivo, compartiendo productos o poniendo productos multifuncionales en el mercado.</p>
		<p>R2 Reducir</p>	<p>Aumentar la eficiencia en la fabricación o el uso de productos al consumir menos recursos naturales y materiales.</p>
<p>regla general: mayor nivel de circularidad menos recursos naturales y menos presión ambiental</p> 	<p>Extender la vida útil del producto y sus partes</p>	<p>R3 Re-Usar Recuperar</p>	<p>Reutilización por otro consumidor del producto desechado que todavía está en buenas condiciones y cumple su función original.</p>
		<p>R4 Reparar</p>	<p>Reparación y mantenimiento del producto defectuoso para que pueda ser utilizado con su función original.</p>
		<p>R5 Restaurar Renovar</p>	<p>Restaurar un producto antiguo y actualizarlo.</p>
<p>Economía Lineal</p>	<p>Aplicación útil de materiales</p>	<p>R6 Remanufacturado</p>	<p>Utilizar partes del producto desechado en un nuevo producto con la misma función.</p>
		<p>R7 Reutilizar</p>	<p>Utilizar partes del producto desechado o sus partes en un nuevo producto con una función diferente.</p>
		<p>R8 Reciclar</p>	<p>Procesar materiales para obtener la misma (grado alto) o menor (grado bajo) de calidad.</p>
		<p>R9 Recuperar</p>	<p>Recoger materiales o productos que ya han sido utilizados, y que aún mantienen su utilidad y reintroducirlos en el proceso productivo.</p>
		<p>R10 Valorizar energéticamente</p>	<p>Incineración de materiales con valorización energética.</p>

COMPONENTE CUALITATIVO

La investigación cualitativa se adecua al análisis de contenido y la encuesta explora cómo los actores involucrados en la construcción conceptualizan y comprenden los significados atribuidos a la circularidad.

ESTRUCTURA ENCUESTA DE PERCEPCION; ESCALA TRANSICION DE POTTING

Conocido como estrategias 10R. es el marco que permitirá estructurar la encuesta (Javier y Xavier, 2019) de medición de la capacidad de recuperación de los materiales, recopilando datos semicuantitativos y compilarlos en indicadores que brinden información significativa (Tabla 1).

Las EC, R0 a R2; no serán materia de estudio no se relacionan directamente con la fase de ejecución (Mora, 2021). La investigación se definirá en función de las EC, R3 a la R10.

METODOLOGÍA ENCUESTA DE PERCEPCIÓN

Se reviso el contenido, por un experto, profesor UBB. Validándose redacción, compresión de preguntas de encuesta piloto, aplicada a tres constructoras de la zona, diferentes de la muestra. El cuestionario de la encuesta se complementó con una definición de las EC del Informe de Potting et al. (2017), para aunar criterios de respuesta de la muestra.

La encuesta se estructuró en tres categorías. La primera mide percepciones de capacidad de recuperación

Tabla 2. Cuantificación porcentajes RCD. Fuente: Elaboración de los autores.

TABLA DE CUBICACION DE ESTRUCTURA DE MUROS								
			A	B	C	D	E	F
VIVIENDA	PARTIDA	ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS	VOLUMEN (m ³)	%DE RESIDUO (%) (c)	(A)*(B) %RCD POR MATERIAL	PESO ESPECIFICO PROMEDIO (Kg/m ³)	(D)*(A) CALCULO PESO TOTAL DE MATERIALES (Kg)	(E)*(B) CALCULO DE PESO TOTAL DEL RESIDUO (Kg)

Tabla 3. Rangos de corte potencial circular en Revit. Fuente: Elaboración de los autores.

Partida Constructiva	Material	(c) Casi nada %	(a) Casi todo %	(b) Algunas partes %	% Potencial circular total (a)+(b)
Datos	(Incluir del proyecto)	(Incluir de resultados encuesta de percepción)			(sumatoria)
	%Rango Corte	xx			yy
		Max. Baja circularidad			Min. Alta circularidad

de materiales. La segunda, complementa con factores que afectan en la capacidad de recuperación de los materiales. La tercera pregunta datos personales del entrevistado. (Anexo A). Estas se realizaron durante 5 días, el autor, dio una breve introducción verbal e instrucciones para completar el instrumento de medición. Además de resolver dudas y leer el consentimiento informado antes de realizar preguntas.

UNIVERSO DE LA MUESTRA

Se utilizó un método de muestreo no-probabilístico seleccionando 10 constructoras representativas, que abarcan el 67% de las empresas de la Provincia de Arauco, con experiencia en proyectos de viviendas sociales rurales. La muestra no es aleatoria, se seleccionó por contactos profesionales del investigador. Por motivos de confidencialidad, los nombres de empresas específicas se han excluido aquí.

COMPONENTE CUANTITATIVO: VALORACIÓN ATRIBUTOS (A), (B), (C)

Los múltiples factores que influyen en la recuperación material se enmarcan en tres atributos circulares reflejando la frecuencia de una percepción circular;

- (a) Casi todo...
- (b) Algunas partes... ... de esa fracción del material residual es recuperable
- (c) Casi nada...

Los valores tabulados se representan en porcentajes, facilitando la interpretación objetiva.

Tabla 4. Rangos corte Tipo semáforo; visualización Revit. Fuente: Elaboración de los autores.

