

Indicadores para la evaluación de la sostenibilidad del parque edificatorio residencial en Colombia.
Caso de aplicación: Mosquera

Autora: Andrea Jorge Ortiz

Directoras: Marta Braulio Gonzalo

M^a Dolores Bovea Edo



UNIVERSITAT
JAUME•I

Tesis Doctoral
2024



Programa de doctorado en Tecnologías Industriales y Materiales

Escuela de Doctorado de la Universitat Jaume I

**Indicadores para la evaluación de la sostenibilidad
del parque edificatorio residencial en Colombia.
Caso de aplicación: Mosquera**

**Memoria presentada por Andrea Jorge Ortiz para optar al grado de doctor/a
por la Universitat Jaume I**

Doctoranda:

Andrea Jorge Ortiz

Directoras:

Marta Braulio Gonzalo

María Dolores Bovea Edo

Castelló de la Plana (España), octubre 2024

Financiación y proyectos

Durante la realización de la tesis, se ha contado con la financiación parcial y participación de estos proyectos de investigación:

- *“Medición de la sostenibilidad de soluciones constructivas de rehabilitación para edificación: indicadores, métricas y escalas de valoración”* (CIGE/2021/054.) Conselleria de Innovación, Universidades, Ciencia y Sociedad Digital, Generalitat Valenciana, España.
- *“Hacia una compra pública sostenible: Herramienta para la incorporación de criterios y su evaluación (SPPTOOL)”* (PID2021-124977OB-I00) financiado por “Subprograma Estatal de Generación de Conocimiento” del Ministerio de Ciencia e Innovación, España.
- *“Análisis de la sostenibilidad del ciclo de vida de sistemas de gestión de residuos en países en desarrollo: metodología y aplicación”* (UJI-A2018-11) Universitat Jaume I, España

LICENCE CC BY-NC-ND



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 4.0 International License. To view a copy of this license, visit

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Compendio de publicaciones JCR

Esta tesis doctoral se ha realizado a partir de un compendio de publicaciones en revistas científicas indexadas en el *Journal Citation Report* (JCR), que a continuación se relacionan:

- Jorge-Ortiz A, Braulio-Gonzalo M, Bovea MD (2023). **Assessing urban sustainability: a proposal for indicators, metrics and scoring-a case study in Colombia.** *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02554-6>
Journal Impact Factor: 4,080 (JCR), Q2
Publicado el 27 de julio del 2022 [Citado 2 veces (Scopus)]
- Braulio-Gonzalo M, Jorge-Ortiz A, Bovea MD (2022). **How are indicators in Green Building Rating Systems addressing sustainability dimensions and life cycle frameworks in residential buildings?** *Environmental Impact Assessment Review* 95: 106793.
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106793>
Journal Impact Factor: 6,122 (JCR), Q1
Publicado el 16 de abril del 2022 [Citado 29 veces (Scopus)]
- Jorge-Ortiz A, Braulio-Gonzalo M, Bovea MD (2023). **Exploring how waste management is being approached in green building rating systems: A case study.** *Waste Management and Research*, 41 (6) : 1121-1133. <https://doi.org/10.1177/0734242X221143952>
Journal Impact Factor: 4,432 (JCR), Q2
Publicado el 12 de enero de 2023 [Citado 3 veces (Scopus)]
- Jorge-Ortiz A, Braulio-Gonzalo M, Bovea MD (2024). **Caracterización del parque edificatorio residencial de los pisos térmicos frío y templado en Colombia.** *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 33, 234–251. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v33n1.103672>
Journal Impact Factor: 0,16 (SJR), Q4
Publicado el 1 de enero de 2024 [Citado 0 veces (Scopus)]
- Jorge-Ortiz A, Braulio-Gonzalo M, Bovea MD (2024). **Environmental and economic performance of the residential building stock: LCA|LCC tool and case study in Colombia.** *Building and Environment*
Journal Impact Factor: 7,1 (JCR), Q1
Enviado el 16 de agosto y en fase de revisión

Esta tesis ha sido aceptada por las coautoras de las publicaciones enumeradas anteriormente, que se han reservado el derecho de presentarlas como parte de otra tesis doctoral (Ver [Anexo](#)).

Otras publicaciones

Además de las publicaciones mencionadas que forman parte de la tesis doctoral, durante la realización de esta, la autora de la tesis ha sido miembro del grupo de trabajo de las siguientes publicaciones:

Artículos en revistas indexadas JCR:

- Braulio-Gonzalo M, Bovea MD, Jorge-Ortiz A, Juan P (2021). **Contribution of households' occupant profile in predictions of energy consumption in residential buildings: A statistical approach from Mediterranean survey data.** *Energy & Buildings* 241: 110939. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110939>
Journal Impact Factor: 5,879 (JCR), Q1
Publicado el 15 de junio de 2021 [Citado 18 veces (Scopus)]
- Braulio-Gonzalo M, Bovea MD, Jorge-Ortiz A, Juan P (2021). **Which is the best-fit response variable for modelling the energy consumption of households? An análisis based on survey data.** *Energy* 231: 120835. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120835>
Journal Impact Factor: 7,147 (JCR), Q1
Publicado el 15 de septiembre de 2021 [Citado 1 veces (Scopus)]

Comunicaciones en congresos:

- **Congreso 1:** Jorge-Ortiz A, Braulio-Gonzalo M, Bovea MD (2021) Indicadores de evaluación de la sostenibilidad de edificios y su relación con los módulos de información del ciclo de vida. *25th Congreso Internacional de Dirección e Ingeniería de Proyectos*. Alcoi, Spain. ISBN 9788409342280
- **Congreso 2:** Braulio-Gonzalo M, Bovea MD, Jorge-Ortiz A (2021) Indicadores de gestión de residuos en las herramientas de evaluación de la sostenibilidad a nivel urbano y de edificio. *IX Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*. Panamá, Panamá. ISBN 978-9962-698-80-7
- **Congreso 3:** Jorge-Ortiz A, Braulio-Gonzalo, Bovea MD (2022) Residential building stock characterization of Mosquera (Colombia) from urban level to construction assemblies. *26th International Congress on Project Management and Engineering*. Terrasa, Spain. ISBN 9788409445219
- **Congreso 4:** Jorge-Ortiz A, Braulio-Gonzalo M, Bovea MD (2022) Environmental impact assessment of the residential building sector: state of the art. *26th International Congress on Project Management and Engineering*. Terrasa, Spain. ISBN 9788409445219
- **Congreso 5:** Jorge-Ortiz A, Braulio-Gonzalo M, Bovea MD (2022) Diseño de herramienta para el análisis de ciclo de vida del parque edificatorio residencial. Caso de aplicación. *27th International Congress on Project Management and Engineering*. San Sebastian, Spain. ISBN 9788409554669

- **Congreso 6:** Marta Braulio Gonzalo; Andrea Jorge Ortiz; Maria D Bovea Edo Braulio-Gonzalo M, Jorge-Ortiz A, Bovea MD, Ibáñez-Forés V. Comparative Life Cycle Assessment of refurbishment alternatives for façade assemblies typically used in existing buildings in the Mediterranean region in Spain. *SBE2022 Sustainable built environments*. Thessaloniki, Greece
- **Congreso 7:** Marta Braulio Gonzalo; Andrea Jorge Ortiz; Maria D Bovea Edo Braulio-Gonzalo M, Jorge-Ortiz A, Bovea MD, Ibáñez-Forés V. Evaluación ambiental de los residuos de construcción y demolición generados en la rehabilitación de fachadas de edificios existentes. *X Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*. Castellón de La Plana, Spain. ISBN 978-84-09-53123-3

Agradecimientos

Le agradezco la realización de este trabajo a las profesoras Marta Braulio y Loles Bovea por el apoyo durante estos 6 años.

Al ángel que tengo en el cielo, que siempre me motivó para emprender este camino, le dedico la culminación de esta etapa.

Resumen

El sector de la edificación en Colombia es responsable del 35% de las emisiones de gases de efecto invernadero y estas se incrementan en una tasa anual del 1,8%. El mayor consumo de energía y generación de emisiones se da en las principales ciudades del país debido a los altos movimientos migratorios de las últimas décadas, que han conllevado un crecimiento urbano acelerado y una construcción rápida de vivienda de calidad constructiva comprometida. Como consecuencia, el entorno urbano construido y el parque edificatorio residencial presentan obsolescencia y no reúnen las características necesarias para asegurar un desarrollo urbano sostenible alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030. Esto impide que la población, especialmente con menores recursos, tenga garantizado el acceso a una vivienda digna que proporcione un adecuado confort a sus ocupantes y que tenga asociado un bajo impacto ambiental.

Con el fin de abordar esta problemática surge el objetivo principal de esta tesis doctoral, que es proponer un sistema de indicadores para evaluar la sostenibilidad del parque edificatorio residencial en Colombia, y que toma como caso de aplicación el municipio de Mosquera (Cundinamarca, Colombia), población de tamaño medio, caracterizada por un parque heterogéneo debido a la alta tasa de construcción informal, y representativa de la región del piso térmico templado y frío.

El análisis de la sostenibilidad se ha abordado para dos niveles diferentes, a escala urbana y a escala de edificio. El resultado principal de la tesis es el diseño de una herramienta de evaluación ambiental y socioeconómica del parque edificatorio residencial de Colombia, que integra ambas escalas de y que incluye información propia de la región templada y fría, además de estar alineada con las metodologías de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y de Coste de Ciclo de Vida (CCV).

La metodología seguida para el estudio consta de ocho etapas. La Etapa I consiste en la revisión del estado del arte. Las Etapas II y III abordan la escala urbana, de manera que en la Etapa II se realiza una revisión en profundidad de las herramientas existentes de evaluación de la sostenibilidad urbana en el panorama internacional y colombiano, y de sus indicadores, y en la Etapa III se desarrolla una propuesta de indicadores adaptados al contexto de Colombia, con sus métricas y representación gráfica y mapeada en un Sistema de Información Geográfica. El resto de las etapas de la metodología abordan la escala edificatoria. En la Etapa IV se revisan las herramientas de evaluación de la sostenibilidad de edificios y sus indicadores; y en la Etapa V se lleva a cabo un análisis detallado de los indicadores específicamente relacionados con la gestión de residuos. La Etapa VI plantea una metodología para la caracterización del parque edificatorio residencial de Colombia, obteniendo como resultado la taxonomía edificatoria del país, y la Etapa VII propone un catálogo de soluciones constructivas típicamente empleadas en la construcción de sus edificios. Finalmente, en la Etapa VIII se diseña y desarrolla la herramienta de evaluación de la sostenibilidad integrando las dos escalas, en soporte *Visual Basic for Applications* (VBA) de Microsoft Excel, con el fin de facilitar de forma intuitiva y en un entorno amigable la toma de decisiones a las partes interesadas.

El presente documento se estructura en ocho capítulos. El Capítulo I incluye la introducción, objetivos y metodología. Los Capítulos II, III, IV, V y VI recogen respectivamente el compendio de las cinco publicaciones que componen la tesis. El Capítulo VII presenta la discusión de los resultados. Finalmente, el Capítulo VIII expone las conclusiones y futuros desarrollos.

Summary

The building sector in Colombia is responsible for 35% of greenhouse gas emissions, and these are increasing at an annual rate of 1.8%. The highest energy consumption and emissions generation occur in the country's main cities due to the high migratory movements of recent decades, which have led to accelerated urban growth and the rapid construction of housing with compromised building quality. Consequently, the built urban environment and the residential building stock are becoming obsolete and do not meet the necessary characteristics to ensure sustainable urban development aligned with the Sustainable Development Goals of the 2030 Agenda. This prevents the population, especially those with fewer resources, from being guaranteed access to decent housing that provides adequate comfort for its occupants and has a low environmental impact.

To address this issue, the main objective of this doctoral thesis is to propose a system of indicators to evaluate the sustainability of the residential building stock in Colombia, with the case study being the municipality of Mosquera (Cundinamarca, Colombia), a medium-sized town characterised by a heterogeneous building stock due to the high rate of informal construction, and representative of the temperate and cold thermal floor region.

The sustainability analysis has been approached at two different levels: urban scale and building scale. The main result of the thesis is the design of an environmental and socio-economic evaluation tool for Colombia's residential building stock, which integrates both scales and includes specific information from the temperate and cold regions, as well as being aligned with Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Cost (LCC) methodologies.

The methodology followed for the study consists of eight stages. Stage I involves a review of the state of the art. Stages II and III address the urban scale, with Stage II providing an in-depth review of existing urban sustainability assessment tools in the international and Colombian contexts, and their indicators, while Stage III develops a set of indicators adapted to the Colombian context, with their metrics and graphical and mapped representation in a Geographic Information System. The remaining stages of the methodology address the building scale. Stage IV reviews the building sustainability assessment tools and their indicators; Stage V carries out a detailed analysis of the indicators specifically related to waste management. Stage VI proposes a methodology for the characterisation of Colombia's residential building stock, resulting in the country's building taxonomy, and Stage VII proposes a catalogue of typical construction solutions used in the construction of these buildings. Finally, Stage VIII designs and develops the sustainability assessment tool integrating the two scales, using Visual Basic for Applications (VBA) in Microsoft Excel, to intuitively facilitate decision-making for stakeholders in a user-friendly environment.

This document is structured into eight chapters. Chapter I includes the introduction, objectives, and methodology. Chapters II, III, IV, V, and VI respectively summarise the five publications that make up the thesis. Chapter VII presents a discussion of the results. Finally, Chapter VIII outlines the conclusions and future developments.

Resum

El sector de l'edificació a Colòmbia és responsable del 35% de les emissions de gasos d'efecte hivernacle i aquestes s'incrementen a una taxa anual de l'1,8%. El major consum d'energia i generació d'emissions es dona a les principals ciutats del país a causa dels alts moviments migratoris de les últimes dècades, que han comportat un creixement urbà accelerat i una construcció ràpida d'habitatges de qualitat constructiva compromesa. Com a conseqüència, l'entorn urbà construït i el parc edificatori residencial presenten obsolescència i no reuneixen les característiques necessàries per assegurar un desenvolupament urbà sostenible alineat amb els Objectius de Desenvolupament Sostenible de l'Agenda 2030. Això impedeix que la població, especialment amb menys recursos, tingui garantit l'accés a un habitatge digne que proporcioni un adequat confort als seus ocupants i que tingui associat un baix impacte ambiental.

Amb la finalitat d'abordar aquesta problemàtica, sorgeix l'objectiu principal d'aquesta tesi doctoral, que és proposar un sistema d'indicadors per a avaluar la sostenibilitat del parc edificatori residencial a Colòmbia, i que pren com a cas d'aplicació el municipi de Mosquera (Cundinamarca, Colòmbia), població de mida mitjana, caracteritzada per un parc heterogeni degut a la alta taxa de construcció informal, i representativa de la regió del pis tèrmic temperat i fred.

L'anàlisi de la sostenibilitat s'ha abordat per a dos nivells diferents, a escala urbana i a escala d'edifici. El resultat principal de la tesi és el disseny d'una eina d'avaluació ambiental i socioeconòmica del parc edificatori residencial de Colòmbia, que integra ambdues escales i que inclou informació pròpia de la regió temperada i freda, a més d'estar alineada amb les metodologies d'Anàlisi de Cicle de Vida (ACV) i de Cost de Cicle de Vida (CCV).

La metodologia seguida per a l'estudi consta de vuit etapes. L'Etapa I consisteix en la revisió de l'estat de l'art. Les Etapes II i III aborden l'escala urbana, de manera que en l'Etapa II es fa una revisió en profunditat de les eines existents d'avaluació de la sostenibilitat urbana en el panorama internacional i colombià, i dels seus indicadors, i en l'Etapa III es desenvolupa una proposta d'indicadors adaptats al context de Colòmbia, amb les seves mètriques i representació gràfica i mapejada en un Sistema d'Informació Geogràfica. La resta de les etapes de la metodologia aborden l'escala edificatòria. En l'Etapa IV es revisen les eines d'avaluació de la sostenibilitat d'edificis i els seus indicadors; i en l'Etapa V es duu a terme una anàlisi detallada dels indicadors específicament relacionats amb la gestió de residus. L'Etapa VI planteja una metodologia per a la caracterització del parc edificatori residencial de Colòmbia, obtenint com a resultat la taxonomia edificatòria del país, i l'Etapa VII proposa un catàleg de solucions constructives típicament emprades en la construcció dels seus edificis. Finalment, en l'Etapa VIII es dissenya i desenvolupa l'eina d'avaluació de la sostenibilitat integrant les dues escales, en suport Visual Basic for Applications (VBA) de Microsoft Excel, amb la finalitat de facilitar de forma intuïtiva i en un entorn amigable la presa de decisions a les parts interessades.

El present document s'estructura en vuit capítols. El Capítol I inclou la introducció, objectius i metodologia. Els Capítols II, III, IV, V i VI recullen respectivament el compendi de les cinc publicacions que componen la tesi. El Capítol VII presenta la discussió dels resultats. Finalment, el Capítol VIII exposa les conclusions i futurs desenvolupaments.

Índice

Capítulo I: Introducción	1
1. Contexto de la investigación	2
2. Estado del arte	3
2.1. Contexto de Colombia	3
2.2. Evaluación de la sostenibilidad a nivel urbano	5
2.3. Evaluación de la sostenibilidad a nivel edificatorio	7
2.3.1. Evaluación de la gestión de residuos asociados al ciclo de vida del edificio	9
2.4. Herramientas para la evaluación de la sostenibilidad del parque edificatorio	11
3. Objetivos	15
3.1. Objetivo general	15
3.2. Objetivos específicos	15
4. Metodología	15
5. Estructura de la tesis doctoral	18
6. Relación de la tesis con los ODS	20
7. Referencias	21
Capítulo II: Indicadores de sostenibilidad a nivel urbano	27
Abstract	28
Keywords	28
Highlights	28
1. Introduction	29
2. Methodology	31
3. Description of the case study: city of Mosquera.	33
4. Results from the application to the case study	34
4.1. Stage I. Selection of programmes about urban sustainability in the context of Colombia.	34
4.2. Stage II. Revision and cluster of indicators	36
4.3. Stage III. Definition of indicators and metrics	38
4.4. Stage IV. Definition of the scoring method of indicators	47
4.5. Stage V. Graphical representation of indicators	49
5. Discussion	52
6. Conclusions	53
7. References	54
Appendix A	58
Capítulo III: Indicadores de sostenibilidad a nivel de edificio. Herramientas de evaluación de la sostenibilidad	61
Abstract	62

Graphical abstract	63
Keywords	63
Highlights	63
1. Introduction	64
2. Methodology	67
3. Results	70
3.1. Phase I: Selection and review of GBRS indicators	70
3.2. Phase II: Clustering and analysis	73
Sustainability dimension	73
Information modules for the different stages of the life cycle of a building	75
Stages of the life cycle of the building construction process	77
4. Discussion	78
5. Conclusions and further research	81
6. References	82
Capítulo IV: Indicadores de sostenibilidad a nivel de edificio. Indicadores de evaluación relacionados con residuos	86
Abstract	87
Keywords	87
Highlights	87
1. Introduction	88
2. Method	90
3. Results and discussion	91
3.1. Phase I: Selection and review of GBRS indicators	91
3.2. Phase II: Cluster of indicators	94
3.2.1. According to the life cycle stage of the building	94
3.2.2. According to the strategies of the waste hierarchy	95
3.2.3. According to the stages of the waste management system	96
3.3. Phase III: Weighting analysis	98
3.4. Case study: Mosquera (Colombia)	99
3.4.1. Description of the case study	99
3.4.2. Indicators' evaluation	99
3.4.3. Proposal for improving	101
4. Conclusion	104
5. References	105
6. Appendix A	108
7. Supplementary Material	109
Capítulo V: Indicadores de sostenibilidad en edificios. Caracterización constructiva	116
Resumen	117
Palabras clave	117

Ideas destacadas _____	117
1. Introducción _____	118
2. Método _____	121
3. Niveles de caracterización _____	122
3.1. Nivel I: caracterización temporal _____	122
3.2. Nivel II: caracterización de vivienda _____	124
3.3. Nivel III: caracterización de soluciones constructivas _____	126
4. Resultados _____	131
4.1. Taxonomía edificatoria _____	131
4.2. Catálogo de soluciones constructivas _____	132
4.3. Estratificación socioeconómica _____	134
5. Conclusiones _____	135
6. Referencias _____	136
7. Material suplementario _____	139
Capítulo VI: Indicadores de sostenibilidad a nivel urbano y de edificio. Herramienta para la evaluación ambiental y económica del parque edificatorio _____	147
Abstract _____	148
Graphical Abstract _____	148
Keywords _____	148
Highlights _____	149
1. Introduction _____	150
2. Background _____	151
3. Materials and methodology _____	161
3.1. Selection of the building LCA LCC tool requirements _____	161
3.2. Database _____	162
3.2.1. Location database _____	162
3.2.2. Urban/Building database _____	163
3.2.3. Construction materials and processes database _____	163
3.2.4. Construction assemblies database _____	166
3.2.5. Maintenance and refurbishment database _____	168
3.2.6. Machinery database _____	168
3.3. Calculation method _____	170
3.3.1. Calculations for modules A1–A3 _____	170
3.3.2. Calculations for modules A4–A5 _____	171
3.3.3. Calculations for modules B1 _____	171
3.3.4. Calculations for modules B2–B5 _____	171
3.3.5. Calculations for modules B6–B9 _____	172
3.3.6. Calculations for modules C1–C4 _____	173
4. Results and discussion _____	174

4.1.	Building LCA LCC tool design _____	174
4.1.1.	Main menu _____	174
4.1.2.	Input data _____	175
4.1.3.	Output data: report _____	177
4.2.	Case study _____	178
4.2.1.	Description: a residential building in Mosquera (Colombia) _____	178
4.2.2.	Input data _____	179
4.2.3.	LCA LCC results _____	180
5.	Conclusion _____	182
6.	References _____	184
Capítulo VII: Resultados globales y Discusión _____		190
1.	Con relación al Objetivo 1. _____	191
1.1.	Etapa I: Revisión del estado del arte en relación con el parque edificatorio residencial. _____	191
2.	Con relación al Objetivo 2. _____	194
2.1.	Etapa II: Identificación de las herramientas de evaluación de la sostenibilidad a nivel urbano en el panorama internacional y análisis de la índole de los indicadores incluidos y cómo se relacionan estos con las dimensiones de la sostenibilidad. _____	194
2.2.	Etapa III: Propuesta de un sistema indicadores de evaluación de la sostenibilidad a nivel urbano y sus métricas. _____	194
3.	Con relación al Objetivo 3. _____	196
3.1.	Etapa IV: Identificación de las herramientas de evaluación de sostenibilidad en edificios (HESE) existentes en el panorama internacional y analizar la índole de los indicadores incluidos y cómo se relacionan estos con las dimensiones de la sostenibilidad y con el marco de análisis de ciclo de vida de los edificios. _____	196
3.2.	Etapa V: Análisis detallado de los indicadores incluidos en las HESE relacionados con la categoría de residuos, tanto a nivel urbano como a nivel edificatorio, y analizar la ponderación de importancia otorgada. _____	198
3.3.	Etapa VI: Caracterización del parque edificatorio residencial de Colombia integrando aspectos climáticos, socioeconómicos, temporales y arquitectónico-constructivos. _____	200
3.4.	Etapa VII: Elaboración de catálogo de soluciones constructivas del parque edificatorio residencial de Colombia con información ambiental y económica. _____	200
3.5.	Etapa VIII: Diseño de la herramienta de evaluación de la sostenibilidad ambiental y económica del parque edificatorio residencial aplicable al contexto de Colombia, que permita, a su vez, proponer estrategias de mejora. _____	201
4.	Con relación al Objetivo 4. _____	202
4.1.	Caso de aplicación I: Evaluación de la sostenibilidad urbana del municipio de Mosquera (Cundinamarca, Colombia) a través de una propuesta de indicadores y sus métricas. _____	204
4.2.	Caso de aplicación II: Evaluación de la gestión de residuos en una vivienda del municipio de Mosquera (Cundinamarca, Colombia). _____	205
4.3.	Caso de aplicación III: Evaluación de la sostenibilidad ambiental y económica de un edificio residencial del municipio de Mosquera (Cundinamarca, Colombia). _____	207
5.	Con relación al Objetivo 5. _____	207

6.	Referencias.	208
Capítulo VIII: Conclusiones y futuros desarrollos		209
1.	Conclusiones	210
2.	Futuros desarrollos	213
Anexo: Autorización coaturía		215

Índice de Figuras

Capítulo I

Figura I- 1. Zonas climáticas de Colombia.....4

Figura I- 2. Etapas del ciclo de vida de un edificio y sus módulos de información asociados (EN 15978, 2012).....8

Figura I- 3. Metodología empleada en el desarrollo de la tesis.....16

Figura I- 4. Estructura de la tesis.....19

Capítulo II

Figure II- 1. Methodoloy32

Figure II- 2. Localization of the case study (Mosquera, Cundinamarca, Colombia).....33

Figure II- 3. Contribution of each programme to the 14 categories analysed.....38

Figure II- 4. Metrics and graphical representation of indicators at the Mosquera level50

Figure II- 5. Metrics and graphical representation of indicators at the socioeconomic strata level ..51

Figure II- 6. Urban sustainability map of Mosquera per socioeconomic stratum (the numbers in circles represent the strata from 1 to 6)52

Capítulo III

Figure III- 1 Methodology68

Figure III- 2. World map for applicability of selected GBRS71

Figure III- 3. Identification of common aspects in GBRS indicators and counting73

Figure III- 4. Clustering: sustainability dimension74

Figure III- 5. Clustering: Information module according to EN 15978 (2011).....76

Figure III- 6. Clustering: stage of the life cycle of the building.....78

Figure III- 7. Sankey diagram showing connection flows among GBRS indicators.....79

Capítulo IV

Figure IV- 1. Indicators related to Waste management92

Figure IV- 2. Cluster of waste management indicators97

Figure IV- 3. Weighting analysis of waste management indicators by GBRS98

Figure IV- 4. Plan of the waste storage spaces in the building99

Figure IV- 5. Analysis by indicator of the case study (Baseline)101

Figure IV- 6. Results of the proposal for improvement. a) Percentage of compliance of the case study; b) Percentage of improvement of the case study in comparison to the baseline103

Capítulo V

Figura V- 1. Método propuesto.....	121
Figura V- 2. Caracterización temporal de la vivienda en Colombia.	124
Figura V- 3. Descripción gráfica del catálogo de soluciones para el periodo A5.....	133

Capítulo VI

Figure VI- 1. Research methodology.....	161
Figure VI- 2. Location database (according to Jorge-Ortiz et al. (2024))	163
Figure VI- 3. Building stock characterisation and code for the Colombian cold and temperate climate (according to Jorge-Ortiz et al. (2024))	163
Figure VI- 4. Building LCA LCC tool interface.....	175
Figure VI- 5. Building code formation (proposed in Jorge-Ortiz et al. (2024)).....	176
Figure VI- 6. Layout of the standard floor plan of the building	179
Figure VI- 7. BoM results and BoM impact for the whole building, by material group.....	182
Figure VI- 8. Total environmental impact by the building's life cycle stage (for the whole building)	182
Figure VI- 9. Environmental and economic impact for the product stage (A1–A3), by construction assembly	182

Capítulo VII

Figura VII- 1. Propuesto de representación gráfica de indicadores de sostenibilidad urbana	195
Figura VII- 2. Diseño conceptual de la herramienta de evaluación ACV CCV	202
Figura VII- 3. Relación de los casos de aplicación con las etapas de la metodología de la tesis.	202
Figura VII- 4. Descripción gráficas de los casos de aplicación I, II y III.	203
Figura VII- 5. Métricas y representación gráfica de indicadores urbanos del Estrato 3	204

Índice de tablas

Capítulo I

Tabla I- 1. Relación de la tesis con los ODS y sus metas	20
--	----

Capítulo II

Table II- 1. Climatic data of Mosquera	34
Table II- 2. Cluster of the indicators of the programmes into a common hierarchical structure of categories and subcategories	37
Table II- 3. Proposal of urban sustainability indicators for Colombia. Topic: Site & Biodiversity.....	40
Table II- 4. Proposal for urban sustainability indicators for Colombia. Topic: Infrastructure	41
Table II- 5. Proposal of urban sustainability indicators for Colombia. Urban metabolism	43
Table II- 6. Proposal of urban sustainability indicators for Colombia. Topic: Social.....	44
Table II- 7. Proposal of urban sustainability indicators for Colombia. Topic: Economic	45
Table II- 8. Proposal of urban sustainability indicators for Colombia. Topic: Institutional & Innovation	46
Table II- 9. Results of the metrics of the indicators	47
Table II- 10. Results of the scoring method for quantitative indicators implemented by strata in Mosquera, according to Sturges (1926) formula	58
Table II- 11. Reference values of Colombia for quantitative indicators implemented in the whole city of Mosquera	59
Table II- 12. Scoring method for qualitative indicators implemented in Mosquera	60

Capítulo III

Table III- 1. Descriptors of GBRS.....	71
Table III- 2. Indicator-related aspects.....	72
Table III- 3. Indicators not included within the EN 15978 boundary (clustered as X in Figure III.5) ...	77

Capítulo IV

Table IV- 1. GBRS indicators included in the category Waste and standardised nomenclature	93
Table IV- 2. Improvement strategies for the case study	102
Table IV A. 1. Non-quantifiable GBRS indicators.....	108
Table IV S1. BREEAM	109
Table IV S2. LEED.....	110
Table IV S3. CASBEE	111
Table IV S4. Green Star	112
Table IV S5. Green Globes.....	113
Table IV S6. DGNB	115

Capítulo V

Tabla V- 1. Revisión bibliográfica	127
Tabla V- 2. Codificación de los elementos constructivos	131
Tabla V- 3. Caracterización de vivienda.....	132
Tabla V- 4. Catálogo de soluciones constructivas	133
Tabla V- 5. Propuesta de estratificación.....	134
Tabla V- 6. Catálogo de soluciones constructivas empleadas en los pisos frío y templado de Colombia	139

Capítulo VI

Table VI- 1. Review of existing specific LCA and LCC software for buildings.....	154
Table VI- 2. Review on building LCA studies.	159
Table VI- 3. Construction materials.....	164
Table VI- 4. Example of building assemblies for each building element (excerpt from Jorge-Ortiz et al. (2024))	167
Table VI- 5. Maintenance and refurbishment alternatives	168
Table VI- 6. Transport and machinery data	169

Capítulo I: Introducción

1. Contexto de la investigación

De acuerdo con las Naciones Unidas, el 55% de la población mundial vive en los perímetros urbanos de las ciudades y se estima que para el 2050 este porcentaje aumente en un 13%. La mayor causa de la aglomeración de población en los núcleos urbanos es la migración de las áreas rurales a las urbanas, cuyo efecto se produce con mayor celeridad en las regiones de ingresos bajos y medios, como es Latinoamérica (ONU, 2018). Actualmente en Latinoamérica, el 81% de la población se encuentra en las áreas urbanizadas y, en el caso de Colombia, en el año 2018 el 71,8% de la población habitaba los centros urbanos (DANE, 2019). El aumento de la población implica contar con una gestión adecuada del urbanismo, especialmente en aspectos prioritarios como la vivienda, los servicios públicos y el transporte, entre otros (ONU, 2018).