Indicador Circular	Color asignado	Rango corte %
(a)Casi todo	Verde	yy% a 100%
(b)Algunas partes	Amarillo	xx+1% a yy-1%
(c)Casi nada	Rojo	1% a xx%

Las variables dependientes incluyen el indicador de circularidad; capacidad de recuperación de los materiales, y las EC, son variables independientes

Fracción no recuperable (b)

Porcentaje del material que puede mejorar su recuperabilidad, incorporando factores que mejoran el diseño.

Fracción no recuperable (c)

Para calcular el porcentaje del peso de los residuos de la obra, se utilizarán los datos tabulados desde las encuestas, junto con el peso específico de los materiales en la base de datos de Revit, (Fernández & Raposo, 2022) permitirán determinar el peso de reciclaje de cada partida en obra. (Tabla 2). acercándose a los protocolos de gestión de residuos en Chile; "Hoja de ruta RCD-2035" como en todos los países de la Unión Europea; Norma de la directiva Europea 2008/98/CE.

Tabla 5. Materiales caso de estudio. Fuente: Elaboración autores

Partida Constructiva	Base	Propuesta 1	Propuesta 2
muros	Tabiquería 2"x3"	Tabique Metalcom	Muros hormigón armado
Estructura	techumbre Cercha 2"x4" costaneras 2x2"	Cercha y costanera de Metalcom	Cercha 2"x4" costaneras 2x2"
	piso Radier 8cm	Placa madera	Radier 8 cm
Fundación	Cimentación corrida	Poyos hormigón 30x30x60 Viga madera 3"x8"	dados de Hormigón 80x80x40
Cubierta	Zinc alum	Teja de Zinc alum.0.35cm	Tejuela asfáltica 0.35 cm
Rev. Interior	Yeso Cartón (Z.S) Fibro cemento (Z.H)	Placa de madera. (Z.S) Fibro cemento (Z.H)	Hormigón a la vista
Rev. Exterior	Siding fibrocemento	Madera Machihembrada	Siding fibrocemento
Ventanas	4 de Aluminio de 130x120cm 1 de Aluminio de 100x100cm 1 de Aluminio de 60x60cm 1 de Aluminio de 60x90cm	4 de PVC de 130x120cm 1 de PVC de 100x100cm 1 de PVC de 60x60cm 1 de PVC de 60x90cm	4 de madera de 130x120cm 1 de madera de 100x100cm 1 de madera de 60x60cm 1 de madera de 60x90cm
Puertas	1 madera Maciza 90x200cm 5 placarol 70cm	1 metálicas 90x200cm 5 metálicas 85cm	6 madera Maciza 85x200cm

RANGOS DE CORTE; INTEGRACIÓN A REVIT

A través del software Revit (Jalaei & Jrade, 2014) se asignará un color para facilitar visualización gráfica, el potencial circular total del material será el resultado de (a) + (b) el valor del porcentaje es proporcional a su circularidad, mientras que en (c), su porcentaje inversamente proporcional a la circularidad del elemento, individualizándose esta variable como el material residual o porcentaje de RCD (Tabla 4).

Definiéndose a través de una ecuación matemática sencilla el promedio de los porcentajes más altos, del potencial circular total de los materiales (a)+(b), este valor dará el rango de corte de mayor circularidad. Mientras que el promedio de los porcentajes más altos de (c), dará el rango de corte de menor circularidad (Tabla 3).

Cada rango (Tabla 3). para incorporarse en cuadro "reglas de Filtro" del paso del Tutorial; IV.) debe asimilarse a colores de acuerdo con:

IMPLEMENTACIÓN CASO DE ESTUDIO A REVIT

Se proporcionará un Tutorial para integrar el potencial circular de materiales en el software Revit. asociando indicadores tipo "semáforo". (Anexo D). Verificándose la viabilidad del método a través de la consulta a dos

expertos en la herramienta de modelado 3D. Para ello se comparó una vivienda base, con una propuesta 1 más favorable, y propuesta 2 menos favorable. (Tabla 5).

PLANIMETRÍA CASO DE ESTUDIO

Vivienda de Madera de 62.24 m², características de diseño (Figura 1, Figura 2 y Figura 3). Se desarrollará modelo con Autodesk Revit.

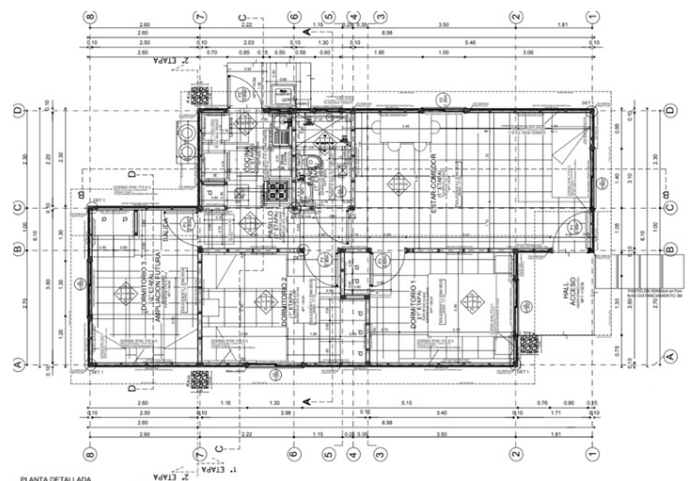


Figura 1. Planta arquitectura, tipología masiva. Fuente: Elaboración de los autores