El sector de la edificación alrededor del mundo contribuye en gran medida al impacto ambiental. En la Unión Europea (UE) los edificios consumen el 42% de energía y generan el 35% de los gases de efecto invernadero (GEI), en Estados Unidos emiten aproximadamente el 39% (Amini Toosi et al., 2020) y, de acuerdo con estadísticas en Colombia, las edificaciones en el país son responsables del 35% de las emisiones de GEI, y se estima que este porcentaje aumenta a una tasa anual equivalente de 1,8% (IDEAM et al., 2022). Definiendo la participación del sector residencial en el consumo energético, los principales consumos de energía se dan por refrigeración, televisión, iluminación y cocción. En las áreas urbanas los recursos energéticos más empleados son la electricidad y el gas natural, con participaciones del 55% y 35% respectivamente (también existe una pequeña participación del gas licuado del petróleo, GLP), mientras que, en zonas rurales, la leña sigue siendo el recurso energético más demandado (77%), seguido del GLP (14%) y de la electricidad.

El término Desarrollo Sostenible se define como la satisfacción de las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades (Brundtland, 1987) y surge para dar respuesta a la necesidad de avanzar y mejorar la calidad de vida de las personas y de evaluar y medir la sostenibilidad en sus tres dimensiones fundamentales: la ambiental, la social y la económica.

La definición de indicadores de evaluación de la sostenibilidad permite medir el impacto de las construcciones residenciales sobre el medio ambiente, la infraestructura y la calidad de vida de los habitantes. Además, los indicadores suponen una herramienta eficaz para garantizar una planificación urbana más eficiente y sostenible, permitiendo a las autoridades y a los desarrolladores tomar decisiones informadas que promuevan un desarrollo urbano equilibrado y resiliente, y monitorear el proceso. Sin estos indicadores, resulta difícil medir de forma objetiva y gestionar adecuadamente los efectos del crecimiento urbano, lo que podría llevar a problemas como la sobrepoblación, la congestión y el deterioro ambiental. En Colombia, la creciente urbanización y expansión del sector residencial han generado la necesidad urgente de desarrollar indicadores que analicen de manera integral los niveles urbanos y edificatorios en las ciudades.

Es por ello por lo que la presente tesis doctoral se enmarca en el ámbito de la evaluación de la sostenibilidad del parque edificatorio residencial mediante el desarrollo de indicadores y se contextualiza en Colombia, como caso de aplicación.

Este primer capítulo del documento tiene como objetivo revisar y actualizar el estado del arte en relación con la sostenibilidad del parque edificatorio residencial a nivel urbano y edificatorio, en el contexto internacional y específico de Colombia. Para ello, se analiza la bibliografía existente y actualizada hasta la fecha, para conocer la realidad del país para el que se desarrolla la investigación (Colombia) y conocer qué estudios, estrategias y acciones se están llevando a cabo en los dos niveles de análisis: el urbano y el edificatorio. Por otro lado, este capítulo plantea los objetivos de la investigación y define la metodología que se ha seguido para realizar el trabajo, finalizando con la presentación de la estructura que tiene el documento.

2. Estado del arte

En este apartado se revisa y actualiza la bibliografía científica en relación con la sostenibilidad del parque edificatorio residencial. En primer lugar, se describe la situación actual del país objeto de estudio, Colombia, y, a continuación, se analiza la literatura en los dos niveles de análisis: el urbano y el edificatorio.

2.1. Contexto de Colombia

En el año 2018 en Colombia, el 71,8% de la población vivía en los centros urbanos (DANE, 2019). Como ocurre en otras regiones de Latinoamérica, la mayor causa de la aglomeración de población en las ciudades es la migración de las áreas rurales a las urbanas, cuyo efecto se ve más acusado y se produce con mayor celeridad en las regiones de ingresos bajos y medios. Debido a este crecimiento urbano acelerado, el estado colombiano tuvo que intervenir y formular políticas que adaptaran las ciudades para que tuvieran la capacidad de satisfacer las necesidades de los habitantes, en tema de vivienda, salud, industria y educación, a lo que diferentes planificadores denominaron la “ciudad moderna” (Ramírez Ríos, 2011). Sin embargo, estas políticas fueron ineficaces debido a la falta de recursos para atender a la población que, incrementaba gradual y aceleradamente, haciendo que fuera difícil emplear un mecanismo de ordenamiento (DNP, 2017). Para ese entonces, el crecimiento de ciudades como Bogotá, Medellín y Cali era difícil de controlar, al igual que el crecimiento de viviendas en asentamientos informales ubicadas en las periferias de los centros urbanos (Valbuena et al., 2013) alterando los límites urbanos. Esta expansión incontrolada hizo que la calidad de vida de la población fuera en deterioro debido a los problemas relacionados con la vivienda que trajo consigo, como la variabilidad y deficiencia de la calidad de las edificaciones o la congestión vehicular. Todo ello también condicionado por las diferentes características socioeconómicas de la población.

Debido al deterioro de la calidad de vida en las principales ciudades, nuevamente se generó la migración de la población a los municipios aledaños a estas. No obstante, estos municipios no contaban con la calidad urbanística para proporcionar la adecuada calidad de vida, provocando un

hacinamiento y por tanto un déficit de vivienda (Galvis, 2015; Hernández Garzón, 2019). Como respuesta a disminuir este déficit de vivienda, nacieron una variedad de tipologías de vivienda y de calidades constructivas, dependiendo del nivel de ingresos en el hogar.

Por otro lado, Colombia es un país ubicado en la zona de convergencia intertropical (ZCIT), por lo que, debido a la convergencia de aire cálido y húmedo, se encuentra clasificado como un país tropical en el cual no existen estaciones. Sin embargo, debido a su vasta orografía marcada por el sistema de cordilleras (occidental, central y oriental), hace que exista una gran variedad de climas (Eslava, 1993), siendo este un factor determinante en la distribución de la precipitación, la nubosidad y la humedad, entre otras variables climatológicas, que pueden llegar a afectar a los edificios y viviendas.

A causa de esta gran variedad climática, el territorio de Colombia se ha clasificado en 8 zonas climáticas o pisos térmicos: cálido, desértico, árido, semiárido, semihúmedo, húmedo, templado y frío (IDEAM, 2011), que quedan mostrados de forma simplificada en la Figura I-1. El clasificar las regiones en estas zonas sirve para establecer la distribución espacial de la sociedad, dependiendo de los servicios ecosistémicos que cada una de zonas climáticas ofrece, además de poder regular la frecuencia de los fenómenos meteorológicos (IDEAM - UNAL, 2018).

El piso térmico cálido es el predominante en el país, aunque la mayor concentración de población y el mayor desarrollo se da en las regiones cuyo piso térmico es templado y frío (correspondiente a la región Andina), debido a la necesidad de un mayor confort térmico de la población y a la variedad de servicios ecosistémicos que existen en dichos climas (González Roza, 2010). Otra de las razones de que en estas regiones sean las más pobladas son los fenómenos demográficos de mediados de los años 50, marcados por la migración de población en el siglo XX desde diferentes regiones de la zona rural a las grandes ciudades, por desplazamiento forzado o búsqueda de oportunidades de empleo, entre otros factores (Flórez, 1995).

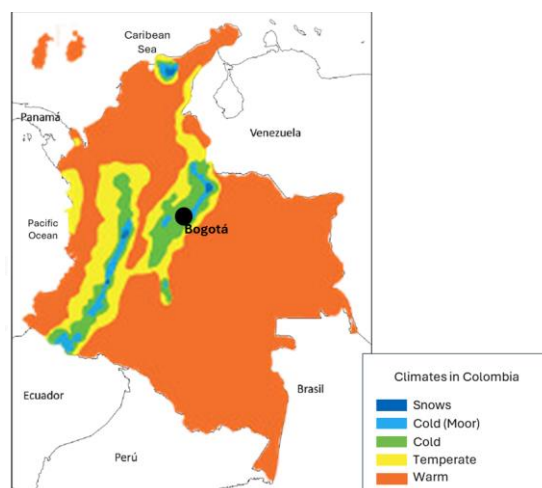


Figura I- 1. Zonas climáticas de Colombia

La variedad de climas en Colombia hace que las características constructivas y socioeconómicas de las viviendas también sean diversas a lo largo del país. Como consecuencia de esta variedad, el gobierno de Colombia formuló la metodología de estratificación socioeconómica (DANE, 2015), que clasifica a los hogares de los centros poblados dependiendo del nivel de ingresos y la calidad de vivienda, con el objetivo de gestionar adecuadamente el urbanismo. No obstante, para determinar el estrato socioeconómico al que corresponde cada vivienda, en dicha metodología solo se tienen en cuenta los materiales predominantes de cubierta, fachadas y paredes, cuya información y datos se recogen a partir de una encuesta multipropósito (DANE, 2018) realizada en los hogares sin importar aspectos clave como el clima o el año de construcción de las viviendas, generalizando así todas las zonas del país y también el hecho de incluir en un mismo estrato socioeconómico a todos los predios (parcelas) de una misma manzana urbana, sin considerar las diferencias que pueden presentar cada uno de ellos. Ello conlleva a que a algunas viviendas se les asigna un estrato relativamente más alto al que en realidad deberían tener (DANE, 2021), lo que dificulta el acceso de la población a los subsidios, especialmente a las personas residentes en Viviendas de Interés Social (VIS).

Por ello, resulta necesario tener conocimiento de la caracterización constructiva en detalle del parque edificatorio residencial de Colombia, aspecto que hasta la fecha se identifica como escasamente analizado en la literatura científica. Disponer de una taxonomía edificatoria que abarque todos los niveles de evaluación, desde el más global como es el urbano, pasando por el edificatorio, hasta la escala menor de caracterización de las soluciones constructivas que configuran los edificios, resulta clave como primer paso para llevar a cabo la evaluación de la sostenibilidad del entorno construido.

2.2. Evaluación de la sostenibilidad a nivel urbano

Para comprender la situación del sector edificatorio y de su parque residencial, es importante previamente conocer la influencia que tiene el entorno urbano sobre el mismo. Como se ha definido anteriormente, el Desarrollo Sostenible pretende abordar los desafíos globales como el clima y la degradación ambiental, la desigualdad y la pobreza, entre otros, para no dejar a nadie atrás y no comprometer a las generaciones futuras. Ello requiere disponer de instrumentos de evaluación y medición del nivel de sostenibilidad que, particularmente en el entorno urbano y construido, dicha evaluación pese a ser muy compleja por su amplio alcance, resulta clave ser abordada.

Para ello, en Colombia se han formulado estrategias normativas que se encuentran alineadas con tratados internacionales, como son el protocolo de Kioto (Corte Constitucional de Colombia, 2000) y el acuerdo de París 21 (Congreso de la República de Colombia, 2017). Dichas normativas están encabezadas por el CONPES 3918 (DNP, 2014) y por el Plan Nacional de desarrollo 2014-2018 (DNP, 2015) y dentro de sus objetivos principales está el de consolidar un sistema de ciudades en términos de sostenibilidad. Como resultado de estas políticas, las principales regiones como Bogotá y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá formularon sus propias políticas.

La política propuesta en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA-UPB, 2015) funciona como una herramienta para implementar la construcción sostenible en la región, en diferentes fases del ciclo de vida de los edificios y en condiciones de viabilidad económica y resiliencia, ecoeficiencia en el consumo de recursos naturales y bajo impacto en relación con el paisaje, la biodiversidad y la conectividad ecológica. Esta política trasciende la escala del edificio, influyendo también en el correcto desarrollo del espacio público, ofreciendo conocimientos para una planificación urbana sostenible.

La política de ecourbanismo y construcción sostenible de Bogotá (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2014) se diseñó para abordar el problema del cambio climático generado por la construcción y el entorno urbano, y se basó en diferentes avances de sostenibilidad de la ciudad y en estándares y normativas internacionales, como las herramientas de evaluación de la sostenibilidad urbana de referencia a nivel internacional, estas son: *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) desarrollado en Estados Unidos (USGBC, 2014), *Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology* (BREEAM) desarrollado en Reino Unido (BRE Global, 2016) o *Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency* (CASBEE) desarrollado en Japón (IBEC, 2007)).

Por otro lado, en la literatura científica existente hasta la fecha, se han identificado numerosos esfuerzos por medir el nivel de sostenibilidad en el ámbito urbano, sin embargo, estos esfuerzos se centran mayoritariamente en los países del mundo con mayores recursos, que sí disponen de herramientas específicamente diseñadas para tal efecto, mientras que estas herramientas en la región de Latinoamérica son todavía escasas (Peralta Arias, 2020)

Aun así, existen algunos estudios que analizan aspectos de la sostenibilidad urbana en Latinoamérica, y concretamente en Colombia, como son Carrillo-Rodríguez y Toca (2013), que diseñaron un índice de desempeño sostenible para la ciudad de Bogotá, o Gaviria (2013), quien propuso un conjunto de indicadores agrupados en cinco dimensiones (institucional, tecnología e innovación, económica, ambiental y social) para ayudar a las empresas del sector de la construcción en la toma de decisiones. Montoya et al. (2020) definieron un conjunto de trece indicadores de sostenibilidad para el caso específico de los asentamientos informales de Bogotá, los cuales fueron validados mediante su aplicación a dos casos de estudio. También en relación con los asentamientos informales, López Borbón (2016) identificó una serie de variables, parámetros e indicadores para evaluar su funcionamiento y perspectivas. Más recientemente, Mesa García (2021) propuso una metodología para la evaluación de seis criterios de sostenibilidad urbana (accesibilidad, conectividad, densidad, diversidad, etc.), específicamente para el municipio de Bucaramanga; pero estos abordaron únicamente aspectos morfológicos (forma urbana) y la metodología no es generalizable a otras ciudades o regiones similares del país.

A pesar de que existen estas iniciativas en Colombia, hasta la fecha no se ha desarrollado una metodología para establecer el nivel de sostenibilidad que permita establecer un conjunto de indicadores completos, claros y objetivos, capaces de evaluar la sostenibilidad de las áreas urbanas,

adaptados al contexto y a las especificidades de la región estudiada, y que abarquen las dimensiones de la sostenibilidad: ambiental, social, económica, e incluso también la institucional y la de innovación, que muchas veces queda fuera del alcance de evaluación pese a ser también relevante. Tampoco las metodologías desarrolladas hoy en día permiten evaluar escalas urbanas más pequeñas que la ciudad entera, como es la escala de distrito o de barrio o incluso asentamientos informales degradados en la periferia de la ciudad.

2.3. Evaluación de la sostenibilidad a nivel edificatorio

Teniendo en cuenta que una parte fundamental del metabolismo urbano lo constituyen los edificios, es importante analizar el nivel de sostenibilidad de estos. Se estima que en Europa al menos el 85% del parque edificatorio es obsoleto en términos energéticos y de confort para los ocupantes (COM662, 2020), generando así un alto consumo de energía y una alta generación de gases de efecto invernadero a la atmosfera. En Colombia se estima que la mayor parte del parque edificatorio existente en las principales ciudades fue construida antes del 2000 (CAMACOL, 2019), lo que denota también su obsolescencia.

Con el fin de cuantificar el impacto que generan los edificios diferentes organizaciones tanto privadas como gubernamentales, se han diseñado sistemas de indicadores.

Por un lado, las Herramientas de Evaluación de la Sostenibilidad de Edificios (HESE), con este fin, definen esquemas de aplicación voluntaria para evaluar los diferentes impactos asociados a los edificios, fundamentalmente desde el punto de vista ambiental, pero también desde el punto de vista social y económico, aunque estos se abordan en menor medida (Doan et al., 2017). En un principio, las HESE fueron concebidas para evaluar edificios de nueva construcción, sin embargo, debido al gran volumen de edificios existentes y al auge de la rehabilitación, muchas de ellas ya tienen esquemas específicos para edificios residenciales existentes, que incorporan indicadores específicos para abordar las intervenciones de rehabilitación y renovación de edificios. Las HESE proponen un sistema de indicadores de evaluación que se organizan en diferentes categorías, las cuales atienden a temáticas como energía, residuos, agua, transporte, condiciones de la parcela, etc. (Luangcharoenrat and Intrachooto, 2018).

Con carácter voluntario cada una de estas HESE suelen incorporar diferentes estándares de calificación y/o certificación, en los que normalmente se exige cumplir unos requisitos mínimos de desempeño en cada una de las categorías a evaluar. El nivel de sostenibilidad se obtiene, generalmente, mediante la obtención de puntos o créditos en cada una de las categorías, evaluando la acción generada con un impacto, como una reducción de impacto negativo y/o la generación de un impacto positivo en el ciclo de vida del edificio. Por ejemplo, la herramienta LEED (USGBC, 2020) para edificios califica por adición de puntos, al igual que BREEAM (BRE Global, 2016), ambas establecen un conjunto de prerrequisitos mínimos a cumplir para obtener cierto nivel de certificación. Sin embargo, la herramienta VERDE en España (GBCe, 2017) calcula el nivel de

calificación a partir de un método basado en los impactos evitados con relación a un edificio de referencia.

Estas herramientas suelen basar su método de evaluación en la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) según estándares internacionales (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006) y europeos (EN 15804, 2013; EN 15978, 2012). La norma EN 15978 plantea la evaluación del ciclo de vida completo del edificio según el principio de modularidad propuesto por la norma UNE-EN 15804 para los productos de construcción y para las Declaraciones Ambientales Producto (DAP). Ambas normas se organizan en módulos de información de ciclo de vida agrupados en las etapas del ciclo de vida: Producto (A1-A3), Construcción (A4-A5), Uso (B1-B7), Fin de vida (C1-C4) y Cargas más allá del sistema (D). Tal y como apunta la propia norma UNE-EN 15978, la etapa de uso del edificio se identifica como la que tiene un mayor impacto ambiental asociado (ver Figura I-2).

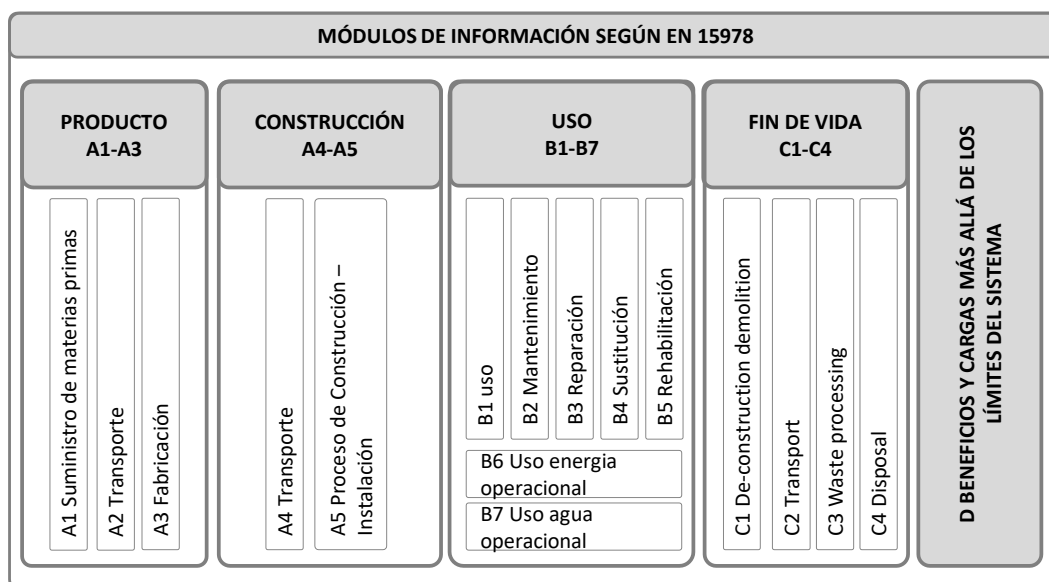


Figura I- 2. Etapas del ciclo de vida de un edificio y sus módulos de información asociados (EN 15978, 2012)

A nivel de Colombia, el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS) desarrolló una herramienta propia para el contexto del país para la evaluación de la sostenibilidad denominada CASA Colombia (CCCS, 2016), basada en la herramienta de referencia LEED (USGBC, 2020), también extendida y utilizada en el país. Sin embargo, CASA Colombia solo analiza el nivel de sostenibilidad en nuevas edificaciones, no abordando la evaluación de los edificios existentes ni tampoco posibles intervenciones de rehabilitación. En el año 2024 Colombia ocupó el tercer puesto a nivel de Latinoamérica en certificaciones LEED.

De este análisis puede concluirse que en Colombia son prácticamente nulas las iniciativas para evaluar nivel de sostenibilidad de los edificios existentes (CCCS, 2024), por lo que se identifica la necesidad de desarrollar herramientas con dicho objetivo y que además propongan alternativas de renovación, rehabilitación y mantenimiento, junto con información sobre su impacto ambiental y socio-económico.

Para ello, se requiere explorar en detalle cómo están planteadas las HESE, si en ellas se abordan de forma equitativa las tres dimensiones de la sostenibilidad (ambiental, social y económica), si los indicadores incluidos están alineados con el enfoque de ciclo de vida de la norma EN 15978, y en qué etapa del proceso edificatorio resulta clave actuar para mejorar el nivel de sostenibilidad de los edificios.

2.3.1. Evaluación de la gestión de residuos asociados al ciclo de vida del edificio

Dentro de los impactos ambientales asociados al sector de la edificación, la producción de residuos ocupa un lugar importante. De acuerdo con la Comisión Europea, en Europa los edificios son responsables del 30% de los residuos de demolición y construcción (RCD) que se generan (COM445, 2014) y, en Latinoamérica, concretamente en Colombia, estos datos ascienden al 40% (Tecnalia, 2017). Los RCD se generan principalmente en la etapa de construcción de los edificios y, en menor medida, durante la etapa de uso del edificio cuando se llevan a cabo actividades de rehabilitación y mantenimiento. Sin embargo, las actividades diarias de los ocupantes también generan residuos, catalogados como Residuos Sólidos Urbanos (RSU). Lopez-Yamunaqué and Iannacone (2021) indican que la gestión de ambas fracciones de residuos (RCD y RSU) debe integrarse en los análisis de ciclo de vida, de manera que puedan proponerse estrategias adecuadas para su valorización y contribuir así a aumentar el nivel de sostenibilidad de los edificios (García-Valerio and Adame Martínez, 2020).

Alrededor del mundo se han analizado diferentes estrategias para mitigar el impacto generado por los dos flujos de residuos, RCD y RSU, y el marco normativo para la gestión de residuos tanto de Europa como de Colombia ya promueven iniciativas para la priorización de la prevención, la minimización y la valorización, frente a la disposición final. En Europa, la gestión de residuos está regulada por las Directivas 2008/98/CE (Parlamento Europeo, 2008) y 2018/851/UE (Parlamento Europeo, 2018). En Colombia, la Resolución 0472/2017 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017) establece directrices para la gestión de los RCD alineadas con la normativa europea.

Diversos estudios han analizado indicadores de gestión de residuos. Turcott Cervantes et al. (2018) identificaron los indicadores de evaluación de los sistemas de gestión de RSU propuestos en el periodo 1980-2018 y los clasificaron en función de la etapa del sistema a la que afectan, concluyendo que, en su mayoría, están vinculados a la etapa de recogida, seguida de la valorización y el tratamiento y, por último, la eliminación. En cuanto a los sistemas de gestión de RCD, Menegaki y Damigos (2018) identificaron un conjunto de factores que tienen efectos tanto positivos como negativos en la generación y gestión eficiente de esta fracción de residuos, así como la correlación estadística entre ellos. Concluyeron que factores como la falta de legislación específica sobre RCD, el incumplimiento de la legislación o la ausencia de buenas prácticas, entre otros, influyen negativamente en la generación de RCD. Shi y Xu (2021) subrayaron la necesidad de desarrollar indicadores que tengan en cuenta la distancia al sitio de disposición final y el potencial de reciclaje. Wang et al. (2014) identificaron factores clave a incluir en la fase de diseño de los edificios, para reducir la generación de residuos. Desde una perspectiva técnica, el uso de componentes

prefabricados, el fomento de diseños modulares o la reducción de modificaciones en el diseño durante la obra, entre otros. Desde una perspectiva burocrática, el impulso de la inversión en reducción de residuos o la promoción de incentivos económicos.

En general, en la literatura revisada, los indicadores encontrados tienen un enfoque *top-down* (de arriba abajo) y suelen evaluarse con datos macroeconómicos sobre el país o la región en la que se aplican, lo que no aporta una visión *bottom-up* (abajo arriba) más detallada de las estrategias que pueden aplicarse a nivel de edificio y de usuario.

Por otro lado, las herramientas de evaluación de la sostenibilidad de edificios (HESE), como se ha apuntado anteriormente, incluyen un conjunto de categorías que evalúan los diferentes aspectos e impactos asociados al ciclo de vida de los edificios. La categoría de residuos es una de las categorías que habitualmente incluyen las HESE, y en ella también se proponen determinados indicadores para evaluar el impacto que los residuos asociados a la edificación tienen en el medio ambiente. Sin embargo, como se extrae de la literatura, el papel de los indicadores de evaluación de la gestión de residuos, tanto RCD como RSU, dentro de las HESE, es mínimo (Varma y Palaniappan, 2019), ya que esta categoría es de las que menor presencia tiene en las herramientas, solo representando un peso entre el 2,7% y el 14,7% de la puntuación total del sistema. Wu et al. (2016) analizó el objetivo que se buscaba en los principales indicadores concluyendo que estos se orientan a cumplir los principios de las 3R (reducir, reutilizar y reciclar) y que se vinculan mayoritariamente con las estrategias de reutilización y reciclaje, dejando de lado las estrategias de reducción, que es la primera que debería priorizarse, según la jerarquía de residuos establecida por la Directiva 2008/98/CE (Parlamento Europeo, 2008).