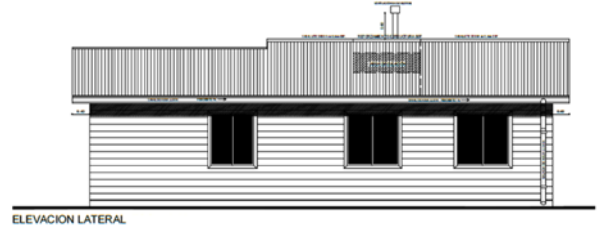
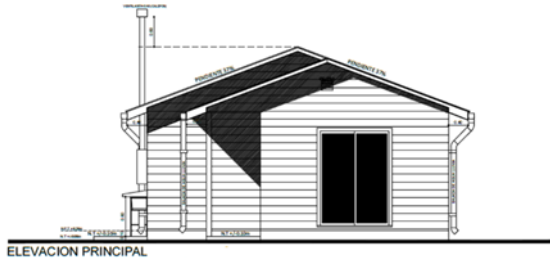


Figura 2. Elevación principal y lateral izquierda. Fuente: Elaboración de los autores

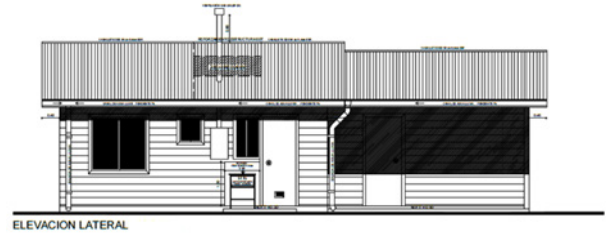
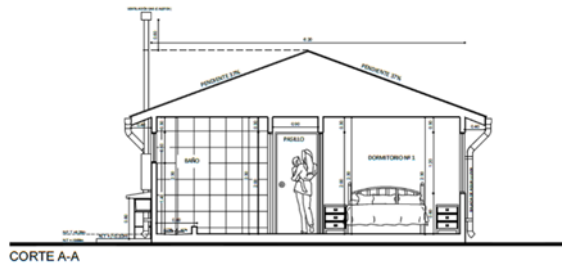


Figura 3. Corte transversal y elevación lateral derecha. Fuente: Elaboración de los autores

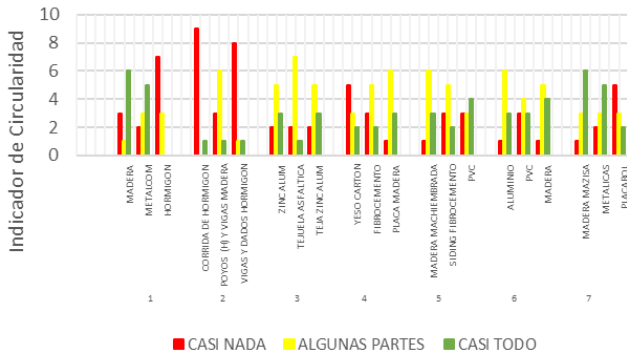


Figura 4. Tabulación Recuperar. Fuente: Elaboración de los autores

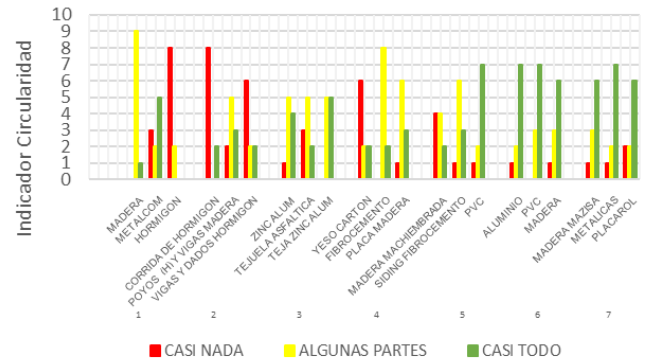


Figura 5. Tabulación Reutilizar. Fuente: Elaboración de los autores

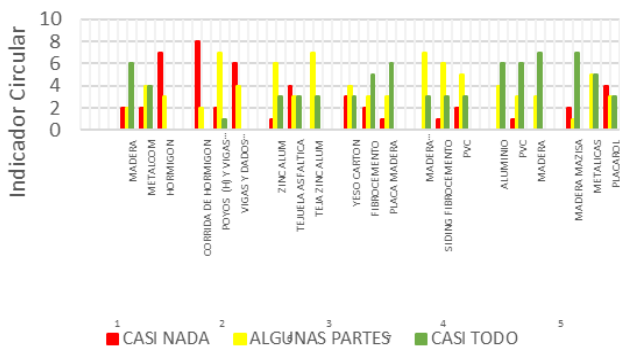


Figura 6. Tabulación Reciclar. Fuente: Elaboración de los autores

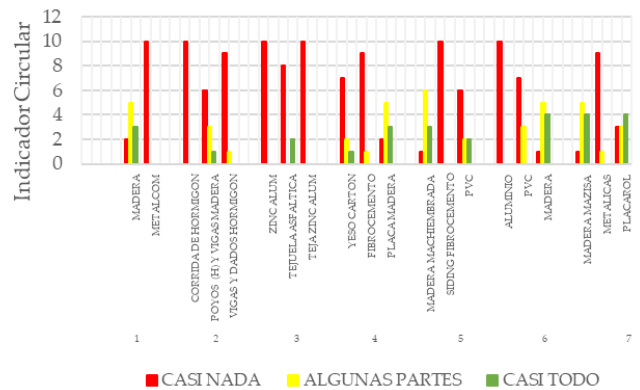


Figura 7. Tabulación Incinerar. Fuente: Elaboración de los autores

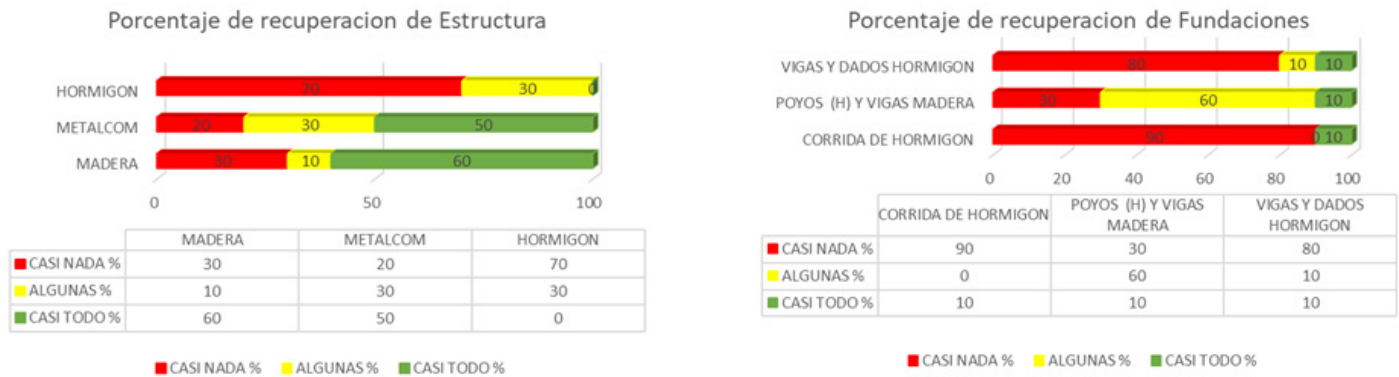


Figura 8. Estructura y Fundación. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 9. Cubierta y Rev. Interior. Fuente: Elaboración de los autores.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las empresas consideraron el mismo concepto para las estrategias Recuperar (Figura 4) Reutilizar (Figura 5). Observándose que, el hormigón en las partidas de estructura y fundaciones presenta un bajo porcentaje de circularidad, al contrario, la madera se presenta con un alto potencial de ser reutilizada.

Reparar y Restaurar; Se refiere a recuperar el valor histórico y por falta de mantención. Los resultados definieron estas EC no vinculantes para la construcción.

Remanufactura; El concepto, indica la inaplicación de la EC en la fase de construcción, al inclinarse los votos a la opción (c) Casi nada.

Reciclar; EC más conocida y aplicada por los contratistas, visualizamos la tendencia a una media-alta circularidad. (Figura 6)

Se observa que los encuestados en las EC, Recuperar Reutilizar y Reciclar, reconocen el elemento más pesado como el hormigón y los elementos de menor calidad en su composición como el yeso cartón y la puerta de placarol, de menor potencial circular.

Incinerar; Las repuestas reflejan una tendencia a no incorporar esta Estrategia (Figura 7). Solo en las alternativas que consideran madera la tendencia a la incineración es media-alta.

Dado los resultados; “no todas las estrategias Circulares pueden ser inherentemente sostenibles, requiere un análisis previo que defina donde situar esta estrategia ...”. Este análisis encontró igualdad entre los resultados de Recuperar y Reciclaje del 100% y Recuperar y Reutilizar 57%. Aunque el reciclaje de materiales de construcción es práctica común requiere más uso de energía, la reutilización está orientado al valor. Se considera entonces la recuperación por sobre el reciclaje (Salehabadi & Ruparathna, 2022), entendiéndose que este se da cuando y ya no se puede recuperar el material.

MEDIR LA CIRCULARIDAD

No es posible llegar a determinar un porcentaje absoluto de recuperación por cada material.

Por ello se asignan valores numéricos a las respuestas traduciendo a porcentaje los rangos de atributos circulares estableciendo cuanto “puede recuperarse”.; (a)Casi todo, (b)Algunas partes, (c)Casi nada (Figura 8, Figura 9, Figura 10 y Figura 11).

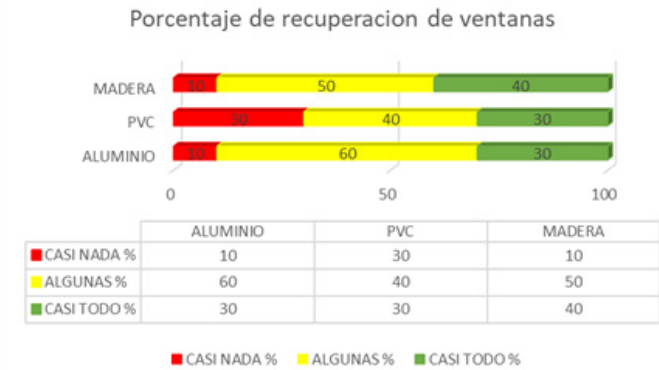
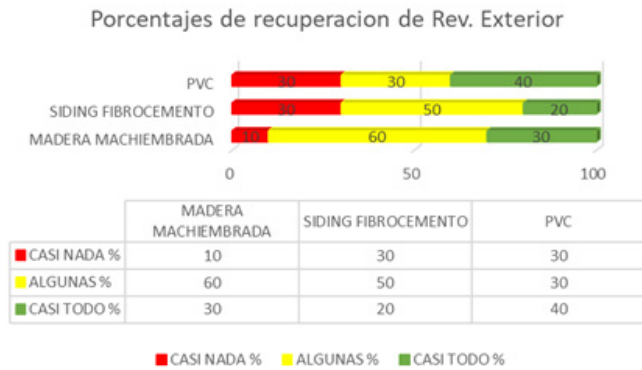


Figura 10. Rev. Exterior y ventanas. Fuente: Elaboración de los autores.