Finalmente, y analizando el contexto normativo relativo a este aspecto, la norma EN 15978 (2012), que evalúa el impacto ambiental de los edificios a lo largo de su ciclo de vida y en los diferentes módulos de información, tiene en cuenta los RCD generados tanto en las etapas del proceso de construcción en instalación (módulos A4-A5), uso (módulos B2-B5, relacionados con las actividades de mantenimiento, reparación, sustitución y rehabilitación, respectivamente), y fin de vida (módulos C1-C4, relacionados con el derribo, reutilización y reciclaje, y eliminación final). En cambio, los RSU quedan fuera del alcance de la norma EN 15978 (2012), no siendo contemplados en la etapa de uso, que es cuando los generan los ocupantes durante sus actividades diarias, mientras que sí se considera el consumo de energía y de agua en esta etapa de uso. En línea con esta carencia identificada, cabe indicar que sí hay esfuerzos en la literatura por incluir el impacto de los RSU en el ciclo de vida del edificio, como es el caso del proyecto *EeBGuide Project* (Gantner et al., 2015), en el marco del cual se propone un módulo adicional a la norma, B8, para evaluar dicho impacto.

De este análisis, surgen diversas cuestiones por explorar relativas a la gestión de los RCD y los RSU y qué estrategias implementar para mejorar este aspecto a lo largo del ciclo de vida de los edificios, para lo que resulta necesario realizar un análisis en profundidad para identificar cuántos y qué tipo de indicadores existen en las herramientas HESE para evaluar la gestión de residuos, qué aspectos evalúan exactamente y qué peso adoptan en las herramientas.

2.4. Herramientas para la evaluación de la sostenibilidad del parque edificatorio

La obsolescencia del parque edificatorio actual es una realidad a nivel mundial que compromete seriamente las necesidades de confort de los ocupantes (European Commission, 2022). Buitelaar et al. (2021) destacaron como principales causas de la obsolescencia el desgaste natural de los materiales y la falta de mantenimiento de los edificios, lo que contribuye a un rápido deterioro, reduciendo la calidad de vida de los ocupantes.

Debido a este problema global, se han formulado políticas para promover el aumento de la eficiencia energética en los edificios existentes mediante la rehabilitación. En la UE, COM 662 (2020) instó a una tasa anual de renovación del 3% con el objetivo de reducir la demanda de energía para calefacción y refrigeración, disminuir las emisiones de GEI y extender la vida útil de los edificios. Sin embargo, para que esto sea realmente efectivo, deben llevarse a cabo reformas integrales. En Colombia, la rehabilitación de edificios es una iniciativa sobre la que todavía no se ha puesto el foco, pues no existe legislación que obligue a la rehabilitación de edificios.

Sin embargo, antes de implementar estrategias de rehabilitación en el parque de edificios existente para minimizar su impacto ambiental, es crucial conocer el comportamiento de los edificios en su estado actual para poder modelar diferentes alternativas y tomar decisiones fundamentadas. Para esto, la metodología ACV (ISO 14040, 2006) proporciona un marco consolidado y ampliamente reconocido por la comunidad científica que. Específicamente para los edificios, como ya se ha apuntado, se concreta mediante la norma EN 15978 (2012), basada también el principio de modularidad propuesto por la norma EN 15804 (2013). La dimensión económica también es fundamental y debe considerarse como un factor decisivo en el diseño y renovación de edificios a lo largo de toda la cadena de valor de la construcción. La metodología del Coste del Ciclo de Vida (CCV) (ISO 15686-5, 2017) ofrece un marco estructurado que se alinea con el enfoque de ciclo de vida para llevar a cabo una evaluación económica sistemática del ciclo de vida de un edificio.

Con el objetivo de conocer en el panorama internacional qué herramientas existen para evaluar ambiental y económicamente los edificios y analizar sus características, se ha llevado a cabo una doble búsqueda bibliográfica. Por un lado, se ha identificado el software comercial existente y, por otro, se ha identificado en la literatura estudios que desarrollan metodologías o herramientas propias para realizar estos estudios.

En relación con el software comercial para realizar estudios de ACV y CCV, existen herramientas muy conocidas que permiten la evaluación de diferentes productos, procesos y sistemas, como SimaPro (Prè Consultants, 2016), GaBi (Sphera, 2021) y OpenLCA (GreenDelta, 2021). Sin embargo, estas herramientas no están específicamente desarrolladas y adaptadas a la casuística de evaluación de edificios, que suponen sistemas complejos (Hollberg et al., 2021). En el sector de la construcción, se identificaron 13 herramientas comerciales, estas son: Athena (Athena Sustainable Materials Institute, 2022), Tally (KTINNOVATIONS, 2014), eToolLCD (eTool, 2016), LCAQuick (BRANZ, 2022), COMFIE-PLIADAS (IZUBA, 2019), OneClickLCA (One Click LCA, 2021), ALCYONE y NovaEQUER (IZUBA,

n.d.) TOTEM (OVAM et al., 2024), cove.tool (Pattern r+d, 2024), BHoM (Building transparency, 2024a), EC3 (Building transparency, 2024b), y EPIC (EHDD, 2024). De análisis de las herramientas se extraen las siguientes conclusiones:

- Todos los softwares permiten analizar el comportamiento ambiental de los edificios, pero solamente Athena, Tally y TOTEM analizan también conjuntamente el rendimiento económico.
- Los países con mayor número de herramientas son los Estados Unidos y los países europeos, siendo inexistentes herramientas desarrolladas para la región de Latinoamérica.
- La mayoría de las herramientas analizan los impactos producidos durante todo el ciclo de vida de los edificios, pero otorgan más importancia a las etapas de producto, construcción y fin de vida, analizando solo parcialmente las etapas de uso, especialmente el consumo de energía.
- En la etapa de uso, solo la mitad de las herramientas abordan el mantenimiento y las posibles rehabilitaciones del edificio durante su vida útil, actividades con un impacto considerable previsible, dada la larga vida útil de los edificios.
- La fase de uso se evalúa normalmente a través de información sobre el consumo de energía y agua durante el funcionamiento del edificio, pero pocas tienen en cuenta estos consumos durante la fase de construcción.
- Raramente se considera el transporte y las distancias de los materiales y productos desde las empresas fabricantes hasta la obra.
- Para calcular el impacto medioambiental, las herramientas utilizan principalmente DAP y Ecoinvent (Ecoinvent, 2020), solo Athena y eToolLCD integran su propia base de datos, mientras que Tally y EC3 utilizan bases de datos GaBi (Sphera, 2021).
- Muy pocas herramientas proponen datos por defecto para facilitar la introducción de datos al usuario (Athena, eToolLCD y COMFIE-PLIADAS) y sólo dos permiten adaptar la base de datos a las especificidades constructivas del contexto regional (eTool y OneClickLCA).
- La mayoría utilizan método de evaluación del impacto ambiental del ciclo de vida de punto medio, siendo TRACI (BARE, 2011) y CML (Leiden University, 2016) los más utilizados.
- El impacto económico mediante el CCV sólo lo abordan Athena, Tally y TOTEM, que incluyen datos de costes de materiales y procesos o indicadores monetizados multiplicando por un factor de monetización de las emisiones de carbono.
- Los resultados son mostrados generalmente tanto de forma gráfica como numérica en tablas, y también desglosados en por etapa del ciclo de vida (A1-A3, A4-A5, B1-B7, C1-C4) y o por categoría de impacto (calentamiento global, acidificación, etc.). Sin embargo, el impacto del ciclo de vida del edificio suele mostrarse como un todo, y pocas herramientas pueden desglosar los resultados por elemento del edificio o por grupo de material.
- Solamente OneClickLCA ofrece escenarios de mejora para operaciones de mantenimiento, medidas de renovación, etc.

- La mayoría de las herramientas pueden importar o exportar a otros formatos mediante *plugins* (BIM, hoja de cálculo, etc.) para transferir datos a software con otras funcionalidades, excepto Athena, TOTEM y EC3.

Como se observa, en general estas herramientas presentan limitaciones, entre las cuales destaca que las bases de datos de inventario incluidas no son aplicables de forma directa a cualquier región del mundo, con lo que los resultados no se ajustan a la realidad del contexto geográfico y socioeconómico de la región objeto de estudio.

En cuanto a los estudios existentes en la literatura, en la última década se han desarrollado al menos 21 trabajos cuyo objetivo es diseñar una herramienta o metodología que evalúe los edificios. Del análisis de estos estudios se concluye lo siguiente:

- Se puede observar que la mayoría de las herramientas se han diseñado principalmente para edificios residenciales, tanto para tipologías plurifamiliares como unifamiliares, y solo unas pocas evalúan también el impacto de los edificios a escala urbana o de barrio (Famiglietti et al., 2022; Llatas et al., 2021; Trigaux et al., 2017).
- Por lo que respecta a las etapas del ciclo de vida incluidas en la evaluación, solo Säwén et al. (2022), Tecchio et al. (2019) y Trigaux et al. (2017) adoptan un enfoque real integral que incluye producto, construcción, uso y fin de vida. La mitad de las herramientas evalúan los impactos en la fase de producto (A1-A3), seguida de las actividades de construcción (A4-A5), el uso de energía durante el funcionamiento (B6) y la fase EoL (C1-C4). En menor medida, se evalúa el impacto relacionado con las emisiones interiores de los materiales en el interior del edificio (B1), los escenarios de mantenimiento, reparación, sustitución y rehabilitación (B2-B5) y el consumo de agua (B7). Ninguna de las herramientas incluye el impacto derivado del estilo de vida de los ocupantes durante la fase de uso.
- En cuanto a la metodología de evaluación utilizada, en general las herramientas siguen la metodología de ACV y emplea la base de datos Ecoinvent (2020), seguida de la base de datos Athena (2022), GaBi (2021) e IPPC 2013. En menor medida se utilizan DAPs y bases de datos específicas adaptadas al contexto geográfico (Llatas et al., (2021), Kanafani et al. (2021)).
- Entre las categorías de impacto, destaca el calentamiento global.
- Los elementos más abordados en la evaluación son las fachadas, las ventanas, la estructura y las cubiertas.
- Solo el 30% de las herramientas tiene realiza la evaluación económica (Apostolopoulos et al., 2023; Arbulu et al., 2023; Basbagill et al., 2014; Famiglietti et al., 2022; Hester et al., 2018; Kanafani et al., 2021; Rodrigues et al., 2018; Trigaux et al., 2017), utilizando generalmente el euro (€) para la monetización de los costes.
- En cuanto a los cálculos, predominan las ecuaciones matemáticas, pero también se utilizan con frecuencia otros lenguajes informáticos, como Python, C# y BAIA.
- En cuanto a los datos de entrada, por lo general se incluye la ubicación, la zona climática, el tipo de edificio y su geometría, los elementos constructivos, el tipo de materiales que

componen el edificio junto con las cantidades, el consumo energético operativo y, en menor medida, el transporte, las actividades de construcción, la orientación solar, la superficie total, el equipamiento eléctrico, el grosor de los elementos constructivos y los datos de costes.

- Se observa que entre las herramientas obvian información urbana del entorno del edificio.
- En cuanto a los datos de salida, todas las herramientas presentan los resultados en gráficos de barras y tablas, y en menor proporción mediante *Key Performance Indicators* (KPI). Normalmente, los resultados se presentan en términos de impacto total y también divididos en etapas del ciclo de vida.

Además de los estudios analizados, cabe mencionar el proyecto EeBGuide (Gantner et al., 2015) que establece una metodología común basada en las normas ISO 14040, EN 15804 y EN 15978 para facilitar la realización de ACV en edificios a personal experto, tanto de organizaciones privadas como públicas, y propone dos módulos de ciclo de vida adicionales y no incluidos en las normas mencionadas, siendo:

- Uso (B8): para la gestión de los residuos sólidos urbanos (RSU) generados por los ocupantes del edificio durante la fase de uso, y
- Uso (B9): para la movilidad y el transporte de los ocupantes para las actividades diarias y laborales.

Ninguno de estos módulos se incluyó en los estudios revisados.

En el contexto de Colombia, existen pocos estudios que analicen el ciclo de vida de los edificios, siendo los más destacados los realizados por González Velandia et al. (2019) y Ortiz-Rodríguez et al. (2010). Estos estudios utilizan herramientas genéricas como SimaPro (Prè Consultants, 2016), ya que hasta la fecha no se ha desarrollado una herramienta específica para el país que considere las particularidades de las técnicas de construcción, los materiales típicos del país y el contexto geográfico y socioeconómico.

Teniendo en cuenta la actualización del estado del arte hasta la fecha, se puede extraer, por un lado, que una herramienta de evaluación ambiental y económica del ciclo de vida integral debe responder a las especificidades del contexto de la región donde se aplica y debe integrar datos precisos y contrastados para ofrecer resultados fundamentados y contrastados. Por otro lado, que hasta la fecha no se ha desarrollado una herramienta específica para el contexto colombiano que permita evaluar tanto el comportamiento ambiental como económico del parque edificatorio residencial.

Para superar esta brecha, se requiere avanzar en el desarrollo de una herramienta de evaluación de edificios nuevos y existentes, basada en las metodologías ACV y CCV, con enfoque de ciclo de vida, adaptada al contexto específico del parque edificatorio residencial de Colombia, y que permita calcular el desempeño ambiental y económico de los edificios de una manera intuitiva y amigable. Para ello será necesario definir qué requerimientos debe reunir la herramienta para que sea un instrumento útil de evaluación para las partes implicadas en el proceso de construcción, como

diseñadores (arquitectos e ingenieros), contratistas y administración pública (gobierno, autoridades regionales y locales, etc.).

3. Objetivos

A partir de la situación actual de la sostenibilidad del contexto urbano y del parque edificatorio residencial en Colombia, se establece el objetivo general de la investigación y los objetivos específicos a alcanzar.

3.1. Objetivo general

El objetivo de la tesis es evaluar el nivel de sostenibilidad del parque edificatorio residencial en Colombia, tomando como caso de estudio el municipio de Mosquera, ubicado en el Departamento de Cundinamarca.

3.2. Objetivos específicos

Con el fin de alcanzar el objetivo general anterior, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- **Objetivo 1.** Revisar y actualizar el estado del arte en relación con la sostenibilidad del parque edificatorio residencial a nivel urbano y edificatorio, en el contexto internacional y específico de Colombia.
- **Objetivo 2.** Proponer una metodología de evaluación de la sostenibilidad urbana aplicable al contexto de Colombia.
- **Objetivo 3.** Diseñar una herramienta de evaluación de la sostenibilidad ambiental y económica del parque edificatorio residencial aplicable al contexto de Colombia.
- **Objetivo 4.** Validar cada una de las metodologías y herramienta propuestas a través de casos de aplicación en el contexto de Colombia.
- **Objetivo 5.** Difusión de los resultados de investigación.

4. Metodología

La metodología seguida para llevar a cabo la investigación consistió en diferentes fases, lo que permite tener una perspectiva amplia y rigurosa de los diferentes niveles de análisis: el urbano y el edificatorio. La Figura I-3 presenta gráficamente la metodología en sus etapas y relaciona cada una de ellas con los objetivos específicos planteados.

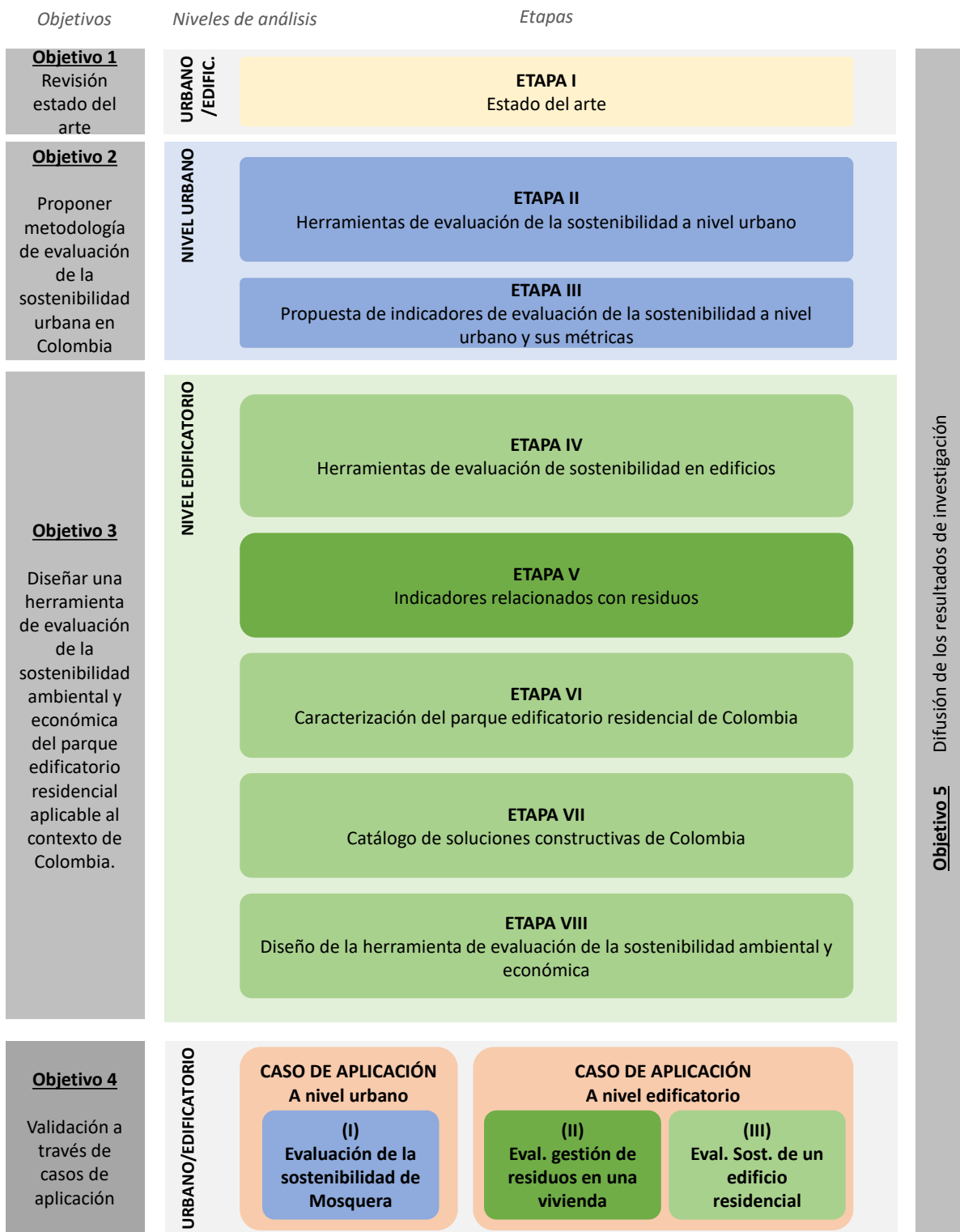


Figura I- 3. Metodología empleada en el desarrollo de la tesis

A continuación, se detalla cada etapa de la metodología y su relación con los objetivos.

Objetivo 1. Revisar y actualizar el estado del arte en relación con la sostenibilidad del parque edificatorio residencial a nivel urbano y edificatorio, en el contexto internacional y específico de Colombia.

- **Etapa I:** Revisión del estado del arte en relación con el parque edificatorio residencial.

Objetivo 2. Proponer una metodología de evaluación de la sostenibilidad urbana aplicable al contexto de Colombia.

- **Etapa II:** Identificación de las herramientas de evaluación de la sostenibilidad a nivel urbano en el panorama internacional y análisis de la índole de los indicadores incluidos y cómo se relacionan estos con las dimensiones de la sostenibilidad.
- **Etapa III:** Propuesta de un sistema indicadores de evaluación de la sostenibilidad a nivel urbano y sus métricas.

Objetivo 3. Diseñar una herramienta de evaluación de la sostenibilidad ambiental y económica del parque edificatorio residencial aplicable al contexto de Colombia.

- **Etapa IV:** Identificación de las herramientas de evaluación de sostenibilidad en edificios (HESE) existentes en el panorama internacional y analizar la índole de los indicadores incluidos y cómo se relacionan estos con las dimensiones de la sostenibilidad y con el marco de análisis de ciclo de vida de los edificios.
- **Etapa V:** Análisis detallado de los indicadores incluidos en las HESE relacionados con la categoría de residuos, tanto a nivel urbano como a nivel edificatorio, y analizar la ponderación de importancia otorgada.
- **Etapa VI:** Caracterización del parque edificatorio residencial de Colombia integrando aspectos climáticos, socioeconómicos, temporales y arquitectónico-constructivos.
- **Etapa VII:** Elaboración de catálogo de soluciones constructivas del parque edificatorio residencial de Colombia con información ambiental y económica.
- **Etapa VIII:** Diseño de la herramienta de evaluación de la sostenibilidad ambiental y económica del parque edificatorio residencial aplicable al contexto de Colombia, que permita, a su vez, proponer estrategias de mejora.

Objetivo 4. Validar cada una de las metodologías y herramienta propuestas a través de casos de aplicación en el contexto de Colombia.

- **Caso de aplicación I:** Evaluación de la sostenibilidad urbana del municipio de Mosquera (Cundinamarca, Colombia) a través de una propuesta de indicadores y sus métricas.
- **Caso de aplicación II:** Evaluación de la gestión de residuos en una vivienda del municipio de Mosquera (Cundinamarca, Colombia).
- **Caso de aplicación III:** Evaluación de la sostenibilidad ambiental y económica de un edificio residencial del municipio de Mosquera (Cundinamarca, Colombia).

Objetivo 5. Difusión de los resultados de investigación.

5. Estructura de la tesis doctoral

Teniendo en cuenta lo anterior, la tesis se ha estructurado en los ocho capítulos siguientes:

- **Capítulo I: Introducción.** Presenta la revisión y actualización del estado del arte que contribuye a justificar la tesis, presenta el contexto de la investigación y la realidad de Colombia, y plantea los objetivos del trabajo y la metodología.
- **Capítulo II: Artículo 1.** Presenta la propuesta del sistema de indicadores para evaluar el nivel de sostenibilidad a nivel urbano, en ciudades y municipios de Colombia.
- **Capítulo III: Artículo 2.** Presenta el estado del arte de 8 Herramientas de Evaluación de Sostenibilidad en Edificios (HESE) utilizadas internacionalmente y su sistema de indicadores, analizados desde el punto de vista de categorías, etapas del ciclo de vida y módulos de información descritos en la norma EN 15978 (2012).
- **Capítulo IV: Artículo 3.** A partir de la revisión realizada en el artículo 2 se desprende la necesidad de evaluar detalladamente cada uno de los indicadores que componen específicamente la categoría de residuos, así como las estrategias que deberían incluirse en los edificios para mejorar su nivel de sostenibilidad en este sentido.
- **Capítulo V: Artículo 4.** Presenta una metodología de caracterización constructiva del parque edificatorio residencial, nuevo y existente, en ciudades y municipios de Colombia, de los pisos térmicos frío y templado. Dicha caracterización permite obtener un catálogo de soluciones constructivas típicamente utilizadas en los edificios, según su periodo de construcción de acuerdo con la evolución histórico-constructiva del país.
- **Capítulo VI: Artículo 5.** Presenta el diseño de una herramienta de análisis de ciclo de vida desarrollada para evaluar el impacto ambiental y económico del parque edificatorio residencial nuevo y existentes ubicado en los pisos frío y templado de Colombia.
- **Capítulo VII: Discusión de los resultados.** Presenta los resultados obtenidos en las diferentes etapas de la metodología con su discusión.
- **Capítulo VIII: Conclusiones y futuros desarrollos.** Destaca las principales conclusiones obtenidas en la tesis doctoral y define líneas de trabajo a futuro.

La Figura I-4 muestra la relación entre los capítulos, los objetivos de la tesis y las publicaciones derivadas (artículos y congresos).

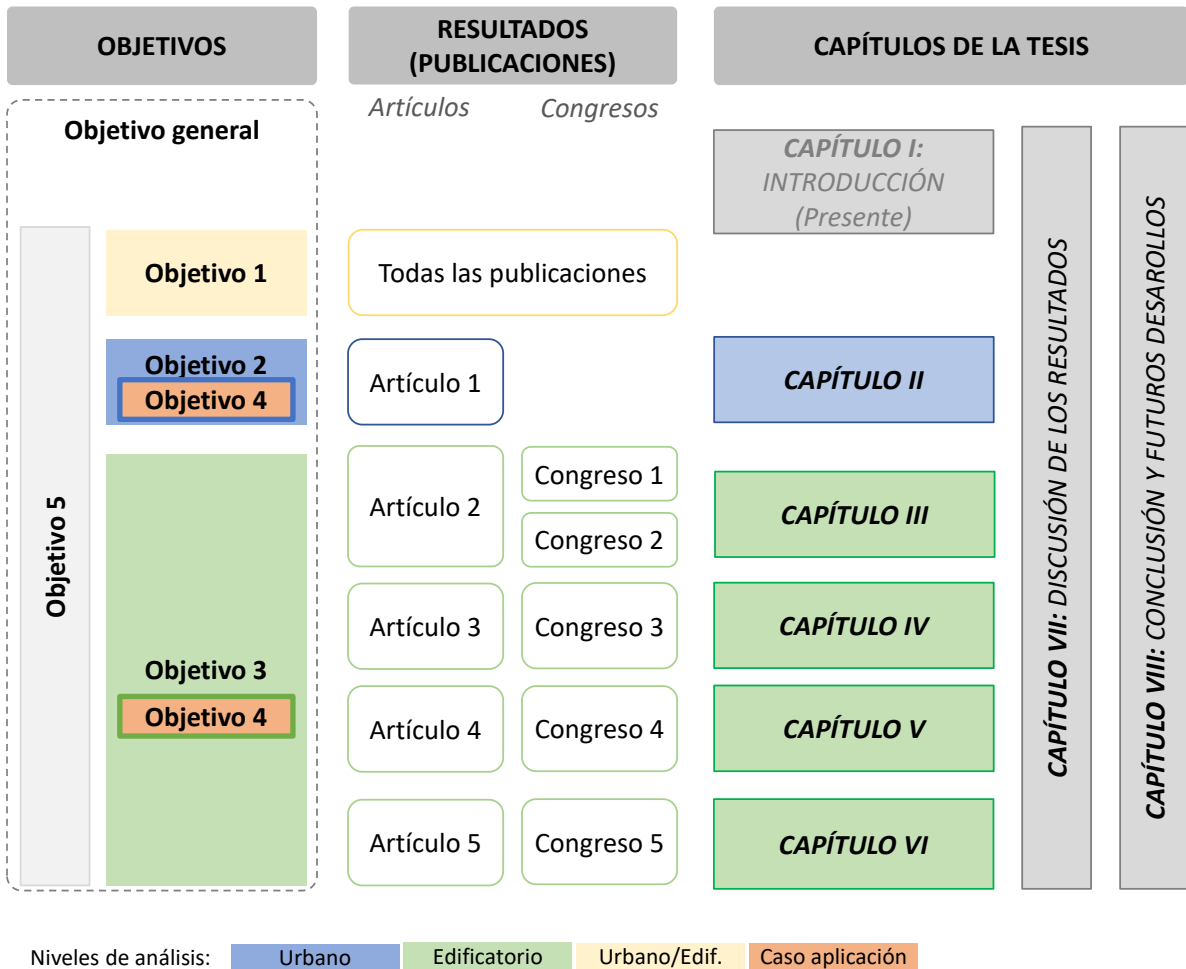


Figura I- 4. Estructura de la tesis

Artículos:

- **Artículo 1:** Assessing urban sustainability: a proposal for indicators, metrics and scoring. A case study in Colombia (Jorge-Ortiz et al., 2023a)
- **Artículo 2:** How are indicators in green building rating systems addressing sustainability dimensions and life cycle frameworks in residential buildings? (Braulio-Gonzalo et al., 2022)
- **Artículo 3:** Exploring how waste management is being approached in green building rating systems. A case study (Jorge-Ortiz et al., 2023b)
- **Artículo 4:** Caracterización del parque edificatorio residencial de los pisos térmicos frío y templado en Colombia (Jorge-Ortiz et al., 2024)
- **Artículo 5:** Environmental and economic performance of the residential building stock: LCA|LCC tool and case study in Colombia (en revision)

Congresos:



- **Congreso 1:** Indicadores de evaluación de la sostenibilidad de edificios y su relación con los módulos de información del ciclo de vida. XXV Congreso Internacional de Dirección e Ingeniería de Proyectos.
- **Congreso 2:** Indicadores de gestión de residuos en las herramientas de evaluación de la sostenibilidad a nivel urbano y de edificio. IX Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos.
- **Congreso 3:** Residential building stock characterization of Mosquera (Colombia) from urban level to construction assemblies. 26th International Congress on Project Management and Engineering.
- **Congreso 4:** Environmental impact assessment of the residential building sector: state of the art 26th International Congress on Project Management and Engineering.
- **Congreso 5:** Diseño de herramienta para el análisis de ciclo de vida del parque edificatorio residencial. Caso de aplicación. 27th International Congress on Project Management and Engineering.