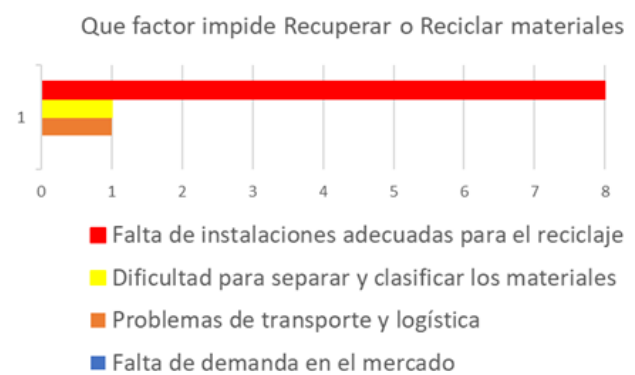
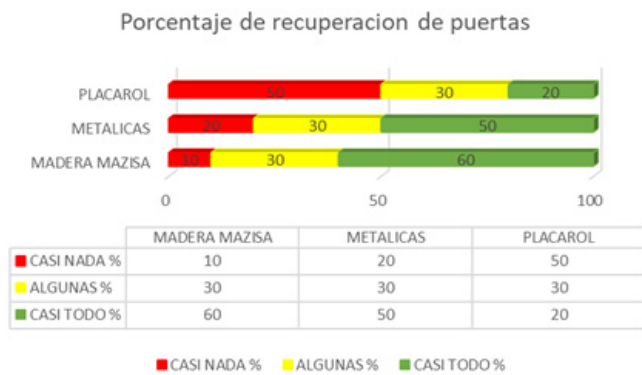


Figura 11. Puertas. Fuente: Elaboración de los autores.

Figura 12. Factores que impiden reciclar. Fuente: Elaboración de los autores.

La grafica "tipo semáforo", reitera el hormigón, placarol y el yeso cartón, los materiales que menor circularidad presentan.

FACTORES DE DISEÑO QUE POTENCIAN LA RECUPERACIÓN

La tendencia en las acciones de las Empresas Constructoras es incluir factores básicos que influyen en la capacidad de recuperación de los materiales, se demuestra en la encuesta una fuerte tendencia a la sostenibilidad, tanto en su incorporación en el diseño de ensambles, estratificación, calidad, etc. como en la incorporación de acciones en terreno de separación de materiales.

Se evidencia fuertemente la falta de instalaciones para el Reciclaje en la Zona (Figura 12).

RANGOS DE CORTE INTEGRACIÓN A REVIT

Determinaremos el potencial circular total como el resultado de (a) + (b), (Tabla 6). el promedio de los porcentajes más altos, del potencial circular total de los materiales, dará el rango de corte de los porcentajes de mayor circularidad. Mientras que el promedio de los porcentajes más altos de (c), dará el rango de corte de los porcentajes de menor valoración (Tabla 7).

VISUALIZACIÓN GRÁFICA EN REVIT Y APROXIMACIÓN SINTÉTICA.

La información geométrica de Revit con la incorporación de los porcentajes de (c) obtenemos el volumen de los materiales del proyecto, con ello el porcentaje de RCD que se emite por material. Para cumplir con la meta propuesta en la Hoja de Ruta RCD Economía Circular en Construcción. "Al menos el 30% del volumen de los RCD se valoriza: Reutilización..." Mientras que la meta para el 2035, debe alcanzar al 70% del volumen de los RCD valorizados. Como se detalla en (Tabla 8).

De este modo, la valoración de dichos materiales y/o sistemas constructivos, debiese aumentar en promedio un 3.7% al año 2025 y un 8.65% al año 2035.

Analizamos la vivienda base a las políticas de la Unión Europea, para 2020, se debería reciclar o reutilizar el 70% del total del peso de los residuos procedentes de RCD., nos da un peso de 31.257,28, RCD, el 70% que se debería estar valorizando son 21,880,96 RCD al año 2020 para cumplir con la meta propuesta según la directiva europea 2008/98/CE.

Tabla 6. Cálculo rangos corte. Fuente: Elaboración de los autores.

Partida Constructiva	Material	(a) Casi nada %	(b) Casi todo %	(c) Algunas partes	Potencial circular total
Estructura	Madera	30	10	60	70
	Metalcom	20	30	50	80
	Hormigón	70	30	0	30
Fundaciones	Corrida de Hormigón	90	0	10	10
	Poyos y vigas	30	60	10	70
	Vigas y dados H	80	10	10	20
Cubierta	Zinc Alum	20	50	30	80
	Tejuela asfáltica	20	70	10	80
	Plancha zinc alum	20	50	30	80
Rev. Interior	Yeso Cartón	50	30	20	50
	Fibroceemento	30	50	20	70
	Placa madera	10	60	30	90
Rev. Exterior	Mad. Machihembrada	10	60	30	90
	Siding Fibroceemento	30	50	20	70
	PVC	30	30	40	70
Ventanas	Aluminio	10	60	30	90
	PVC	30	40	30	70
	Madera	10	50	40	90
Puertas	Madera maciza	10	30	60	90
	Metálica	20	30	50	80
	Placarol	50	30	20	50
%Rango Corte		48.5			84.2
		Max.Baja circularidad		Min.Alt circularidad	