6. Relación de la tesis con los ODS

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la Agenda 2030 (ONU, 2015) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Los 17 ODS aprobados como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, se articulan en los pilares de la sostenibilidad: el ambiental, el social y el económico.

Esta tesis contribuye a la consecución de los ODS, en concreto, se alinea con el ODS #11: Ciudades y comunidades sostenibles y el ODS #13: Acción por el clima, y a las metas concretas que se relacionan en la Tabla I-1.

Tabla I- 1.Relación de la tesis con los ODS y sus metas

ODS	Objetivo y Metas
ODS #11: Ciudades y comunidades sostenibles 	Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles
	11.1 De aquí a 2030, asegurar el acceso de todas las personas a viviendas y servicios básicos adecuados, seguros y asequibles y mejorar los barrios marginales.
	11.3 De aquí a 2030, aumentar la urbanización inclusiva y sostenible y la capacidad para la planificación y la gestión participativas, integradas y sostenibles de los asentamientos humanos en todos los países.
	11.6 De aquí a 2030, reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo.
	11.a Apoyar los vínculos económicos, sociales y ambientales positivos entre las zonas urbanas, periurbanas y rurales fortaleciendo la planificación del desarrollo nacional y regional.
	11.b De aquí a 2030, aumentar considerablemente el número de ciudades y asentamientos humanos que adoptan e implementan políticas y planes integrados para promover la inclusión, el uso eficiente de los recursos, la mitigación del cambio climático y la adaptación a él y la resiliencia ante los desastres, y desarrollar y poner en práctica, en consonancia con el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, la gestión integral de los riesgos de desastre a todos los niveles.
ODS #13: Acción por el clima 	Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos
	13.2 Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales
	13.3 Mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana.

7. Referencias

- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2014. Política pública de ecourbanismo y construcción sostenible. Documento técnico de soporte. Bogotá.
- Amini Toosi, H., Lavagna, M., Leonforte, F., Del Pero, C., Aste, N., 2020. Life Cycle Sustainability Assessment in Building Energy Retrofitting; A Review. *Sustain. Cities Soc.* 60, 102248. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102248>
- AMVA-UPB, 2015. Política Pública de Construcción Sostenible. Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín.
- Apostolopoulos, V., Mamounakis, I., Seitaridis, A., Tagkoulis, N., Kourkoumpas, D.S., Iliadis, P., Angelakoglou, K., Nikolopoulos, N., 2023. An Integrated Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing Approach Towards Sustainable Building Renovation Via a Dynamic Online Tool. *Appl. Energy* 334, 120710. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120710>
- Arbulu, M., Oregi, X., Etxepare, L., 2023. Environmental and economic optimization and prioritization tool-kit for residential building renovation strategies with life cycle approach. *Build. Environ.* 228, 109813. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109813>
- Athena Sustainable Materials Institute, 2022. Athena. URL <http://www.athenasmi.org/our-software-data/lca-databases/>
- BARE, J.C., 2011. TRACI 2.0 - The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts. *Clean Technol. Environ. Policy* 13(5), 687–696. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10098-010-0338-9>
- Basbagill, J.P., Flager, F.L., Lepech, M., 2014. A multi-objective feedback approach for evaluating sequential conceptual building design decisions. *Autom. Constr.* 45, 136–150. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.04.015>
- BRANZ, 2022. LCAQuick: Life cycle assessment tool. URL <https://www.branz.co.nz/environment-zero-carbon-research/framework/lcaquick/>
- Braulio-Gonzalo, M., Jorge-Ortiz, A., Bovea, M.D., 2022. How are indicators in Green Building Rating Systems addressing sustainability dimensions and life cycle frameworks in residential buildings? *Environ. Impact Assess. Rev.* 95, 106793. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106793>
- BRE Global, 2016. BREEAM New Construction. Technical Manual. Building Research Establishment.
- Brundtland, G.H., 1987. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. Oslo.
- Building transparency, 2024a. URL BHoM. <https://bhom.xyz/>
- Building transparency, 2024b. EC3. URL <https://www.buildingtransparency.org/ec3-resources/ec3-docs/>
- Buitelaar, E., Moroni, S., De Franco, A., 2021. Building obsolescence in the evolving city. Reframing property vacancy and abandonment in the light of urban dynamics and complexity. *Cities* 108, 102964. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102964>
- CAMACOL, 2019. Catálogo de cualificaciones del sector de la construcción. Cámara Colombiana de la construcción. Bogotá.

- Carrillo-Rodríguez, J., Toca, C.E., 2013. Desempeño sostenible en Bogotá: Construcción de un indicador a partir del desempeño local. *Eure* 39, 165–190. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612013000200008>
- CCCS, 2024. Programa LEED® en Colombia. URL <https://www.cccs.org.co/wp/capacitacion/talleres-de-preparacion-leed/>
- CCCS, 2016. Guía para el diseño y construcción de soluciones habitacionales sostenibles, Consejo Colombiano de Construcción Sostenible.
- COM445, 2014. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on Resource Efficiency Opportunities in the Building Sector.
- COM662, 2020. A Renovation Wave for Europe - Greening our buildings, creating jobs, improving lives. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions.
- Congreso de la República de Colombia, 2017. Ley 1844 2017. Por medio de la cual se aprueba el acuerdo de París. Colombia.
- Corte Constitucional de Colombia, 2000. Ley 629 de 2000. Por medio de la cual se aprueba el “Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”, hecho en Kyoto el 11 de diciembre de 1997. Colombia.
- DANE, 2021. Mesa de expertos de Estratificación Socioeconómica (Informe Final). Bogotá. Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia.
- DANE, 2019. Censo Nacional de Población y Vivienda 2018.). Bogotá. Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia.
- DANE, 2018. Boletín técnico Encuesta Multipropósito (EM) 2017 Bogotá 18 de julio de 2018, Boletín técnico DANE. Bogotá. Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia.
- DANE, 2015. Metodología de estratificación socioeconómica urbana para servicios públicos domiciliarios. Bogotá. Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia.
- DNP, 2017. Manual técnico del programa POT -modernos. Bogotá. Departamento Nacional De Planeación de Colombia.
- DNP, 2015. Plan Nacional de Desarrollo 2014 2018 “Todos por un nuevo país.” Bogotá. Departamento Nacional De Planeación de Colombia.
- DNP, 2014. CONPES 3819: Política nacional para consolidar el sistema de ciudades en Colombia, Consejo Nacional de Política Económica y Social República De Colombia. Bogotá. Departamento Nacional De Planeación de Colombia.
- Doan, D.T., Ghaffarianhoseini, Ali, Naismith, N., Zhang, T., Ghaffarianhoseini, Amirhosein, Tookey, J., 2017. A critical comparison of green building rating systems. *Build. Environ.* 123, 243–260. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.007>
- Ecoinvent, 2020. Ecoinvent Database. URL <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>
- EHDD, 2024. EPIC. URL <https://epic.ehdd.com/>
- EN 15804, 2013. Standards Publication Sustainability of construction works — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products.

- EN 15978, 2012. Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method.
- Eslava R., J.A., 1993. Climatología y diversidad climática de Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*
- eTool, 2016. Life Cycle Assessment. International Residential Benchmark. URL: <https://etool.app/>
- European Commission, 2022. Eurostat:Sustainable Development in the European Union, Sustainable Development in the European Union.
- Famiglietti, J., Toosi, H.A., Dénarié, A., Motta, M., 2022. Developing a new data-driven LCA tool at the urban scale: The case of the energy performance of the building sector. *Energy Convers. Manag.* 256. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115389>
- Flórez, J.E., 1995. ¿Transición demográfica en Colombia? *Cuad. Geogr. Rev. Colomb. Geogr.* 5, 133–146. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcg/article/view/70782>
- Galvis, L.A., 2015. Crecimiento económico y demográfico regional en Colombia, 1985-2012. *Rev. Econ. Inst.* 17, 183–201. <https://doi.org/10.18601/01245996.v17n33.08>
- Gantner, J., Wittstock, B., Lenz, K., Fischer, M., Sedlbauer, K., 2015. EeBGuide Guidance Document - Part B: Buildings Operational guidance for Life Cycle Assessment Studies of the Energy Efficient Building Initiative. Stuttgart.
- García-Valerio, A., Adame Martínez, S., 2020. Manejo de residuos sólidos urbanos en grandes metrópolis: una revisión. *Meio Ambient.* 2, 78–095. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4460470>
- Gaviria, P.A., 2013. Diseño de un sistema de indicadores de sostenibilidad como herramienta en la toma de decisiones para la gestión de proyectos de infraestructura en Colombia, Universidad EAFIT. Medellín.
- GBCe, 2017. VERDE Residencial. Guía para el Evaluador Acreditado. España.
- González, K., Pérez, L.F., Galeano, E., 2019. Análisis del ciclo de vida de un edificio residencial en Colombia. *Inventum* 14, 3–14. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.14.27.2019.3-14>
- González Rozo, P., 2010. El clima y principios de diseño arquitectura bioclimática en los andes tropicales 23.
- GreenDelta, 2021. LCIA Methods & Databases. URL <https://www.openlca.org/lcia-methods-databases/>
- Hernández Garzón, M., 2019. Análisis territorial de la problemática ambiental urbana: el caso del municipio de Facatativá, Cundinamarca, Colombia (1980-2010). *Perspect. Geográfica* 24, 92–115. <https://doi.org/10.19053/01233769.9074>
- Hester, J., Gregory, J., Ulm, F.J., Kirchain, R., 2018. Building design-space exploration through quasi-optimization of life cycle impacts and costs. *Build. Environ.* 144, 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.003>
- Hollberg, A., Kiss, B., Röck, M., Soust-Verdaguer, B., Wiberg, A.H., Lasvaux, S., Galimshina, A., Habert, G., 2021. Review of visualising LCA results in the design process of buildings. *Build. Environ.* 190. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107530>
- IBEC, 2007. CASBEE UD Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency for Urban Development. Technical manual 2007 edition.

- IDEAM, 2011. Clasificaciones Climaticas Colombia. II Congr. Nac. del Clima.
- IDEAM - UNAL, 2018. Variabilidad Climática y el cambio climático en Colombia, Bogota, D.C.
- IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, 2022. Informe del inventario nacional de gases de efecto invernadero 1990-2018 y carbono negro 2010-2018 de Colombia. Bogotá D.C.
- ISO 14040, 2006. Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework.
- ISO 14044, 2006. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines.
- ISO 15686-5, 2017. Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing.
- IZUBA, 2019. Informations générales sur Pleiades ACV. URL https://docs.izuba.fr/v4/fr/index.php/Informations_générales
- Jorge-Ortiz, A., Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M.D., 2024. Caracterización del parque edificatorio residencial de los pisos térmicos frío y templado en Colombia. Cuad. Geogr. Rev. Colomb. Geogr. 33, 234–251. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v33n1.103672>
- Jorge-Ortiz, A., Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M.D., 2023a. Assessing urban sustainability: a proposal for indicators, metrics and scoring—a case study in Colombia. Environ. Dev. Sustain. 25, 11789–11822. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02554-6>
- Jorge-Ortiz, A., Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M.D., 2023b. Exploring how waste management is being approached in green building rating systems: A case study. Waste Manag. Res. <https://doi.org/10.1177/0734242X221143952>
- Kanafani, K., Zimmermann, R.K., Rasmussen, F.N., Birgisdóttir, H., 2021. Learnings from developing a context-specific LCA tool for buildings—the case of Icabog 4. Sustain. 13, 1–23. <https://doi.org/10.3390/su13031508>
- KTINNOVATIONS, 2014. Tally- Autodesk. URL <https://choosetally.com/>
- Leiden University, 2016. CML-IA. URL <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>
- Llatas, C., Bizcocho, N., Soust-Verdaguer, B., Montes, M. V., Quiñones, R., 2021. An LCA-based model for assessing prevention versus non-prevention of construction waste in buildings. Waste Manag. 126, 608–622. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.047>
- Lopez-Yamunaqué, A., Iannacone, J., 2021. Integral management of urban solid waste in Latin America. Paid. XXI 11, 453–474. <https://doi.org/10.31381/paideia.v11i2.4087>
- López Borbón, W., 2016. La informalidad urbana y los procesos de mejoramiento barrial. Arq. y Urban. XXXVII, 1–18. <https://rau.cujae.edu.cu/index.php/revistaau/article/view/385>
- Luangcharoenrat, C., Intrachoto, S., 2018. Comparative Analysis of Green Building Rating Standards for Improvement Opportunities. Period. Polytech. Archit. 50, 41–49. <https://doi.org/10.3311/ppar.12656>
- Menegaki, M., Damigos, D., 2018. A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. Curr. Opin. Green Sustain. Chem. 13, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.02.010>
- Mesa García, S.C., 2021. Measurement and evaluation of six urban sustainability criteria (physical aspect), in Bucaramanga, Colombia. Rev. Ciudad. Estados y Política 8.

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017. Resolución 472. «Por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de Construcción y Demolición (RCD) y se dictan otras disposiciones.». Colombia.
- Montoya, J., Cartes, I., Zumelzu, A., 2020. Indicators for evaluating sustainability in Bogota's informal settlements: Definition and validation. *Sustain. Cities Soc.* 53. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101896>
- One Click LCA, 2021. One Click LCA® life cycle assessment for buildings. URL: <https://oneclicklca.com/es/>
- ONU, 2018. Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo. URL <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>
- ONU, 2015. Transformando nuestro mundo: la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible. General Assembly of United Nations. URL https://www.un.org/pga/wp-content/uploads/sites/3/2015/08/120815_outcome-document-of-Summit-for-adoption-of-the-post-2015-development-agenda.pdf
- Ortiz-Rodríguez, O., Castells, F., Sonnemann, G., 2010. Life cycle assessment of two dwellings: One in Spain, a developed country, and one in Colombia, a country under development. *Sci. Total Environ.* 408, 2435–2443. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.02.021>
- OVAM, Environment Brussels, Public Service of Wallonia, 2024. TOTEM.
- Parlamento Europeo, 2018. Directiva 2018/851/UE por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos.
- Parlamento Europeo, 2008. Directiva 2008/98/CE sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.
- Pattern r+d, 2024. cove.tool. URL: <https://cove.tools/>
- Peralta Arias, J.J., 2020. Sostenibilidad urbana en el contexto latinoamericano y en el europeo, in: Cuaderno de Investigación Urbanística (Ed.), La Unidad Barrial Sostenible (UBS). Modelo Para La Evaluación Sostenible de Periferias Barriales de Borde Existentes en Ciudades Latinoamericanas. p. 128.
- Prè Consultants, 2016. SimaPro Database 8.3.2. URL: <https://simapro.com/>
- Ramírez Ríos, J.F., 2011. La planeación urbana en Colombia: años sesenta-ochenta. Discursos, consultores y comunidades académicas. *Rev. Estud. Soc.* 115–125.
- Rodrigues, C., Kirchain, R., Freire, F., Gregory, J., 2018. Streamlined environmental and cost life-cycle approach for building thermal retrofits: A case of residential buildings in South European climates. *J. Clean. Prod.* 172, 2625–2635. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.148>
- Säwén, T., Magnusson, E., Sasic Kalagasidis, A., Hollberg, A., 2022. Tool characterisation framework for parametric building LCA. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 1078. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012090>
- Shi, Y., Xu, J., 2021. BIM-based information system for econo-enviro-friendly end-of-life disposal of construction and demolition waste. *Autom. Constr.* 125. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103611>
- Sphera, 2021. GaBi Solutions. URL <https://gabi.sphera.com/international/databases/>

- Tecchio, P., Gregory, J., Olivetti, E., Ghattas, R., Kirchain, R., 2019. Streamlining the Life Cycle Assessment of Buildings by Structured Under-Specification and Probabilistic Triage. *J. Ind. Ecol.* 23, 268–279. <https://doi.org/10.1111/jiec.12731>
- Tecnia, 2017. Estudio en la intensidad de utilización de materiales y economía circular en Colombia para la Misión de Crecimiento Verde. Producto 1. Diagnóstico de eficiencia en el uso de materiales y cierre de ciclos en los sectores manufacturero y de construcción.
- Trigaux, D., Oosterbosch, B., De Troyer, F., Allacker, K., 2017. A design tool to assess the heating energy demand and the associated financial and environmental impact in neighbourhoods. *Energy Build.* 152, 516–523. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.057>
- Turcott Cervantes, D.E., López Martínez, A., Cuartas Hernández, M., Lobo García de Cortázar, A., 2018. Using indicators as a tool to evaluate municipal solid waste management: A critical review. *Waste Manag.* 80, 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.046>
- USGBC, 2020. LEED v4.1: Residential Single Family Homes.
- USGBC, 2014. LEED Green Associate Study Guide v4 Edition.
- Valbuena, S., Mena, M., César, G., 2013. Características típicas de la vivienda en sectores de población vulnerable en Bogotá. *Tecnura* 17, 113–121.
- Varma, C.R.S., Palaniappan, S., 2019. Comparison of green building rating schemes used in North America, Europe and Asia. *Habitat Int.* 89, 101989. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2019.05.008>
- Wang, J., Li, Z., Tam, V.W.Y., 2014. Critical factors in effective construction waste minimization at the design stage: A Shenzhen case study, China. *Resour. Conserv. Recycl.* 82, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.11.003>
- Wu, Z., Shen, L., Yu, A.T.W., Zhang, X., 2016. A comparative analysis of waste management requirements between five green building rating systems for new residential buildings. *J. Clean. Prod.* 112, 895–902. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.073>

Capítulo II: Indicadores de sostenibilidad a nivel urbano

Assessing urban sustainability: a proposal for indicators, metrics and scoring. A case study in Colombia.

Jorge-Ortiz, A., Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M.D., 2023a. Assessing urban sustainability: a proposal for indicators, metrics and scoring—a case study in Colombia. *Environ. Dev. Sustain.* 25, 11789–11822

<https://doi.org/10.1007/s10668-022-02554-6>

Abstract

Although there are different methodologies for evaluating the sustainability of urban areas in Latin America, they usually apply to a specific city as a whole and cannot be generalised to other cities, besides, they do not address smaller urban units, such as the district, and rarely approach all sustainability dimensions. This study aims to propose a methodology for the evaluation of urban sustainability in the context of a country, whose approach can be adapted to evaluate the urban sustainability of any country or territory, taking into account environmental, social, economic and institutional aspects. The methodology is structured as an ordered protocol in five stages: (I) Revision of programmes on urban sustainability, (II) Revision and cluster of indicators, (III) Definition of indicators and metrics, (IV) Definition of the scoring method of indicators, and (V) Graphical representation of indicators. Accordingly, the methodology was applied in the context of Colombia, particularly to the medium-sized city of Mosquera, as a case study, and both as a whole and by socioeconomic strata. As a result, a set of indicators with their corresponding metrics and score in sustainability levels was obtained, as well as a graphical representation that facilitates the interpretation of results and enables the comparison of different urban areas within the city. The results made it possible to identify vulnerable or degraded urban areas, and on a lower level, to detect specific critical aspects that require the implementation of improvements geared towards a more sustainable urban environment. The overall conclusion is that there is room for improvement in the municipality, since its level of sustainability ranges, generally, from 1 to 2 on a scale of 3.

Keywords

Urban sustainability; built environment; sustainability assessment tool; urban indicator

Highlights

Research article proposing a system of indicators to evaluate the level of sustainability of any urban territory in Colombia, allowing to establish the differences that may exist between each existing socio-economic stratum.

1. Introduction

The Latin American (LA) region is the second most highly urbanized area in the world and most of its population live in medium-sized and large cities in poor conditions (Jaitman and Brakarz, 2013). This trend is increasing progressively and leads to a rapid and uncontrolled growth, while many inhabitants are still poorly housed, without safe drinking water, sewage systems, adequate building materials, sufficient living space, formal tenure and a secure location (Boullon, 2012). Additionally, considering that urban improvement plans are scarcely applied and, when they are, the initiative is performed in a disjointed and limited manner (Montoya et al., 2020), LA regions are liable to fail to meet the sustainable development goals (SDG) set by the United Nations (United Nations, 2015). Colombia is one of the countries included in the LA region and its population has concentrated increasingly in cities over the last few decades, this urban population reaching a figure of 81.5% in 2020 (CEPAL, 2020).

In the field of sustainability assessment in the international context, great efforts have been made by the scientific community to measure the level of sustainability of urban areas through indicators grouped in the three classical dimensions: social, economic and environmental. More recently, the institutional dimension has also aroused interest and is being approached in order to increase administrations support, but only tentatively. Sharifi and Murayama (2014) exhaustively reviewed a number of urban sustainability assessment tools and found that many regions have developed their own, such as LEED (US GBC, 2009) in US, BREEAM (BRE Global, 2011) in UK, CASBEE (IBEC, 2007a) in Japan, HQE2R (Blum, 2007) or Ecocity (Gaffron et al., 2008) in Europe, or Green Star (GCBA, 2003) in Australia. As seen, most of these tools apply to Europe, North America and Asia, where robust and proven methodologies for developing sustainability indicators exist and have been widely implemented yet.

However, these kinds of methodologies or tools have been very little developed in LA (Peralta Arias, 2020). Even though, several studies that focused in some LA countries were found in the literature. In Peru, Martínez Vitor (2019) analysed the influence of a set of existing urban indicators in the sustainable development of the metropolitan area of Huancayo using three different methodologies (census and cartographic data, urban plans implemented by the city hall along time, and the biogram made by the Inter-American Institute for Cooperation on Agriculture). His work focused on the three dimensions of sustainability, included the monitoring of indicators in different time periods and represented the results through spider graphs in a clear and visual manner. In Chile, Moreno and Inostroza (2019) evaluated the performance and the sustainability level of 4 neighbourhoods of the city of Temuco, through 11 indicators, and established three levels of performance (low, medium and high). Nonetheless, these indicators were only focused on physical (morphological) and environmental aspects, not in socio-economic ones, and did not define the method for granting the score. In Costa Rica, Romero Vargas et al. (2020) explored environmental, social and economic indicators through an expert's panel and identified a total of 327 indicators that finally simplified in 19 and grouped in 9 criteria (water, energy, fauna, green areas, etc.). They also defined a scale from 1 to 5 to score them, but the method used seemed fuzzy. Pinedo and Pimentel (2021) proposed a

global index (in a scale of 0 to 1) to assess the sustainability of the municipality of Sao Joao da Ponta in Brasil, which was decomposed in the social, the economic and the environmental dimensions. They also defined a scale for evaluating four levels of sustainability, according to the value of the index obtained after the evaluation. In the context of Colombia, also some advances in the definition of sustainability indicators can be identified in the recent literature. Carrillo-Rodríguez and Toca (2013) designed a sustainable performance index for the city of Bogota. Gaviria (2013) proposed a set of indicators grouped into five dimensions (institutional, technology and innovation, economic, environmental and social) to assist construction sector companies in their decision-making. Montoya et al. (2020) defined a set of thirteen sustainability indicators for the specific case of Bogota's informal settlements, which were validated by applying them to two case studies. Also, in relation to the informal settlements, López Borbón (2016) identified a number of variables, parameters and indicators to evaluate their functioning and prospects. More recently, Mesa García (2021) proposed a methodology for the measurement and assessment of six urban sustainability criteria (scale, accessibility, connectivity, density, diversity and nodal), specifically for the municipality of Bucaramanga; but these approached only morphological aspects (urban form) and the methodology cannot be generalised to other cities or similar regions in the country.

As depicted from the literature, one characteristic of Latin America is that, although there is some work done within the development of sustainability indicators, the countries are working at the national level, not offering a global vision of specific regions. Urban sustainability indicators require a holistic approach, the definition of scales, the selection of parameters and levels of characterisation, and also have to be flexible tools capable to adapt to the urban fabric and features of the city or region where are to be applied, since urban ecosystems are dynamic and changing.

The studies carried out to date in LA, focused on the evaluation of a certain city of the country, then, the method used cannot be applied to other cities. Besides, sometimes the method or procedure used for identifying existing indicators for their direct application or, otherwise, the development of new ones, seemed a little bit fuzzy. It was also observed that much emphasis was placed on the environmental aspect, and less on the socioeconomic one. Also, it was seen that the evaluation of the cities included in these studies is mainly addressed to the city as a whole system, but not cover the evaluation of smaller urban units, such as the neighbourhood or the district, in order to identify different sustainability performance within the same city, what is foreseeable to occur due to the marked physical and socio-economic differences that usually occur within the same urban area.

Specifically, in Colombia, the opportunity to measure intermediate Colombian cities through sustainability indicators is strategic, in the search to determine particularized environmental and socio-economic problems, possibly different from other areas at the national or LA level, with a focus on sustainability. The most recent legal framework has been adopted some legislation and tools approaching sustainable building and urban practices, that have been taken into consideration in this study. This is the CONPES 3919 policy (2018), whose objective is to promote the inclusion of sustainability criteria within the life cycle of buildings, through instruments for transition, monitoring and control, and financial incentives that allow the implementation of sustainable construction

initiatives. This policy was born from different initiatives for the strengthening the sustainability of cities, such as the previous CONPES 3819 policy (2014a) and National Development Plan 2014-2018 (2015), whose main objectives are the consolidation of the city system for economic, social and environmental development, and the mitigation of climate change with the focus on social mobility. As a result of these policies, some Colombian cities have formulated their own policies. This is the case of Bogotá and Valle de Aburrá, as an example of good practices. The policy of ecourbanism and sustainable construction of Bogotá (Secretaria Distrital de Ambiente Hábitat and Secretaria Distrital de Planeación, 2009) was designed to address the problem of climate change generated by construction and urban environment and was based on different sustainability advances in the city and on international standards and regulations, such as the urban sustainability assessment tools above-mentioned (LEED, BREEAM or CASBEE). As for the sustainable construction policy of the Metropolitan Area of Valle de Aburrá (AMVA-UPB, 2015b), it works as a tool to implement sustainable construction in the region, at different phases of the life cycle of buildings, and under conditions of economic viability and resilience, eco-efficiency in the consumption of natural resources and low impact in relation to the landscape, biodiversity and ecological connectivity. This policy transcends the scale of the building, also influencing the proper development of public space, offering knowledge for sustainable urban planning.

Nevertheless, despite some efforts have been done in Colombia, no urban sustainability assessment general methodology for establishing of a set of comprehensive, clear and objective indicators capable of assessing the sustainability of urban areas that were adapted to the context and specificities of the region under study, and that covered the four dimensions of sustainability, namely, environmental, social, economic and institutional, has been developed in LA and Colombia. Nor that it can evaluate smaller urban scales than the whole city, such as the district or neighbourhood or even degraded informal settlements in the periphery of the city.

This paper aims to cover this research gap by presenting a methodology for proposing a set of indicators, their metrics and the method for scoring them in sustainability levels, which allows to assessing and comparing different urban areas, even in the same municipality. The proposed methodology is a contribution for the evaluation of urban sustainability in the context of a country, whose approach can be adapted to evaluate the urban sustainability of any country or territory. For the validation of the methodology, it is applied to Colombia, as a case study, and particularly to the medium-sized city of Mosquera (Cundinamarca, Colombia).

2. Methodology

To define the set of indicators capable of evaluating the sustainability of urban areas, a general methodology is proposed, which can be adapted to the context-specific characteristics of the region where the sustainability assessment is to be conducted. The methodology (Figure II-1) is divided into five stages, as described below. Additionally, in order to establish an ordered protocol to apply the stages, a method to approach the analysis of evidence and representation of results is proposed along the methodology (McGregor and Murnane, 2010).

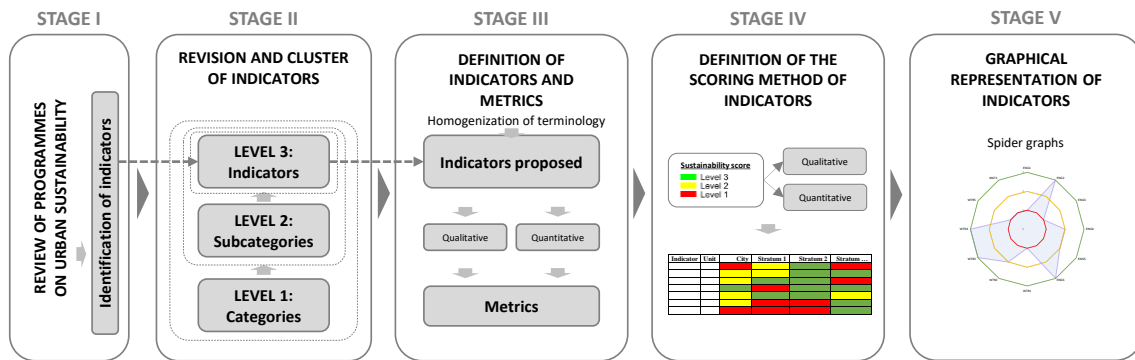


Figure II- 1. Methodology

- **Stage I. Selection of programmes about urban sustainability.** The methodology starts with the search and selection of programmes of urban indicators in the context of the region under study and the identification of the indicators included.
- **Stage II. Revision and cluster of indicators.** After identifying the indicators, these are classified and grouped according to a common and hierarchical structure, as done in similar work by Arrieta et al. (2016) and Córdoba et al. (2020). The hierarchical structure is composed of thematic categories (level 1) and subcategories (level 2), as proposed by Braulio-Gonzalo et al. (Braulio-Gonzalo et al., 2015a) previously, which finally include the indicators (level 3).
- **Stage III. Definition of indicators and metrics.** The indicators (level 3) are analysed in detail, thus, the terminology can be homogenized for proposing a final set of indicators adapted to the context-specific characteristics of the region under study. Afterwards, the indicators are classified in quantitative or qualitative, what would determine the kind of metric to be used. Then, the metric is defined for each indicator. It should be noted that the set of indicators proposed can be applied to large scale urban areas (such as an entire country), or instead to smaller scale urban areas (such as municipalities or even, districts or neighbourhoods).
- **Stage IV. Definition of the scoring method of indicators.** In order to classify each of the indicators on a rated scale, so that they are easily comparable, a method for scoring for both quantitative and qualitative indicators was defined.

For those quantitative that can be calculated for different districts/neighbourhoods in the same municipality, a grading of the results of each indicator was established according to the method proposed by Sturges (1926). The optimal class interval (C) can be estimated from the formula:

$$C = \frac{R}{1 + 3.322 \log N}$$

where R is the range and N is the number of items involved in the computation. This formula gives the class interval for the computation of the averages, measures of dispersion and skewness of frequency distributions. It is based on the principle that the proper distribution into classes is given for all numbers which are powers of 2, by a series of binominal coefficients. A numerical value, a sustainability score and a colour, 1 (low, red),

2 (medium, yellow) or 3 (high, green) were assigned to the scale that was finally obtained in order to represent the indicators' results both graphically and in a table with numerical values.

When the indicator is only calculated once (in general for the municipality under study), this value cannot be graded and should be compared to reference values that can be obtained from a country scale, or a smaller scale, if appropriate.

For those qualitative indicators, the procedure for measuring is based on checking if some specific criteria or standard are accomplished or not, then, the score results in level 1 (not accomplished: low, red) or level 3 (accomplished: high, green).

- **Stage V. Graphical representation of indicators.** The methodology finally generates a graphic result that allows to differentiate the level of sustainability (1, 2 or 3) of the urban environment analysed, as done in similar studies conducted by Martínez et al. (2019) and Arrieta et al. (2016). The spider graph type was chosen to show the indicators scores in the urban area, for a clear and reliable visual representation.

3. Description of the case study: city of Mosquera.

The municipality of Mosquera is located in Colombia in the western side of the department of Cundinamarca, 23 km from Bogota D.C, as presented in the map in Figure II-2. The city has a territorial extension of 107 km², of which 12.8 km² correspond to the urban area and 94.2 km² to the rural area, and it is located in a cold climate, with the conditions reported in Table II-1. It has a population of 150,665 inhabitants, of which 98.8% live in urban areas and 1.2% in rural areas (Alcaldía Municipal de Mosquera, 2020). According to the cadastral census, Mosquera has a built area of 831.33 Ha with 35,064 parcels of land distributed according to the socioeconomic strata established in the country.

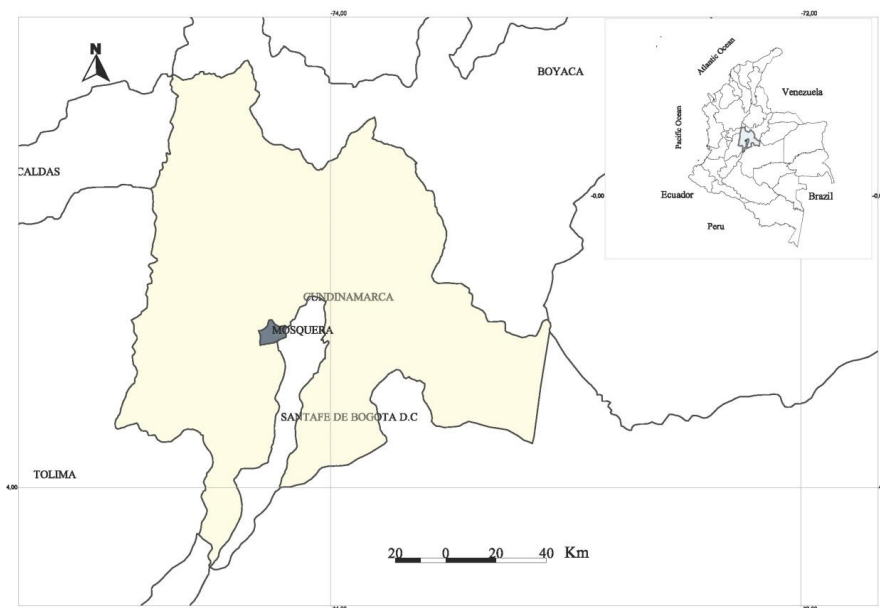


Figure II- 2. Localization of the case study (Mosquera, Cundinamarca, Colombia)

Table II- 1. Climatic data of Mosquera

Parameter	Maximum value	Average value	Minimum value
Temperature	18°C	12°C	10.9°C
Annual precipitation	787 mm/year	640 mm/ year	410 mm/ year
Wind	3.2 m/s	1.88 m/s	0.2 m/s
Relative humidity	90%	82%	74%
Cloudiness	7/8 oktas	6/8 oktas	4/8 oktas

The Colombian System for the Selection of Beneficiaries for Social Programmes (SISBEN) classifies households into six strata, according to their socioeconomic conditions: 1- low-low, 2- low, 3- medium-low, 4- medium, 5- medium-high, and 6- high. In Mosquera, stratum 1 is made up of the neighbourhoods located near the peripheral limits, close to the wastewater discharge points. It is characterized by the presence of traditional self-built dwellings in informal settlements with difficult access. Strata 2 and 3 are made up of VIS located near the centre of the municipality and with leisure areas and paved roads. Strata 4 and 5 consist of dwellings, mostly single-family houses, built with private funds. Stratum 6 comprises semi-detached houses where the population with the highest purchasing power resides.

4. Results from the application to the case study

4.1. Stage I. Selection of programmes about urban sustainability in the context of Colombia.

The legal framework in Colombia related to building and urban sustainability adopted the international protocols of Kyoto (Corte Constitucional de Colombia, 2000b) and Paris COP21 (Congreso de la República de Colombia, 2017b) in order to mitigate climate change and to reduce greenhouse gas (GHG) emissions in the country. Taking into account the agreements reached in these protocols, Colombia defined a series of urban planning strategies to fight against climate change (DNP, 2011). To do so, Law 1753 (Congreso de la República de Colombia, 2015) incorporated cross-cutting and regional strategies related to infrastructure, social mobility, transformation of rural areas, security and justice, good governance and ecological growth. This legal framework was accompanied by CONPES 3819 (DNP, 2014b), which is focused on the consolidation of cities by creating metropolitan areas with homogeneous aspects by grouping different municipalities, and by CONPES 3870 (DNP, 2016), which concentrates on achieving an orderly and sustainable growth by integrating rural and populated areas in agreement with SDG11 (Sustainable cities and communities). In addition, Decree 1077 (Presidencia de la República, 2015) and CONPES 3919 (DNP, 2018a) promoted the incorporation of a set of sustainable criteria during the life cycle of buildings and their urban environment. However, what are intended to be criteria are in fact just general guidelines that are difficult to apply and quantify (Córdoba et al., 2020).

Also derived from Decree 1077, Resolution 0549 (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2015) and Colombian Technical Standard 6112 (NTC 6112, 2016) defined several sustainable development initiatives for buildings. They were mainly focused on strategies for water and energy savings in specific new buildings (shopping centres, offices, hotels, educational centres, hospitals and non-Social Interest Housing (VIS)). However, these initiatives are only voluntary for VIS and Priority Interest Housing (VIP). These mechanisms therefore do not adopt a global urban approach, but apply only to the specific area of buildings, leaving aside the urban perspective.

From the literature review of the regulatory framework and the programmes applicable to the context of Colombia, the following were selected and analysed in depth:

- CONPES 3919 (CONPES 3919, 2018). It includes 38 indicators grouped into 3 criteria (social, environment for the territory and environment for the building) and, in turn, into 9 subcategories (citizen participation, equity and accessibility, location, mobility, adaptation to climate change, efficiency in water, energy efficiency, material and resource management, and indoor environment quality). The indicators are qualitative and are coded in the study as CP01 ... CP38 (Table S1). It provides general guidelines but does not use a rating system to calculate the level of sustainability.
- BOGOTA (Secretaria Distrital de Ambiente Hábitat and Secretaria Distrital de Planeación, 2009). It includes 35 qualitative and quantitative indicators grouped into 6 categories: social, public services, hydrological cycle, pollution, urban context, and buildings, which are coded in this study as BG01 ... BG35 (Table S2). The document does not constitute a rating system, but rather a guide to sustainability guidelines to be applied in urban and building environments.
- VALLE DE ABURRA (AMVA-UPB, 2015b). It is structured into 5 guides, 3 of them applicable to the urban environment (Characterization of the place, Urban planning and Open spaces). These comprise a total of 64 indicators, which address 9 topics: climate and atmosphere, water resources, geology and soil, biotic component, energy resource, materiality, built environment, habitability, and viability. The indicators, both qualitative and quantitative, are presented as technical criteria that contribute to the sustainability of the region. However, it does not constitute a rating system either. These are coded in this study according to VA01 ... VA62 (Table S3).
- CALI (DAGMA, 2019). It includes 31 indicators (qualitative) belonging to 5 topics: knowledge of the territory, water and energy, construction and demolition waste, climate adaptation, and protection of biota. It provides illustrative and non-quantifiable guidelines for each indicator. They are coded in this study as CA01 ... CA31 (Table S4).
- LEED (US GBC, 2009) was also selected, since it is the international urban sustainability assessment tool promoted by the CCCS. It includes 56 indicators grouped into 5 topics: smart location and linkage, neighbourhood pattern and design, green infrastructure and buildings, innovation and design process, and regional priority. The indicators in the study are coded as

LEED01 ... LEED56 (Table S5). It is a rating system that allows the sustainability of the urban environment to be classified on four levels: certified, silver, gold, and platinum.

It should be noticed that the cities of Bogotá, Valle de Aburrá (Medellin) and Santiago de Cali recently joined the international partnership Building Efficiency Accelerator (BEA), which is focused on actions to mitigate climate change and to provide support for cities that are transforming the energy use of their buildings. The programmes developed and described are evidence of the increasing efforts being made in these regions to improve urban sustainability.

4.2. Stage II. Revision and cluster of indicators

Prior to comparing the programmes selected in Stage I, it is necessary to define a common structure as each of them uses different classification topics and a distinct nomenclature. To address this, the structure proposed by Braulio-Gonzalo et al. (2015) was applied, based on a hierarchical structure composed of three levels. Level 1 was made up of 14 categories (Site and soil (SS), Urban morphology (UM), Mobility and transport (MT), Nature and biodiversity (NB), Building and housing (BH), Energy (E), Water (Wr), Materials (M), Waste (Ws), Pollution (P), Social aspects (SA), Economic aspects (EA), Management and institution (MI), Innovation (I)) and Level 2 of 69 subcategories, as reported in Table II-2. The indicators found in the selected programmes were reviewed and those related to the urban context were extracted. Table II-2 shows the indicators belonging to each programme with a direct relationship with each category and subcategory. The full description of each indicator (CPXX, LEEDXX, BGXX, VAXX and CAXX) is detailed in the Supplementary Information. As observed in Table II-2, some of the subcategories are not covered by any of the indicators included in the programmes analysed. These are: transport management in the MOB category; diversity of housing and maintenance of buildings in BUD; Civil association and Energy poverty in SOC; Tourism and New business and investment in ECO; Administrative transparency, Knowledge and Information Management, Information and Communications Technology (ICT), Investment in activities for society, Environmental education, and Regulations to improve sustainability in MI.

Table II- 2. Cluster of the indicators of the programmes into a common hierarchical structure of categories and subcategories

LEVEL 1 Categories	LEVEL 2 Subcategories	LEVEL 3 Indicators
Site and soil (SS)	Weather and site conditions	LEED5, LEED6, LEED11, CA02, CA03, CA04, CA14, CA15, CA16, CA17, CA05, CA26, VA01, VA02, VA03, VA04, VA05, VA06, VA07, VA08, VA11, VA12, VA13, VA14, VA15, VA16, VA38, VA44, VA58, VA59, VA60, VA61
	Land occupation	LEED1, CA01
	Soil and heritage reuse and conservation	LEED7, LEED41, LEED42, LEED43
	Compactness	LEED16, LEED19, BOG25, BOG26, VA30
Nature and biodiversity (BIO)	Green areas	CP11, BOG27, BOG28, BOG29, VA18, VA19, VA20, VA21, CA25
	Urban farming and food	LEED4
	Natural resources	LEED12, LEED13, LEED14, CA31
	Species biodiversity	CP07, CA29, LEED2, VA22, VA24, VA25, VA57, CA29, CA30
	Architectural elements and infrastructure with vegetation	VA23, VA45, VA46
Urban Morphology (URB)	Design and quality of public spaces	LEED15, LEED18, LEED22, LEED23, BOG35, VA26, VA27, VA28, VA29, VA31, VA47
	Mixed-use development	CP08, LEED20
	Equipment	LEED26, LEED27, LEED28
	Universal design and architectural barriers	CP05, LEED28, VA50
	Safety, health and hygiene	VA49, VA51
Mobility and transport (MOB)	Distance reduction and private vehicle use	CP13, BOG30, VA32, LEED8, LEED10, LEED24
	Public transport and other sustainable alternatives	CP09, CP10, CP12, LEED9, LEED17, BOG31
	Efficiency of public transport	LEED25
	Transport management	-
Building and housing (BUD)	Fulfilment of standards and regulations	LEED33, CA20, LEED37
	Building renovation and adaptation of use	BOG34, BOG32, BOG33
	Building resource efficiency	LEED34, LEED35, LEED38, LEED39
	Energy in buildings	CP20
	Bioclimatic building design	CP35, CP37, CP38, CP27
	Diversity of housing	-
	Maintenance of buildings	-
	Bioclimatic urban design	LEED31, LEED46, VA10
Energy (ENG)	Urban heat island	CP16, CA27, LEED45
	Energy efficiency of facilities and monitoring	CP21, CP23, LEED48, LEED49, VA52, CA19
	Renewable energy	CP24, LEED47
	Energy supply	BOG10, BOG11, CA10, CA11
	Energy consumption	VA39
Water (WTR)	Water consumption	CP17, LEED40, BOG7, BOG8, BOG13, VA40, CA09, CP18
	Rainwater and wastewater management	CP15, CP19, CP25, LEED44, LEED50, BOG21, BOG24, VA53
	Water quality	LEED3, BOG12, VA09
Materials (MAT)	Low-impact materials	CP34, CP36, CP26
	Certified reference materials	CP33, VA54
	Reused and recycled materials	CP31, LEED51
Waste (WST)	Local materials	CP30
	Minimizing waste production	VA41, CA21
	Waste treatment	CP28, LEED52, BOG20, BOG9, VA42, VA55, CA22, CP29, CP32
Pollution (POL)	Soil	CA28
	Air	BOG22, VA16, CA13
	Water	BOG14, BOG15, BOG16, BOG17, BOG18, BOG19, CA24
	Noise	BOG23, VA17, CA18
	Light	CP22, LEED53
	Resources and others (environmental footprint)	CP14, LEED36, VA43, VA56
	Social cohesion and mixed neighbourhoods	LEED21, BOG1, BOG4, VA34, VA35, VA36, CA08, CA12
Social aspects (SOC)	Citizen participation	CP01, CP03, LEED29
	Civil association	-
	Affordable housing	BOG2, CA06
	Energy poverty	-
	Education	CP02, VA33
Economic aspects (ECO)	Local, social and green jobs	CP06, LEED30
	Employment rates	BOG3
	New business and investment	-
	Quality of employment	BOG5, BOG6, VA37, CA07, BOG6
	Tourism	-
	Return on investment and affordable costs	CP04, VA48
	Process management	LEED56
Management and institution (MI)	Administrative transparency	LEED55
	Knowledge information and management	-
	Information and Communications Technology (ICT)	-
	Investment in activities for society	-
	Environmental education	-
	Regulations to improve sustainability	-
	Innovation	-
	Process management	LEED54
Innovation (IN)		

These results were represented graphically in order to identify which aspects are the most and least discussed, and to be able to compare them. Figure II-3 presents, as percentages, the number of indicators that each programme contributes to the 14 categories.

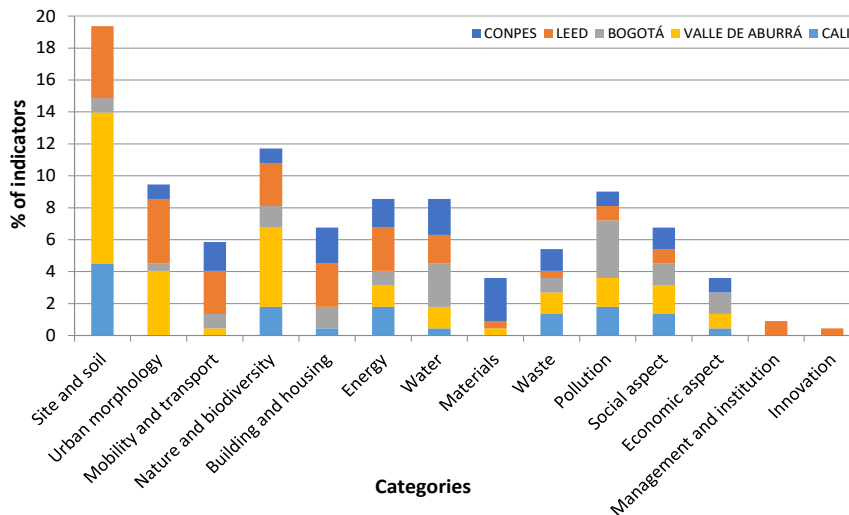


Figure II- 3. Contribution of each programme to the 14 categories analysed

4.3. Stage III. Definition of indicators and metrics

After analysing the programmes currently available in Colombia and classifying their 222 indicators into 14 categories and 69 subcategories, Stage III proposes a set of 105 indicators capable of assessing the sustainability of the current urban context in Colombia.

The selection of indicators was done throughout the following criteria. The distribution of the 222 total indicators found in the policies in Table II-2 showed that for some indicators there is more than one way to measure them, for which the indicator that fitted better to the problems of any municipality in Colombia was selected, leaving a total of 115 indicators. Therefore, for each subcategory at least one indicator has been suggested, which is intended to be intelligible and easy to apply. It was also considered that the indicators presented in the study would cover all aspects of sustainability on an urban scale, either in the entire municipality or at the district level. Besides, for the formulation of the set of indicators, the Building and housing (BUI) category has been excluded, as it is related to the building scale, which falls outside the scope of this study. Excluding these 10 indicators that make up this category, the proposed system of indicators was finally made up of 105 indicators.

The proposed indicators are based on some of the those belonging to the programmes reviewed, while others are indicators belonging to other international verified programmes (Agencia de Ecología Urbana de Barcelona, 2007; Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010) or our own proposal developed ad hoc in this study. The indicators are reported in Tables II-3 to II-8 and are grouped into 7 topics: Site & Biodiversity, Infrastructure, Urban metabolism (inputs), Urban metabolism (outputs), Social, Economic, and Institutional & Innovation. These tables are structured

in six columns, described as follows: the code of the indicators is indicated in the first column; secondly, the type indicates if whether the indicator is qualitative (QL) or quantitative (QT); in the third column, the description provides the title of the indicator and a comprehensive explanation; fourthly, unit defines the units for measuring each indicator; in the fifth column, the metric provides the formula for evaluating each indicator, when quantitative, and the criteria, when qualitative; finally, the reference provide the bibliographic detail from which the indicator was retrieved or, otherwise, indicates “proposed” when the indicator was proposed in the framework of this study.

The indicators are qualitative or quantitative and can be applied both at the global level of the municipality and at the neighbourhood or district level, depending on the information available to quantify them. In the case of quantitative indicators, their metric is provided through a mathematical expression used to calculate them. Qualitative indicators are advisory in nature and offer sustainability guidelines to carry out good practices

Table II- 3. Proposal of urban sustainability indicators for Colombia. Topic: Site & Biodiversity

Code	Type	Description	Unit	Metric	Reference
SS1	QL	Local climatic conditions (temperature, precipitation, wind, humidity, cloudiness)	°C, mm/y, m/s, %, oktas	-	Proposed
SS2	QT	Relationship between built area and total area	%	$\frac{\text{Built area (Ha)}}{\text{Total area (Ha)}}$	Proposed
SS3	QT	Existing Building Reuse (% buildings reused as dwellings)	%	$\frac{\#reused\ buildings}{\#total\ buildings}$	Based on LEED.41 (US GBC, 2009)
BIO1	QT	Green area: proportion of green area in relation to total area	%	$\frac{\text{Green area (Ha)}}{\text{Total area (Ha)}}$	(Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010)
BIO2	QT	Green area: green area per inhabitant	m ² /p	$\frac{\text{Green area (m}^2\text{)}}{\#inhabitant\ (p)}$	(Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010)
BIO3	QL	Urban farming: proportion of urban farming area per inhabitant (on public roads or buildings)	m ² /dw	$\frac{\text{Urban farming area (m}^2\text{)}}{\#dwellings}$	Based on LEED.30 (US GBC, 2009)
BIO4	QT	Protected green area: proportion of protected green area in relation to the total	%	$\frac{\text{Protected green area (Ha)}}{\text{Total green area (Ha)}}$	(Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010)
BIO5	QT	Ecosystem services: maintained area of strategic ecosystem services	Ha	-	(Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010)
BIO6	QL	Green infrastructure: presence of green corridors and/or integration of greenery in buildings (roofs and façades)	-	-	Proposed

Abbreviations. QT: Quantitative; QL: Qualitative; #: number; °C: degree Celsius; %: percentage; m: metre; Ha: hectare; p: person/inhabitant; dw: dwelling

Table II- 4. Proposal for urban sustainability indicators for Colombia. Topic: Infrastructure

Code	Type	Description	Unit	Metric	Reference
URB1	QT	Population density (relationship between the number of registered inhabitants in census and the total area)	p/Ha	$\frac{\#inhabitants (p)}{\#total\ urban\ area (Ha)}$	SINCHI (Instituto Amazónico de Investigaciones científicas), 2003)
URB2	QT	Building density (number of dwellings in relation to the urban area)	dw/Ha	$\frac{\#dwellings}{total\ urban\ area (Ha)}$	Based on Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2010)
URB3	QT	Net residential urban area (proportion of land area for permanent housing of people)	%	$\frac{Net\ residential\ urban\ area (Ha)}{total\ urban\ area (Ha)}$	Proposed
URB4	QT	Mixed integrated urban area (proportion of urban land and/or expansion for urban projects that combine commercial and service areas)	%	$\frac{Mixed\ integrated\ urban\ area (Ha)}{total\ urban\ area (Ha)}$	Proposed
URB5	QT	Residential urban area delimited by commerce and services (proportion of residential land complemented by commercial activities)	%	$\frac{Residential - commercial\ area (Ha)}{total\ urban\ area (Ha)}$	Proposed
URB6	QT	Non-residential area for educational use (relationship between area and number of inhabitants)	%	$\frac{Educational\ area (m^2)}{\#inhabitants (p)}$	Proposed
URB7	QT	Non-residential area for healthcare use (relationship between area and number of inhabitants)	%	$\frac{Healthcare\ area (m^2)}{\#inhabitants (p)}$	Proposed
URB8	QT	Non-residential area for sports use (relationship between area and number of inhabitants)	%	$\frac{Sports\ area (m^2)}{\#inhabitants (p)}$	Proposed
URB9	QT	Non-residential area for leisure use: religious, cultural, commercial, etc. (relationship between area and number of inhabitants)	%	$\frac{Leisure\ area (m^2)}{\#inhabitants (p)}$	Proposed
URB10	QT	Proportion of area for non-residential use (relationship between non-residential area and urban area)	%	$\frac{Non - residential\ area (Ha)}{total\ urban\ area (Ha)}$	Based on Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2010)
URB11	QT	Accessibility of pedestrian walkways (average width)	m	-	Based on LEED.15 (US GBC, 2009)
URB12	QL	Universal accessibility: existence of traffic lights with sound signals for people with hearing impairment	-	yes/no	Proposed
URB13	QT	Universal accessibility: proportion of parking spaces for disabled people	%	$\frac{\#parking\ spaces\ for\ disabled}{\#total\ parking\ spaces}$	Proposed
URB14	QL	Universal accessibility: existence of ramps on pavements	-	yes/no	Proposed
URB15	QT	Universal accessibility: proportion of pedestrian bridges with ramps	%	$\frac{\#pedestrian\ bridges\ with\ ramps}{\#total\ bridges}$	Proposed
URB16	QL	Road safety: existence of a road safety plan in the municipality	-	yes/no	Proposed
MOB1	QT	Private vehicle use: number of vehicles per inhabitant	veh/p	$\frac{\#vehicles}{\#inhabitants (p)}$	Proposed
MOB2	QT	Private vehicle use: proportion of dwellings with private vehicles	%	$\frac{\#dwellings\ with\ vehicle}{\#total\ dwellings}$	Proposed
MOB3	QT	Daily reduction in time and distances from home to work and services: average daily time per trip on public transport	min/p-day	-	(Alcaldía Municipal de Mosquera, 2016)
MOB4	QL	Bicycle use: existence of cycle lanes	-	yes/no	Based on LEED.9 (US GBC, 2009)
MOB5	QT	Public transport use: inhabitants who use the public transport system daily	p/day	$\frac{distance\ travelled(km) \cdot passenger (p)}{dav \cdot km}$	Proposed
MOB6	QT	Walkable streets: proportion of public roads intended for pedestrians	%	$\frac{Pedestrian\ area (m^2)}{Total\ road\ area (m^2)}$	(Agencia de Ecología Urbana)

Code	Type	Description	Unit	Metric	Reference
					de Barcelona, 2007)
MOB7	QL	Visual status of walkways and roads	-	tarmacked, gravel or chippings, dirt	Proposed
MOB8	QT	Parking in public spaces: guaranteed parking space (car parks) on public roads	#	$\frac{\text{Total parking area (Ha)}}{\text{Standard area per parking space (Ha)}}$	Proposed
MOB9	QT	Parking on public space: car parks on public roads per private vehicle	#	$\frac{\text{\# car parks}}{\text{\# vehicles}}$	Proposed
MOB10	QT	Private parking: private car parks in closed condominium	#	-	Proposed