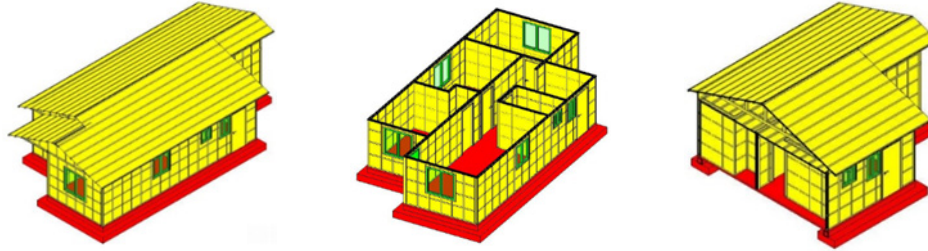
Tabla 7. Rangos corte indicador Tipo semáforo. Fuente: Elaboración de los autores.

Indicador de Circularidad	Color	Rangos de Valor %
Casi Todo	Verde	84% a 100%
Algunas Partes	Amarillo	50% a 83%
Casi Nada	Rojo	0% a 49%

Tabla 8. Cálculo porcentaje volumen y peso de RCD. Fuente: Elaboración de los autores.

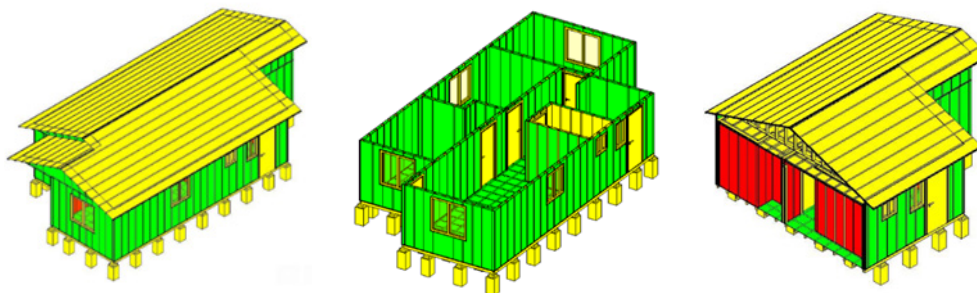
Modelo	Volumen Total RCD por vivienda (v)*(c)	Meta Hoja de Ruta (CORFO, 2020b). Chile.		Normativa Unión Europea	
		30%volumen RCD al 2025 (v)*0.3	70%volumen RCD al 2035 (v)*0.7	Peso Total RCD (p)	70% del peso RCD al 2020 (p)*0,7
Vivienda Base Estructura Madera	14.328	4.2984	10.0296	31257.28	21880.096
Propuesta 1 Estructura liviana	2.159	0.6477	1.513	7574.02	5301.814
Propuesta 2 Estructura Hormigón	20.518	6.1743	14.4067	48022.68	33615.876

Tabla 9. Vivienda base. Fuente: Elaboración de los autores.



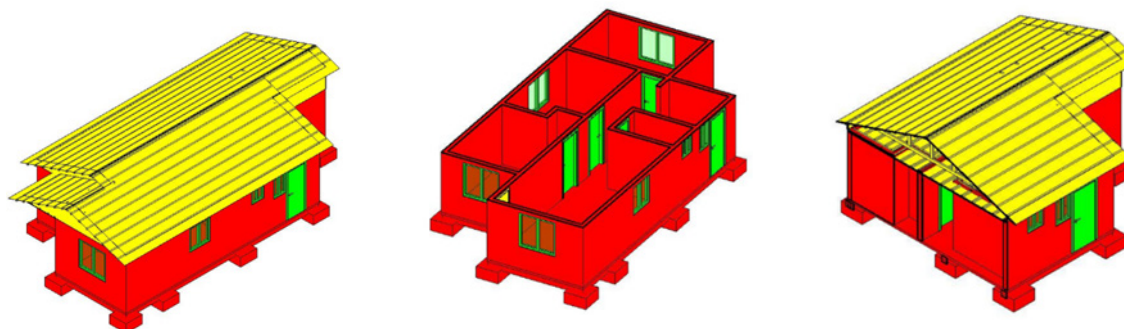
Modelo Vivienda base	Materiales	%Potencial circular Total (a)+(b)	Volumen Total (v)	Porcentaje de RCD (c)	% RCD por material (v)*(c)	D Peso Total materiales (v)*(pe)	Peso Total RCD D*(c)
Estructura	Madera	0.7	8.84	0.3	5,64	14319,71	11462,62
Fundación	Corrida hormigón	0.1	8,49	0.9	7,641	20367,36	18330,62
Cubierta	Zinc alum	0.8	0,3	0.2	0,06	2130,74	426,15
Rev. Exterior	Yeso Cartón	0.5	0,53	0.5	0,159	640,34	192,1
Rev. Interior	Siding Fibrocemento	0.7	1,55	0.3	0,755	1604,43	771,71
Ventanas	aluminio	0.9	0,18	0.1	0,018	20,35	2,04
Puertas	1 madera 5 placarol	0.5	0,19	0.5	0,055	176,39	72,04
Totales			20.08		14.328%	39259.32	31257.28

Tabla 10. Propuesta 1. Fuente: Elaboración de los autores.