Abbreviations. QT: Quantitative; QL: Qualitative; #: number; %: percentage; m: metre; h: hour; min: minute; p: person/inhabitant; Ha: hectare; dw: dwelling; veh: vehicle

Table II- 5. Proposal of urban sustainability indicators for Colombia. Urban metabolism

Code	Type	Description	Unit	Metric	Reference
ENG1	QL	Solar gains: optimal orientation of the urban pattern to promote north-oriented building façades	-	yes/no	Proposed, based on VA.10 AMVA-UPB, 2015a)
ENG2	QL	Heat island reduction: existence of vegetation in public spaces and green construction solutions in buildings	-	yes/no	Proposed, based on CP.16 (DNP, 2018b) and LEED.45 (US GBC, 2009)
ENG3	QT	Energy efficiency of facilities and monitoring: existence of energy consumption monitoring equipment at urban level	-	yes/no	VA.52 (AMVA-UPB, 2015a)
ENG4	QT	Renewable energy: intermediate energy acquired and consumed from renewable energy (RE)	MJ	RE= EiAC-NRE	(Gaviria, 2013)
ENG5	QT	Electric energy supply: proportion of subscribers in relation to the number of dwellings	%	$\frac{\# subscribers}{\# dwellinas}$	Proposed
ENG6	QT	Energy consumption: electricity consumption in the municipality	KWh/mth	-	Proposed
WTR1	QT	Water consumption: water supply coverage (relationship between the number of subscribers and the number of dwellings)	%	$\frac{\# subscribers}{\# dwellinas}$	Proposed
WTR2	QT	Drinking water consumption	m ³	$\frac{Water\ consumption\ (m^3) \cdot \# subscribers}{month \cdot subscriber}$	Proposed
WTR3	QT	Rainwater and Wastewater management: sewage discharge points	#	-	Proposed
WTR4	QL	Rainwater and Wastewater management: wastewater treatment system	-	-	Proposed
WTR5	QT	Water quality: IRCA index	%	-	(Alcaldía Municipal de Mosquera, 2013)
MAT1	QT	Low-impact materials: percentage of material from excavation reused on site	%	$\frac{material\ from\ excavation\ reused}{material\ from\ excavation\ (m^3)}$	Proposed
MAT2	QL	Certified reference materials: materials with SAC, EPD or other label	-	yes/no	Proposed
MAT3	QT	Reused and recycled materials: reuse of CDW	%	$\frac{CDW\ reused\ (T)}{CDW\ aenerated\ (T)}$	Proposed
MAT4	QL	Local materials: promote the purchase of local products	-	yes/no	Proposed
WST1	QT	Minimizing waste production: relation between recovered waste and generated waste	%	$\frac{Waste\ recovered\ (T/mon)}{Waste\ aenerated\ (T/mon)}$	Proposed
WST2	QT	Waste treatment: proportion of users with supply from waste collection system	%	$\frac{\# subscribers}{\# dwellinas}$	Proposed
WST3	QT	Solid waste generation: fraction of solid urban waste	%	$\frac{Solid\ urban\ waste\ (T/mon)}{Total\ waste\ aenerated\ (T/mon)}$	Proposed
WST4	QT	Solid waste generation: fraction from street sweeping and cleaning activities	%	$\frac{Cleaning\ waste\ (T/mon)}{Total\ waste\ aenerated\ (T/mon)}$	Proposed
WST5	QT	Solid waste generation: fraction from pruning	%	$\frac{Pruning\ waste\ (T/mon)}{Total\ waste\ aenerated\ (T/mon)}$	Proposed
WST6	QT	Solid waste generation: fraction of CDW	%	$\frac{CDW\ waste\ (T/mon)}{Total\ waste\ aenerated\ (T/mon)}$	Proposed
WST7	QT	Solid waste generation: fraction of special waste	%	$\frac{Special\ waste\ (T/mon)}{Total\ waste\ aenerated\ (T/mon)}$	Proposed
WST8	QT	Solid waste generation: fraction from rural activities	%	$\frac{Rural\ waste\ (T/mon)}{Total\ waste\ aenerated\ (T/mon)}$	Proposed
WST9	QT	Solid waste generation: solid waste generated per capita	kg/p-day	$\frac{Total\ waste\ generated\ (kg/day)}{\# inhabitants\ (n)}$	Proposed
WST10	QT	Solid waste generation: weekly collection frequency	times/wk	$\frac{\# Times\ of\ collection}{week}$	Proposed

Code	Type	Description	Unit	Metric	Reference
POL1	QL	Soil pollution: observation of changes in soil aridity	-	yes/no	Based on CA.28 (DAGMA, 2019)
POL2	QT	Air pollution: concentration of atmospheric emissions (PM ₁₀)	µg/m ³	-	Proposed
POL3	QT	Air pollution: concentration of atmospheric emissions (PST)	µg/m ³	-	Proposed
POL4	QT	Air pollution: concentration of atmospheric emissions (SO ₂)	µg/m ³	-	Proposed
POL5	QT	Air pollution: concentration of atmospheric emissions (NO ₂)	µg/m ³	-	Proposed
POL6	QT	Air pollution: proportion of users who perceive problems in the air quality of their home	%	$\frac{\# \text{ Air – polluted dwellings}}{\# \text{ Total dwellinas}}$	Proposed
POL7	QT	Water pollution: concentration of polluting metals in discharges	mg/l	-	Proposed
POL8	QT	Noise: user's perception of the presence of noise in the home	%	$\frac{\# \text{ Noise – polluted dwellings}}{\# \text{ Total dwellinas}}$	Proposed
POL9	QT	Light pollution: light pollution caused by public lighting (points replaced by LED luminaires)	#	-	Proposed
POL10	QT	Distance from residential areas to industrial zones	M	-	Proposed

Abbreviations. QT: Quantitative; QL: Qualitative; #: number; %: percentage; kg: kilogram; mg: miligram; µg: microgram; l: litre; m: metre; mth: month; wk: week; h: hour; p: person/inhabitant; MJ: megajoules; kWh: kilowatt-hours; EIAC: amount of intermediate energy acquired and consumed from external sources; NRE: non-renewable energy; IRCA: index for risk of water quality for human consumption; SAC: *Sello Ambiental Colombiano* (Colombia Environmental Label); EPD: Environmental Product Declaration; CDW: Construction and Demolition Waste; PM₁₀: Inhalable Particulate Matter; PST: Total Suspended Particles

Table II- 6. Proposal of urban sustainability indicators for Colombia. Topic: Social

Code	Type	Description	Unit	Metric	Reference
SOC1	QT	Social subsidies: inhabitants with SISBEN level I: 0- 44,79	%	$\frac{\# \text{ Inhabitants SISBEN I (p)}}{\# \text{ Total inhabitants (p)}}$	Proposed
SOC2	QT	Social subsidies inhabitants with SISBEN level II: 44,79- 54,58	%	$\frac{\# \text{ Inhabitants SISBEN II (p)}}{\# \text{ Total inhabitants (p)}}$	Proposed
SOC3	QT	Social subsidies: inhabitants with SISBEN level III: >51,58	%	$\frac{\# \text{ Inhabitants SISBEN III (p)}}{\# \text{ Total inhabitants (p)}}$	Proposed
SOC4	QL	Citizen participation: existence of a citizen participation plan	-	yes/no	Proposed
SOC5	QT	Civil association: percentage of attendees at the roundtables	%	$\frac{\# \text{ attendants (p)}}{\# \text{ Total inhabitants (p)}}$	Proposed
SOC6	QT	Civil association: proportion of Community Action Board (Junta de Acción Comunal, JAC) in relation to number of dwellings	%	$\frac{\# \text{ JAC}}{\# \text{ Total dwellinas}}$	Proposed
SOC7	QT	Affordable housing: housing rental price	ŞCOP	-	Proposed
SOC8	QT	Affordable housing: housing sale price referred to built area	ŞCOP/m ²	-	Proposed
SOC9	QT	Energy poverty: energy poverty index IPREM	%	-	(Aguado and Duque, 2013)
SOC10	QT	Education: truancy rate	%	-	(Secretaría Distrital de Planeación, 2017)

Abbreviations. QT: Quantitative; QL: Qualitative; #: number; %: percentage; m: metre; p: person/inhabitant; SISBEN: Sistema de Selección de Beneficiarios para Programas Sociales; ŞCOP: Colombian peso; kWh: kilowatt-hours

Table II- 7. Proposal of urban sustainability indicators for Colombia. Topic: Economic

Code	Type	Description	Unit	Metric	Reference
ECO1	QT	Employment rate: employment rate of salaried employees	%	-	(Secretaría Distrital de Planeación, 2017)
ECO2	QT	Employment rate: rate of informal employment (self-employed)	%	-	(Secretaría Distrital de Planeación, 2017)
ECO3	QT	Employment rate: general employment rate	%	-	(Secretaría Distrital de Planeación, 2017)
ECO4	QT	Employment rate: unemployment rate (men)	%	-	(Secretaría Distrital de Planeación, 2017)
ECO5	QT	Employment rate: unemployment rate (women)	%	-	(Secretaría Distrital de Planeación, 2017)
ECO6	QT	Tourism: rate of population benefitted by tourism	%	$\frac{\# \text{Inhabitants benefitted } (p)}{\# \text{inhabitants } (p)}$	(Secretaría Distrital de Planeación, 2017)
ECO7	QT	Quality of employment: proportion of households with primary education	%	$\frac{\# \text{Households primary}}{\# \text{Total dwellinas}}$	(Secretaría Distrital de Planeación, 2017)
ECO8	QT	Quality of employment: proportion of households with secondary education	%	$\frac{\# \text{Households secondary}}{\# \text{Total dwellinas}}$	(Secretaría Distrital de Planeación, 2017)
ECO9	QT	Quality of employment: proportion of households with university education	%	$\frac{\# \text{Households university}}{\# \text{Total dwellinas}}$	(Secretaría Distrital de Planeación, 2017)
ECO10	QT	Quality of employment: proportion of households with postgraduate education	%	$\frac{\# \text{Households postgraduate}}{\# \text{Total dwellinas}}$	(Secretaría Distrital de Planeación, 2017)
ECO11	QT	Services costs: cost of electricity consumption	\$/kWh	-	(Secretaría Distrital de Planeación, 2017)
ECO12	QT	Services costs: cost of natural gas consumption	\$/m ³	-	(Secretaría Distrital de Planeación, 2017)
ECO13	QT	Services costs: cost of water consumption	\$/m ³	-	(Secretaría Distrital de Planeación, 2017)
ECO14	QT	Services costs: cost of sewage service	\$/m ³	-	(Secretaría Distrital de Planeación, 2017)
ECO15	QT	Average hourly pay for self-employed workers	\$/h	-	(Secretaría Distrital de Planeación, 2017)
ECO16	QT	Average hourly remuneration received by salaried employees	\$/h	-	(Secretaría Distrital de Planeación, 2017)

Abbreviations. QT: Quantitative; QL: Qualitative; #: number; %: percentage; m: metre; p: person/inhabitant; kWh: kilowatt-hours; h: hour; \$COP: Colombian peso

Table II- 8. Proposal of urban sustainability indicators for Colombia. Topic: Institutional & Innovation

Code	Type	Description	Unit	Metric	Reference
MI1	QT	Institutional management: fulfilment of the political objectives	%	-	(Alcaldía Municipal de Mosquera, 2020)
MI2	QT	Process management: fulfilment of the political schedule	%	-	(Alcaldía Municipal de Mosquera, 2020)
MI3	QT	Administrative transparency: municipal administrative transparency index	%	-	(Corporación Transparencia por Colombia, 2014)
MI4	QL	Knowledge and information management: public participation allowed in tender procedures	-	yes/no	Proposed
MI5	QL	ICT management: promotion of the use of ICT tools, social networks and web pages according to the needs of the population	-	yes/no	Proposed
MI6	QL	Investment in activities for society: definition of a programme of activities that integrates the population	-	yes/no	Proposed
MI7	QL	Environmental education: promotion of environmental education at the institutional and social level	-	yes/no	Proposed
MI8	QT	Regulations to improve sustainability: schedule activities to mitigate climate change	#	yes/no	Proposed
IN1	QT	Innovation: promotion of the certification of institutional, commercial and residential buildings with an environmental label (i.e. LEED)	-	yes/no	Based on LEED.54 (US GBC, 2009)

Abbreviations. QT: Quantitative; QL: Qualitative; #: number; %: percentage

4.4. Stage IV. Definition of the scoring method of indicators

The information needed to apply the metrics proposed for each of the indicators was collected from the sources of data available in Mosquera. Depending on the data source, some indicators can be calculated by strata and others for Mosquera as a whole. Despite the efforts made to collect all the data, some of it is missing for the calculation of indicators ENG4, MAT1, POL1 and POL7, so that these metrics cannot be obtained. Results are reported in Table II-9, according to the colour scale described in Stage IV, which represents the sustainability score in three levels: 1 (low, red), 2 (medium, yellow) and 3 (high, green). The reference values to rate each indicator, which resulted from the Sturges (1926) formula or Colombian standards, are presented in Appendix A in Tables II-10 to II-12.

Table II- 9. Results of the metrics of the indicators

Code	M/S	Unit	Mosquera	Stratum 1	Stratum 2	Stratum 3	Stratum 4	Stratum 5	Stratum 6
SS1	S	-	See Table 1						
SS2	S	%	84.40	37.07	94.72	72.89	96.35	71.64	85.33
SS3	M	%	0.00						
BIO1	S	%	4.84	3.25	6.64	9.12	7.81	2.84	7.41
BIO2	S	m ² /p	5.14	2.95	1.39	11.62	(1)	(1)	(1)
BIO3	M	m ² /dw	537.27						
BIO4	S	%	49.64	44.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BIO5	M	Ha	17.23						
BIO6	S	-	yes	no	yes	yes	yes	yes	yes
URB1	S	p/Ha	94.21	297.44	504.84	107.62	1.92	0.7	0.15
URB2	S	dw/Ha	28.93	25.69	65.76	58.83	17.55	2.89	2.46
URB3	S	%	40.53	0.00	0.00	66.66	100.00	100.00	100.00
URB4	S	%	2.23	13.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
URB5	S	%	39.14	86.66	100.00	33.40	0.00	0.00	0.00
URB6	S	%	0.250	0.084	0.114	0.772	0	0	0
URB7	S	%	0.056	0.046	0	0.227	0	0	0
URB8	S	%	0.028	0.017	0.015	0.075	0	0	0
URB9	S	%	0.391	0.036	0.258	1.048	0	0	0
URB10	S	%	1.00	0.19	1.57	3.03	0	0	0
URB11	S	m	4.5	3.5	4.7	6.83	4.5	4.5	0
URB12	S	-	yes	no	yes	yes	yes	(1)	(1)
URB13	S	%	0	0	0	0	0	0	0
URB14	S	-	yes	yes	yes	yes	yes	yes	
URB15	M	%	100						
URB16	M	-	yes						
MOB1	M	veh/p	1.22						
MOB2	M	%	5.99						
MOB3	M	min/p-day	45						
MOB4	S	-	yes	no	yes	yes	yes	yes	yes
MOB5	S	p/day	322,099	40,262	60,394	100,656	46,973	33,552	40,262
MOB6	S	%	36.00	31.32	25.70	50.00	15.79	15.79	0.00
MOB7	S	-	3	1	3	3	3	3	3
MOB8	S	#	846	4,894	1,713	1,725	0	0	0
MOB9	M	#	0.073						
MOB10	S	#	4,749	596	1,313	2,492	323	9	16
ENG1	S	-	no	no	no	no	no	no	no
ENG2	S	-	yes	no	yes	yes	yes	yes	yes
ENG3	M	-	no						
ENG5	M	%	85.93						
ENG6	M	KWh/mes	6,555,202.25						
WTR1	S	%	106.27	90.22	96.05	117.07	102.27	(1)	(1)

Code	M/S	Unit	Mosquera	Stratum 1	Stratum 2	Stratum 3	Stratum 4	Stratum 5	Stratum 6
WTR2	S	m ³	324,936.59	34,625.71	81,204.64	187,817.92	21,288.32	(1)	(1)
WTR3	M	#	4						
WTR4	M	-	(2)						
WTR5	M	%	1.25						
MAT2	M	-	no						
MAT3	M	%	50.00						
MAT4	M	-	no						
WST1	M	%	9.11						
WST2	S	%	100.00	92.37	99.61	112.59	111.34	5.77	25.00
WST3	M	%	84.06						
WST4	M	%	3.32						
WST5	M	%	2.16						
WST6	M	%	4.98						
WST7	M	%	5.18						
WST8	M	%	0.34						
WST9	M	kg/p-day	0.775						
WST10	M	times/wk	3						
POL2	M	µg/m ³	44						
POL3	M	µg/m ³	68						
POL4	M	µg/m ³	59						
POL5	M	µg/m ³	44						
POL6	M	%	26.60						
POL8	M	%	34.03						
POL9	M	#	2172						
POL10	S	m	340	205	310	277	348	348	549
SOC1	M	%	2.20						
SOC2	M	%	11.24						
SOC3	M	%	9.74						
SOC4	M	-	yes						
SOC5	S	%	3.97	2.95	0.77	3.06	0.00	(1)	(1)
SOC6	S	%	0.19%	0.25	0.33	0.10	0.10	0.00	0.00
SOC7	S	\$COP	1,173,000	550,000	580,000	750,000	1,108,000	1,750,000	2,300,000
SOC8	S	\$COP	2,840,724	1,080,000	2,000,000	2,062,500	2,620,000	3,170,731	6,111,111
SOC9	M	%	9.13						
SOC10	M	%	5.85						
ECO1	M	%	56.23						
ECO2	M	%	42.86						
ECO3	M	%	11.40						
ECO4	M	%	4.09						
ECO5	M	%	5.69						
ECO6	M	%	74.68						
ECO7	M	%	27.72						
ECO8	M	%	49.55						
ECO9	M	%	5.11						
ECO10	M	%	0.52						
ECO11	S	\$COP/kWh	443.32	211.48	264.36	436.80	513.90	616.70	616.70
ECO12	S	\$COP/m ³	1,189.84	893.17	1,120.50	1,167.00	1,167.00	1,395.70	1,395.70
ECO13	S	\$COP/m ³	2,708.80	806.80	2,017.00	2,393.50	2,698.40	4,034.10	4,303.00
ECO14	S	\$COP/m ³	1,799.32	547.10	1,185.30	1,586.60	1,823.60	2,735.50	2,917.80
ECO15	M	\$COP/h	4,731						
ECO16	M	\$COP/h	4,557						
MI1	M	%	92.70						
MI2	M	%	97.50						
MI3	M	%	77.40						
MI4	M	-	yes						
MI5	M	-	yes						
MI6	M	-	yes						

Code	M/S	Unit	Mosquera	Stratum 1	Stratum 2	Stratum 3	Stratum 4	Stratum 5	Stratum 6
MI7	M	-	yes						
MI8	M	#	960						
IN1	M	-	no						

Notes. M: municipal data; S: data by strata; (1) No data available; (2) Oxidation ponds

4.5. Stage V. Graphical representation of indicators

Results are reported graphically in Figures II-4 and II-5, using spider graphs. Figure II-4 shows the results for the overall municipality of Mosquera, in such a way that it provides a general vision and diagnosis, while Figure II-5 shows the comparison by socioeconomic strata (for those indicators calculated by strata). Finally, Figure II-6 presents the results on a map of Mosquera, where the six socioeconomic strata are delimited by a contour and coloured according to their average level of sustainability: low (1), medium (2) or high (3).

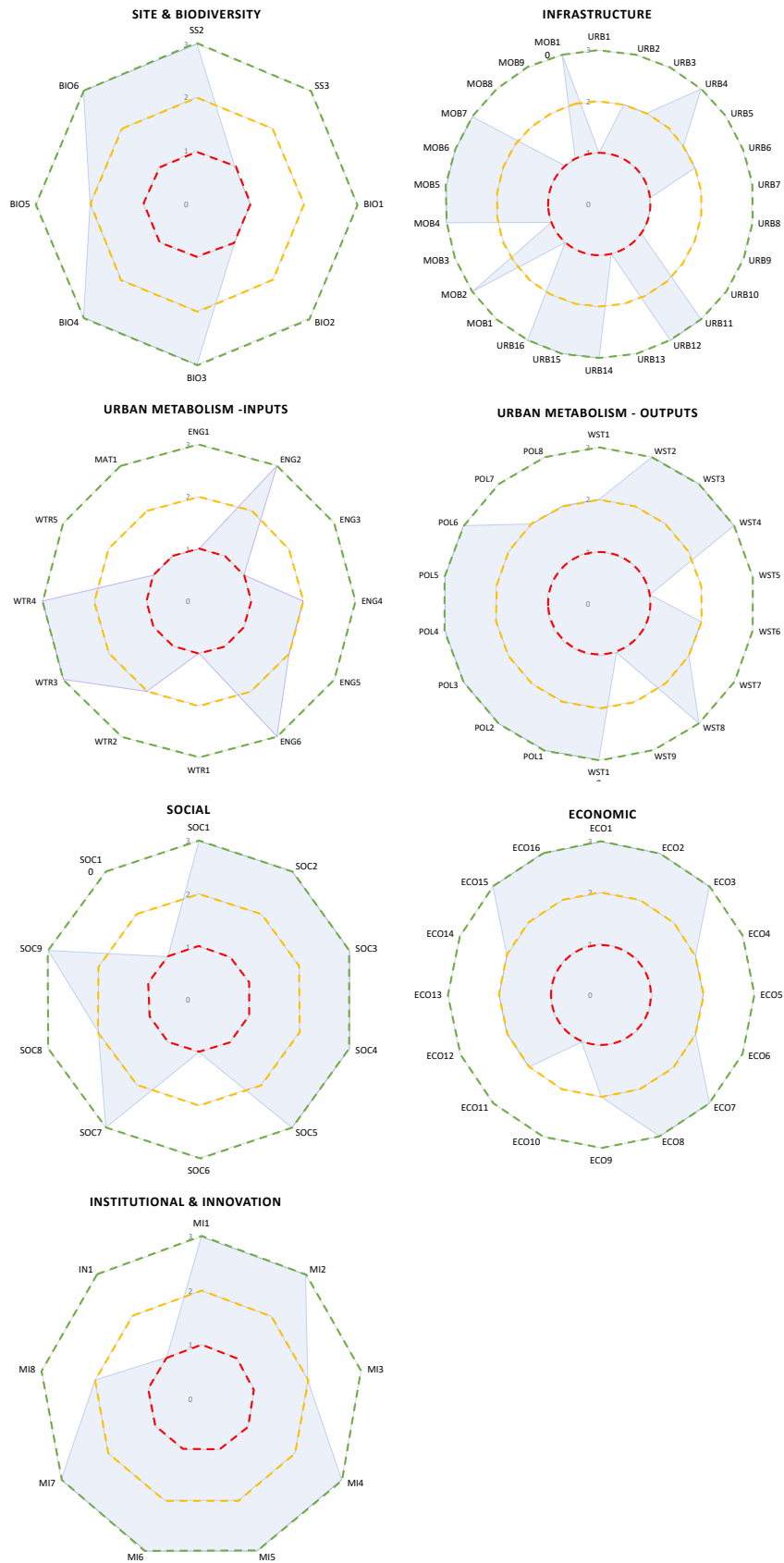


Figure II- 4. Metrics and graphical representation of indicators at the Mosquera level

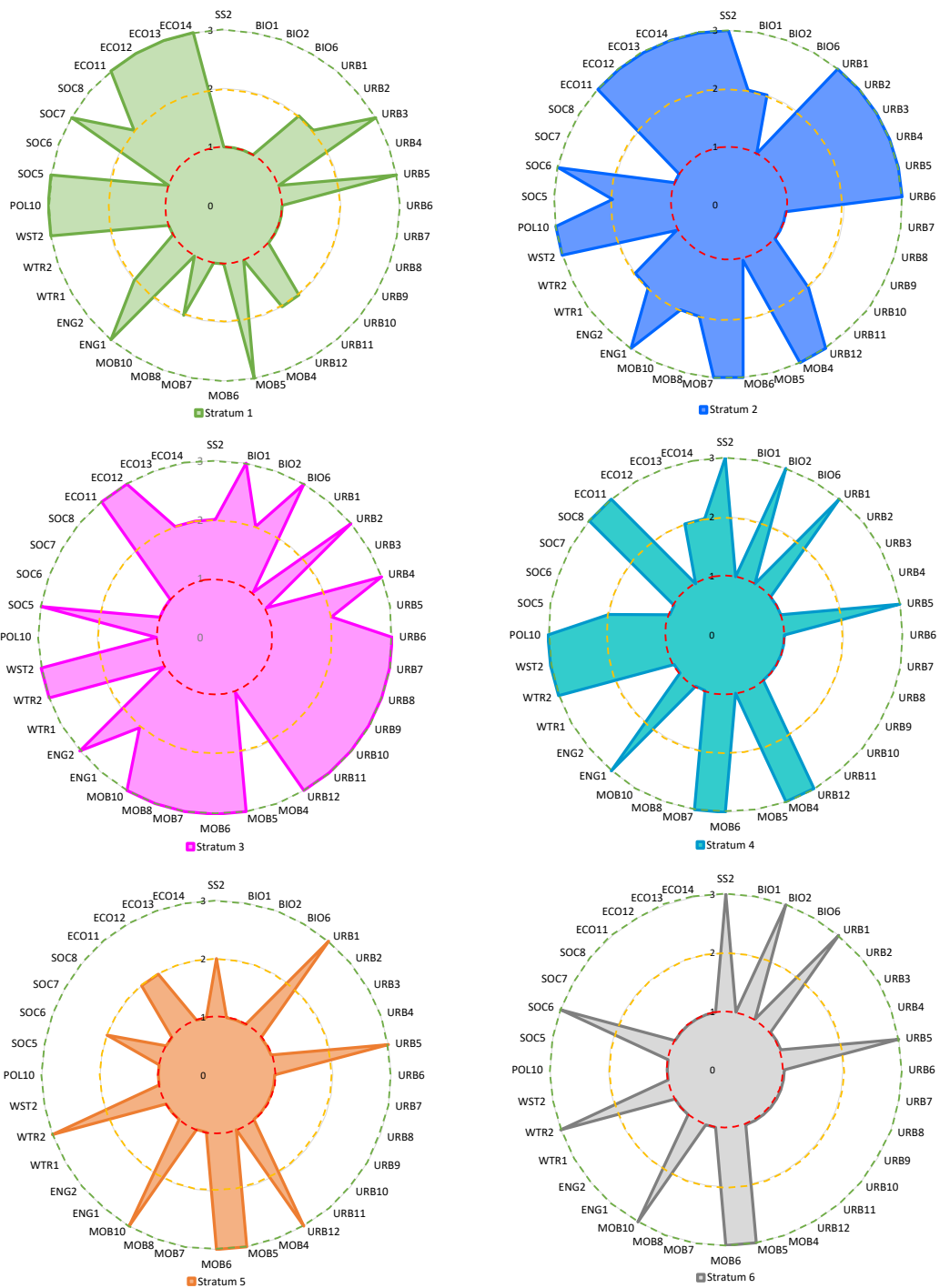


Figure II- 5. Metrics and graphical representation of indicators at the socioeconomic strata level

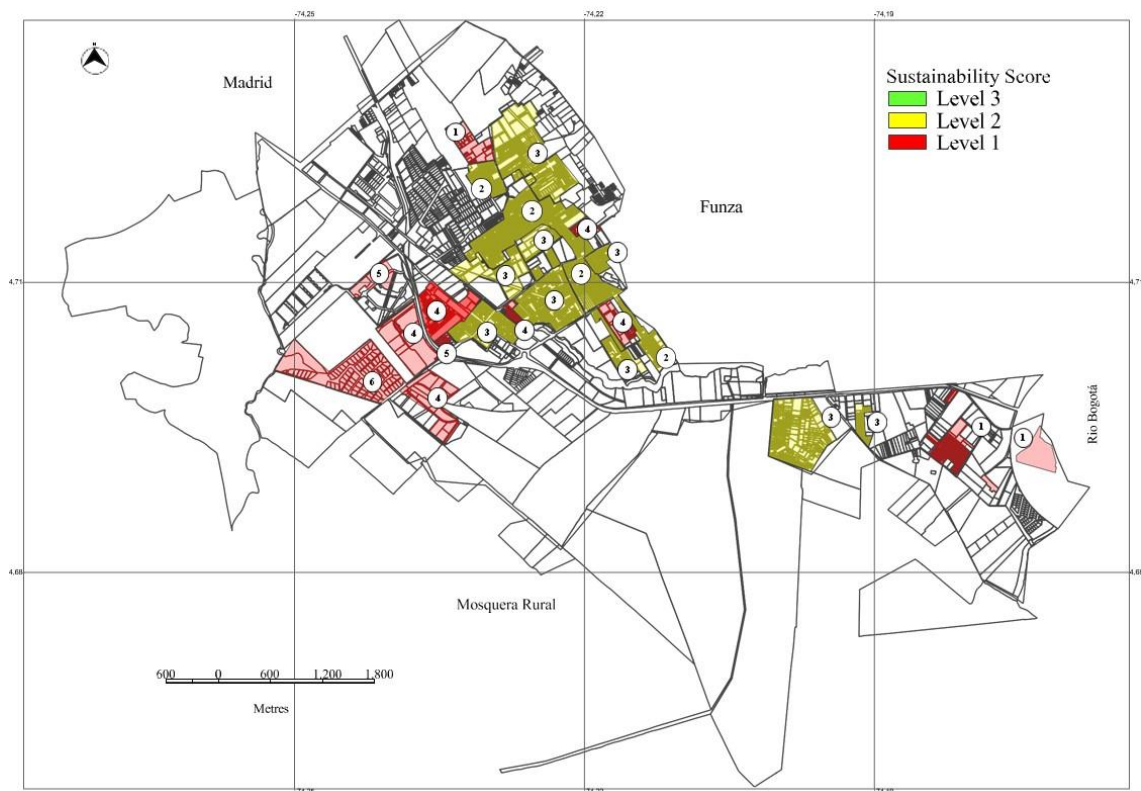


Figure II- 6. Urban sustainability map of Mosquera per socioeconomic stratum (the numbers in circles represent the strata from 1 to 6)

5. Discussion

The results showed that none of the socioeconomic strata reached the highest level of sustainability (3, green), as depicted in Figure II-6. Strata 2 and 3 achieved the medium level (2, yellow), while strata 1, 4, 5 and 6 presented the lowest levels (1, red). As shown in the spider graphs in Figure II-5, strata 2 and 3 successfully covered a large number of the indicators, especially those related to URB and MOB. The fact that they are located near the city centre leads to better sustainability performance, due to higher building compactness, and the presence of mixed-use buildings (both housing and equipment) brings people closer to services and helps to reduce distances and the use of private vehicles. Stratum 1, located in informal peripheral settlements and characterized by self-constructed dwellings, houses the families with the lowest incomes and embraces the lowest sustainability level regarding infrastructure, due to the low quality of water and energy services, the proximity to wastewater discharge points, the lack of green areas and the difficulties in having direct access to everyday services. Strata 4, 5 and 6, despite accommodating people with higher levels of income and being made up of residential buildings with good quality construction features, are usually also located in peripheral districts outside the city centre. This implies lower compactness and dispersed residential areas with poor direct access both to services (high distances) and also to public transport. This, together with their inhabitants' high levels of income, gives rise to the intensive use of private vehicles, thereby compromising the sustainability of transport. In general, mobility is one of the most critical aspects in the city, also because of the low frequencies and long times spent travelling. Social

and economic issues are, however, more developed in strata 1, 2 and 3, where the cost of services and housing are more affordable and citizen association and participation is more active thanks to the Community Action Boards (Juntas de Acción Comunal, JAC), which support neighbourhood development and interaction with the local government. At the institutional level of the city as a whole, it was identified that many sustainability initiatives are being launched, such as the promotion of local employment, the improvement of educational programmes for inhabitants to reduce illiteracy rates and also carrying out environmental awareness campaigns.

Overall, it can be concluded that there is room for improvement in Mosquera, since its level of sustainability ranges from levels 1 to 2 on a scale of 3. Greater efforts should therefore be made to improve the weaknesses found herein. To do so, the involvement and support of the local government is essential to ensure collaboration between stakeholders and to make a serious commitment towards urban sustainability. However, as concluded from the evaluation of programmes that have previously been implemented and tested, for instance BEA, some limitations during the real implementation of the indicators proposed may be expected, such as the lack of third-party inspection and validation, insufficient support through monetary resources, and the non-mandatory and regular character of the measurement of the indicators (Evans et al., 2018). In order to ensure a successful implementation of indicators, these aspects should be revised, focused and strengthened.

The results of the application of the indicators to the case study of Mosquera are aligned with the results obtained in the studies analysed in the literature review. Mesa García (2021), in the context of Colombia, obtained similar conclusions. She rated the indicators in a scale of three levels (not accomplished, little accomplished, accomplished) and most of indicators were scored as not accomplished or little accomplished. Martínez Vitor (2019) in Peru, who also represented the indicators through spider graphs, obtained low values in a qualitative scale comprised between the levels of collapse, critical and unstable, not being any of them in stable or optimum levels. Moreno García & Inostroza Seguel (2019) evaluated four different neighbourhoods in Chile and the results denoted that, although some aspects such as public transport, proximity to green areas and to recycling points presented high performances, most of the other aspects evaluated showed low or medium performances. In Brazil, Pinedo & Pimentel (2021) developed a numerical global index for evaluating the environmental, social and economic aspects; however, all these indices adopted values lower than 0.50 in a scale from 0 to 1.

6. Conclusions

This paper proposed a methodology for the evaluation of urban sustainability in the context of a country, considering environmental, social, economic and institutional aspects. It was applied to the context of Colombia and a set of 105 indicators were developed, implemented and tested in Mosquera, a medium-sized city in Cundinamarca which forms part of the metropolitan area of Bogota together with other municipalities. The scale of implementation was the stratum, which allowed to compare different urban areas even in the same municipality. For those quantitative

indicators, a metric for calculating them is proposed, along with a three-level scale for both quantitative and qualitative indicators. This would allow all the proposed indicators to be measured objectively and then different urban areas can be compared.

Many of the indicators included in the study could only be measured at the whole city level, limiting the quality of the results. To improve the quality of measurement and to be able go deeper into the comparison of smaller urban areas, there is a need for more publicly available data and information that is disaggregated at a lower level, i.e. the stratum or even neighbourhood level. For instance, the cadastral office can systematically collect socioeconomic georeferenced information in order to be mapped easily by means of a Geographical Information System (GIS).

The methodology proposed in this paper can be applied in any city in Colombia or any other territory and allows the set of indicators to be adapted to the environmental and socioeconomic specificities of the region, by modifying some of the indicators included (i.e. adapted to the climatic zone) or including new ones, but maintaining the original hierarchical structure of the topics, categories and subcategories as a reference. The scheme proposed is thus intended to be dynamic and adaptable to the context of the region where the indicators are applied. Additionally, the implementation of the indicators would enable the progress of the city to be analysed and would serve local governments as a tool for measuring and demonstrating to citizens the implementation of urban improvements towards enhanced sustainability, with administrative transparency.

7. References

- Agencia de Ecología Urbana de Barcelona. (2007). Plan Especial de Indicadores de Sostenibilidad Ambiental de la Actividad Urbanística de Sevilla.
- Aguado, L. F., & Duque, H. (2013). Índice de pobreza energética multidimensional por regiones para Colombia (IPREM_RC). 3(3), 35–71.
- Alcaldía de Mosquera. (2013). Perfil y Agenda Ambiental - Municipio de Mosquera Cundinamarca.
- Alcaldía de Mosquera. (2016). Lineamientos para la formulación del informe de Empalme Transporte e infraestructura.
- Alcaldía de Mosquera. (2020). Plan de desarrollo 2020-2023. Municipio de Mosquera Cundinamarca.
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2014). Política pública de ecourbanismo y construcción sostenible. Documento técnico de soporte.
- AMVA-UPB. (2015). Política Pública de Construcción Sostenible. Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Colombia.
- Arrieta, G., Requena, I., Toro, J., & Zamorano, M. (2016). Adaptation of EVIAVE methodology for monitoring and follow-up when evaluating the environmental impact of landfills. *Environmental Impact Assessment Review*, 56, 168–179. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.10.001>
- Blum, A. (2007). HQE2R-research and demonstration for assessing sustainable neighborhood development. In M. Deakin, G. Mitchell, P. Nijkamp, & R. Vreeker (Eds.), *Sustainable urban development volume 2: the environmental assessment methods* (pp. 412–428).

- Boullon, C. P. (2012). Room for Development: Housing Markets in Latin America and the Caribbean.
- Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M. D., & Ruá, M. J. (2015). Sustainability on the urban scale: Proposal of a structure of indicators for the Spanish context. *Environmental Impact Assessment Review*, 53, 16–30. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.03.002>
- BRE Global. (2011). SD5065 technical guidance manual: version 1. BREEAM for Communities assessor manual: development planning application stage.
- Carrillo-Rodríguez, J., & Toca, C. E. (2013). Desempeño sostenible en Bogotá: Construcción de un indicador a partir del desempeño local. *Eure*, 39(117), 165–190. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612013000200008>
- CEPAL. (2020). Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Congreso de la República de Colombia. (2015). Ley 1753 de 2015. Plan Nacional de Desarrollo 2014 2018 “Todos por un nuevo país.”
- Congreso de la República de Colombia. (2017). Ley 1844 2017. Por medio de la cual se aprueba el acuerdo de París. Colombia
- Política Nacional De Edificaciones Sostenibles, Consejo Nacional de Política Económica y Social República De Colombia.
- Córdoba, C., Triviño, C., & Calderón, J. T. (2020). Agroecosystem resilience. A conceptual and methodological framework for evaluation. *PLoS ONE*, 15(4), 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220349>
- Corporación Transparencia por Colombia. (2014). Índice de Transparencia Municipal 2013 - 2014. In Colección de Documentos Observatorio de Integridad N. 14.
- Corte Constitucional de Colombia. (2000). Ley 629 de 2000. Por medio de la cual se aprueba el “Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático”, hecho en Kyoto el 11 de diciembre de 1997. Colombia
- DAGMA. (2019). Manual de Construcción Sostenible. Alcaldía de Calí, Colombia
- DNP. (2011). Documento CONPES 3700 - Estrategia Institucional para la articulación de políticas y acciones en materia de cambio climático en Colombia.
- DNP. (2014). CONPES 3819: Política nacional para consolidar el sistema de ciudades en Colombia. Consejo Nacional de Política Económica y Social República De Colombia. Departamento Nacional De Planeación (DNP)
- DNP. (2016). CONPES 3870. Programa Nacional para la Formulación y Actualización de Planes de Ordenamiento Territorial: POT Modernos.
- DNP. (2018). CONPES 3919. Política Nacional De Edificaciones Sostenibles. Consejo Nacional de Política Económica y Social República De Colombia. Departamento Nacional De Planeación (DNP)
- Evans, M., Yu, S., Staniszewski, A., Jin, L., & Denysenko, A. (2018). The international implications of national and local coordination on building energy codes: Case studies in six cities. *Journal of Cleaner Production*, 191, 127–134. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.142>
- Gaffron, P., Huismans, G., & Skala, F. (2008). *Ecocity Book II: How To Make It Happen*. Facultas Verlags- und Buchhandles AG.

- Gaviria, P. A. (2013). Diseño de un sistema de indicadores de sostenibilidad como herramienta en la toma de decisiones para la gestión de proyectos de infraestructura en Colombia. In Universidad EAFIT.
- GCBA. (2003). Green Star. Green Building Council Australia. <https://new.gbca.org.au/>
- IBEC. (2007). CASBEE UD Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency for Urban Development. Technical manual 2007 edition.
- Jaitman, L., & Brakarz, J. (2013). Evaluation of slum upgrading programs: A literature review and methodological approaches. In Inter-American Development Bank (Issue November). <https://doi.org/10.2139/ssrn.2305396>
- López Borbón, W. (2016). La informalidad urbana y los procesos de mejoramiento barrial. *Arquitectura y Urbanismo*, XXXVII (3), 1–18.
- Martínez, L. F., Toro, J., & J. León, C. (2019). A complex network approach to environmental impact assessment. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 37(5), 407–420. <https://doi.org/10.1080/14615517.2018.1552442>
- Martínez Vitor, C. F. (2019). Urban indicators and their influence on the urban sustainable development of metropolitan Huancayo - Peru. *Ingeniare*, 27(3), 465–478. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052019000300465>
- McGregor, S. L. T., & Murnane, J. A. (2010). Paradigm, methodology and method: Intellectual integrity in consumer scholarship. *International Journal of Consumer Studies*, 34(4), 419–427. <https://doi.org/10.1111/j.1470-6431.2010.00883.x>
- Mesa García, S. C. (2021). Measurement and evaluation of six urban sustainability criteria (physical aspect), in Bucaramanga, Colombia. *Revista Ciudades, Estados y Política*, 8(3).
- Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. (2010). Sistema de indicadores y condicionantes para ciudades grandes y medianas. Gobierno de España.
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (2015). Resolución 0549 de 2015. Parámetros y lineamientos de construcción sostenible y se adopta la guía para el ahorro de agua y energía en Edificaciones. Colombia
- Montoya, J., Cartes, I., & Zumelzu, A. (2020). Indicators for evaluating sustainability in Bogota's informal settlements: Definition and validation. *Sustainable Cities and Society*, 53(51). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101896>
- Moreno García, R., & Inostroza Seguel, L. (2019). Urban sustainability: Analysis to scale neighborhood in The Temuco City, Chile. *Arquitectura Revista*, 15(1), 103–116. <https://doi.org/10.4013/arq.2019.151.06>
- NTC 6112. (2016). Etiquetas ambientales tipo i. Sello Ambiental Colombiano (SAC). Criterios ambientales para diseño y construcción de edificaciones sostenibles para uso diferente a vivienda. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC).
- Peralta Arias, J. J. (2020). Sostenibilidad urbana en el contexto latinoamericano y en el europeo. In Cuaderno de Investigación Urbanística (Ed.), La Unidad Barrial Sostenible (UBS). Modelo para la evaluación sostenible de periferias barriales de borde existentes en ciudades latinoamericanas (Issue 131, p. 128).
- Pinedo, C. D., & Pimentel, M. A. da S. (2021). Análisis de indicadores de desarrollo sostenible en el municipio de São João da Ponta/PA. *Nature and Conservation*, 14(1), 158–168. <https://doi.org/10.6008/cbpc2318-2881.2021.001.0018>

- Presidencia de la República. (2015). Decreto 1077 de 2015. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio. Colombia
- Romero Vargas, M., Bermúdez Rojas, T., & Duque Gutiérrez, M. (2020). Qualitative evaluation of socio-environmental sustainability indicators for their selection and application in Costa Rican cit. *Revista Geográfica de América Central*, 64(1), 17–42.
- Secretaría Distrital de Planeación. (2017). Encuesta Multipropósito 2017. Principales resultados Bogotá-Región. In *Encuesta Multipropósito 2017*.
- Sharifi, A., & Murayama, A. (2014). Neighborhood sustainability assessment in action: Cross-evaluation of three assessment systems and their cases from the US, the UK, and Japan. *Building and Environment*, 72, 243–258. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.006>
- SINCHI. (2003). Densidad de población. Definición del indicador.
- Sturges, H. A. (1926). The Choice of a Class Interval. *Journal of the American Statistical Association*, 21(153), 65–66. <https://doi.org/10.1080/01621459.1926.10502161>
- United Nations. (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. In Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015.
- US GBC. (2009). LEED ND Leadership in Energy and Environmental Design for neighborhood development. The U.S. Green Building Council.

Appendix A

Table II- 10. Results of the scoring method for quantitative indicators implemented by strata in Mosquera, according to Sturges (1926) formula

Code	Unit	Sustainability score		
		Level 1	Level 2	Level 3
SS2	%	36.95-56.95	56.95-76.95	76.95-97.07
URB1	p/Ha	0.265-168.265	168.265-336.265	336.265-504.15
URB2	dw/Ha	2.51-23.51	23.51-44.51	44.51-65.46
URB3	%	0.17-33.17	33.17-66.17	66.17-99
URB4	%	0.22-4.22	4.22-8.22	8.22-12
URB5	%	0.17-33.17	33.17-66.17	66.17-99
URB6	%	0.13-0.39	0.39-0.64	0.64-0.77
URB7	%	0.04-0.11	0.11-0.18	0.18-0.22
URB8	%	0.01-0.04	0.04-0.06	0.06-0.08
URB9	%	0.2-0.54	0.54-0.87	0.87-1.04
URB10	%	0.0033-1.0033	1.0033-2.0033	2.0033-3
URB11	m	0.14-2.14	2.14-4.14	4.14-6
MOB5	p/day	33552-55920	55920-78288	78288-100656
MOB6	%	0-16.83	16.83-33.83	33.83-51
MOB8	#	0-1631	1631-3262	3262-4893
MOB10	#	9-837	837-1665	1665-2493
BIO1	%	2.89-4.89	4.89-6.89	6.89-8.84
BIO2	m ² /p	1.49-1927.49	1927.49-3853.49	3853.49-5779.39
WTR1	%	0-39.02	39.02-78.02	78.02-117
WTR2	m ³	0-62606	62606-125212	125212-187818
WST2	%	5.6-41.6	41.6-77.6	77.6-113.77
POL10	m	205.12-320.12	320.12-435.12	435.12-550.3
SOC5	%	0.01-1.01	1.01-2.01	2.01-3
SOC6	%	0.0005-0.0016	0.0016-0.0027	0.0027-0.0032
SOC7	\$COP	1716666-2299999	1133333-1716666	550000.2-1133333
SOC8	\$COP/ m ²	4434074-6111111	2757037-4434074	1080000-2757037
ECO11	\$COP/kWh	481.5167-616.48	346.5167-481.5167	211.5167-346.5167
ECO12	\$COP/m ³	1228.92-1397.17	1060.92-1228.92	892.92-1060.92
ECO13	\$COP/m ³	3137-4301.8	1972-3137	807-1972
ECO14	\$COP/m ³	2127.22-2917.2	1337.22-2127.22	547.22-1337.22

Table II- 11. Reference values of Colombia for quantitative indicators implemented in the whole city of Mosquera

Code	Unit	Reference Value Colombia	Sustainability score		
			Level 1	Level 2	Level 3
SS3	%	0,05	-		+
URB15	%	90%	-		+
URB16	-	Yes	No		Yes
MOB1	veh/p	5,9	-		+
MOB2	%	14%	-		+
MOB3	min/p-day	46	+		-
MOB9	#	0,02	-		+
BIO4	%	47%	-		+
BIO5	Ha	60	-		+
ENG5	%	0,9972	-0,5	>50%	<100%
WTR5	%	1%	-		+
MAT3	%	0,15	-		+
MAT4	-	No	No		Yes
WST1	%	17%	-		+
WST3	%	0,98	-		+
WST4	%	0,045	+		-
WST5	%	1%	-		+
WST6	%	0,1	-		+
WST7	%	0,0769	-		+
WST8	%	2%	+		-
WST9	kg/p-day	0,63	+		-
WST10	times/wk	3	-		+
POL2	µg/m ³	5000%	+		-
POL3	µg/m ³	100	+		-
POL4	µg/m ³	80	+		-
POL5	µg/m ³	10000%	+		-
POL6	%	0,382	+		-
POL8	%	0,42	+		-
SOC1	%	22%	+		-
SOC2	%	0,362	+		-
SOC3	%	0,268	+		-
SOC4	-	Si	No		Si
SOC9	%	0,233	+		-
SOC10	%	0,0308	-		+
ECO1	%	43%	-		+
ECO2	%	0,485	+		-
ECO3	%	0,214	+		-
ECO4	%	9%	+		-
ECO5	%	0,164	+		-
ECO6	%	0,66	-		+
ECO7	%	15%	-		+
ECO8	%	0,232	-		+
ECO9	%	0,08	0	<8%	>8%
ECO10	%	3%	-		+
ECO15	\$/COP/h	3657,51	-		+
ECO16	\$/COP/h	3785,52	-		+
MI1	%	100%	-		+
MI2	%	1	-		+
MI3	%	0,745	-0,5	>50%	<100%
MI4		Yes	No		Yes

Code	Unit	Reference Value Colombia	Sustainability score		
			Level 1	Level 2	Level 3
MI5		Yes	No		Yes
MI6	-	Yes	No		Yes
MI7	-	Yes	No		Yes
IN1	-	Yes	No		Yes

Table II- 12. Scoring method for qualitative indicators implemented in Mosquera

Code	Unit	Sustainability score		
		Level 1	Level 2	Level 3
URB12	-	No		Yes
URB14	-	No		Yes
MOB4	-	No		Yes
MOB7	-	Dirt	Gravel or chippings	tarmacked
BIO6	-	No		Yes
ENG1	-	No		Yes
ENG2	-	No		Yes

Capítulo III: Indicadores de sostenibilidad a nivel de edificio. Herramientas de evaluación de la sostenibilidad

How are indicators in green building rating systems addressing sustainability dimensions and life cycle frameworks in residential buildings?

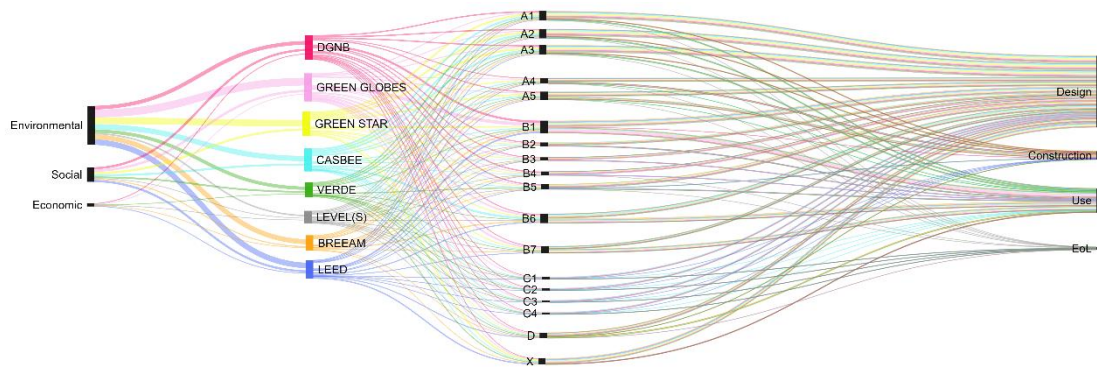
Braulio-Gonzalo, M., Jorge-Ortiz, A., Bovea, M.D., 2022. How are indicators in Green Building Rating Systems addressing sustainability dimensions and life cycle frameworks in residential buildings? *Environ. Impact Assess. Rev.* 95, 106793.

<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106793>

Abstract

The use of tools capable of evaluating the sustainability of buildings throughout their life cycle represents a key point enabling the transition towards a sustainable built environment. To this end, different Green Building Rating Systems (GBRS) have been developed over the last few decades. All of them are voluntary schemes and propose a set of indicators to evaluate the associated impacts of buildings throughout their life cycle. However, it is unclear how GBRS are addressing sustainability dimensions and the life cycle frameworks, and particularly in residential buildings, which are responsible for a great part of these impacts. The aim of this study is to explore, in detail, how indicators in GBRS are covering the three dimensions of sustainability (environmental, social and economic) and the information modules proposed by EN 15978, along the life cycle stages of the building construction process. To do so, eight GBRS were selected and the 387 sustainability indicators included in them were analysed and clustered according to three different classification criteria, namely, sustainability dimension, information modules and stage of the construction process life cycle. The analysis and clustering process of indicators was carried out by a panel of experts in the field of study, with multidisciplinary academic and professional background, throughout an iterative process of four rounds and meetings, which led to achieve a consensus in the findings. The results of the analysis revealed that the environmental dimension is the one that is considered most among the tools, and both the social and economic dimensions require more attention to achieve a good balance. GBRS are more focused on the evaluation of the embedded impacts of the building, since most of the indicators are related to the product and construction stages (A1-A5) and therefore need to acquire a more holistic approach throughout the whole life cycle; the indicators should be considered in the very early design stage (not when the building is in operation), when decisions are made and have more potential to improve the sustainability performance of the buildings throughout its lifespan. It was not possible to cluster one set of indicators as they referred to aspects beyond the EN 15978 system boundary (such as site, transport or domestic waste management), thus highlighting the need for more coherence between a building's life cycle and GBRS frameworks, on the one hand, and the inclusion of new information modules covering the above-mentioned additional aspects, on the other.

Graphical abstract



Keywords

Green Building Rating Systems (GBRS); building life cycle; EN 15978; sustainability indicators; sustainable buildings

Highlights

- Eight GBRS and 387 sustainability indicators were comprehensively analysed.
- The three sustainability's dimensions require to be more balanced in GBRS.
- GBRS should be applied from the early design stage of the building to succeed.
- Life cycle information modules in EN 15978 fail to cover all aspects in GBRS.

1. Introduction

The building sector in the European Union (EU) is one of the those that has the most impact on the environment, since it accounts for 42% of the energy consumed, 35% of the greenhouse gas (GHG) emissions, 50% of the extracted materials and about a third of the water consumption and waste (COM445, 2014). Residential buildings, in particular, are responsible for a great part of these impacts and these percentages are presumably going to increase in the coming years (Eurostat, 2020).

The use of tools capable of evaluating the sustainability of buildings throughout their life cycle represents a key point enabling the transition towards a sustainable built environment, from the environmental, social and economic perspective. To this end, different Green Building Rating Systems (GBRS) have emerged in the last few decades and have since been reviewed from different perspectives (Haapio y Viitaniemi, 2008; Lazar y Chithra, 2021a). The first contribution on GBRS was the development of the Building Research Establishment Environmental Method (BREEAM) (BRE Global, 1990) and, from then on, different international organisations, such as the World Green Building Council (WGBC, 1990), the International Initiative for Sustainable Building Environment (iiSBE, 2004a) and the Sustainable Building Alliance (SBA, 2009), have contributed with the development of new tools, applicable worldwide. But some of the GBRS have gradually been adapted to specific regions/countries in order to meet their unique and contextual requirements (Lazar y Chithra, 2021a). As a result, the number of GBRS currently put into practice around the world is notable and some of them have even expanded their scope to the urban/neighbourhood context. All these schemes are voluntary and comprise a set of indicators to evaluate the associated impacts of buildings throughout their life cycle, usually organised in topics such as energy, waste, water, transport or land features, within the environmental pillar of sustainability, and other topics within the social and economic pillars.

The literature contains numerous reviews that address the study of the characteristics of the GBRS. With a general approach, Lazar and Chithra (2021a) recently performed a bibliometric mapping of publication trends in the development of GBRS, thereby providing a snapshot of the current situation. Their findings highlighted the most productive authors in this field (Bragança et al., 2010; Mateus y Bragança, 2011; San-José et al., 2007), the usual countries and affiliations, the most cited papers (Haapio y Viitaniemi, 2008) and the most frequent journals and keywords used. However, the first attempt to take a deeper approach to look into the GBRS was made by Haapio and Viitaniemi (2008), who explored the differences between the existing tools in 2008 by classifying them according to general criteria. Since then and as new tools have been developed, more research has been published. Among the most recent literature, Bernardi et al. (2017) analysed the general features of six of the most adopted tools (BREEAM (BRE Global, 1990), CASBEE (IBEC, 2007), DGNB (DGNB, 2018), HQE (HQE, 2016), LEED (US GBC, 2019) and SBTool (iiSBE, 2004b)) and explored the categories included in each tool. Illankoon et al. (2017) analysed the categories considered in eight tools with worldwide coverage (LEED, BREEAM, BEAM Plus (BEAM Society Limited, 2021), Green Mark (Building Construction Authority, 2013), CASBEE, GBI (2009), IGBC (IGBC Indian Green Building Council, 2015) and Green Star (GCBA, 2003)) and found that energy, water and indoor environment

quality were the most common. Mattoni et al. (2018) analysed five tools (CASBEE, Green Star, BREEAM, LEED and ITACA (2014)) and defined six common categories of sustainability, energy being the one with more weighting while water was the one with the least. Shan and Hwang (2018) reviewed fifteen tools, including some specific ones for the Asian region, and classified their aspects into seven categories, energy again being the one with more weighting, followed by site and indoor environment. From a different perspective of GBRS, but also with the aim of measuring and manage the level of sustainability, Kylili et al. (2016) focused on Key Performance Indicators (KPI) and conducted a literature review to draw the state of the art in building renovation projects. They also defined a common structure of categories (economic, environmental, social, technological, time, quality, disputes and project administration) and subcategories in order to classify and identify the most frequently employed types of KPIs, and found that the environmental is the most popular category with the focus in energy-related, atmosphere and waste management subcategories.