Modelo Propuesta 1	Materiales	%Potencial circular Total (a)+(b)	Volumen Total (v)	t de RCD (c)	% RCD por material (v)*(c)	D Peso Total materiales (v)*(pe)	Peso Total RCD D*(c)
Estructura	Metalcom	0.8	3,81	0,2	0,717	22257,53	4430,73
Fundación	Poyos Hormigón	0.7	3,55	0,3	1,065	8511,6	2553,47
Cubierta	Teja Zinc alum	0.8	0,3	0,2	0,06	2130,74	426,15
Rev. Exterior	Madera machihembrada	0.9	0,54	0,1	0,054	352,57	35,26
Rev. Interior	Placa de madera	0.9	1,51	0,1	0,171	928,4	123,34
Ventanas	PVC	0.7	0,18	0,3	0,054	16,28	4,88
Puertas	Metálicas	0.8	0,19	0,2	0,038	0,93	0,09
Totales			10,08		2,159%	34198,05	7573,92

Tabla 11. Propuesta 2. Fuente: Elaboración de los autores



Modelo Propuesta 2	Materiales	%Potencial circular Total (a)+(b)	Volumen Total (v)	Porcentaje de RCD ©	% RCD por material (v)*©	D Peso Total materiales (v)*(pe)	Peso Total RCD D*©
Estructura	Hormigón armado	0.3	20,89	0,9	17,553	46352,82	40904,97
Fundación	Dados de Hormigón	0.3	3,58	0,8	2,864	8601,6	6881,28
Cubierta	Tejuela asfáltica	0.8	0,3	0.2	0,06	600,21	120,04
Rev. Exterior			0,09	0.3	0,027	107,22	32,17
Ventanas	Madera	0.9	0,18	0.1	0,018	15,47	1,55
Puertas	Madera	0.9	0,19	0.5	0,059	193,08	82,67
Totales			25,23		20,581%	55870,4	48022,68

La visualización gráfica Revit en conjunto con la base de datos (Tabla 9), evidencia que la estructura y las fundaciones por su volumen y peso, son las partidas que mayor RCD generan, siguiendo la partida cubierta con gran peso y la tercera partida en volumen el Rev. Interior. Definiéndose como las principales partidas que deben mejorar su selección y factores que permitan la recuperación de estos.

La propuesta 1, deja de eliminar un 84.93% de RCD con respecto del caso base. La elección de materiales en las fundaciones, se complementan para reducir el volumen de materiales pesados e incluir sistemas desmontables, aumentando el potencial de recuperación de los materiales (Tabla 10).

Respecto al volumen de RCD del base, el volumen de la propuesta 2 es 30% mayor. Corroborado el bajo nivel de circularidad en la gráfica, donde estructura y fundación se visualizan en rojo (Tabla 11).

Al comparar el modelo base, con el más favorable, y otro menos favorable, encontramos que la metodología detecta con una visualización gráfica en los modelos y una cuantificación sintética en porcentaje de RCD, claras tendencias entre los distintos sistemas constructivos analizados.

Los acercamientos a la norma nacional e internacional nos permiten evidenciar la brecha hacia la transición circular del sector de la construcción.

REFLEXIONES DE LOS USUARIOS

Como Modelador BIM en planificación y coordinación de proyectos, la plantilla de reciclabilidad es una herramienta valiosa agregando valor al diseño en la construcción. Implementar esta herramienta en el software Revit mejoraría el aprovechamiento de recursos sostenibles la planificación de obras.

DISCUSIÓN

Esta investigación busca superar la falta desconocimiento y/o integración tecnológica ofreciendo un enfoque basado en la experiencia para evaluar la capacidad de recuperación de los recursos de manera accesible en proyectos de construcción.

La incorporación de EC mediante la cualificación de atributos sostenibles de los materiales es efectiva para las constructoras. Se integran múltiples datos en un indicador que evalúa las EC de manera completa. La experiencia de las constructoras proporciona información holística. Integrándose en la base de datos del software Revit a través de Tutorial, que permite visualización gráfica.

La metodología utilizada respalda la medición Circular mediante indicadores significativos (Potting et al., 2017).

Este enfoque simplifica la transición hacia una mayor circularidad (Calzolari & Genovese, 2022). El objetivo es proporcionar un indicador más simple pero riguroso y accesible para los actores del desarrollo de proyectos acercando las EC a los diseñadores en etapas iniciales de diseño.

La plataforma BIM proporciona resultados gráficos, facilitando la comparación de soluciones y la toma de decisiones informadas, en combinación de BIM con información entregada por los actores involucrados en el proceso abre nuevas posibilidades para promover la sostenibilidad en la construcción y facilitar la implementación de estrategias de EC en proyectos, asociando la baja adopción de herramientas de economía circular a su complejidad y falta de información (Dufrene et al., 2013).

CONCLUSIÓN

Se exploró la integración de EC en la etapa de diseño conceptual mediante BIM en el contexto de la construcción de viviendas. La investigación incluyó a los principales actores del proceso de construcción para evaluar el potencial de circularidad de diferentes elementos de construcción y su aplicación en un modelo de vivienda en BIM.

La asignación de valores numéricos a la encuesta determinó la fluctuación de rangos porcentuales, obteniendo alta media y baja circularidad, donde el rango medio, permite incorporar factores que mejoren la circularidad, mediante el uso de conexiones desmontables, pasadores, pernos, etc.

Al complementar esta información con los datos geométricos de Revit, observamos que la estructura y la fundación definen el mayor porcentaje de los RCD, al concentrar el mayor volumen y peso de la vivienda. La vivienda base, arroja un 9.35% de volumen del RCD, la vivienda de la propuesta 1 arroja un 2.15% volumen de RCD, mientras que la Propuesta 2, estructurada en hormigón, presenta un 15.63% de volumen de RCD. Al analizar los valores para el cumplimiento de meta del 2025 de la Hoja de ruta 2025.

Al analizar las alternativas por partida constructiva, se evidencia que, al involucrar el hormigón en las partidas, materiales de baja calidad como puertas de chapa o materiales frágiles como placas de yeso cartón, el porcentaje de baja circularidad se incrementa. Mientras que la incorporación de la madera en cualquier formato incrementa el porcentaje de valoración de la alta circularidad.

En los materiales livianos, se observa que el potencial circular alto se potencia fuertemente con el porcentaje

de potencial parcial del material generando una mayor oportunidad de mejorar la recuperación de estos materiales, al incorporar sistemas que favorezcan la recuperación de las partes del proyecto, En definitiva, (b) representa el potencial para maximizar la recuperación a través del diseño.

A pesar de las contribuciones del estudio, existen limitaciones, ya que se basó en apreciaciones cualitativas de los materiales a través de encuestas sin una especificación detallada de los factores considerados para evaluar la capacidad de recuperación de los elementos. Se sugiere que futuras investigaciones integren factores como ensambles y fijaciones en el modelado Revit para una evaluación más completa del potencial circular.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akanbi, L. A., Oyedele, L. O., Akinade, O.O., Ajayi, A. O., Dávila Delgado, M., Bilal, M., y Bello, S. A. (2018). Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 175-186. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.026>
- Calzolari, T., Genovese, A., y Brint, A. (2022) Circular Economy indicators for supply chains: A systematic literature review. *Environmental and Sustainability Indicators*, 13, 100160. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100160>
- Climent, A. (2021). Economía circular aplicada a la arquitectura espejismo o realidad. *Limaq*, 7(007), 29-71. <https://doi.org/10.26439/limaq2021.n007.5178>
- Corantioquia. (2022). Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible. *Negocios Verdes Crecim. Sosten.*, 33, pp. 820-830
- Dufrene, M., Zwolinski, P., y Brissaud, D. (2013). How the Integration of Environmental Concerns Modifies the Integrated Design Process. In: Abramovici, M., Stark, R. (eds) *Smart Product Engineering. Lecture Notes in Production Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 845-854. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30817-8_83
- Enshassi, A., Kochendoerfer B., y Rizq, E. (2014). An evaluation of environmental impacts of construction projects. *Revista Ingeniería de Construcción*, 29(3), 234-254. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732014000300002>
- Fernández, R., y Raposo, J. (2022). Economía circular y BIM. Optimización, sostenibilidad y construcción [Trabajo de Fin de Grado]. Universidad Politécnica de Madrid.
- Fiel, M. (2022). Sustainable and Eco-Effective Architecture: Pushing BIM Limits with a Cradle-to-Cradle Approach. *Aus*, (32), 12-19. <https://doi.org/10.4206/aus.2022.n32-03>
- Ghisellini, P., Ji, X., Liu, G., y Ulgiati, S. (2018). Evaluating the transition towards cleaner production in the construction and demolition sector of China: A review. *Journal of Cleaner Production*, 195, 418-434. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.084>

Jrade, A., y Jalaei, F. (2014). Integrating Building Information Modeling (BIM) and energy analysis tools with green building certification system to conceptually design sustainable buildings. *Journal of Information Technology in Construction*, 19, 494–519. <https://www.itcon.org/2014/29>

Mesa, J., Esparragoza, I., y Maury, H. (2018) Developing a set of sustainability indicators for product families based on the circular economy model. *Journal of Cleaner Production*, 196, 1429-1442. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.131>

Mercader Moyano, M., Camporeale, P. E., y Cózar-Cózar, E. (2019). Indicadores a Un Modelo Bim De Vivienda Social. *Hábitat Sustentable*, 9(2), 78–93. <https://doi.org/10.22320/07190700.2019.09.02.07>

Mora, D. (2021). Reciclaje y reutilización de materiales de construcción en Colombia como aporte a la economía circular [Tesis Ingeniería Civil]. Universidad de La Salle, Bogotá.

Niero, M., y Kalbar, P. P. (2019). Coupling material circularity indicators and life cycle based indicators: A proposal to advance the assessment of circular economy strategies at the product level. *Resources, Conservation and Recycling*, 140, 305-312. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.002>

Ossio, F. (2021). Políticas para la implementación de una estrategia circular en la construcción, cap. 6 en Propuestas para Chile. Concurso de Políticas Públicas, Centro de Políticas Públicas UC, Santiago.

Potting, J., Hekkert, M.P., Worrell, E., y Hanemaaijer, A. (2017). Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain. Technical Report

Prieto-Sandoval, V., Jaca-García, C., y Ormazabal-Goenaga, M. (2017). Economía circular: Relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación. *Memoria de Investigaciones en Ingeniería*, 15, 85-95. <https://hdl.handle.net/10171/53653>

Salehabadi, Z. M., y Ruparathna, R. (2022). User-centric sustainability assessment of single family detached homes (SFDH): A BIM-based methodological framework. *Journal of Building Engineering*, 50, 104139. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104139>

Zhang, K., y Jia, J. (2021). Promotion of the Application of BIM in China—A BIM-Based Model for Construction Material Recycling. *Recycling*, 6(1), 16. <https://doi.org/10.3390/recycling6010016>