On the other hand, one of the main concerns regarding the literature is to identify how indicators are addressing the sustainability dimensions. Some efforts have been made to revise research from this perspective. Doan et al. (2017) examined four tools (LEED, BREEAM, Green Star and CASBEE) to assess how the environmental, social and economic, plus institutional aspects were considered in each one of them; their results showed that the environmental one is the main focus in building schemes whereas the social one is emphasised in urban/neighbourhood schemes. In line with the findings of Braulio-Gonzalo (2015), who explored thirteen urban sustainability assessment tools, both studies concluded that economic and institutional factors should be promoted to improve the capability of GBRS. Specifically, for the region of India, Lazar and Chithra (2021b) focused on GBRS applied to residential buildings there and found that all three dimensions were well balanced, with a slightly higher weight for the environmental one. Awadh (2017) analysed four GBRS (LEED, BREEAM and two particularly developed for the gulf region, Estidama and GSAS), discussing quantitatively the credit weighting given to sustainability pillars, and found that the environmental issues are the most approached in all them, followed by the social, procedural and economic. Although some efforts have been made to explore the balance of the sustainability dimensions, it seems that results varied depending on the number and type of GBRS included in the study. Hence, a good representation of tools used around the world is needed for analysis, in order to draw general conclusions. Furthermore, few studies considering GBRS specifically applicable to residential buildings were found.

As seen from the previous findings, the environmental aspect reaches a high degree of relevance among the GBRS. The Life Cycle Assessment (LCA) methodology (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006) and the framework proposed by EN 15978 (2011) are the two approaches commonly used to holistically analyse the environmental performance of buildings (Sartori et al., 2021). So that, the second main concern is to find how indicators included in GBRS are approaching the LCA framework and, in turn, to investigate the role of the life cycle approach in the GBRS framework. Sartori et al. (2021) pointed out the potential of the LCA methodology when evaluating sustainability in buildings and explored the connection between LCA and GBRS. After analysing six tools (LEED, BREEAM, Green Star, HQE, CASBEE and DGNB), they found that while GBRS are mostly based on a checklist with many

qualitative criteria, the LCA methodology allows quantitative results to be obtained, which facilitates the decision-making process. Ismaeel (2018) analysed the interrelations between eleven GBRS and LCA through the investigation of midpoint and endpoint environmental impact categories and highlighted discrepancies in the base of their environmental assessment, and then showed the need for a robust base for comparing the outcomes obtained with the two approaches. From a country context perspective, Palumbo (2021) analysed the effect of LCA data sources on a specific Italian tool, and Oviir (2016) analysed the application of the LCA methodology within the framework of an Estonian one together with some others used in the country, showing how each scheme deals with the life cycle of a building and which criteria are given higher priority. Trigaux et al. (2021), with a wider approach beyond the GBRS, analysed various benchmarks developed on the basis of the LCA methodology, and included in their work different models and tools, and some GBRS (BREEAM, CASBEE, DGNB and LEED). They analysed aspects such as the LCA method used, LCA database and inventory, reference units and study time period, geographical coverage, building elements and assemblies considered, and the life cycle modules according to EN 15804 (2012) approached. However, their study only did general investigation and did not reach the level of indicators analysis, in detail.

With the aim of exploring how the stages of the life cycle of the building construction process are being approached by GBRS, which represents the third main concern raised herein, some work has been found in the literature. Ferrari et al. (2022) analysed six GBRS and its engagement with the stages of the building life span (design, production, construction, use, maintenance, demolition and disposal), finding that design, construction, use and maintenance are the most addressed ones, being these in common between all GBRS analysed. However, they did not investigate this engagement at the level of the indicators included in the GBRS. Meex et al. (2018) looked at possible solutions to check the suitability of LCA-based environmental impact assessment (EIA) tools (not specifically GBRS) for use by architects during early design stages, and defined the requirements that these tools should meet; but they did not investigate if the current GBRS met these requirements through the indicators included. With a focus on building refurbishment, Vilches et al. (2017) showed that the more frequently studied life cycle stages among the literature are those related to production and use phases, exclusively analysing environmental issues, not social or cultural ones. Once more, the analysis is not conducted at the level of indicators.

Based on these literature findings, the shortcomings of both approaches, GBRS and LCA, are evident and the confluence of the two is needed. While GBRS emphasises the improvements and advantages of the design decisions, LCA outputs are focused on quantifying the environmental damage. Additionally, although both methods evaluate a building's environmental impact systematically, LCA focuses on a global or regional context, but ignores the impact of a new building in a neighbourhood or community context, which is considered in GBRS. However, and despite these relevant findings in the literature, none of the studies explored how the stages of the life cycle of the building construction process and the information modules for the different stages of the life cycle of a building proposed by EN 15978 (2011) are being addressed in GBRS, at the detailed level of the

indicators. And this is essential to be able to use both approaches in a consistent framework for modelling environmental impacts of buildings.

Furthermore, although good knowledge about GBRS currently exists in the literature, the research conducted was strongly focused on the analysis of the categories/topics considered and the weightings allocated to each one. Also, in line with conclusions drawn by Li et al. (2017) in their review and comparative analysis on studies addressing GBRS, the majority of existing work concentrated on general information comparison of the assessment methods, covering only basic information (such as developers, schemes, classification levels, etc.). Meanwhile, only few studies conducted the indicator comparison, which is the most detailed comparison level, and, as they concluded, more attention is required to be paid to this specific analysis. Additionally, and as depicted from the literature review in this work, the analysis of the balance among the dimensions of sustainability and the stages of the life cycle of the building and of the building construction process still seems to be neglected in the literature. To overcome these gaps, this study aims to seek answers to these three main research questions:

- RQ1) Are the three dimensions of sustainability (environmental, social and economic) equitably addressed in GBRS?
- RQ2) Do the indicators included in GBRS consider the information modules for the different stages of the life cycle of a building proposed by EN 15978?
- RQ3) At which stage of the life cycle of the building construction process should the GBRS indicators be assessed to improve a building's sustainability?

2. Methodology

The methodology used in this work consisted of two main phases, as shown in Figure III-1 and described below.

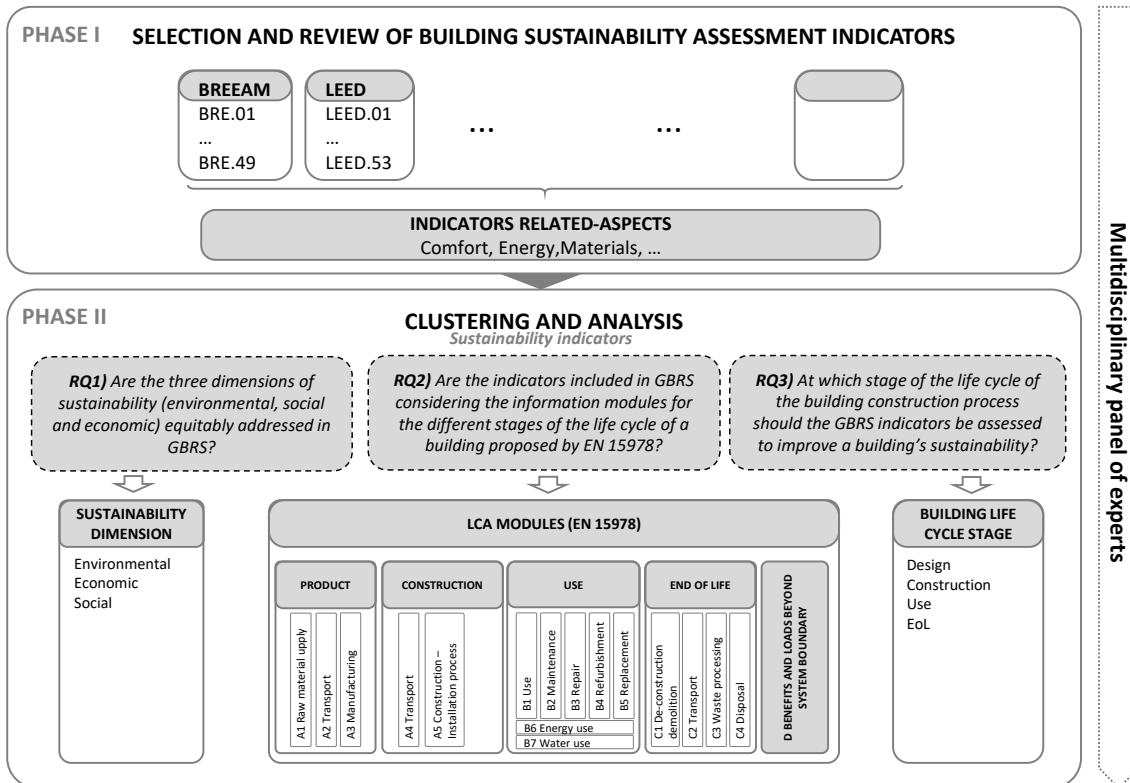


Figure III- 1 Methodology

- In Phase I, Green Building Rating Systems (GBRS) were selected, ensuring that they were applicable to residential buildings and covered a wide range of regions around the world. GBRS generally consist of an extensive list of sustainability indicators that measure the level of sustainability regarding different aspects, such as energy, water and waste, within the environmental dimension; environmental awareness, within the social one; or cost of construction, within the economic one. The indicators included in each GBRS were identified, together with a set of common aspects to which the indicators refer, in order to facilitate a subsequent systematic analysis and clustering. The clustering was made as follows: the scheme provided by the GBRS was analysed in detail and the indicators included in each one were reviewed and coded. Although each of them proposes a different structure to group them, similar aspects were identified and a common structure has been proposed, which made it possible to work with a common language in the framework of this study.
- In Phase II, the GBRS indicators were clustered in accordance with three different criteria:
 - The sustainability dimension: environmental, economic and social. Since the earliest uses of the term sustainable development (Brundtland, 1987), three traditional dimensions or pillars have been assumed to be necessary to achieve sustainable systems: environmental, social and economic. In addition, CEN-EN 15643 (2012) urges inclusion of the three pillars together when assessing a building's sustainability.
 - The information modules for the different stages of the life cycle of a building proposed by EN 15978 (2011), based on EN 15804 (2012), which are:

- product stage (A1-A3): covers the cradle-to-gate processes for the materials and services used in the construction,
 - construction stage (A4-A5): covers the processes from the gate of the factory making the construction products to the practical completion of the construction work,
 - use stage (B1-B7): B1 encompasses, more specifically, the impacts and aspects arising from the normal conditions of use of the components of the building; modules B2 to B5 are related to maintenance, repair, replacement and refurbishment operations; B6 includes energy used by building-integrated technical systems during the operation of the building; and B7 includes all the water used and its treatment (pre- and post-use), also during the operation of the building,
 - end of life stage (EoL) (C1-C4): considers the building's demolition as a multi-output process that provides a source of materials, products and components that are to be discarded, recovered, recycled or reused, and
 - benefits and loads beyond the system boundary (D): considers components for reuse and materials for recycling and energy recovery as potential resources for future use, and quantifies the net environmental benefits or loads resulting from these operations.
- The stages involved in the life cycle of a building: design, construction, use and end of life (EoL) proposed by EN 15978 and the Royal Institute of British Architects Plan of Work (RIBA, 2020):
 - Design stage, which consists of the strategic definition, preliminary studies, concept design and technical design.
 - Construction stage, which corresponds to the manufacturing and construction processes and handover.
 - Use stage, which is defined by the operation and management of the building.
 - EoL stage, which includes the decommissioning of the building, deconstruction, reuse and recycling.

The clustering process was tackled by a multidisciplinary panel of experts from different disciplines and geographical areas, composed by an architect, an environmental engineer and an industrial engineer, whose academic and professional background matched with the field of the study. The review and clustering were carried out in several rounds throughout an iterative process, until achieving a consensus in the findings by the experts. The Phase I was approached in a first round, where one of the experts analysed in detail the set of indicators identified, from her own viewpoint, and classified them according to the aspect to which referred by considering environmental effluents (airborne, waterborne, solid waste, etc.), but also users' comfort and other building users' issues; then the related aspects to indicators were defined in a common structure. This work was revised,

subsequently, by the other two experts and, afterwards, a meeting session was taken to discuss discrepancies and bring together the various points of view, until defining the final classification. Phase II was approached in three rounds, following the same latter dynamic, one round for each one of the clustering criteria: the sustainability dimension, the information modules proposed by EN 15978 (2011), the stages of the life cycle of the building construction process. The process of clustering ended when, in the final meeting session after each round, a consensus in the findings was achieved. Following this dynamic, different experts' points of view within the disciplines considered in the study were integrated altogether, which brought objectivity and a holistic vision to the work conducted herein.

3. Results

3.1. Phase I: Selection and review of GBRS indicators

In order to cover a wide range of the world's regions, eight GBRS applicable to residential buildings were selected: BREEAM (BRE Global, 2016), LEED (Leadership in Energy & Environmental Design) (US GBC, 2019), CASBEE (Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency) (IBEC, 2007), Green Star (GCBA, 2003), Green Globes (ECD, 2019), DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen) (DGNB, 2018), VERDE (GBCe, 2017) and Level(s) (the European framework for sustainable buildings) (Dodd et al., 2021). They are briefly described in Table III-1 and their geographical distribution worldwide (Asia, Africa, North America, South America, Europe and Australia) is shown in Figure III-2. Some of these GBRS are adapted to specific countries, which develop their own particular GBRS. For instance, Green Star, despite being set up in Australia, was subsequently adapted to South Africa, Brazil and Chile; and LEED was originally from the US, but also applicable in many countries in South America, such as Mexico, Colombia or Peru.

LEED, BREEAM, CASBEE, Green Star and Green Globes are the oldest ones, and have already been widely implemented around the world, both internationally and regionally. DGNB emerged in Germany more recently and has now already been adapted to nearby countries, such as Austria, Switzerland, Denmark and Spain. The tool VERDE was also developed more recently and it derives from the SBTool (iiSBE, 2004b), which was created by the iiSBE with the aim of providing a generic tool to be adapted to the context specificities of the corresponding region where it is to be applied. In this case, VERDE is the adaptation to Spain, and it was selected in this study as a representation of the SBTool. Finally, Level(s) is the youngest tool and, although it was developed by the European Commission, it is intended to be applicable internationally. It has the minimum numbers of indicators, with maximum leverage to deliver sustainability, and integrates a common language for building sustainability. Because it was developed only recently, Level(s) has received very little attention in the literature (del Rosario et al., 2021; Díaz-López et al., 2021; Sánchez-Cordero et al., 2019) and its inclusion in the study contributes to enhancing the background.

Table III- 1. Descriptors of GBRS

GBRS	Origin	Year	Developer	Applicability	# ind.	Rating system
BREEAM	UK	1990	BRE	UK, US, Netherlands, Norway, Spain, Sweden, Germany, Austria, Switzerland, China, etc. (89 countries)	49	✓
LEED	US	1998	US GBC	US, China, UAE, Brazil, India, Canada, Mexico, Germany, Turkey, Korea, etc. (more than 167 countries)	53	✓
CASBEE	Japan	2004	IBEC	Japan	57	✓
Green Star	Australia	2002	GBC of Australia	Australia, New Zealand, South Africa	65	✓
Green Globes	Canada	2000	ECD	Canada, US	73	✓
DGNB	Germany	2008	DGNB	Germany, Austria, Switzerland, Denmark, Spain	38	✓
VERDE	Spain	2010	GBCe Spain	Spain	39	✓
Level(s)	Europe	2020	JRC	Europe and international	16	

Notes: UK: United Kingdom; US: United States; BRE: Building Research Establishment; GBC: Green Building Council; IBEC: Institute for Building Environment and Energy Conservation; ECD: Energy and Environmental Canada; DGNB: Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen; JRC: Joint Research Centre; UAE: United Arab Emirates

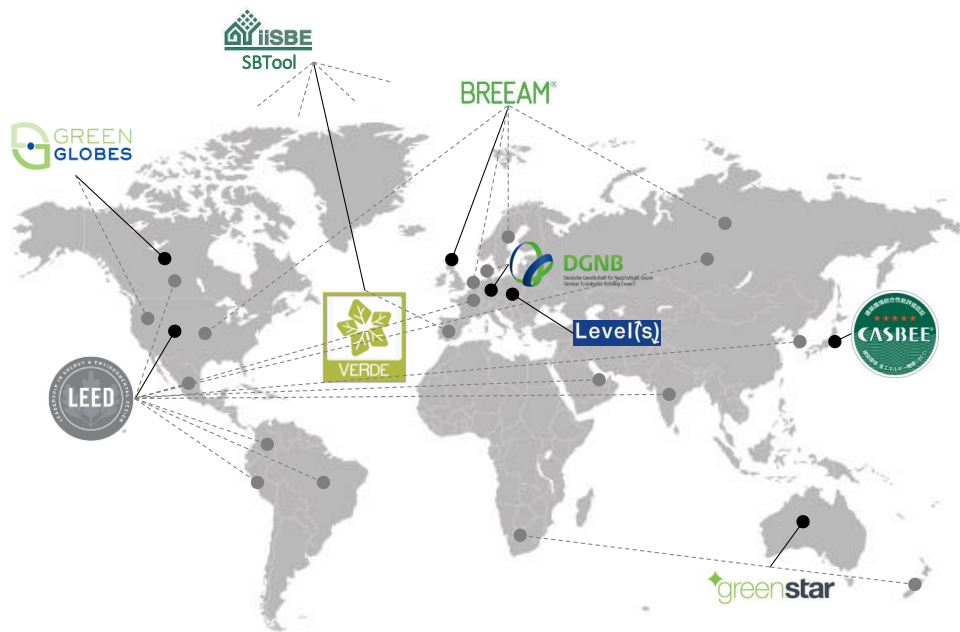


Figure III- 2. World map for applicability of selected GBRS

The scheme provided by the eight GBRS was analysed in detail and the indicators included in each one were reviewed and coded, 387 altogether. The Supplementary material provides an exhaustive list and the codes of the indicators included in each GBRS. Although each of them proposes a different structure to group them, similar aspects were identified and a common structure has been proposed, which made it possible to work with a common language in the framework of this study. The common aspects identified are the following: Comfort, Energy, Environmental awareness, Materials, Natural resources and climate change, Waste and Water. Table III-2 describes the items considered in each aspect.

Table III- 2. Indicator-related aspects

Aspects	Items considered
Comfort	Proximity to public transport and services Indoor environmental quality (VOCs emissions, etc.) Thermal comfort Ventilation Lighting Noise Privacy Efficiency of spaces and accessibility
Energy	Energy demand and consumption Improvement of building's thermal envelope Charging electric vehicles Renewable energy Efficient household appliances and building facilities Energy consumption monitoring
Environmental awareness	Environmental education Good practices user guide Code of conduct for contractors Accredited professional involvement
Materials	Use of recycled materials Use of materials obtained from sustainable resources Use of local materials Impact of construction materials and eco-labelling Conservation of the building Design for adaptability and renovation
Natural resources and Climate change	Habitat management and restoration Land use and reuse Mitigation of the ecological impact during construction Use of vegetation to create shade Flood and erosion risk Urban Heat Island effect Atmosphere emissions (CO ₂ , NO _x , etc.) Responsible use of refrigerants Transport and car parking Pollution mitigation (water, soil, lighting, etc.)
Waste	MSW segregation MSW storage in the building Composting CDW management Planning a selective demolition strategy Recycled aggregates
Water	Drinking water consumption Irrigation system Sustainable water treatment Reuse of non-potable water Water consumption monitoring

Note. VOCs: Volatile Organic Compounds; CO₂: carbon dioxide; NO_x: nitrogen oxides; MSW: Municipal Solid Waste; CDW: Construction and Demolition Waste

The indicators included in the GBRS were classified according to these aspects, by considering their objective. Figure III-3 shows, graphically, the distribution of the 387 indicators in the seven aspects, by GBRS. It can be observed that Comfort is the most addressed aspect (with 108 indicators dedicated to it), which denotes that the user's well-being is a priority among the GBRS; this is followed by Natural resources and climate change (with 107). To a lesser extent, the aspects Waste (with 25) and Environmental awareness (with 20) are also evaluated. On average, the weight by number of indicators conferred by the GBRS to each aspect is 28.5% to Comfort, 27.9% to Natural resources and climate change, 12.3% to Energy, 10.9% to Materials, 8.5% to Water, 6.9% to Waste and 5% to Environmental awareness. It should be noted that the GBRS are quite balanced among the aspects and coincide with these percentages. From the perspective of GBRS, only Level(s) fails to cover one of the aspects, Environmental awareness, since it does not include any related indicator.

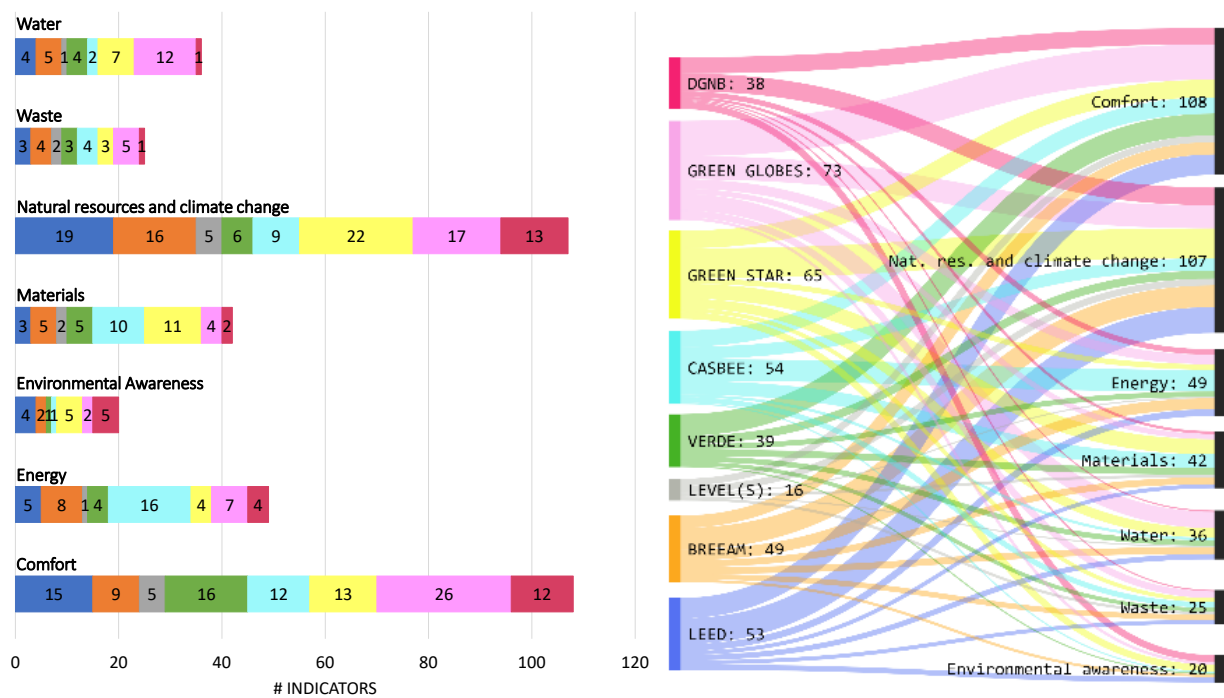


Figure III- 3. Identification of common aspects in GBRS indicators and counting

3.2. Phase II: Clustering and analysis

Sustainability dimension

The indicators were classified according to the three dimensions of sustainability -environmental, social and economic- and the results are presented in Figure III-4. The vertical axis represents the number of indicators in these three dimensions, each of which is one bar. The percentages included in the bars represent the proportion of indicators (in number) in each GBRS (colours) that addressed each dimension; so that, Figure III-4 depicts, in horizontal interpretation, how the indicators are quantitatively distributed according to the three sustainability's dimensions, and by GBRS. For instance, LEED distributed 65% of its indicators according to environmental dimension, while 25% and 10% according to social and economic ones. It should be noted that some indicators addressed

more than one dimension; for instance, some included in Comfort were classified both as environmental, due to their being related to pollutant emissions (VOCs, formaldehydes, etc.), natural ventilation, lighting and noise protection, and as social, because they are also related to the well-being of the building’s occupants. This is also the case of indicators addressing transport and mobility: despite being mainly related to such an environmental issue because of the associated pollution and GHG, they also relate to the social pillar, since they enhance the users’ comfort.

Figure III-4 evidenced that the Environmental dimension is by far the most addressed by the GBRS; in fact, the tools dedicate 68.3% of the indicators to it, on average. The Social dimension, however, represents 25.8% and the Economic one accounts for only 6%. The Economic dimension is covered by six GBRS, but with a very low percentage of indicators: Level(s) (13.6% of indicators related to the Economic pillar), DGNB (12.5%), LEED (10%), VERDE (5.9%), Green Globes (4%) and BREEAM (1.8%). Among them, there are some kinds of indicators related to the cost of construction, energy efficiency measures for saving on utility bills, building users’ guide (with monetary saving strategies) and consideration of the life cycle cost assessment.

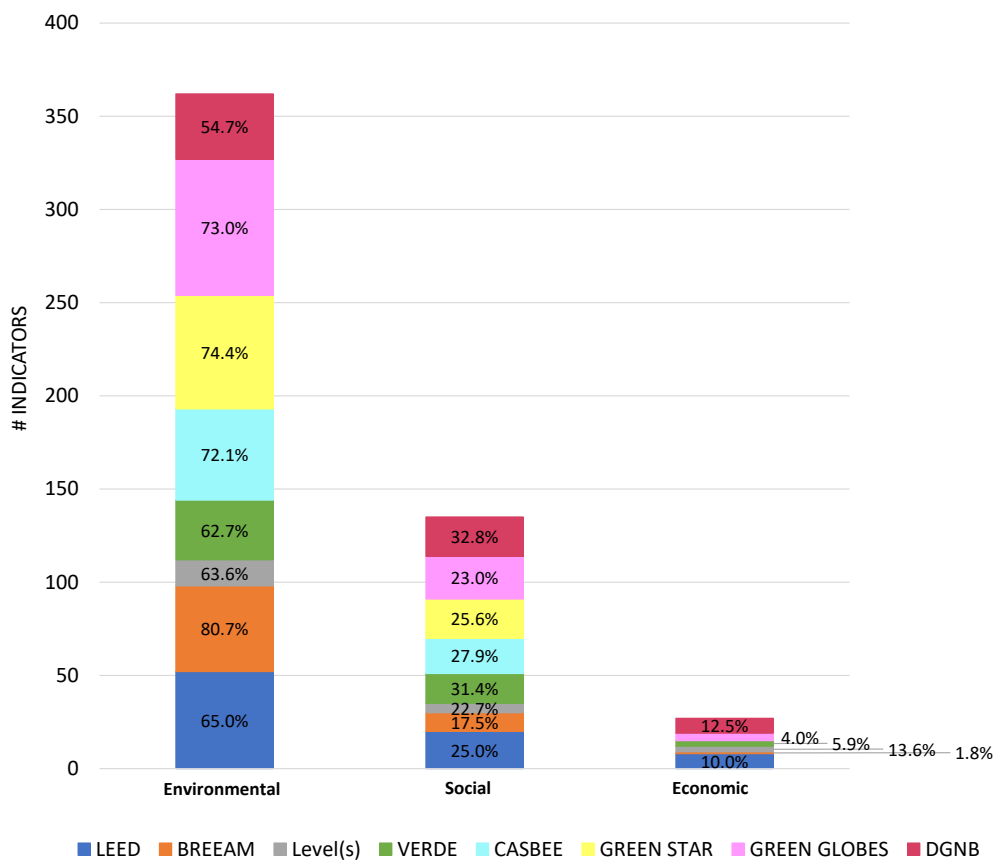


Figure III- 4. Clustering: sustainability dimension

Information modules for the different stages of the life cycle of a building

The indicators included in the GBRS have been clustered according to the information modules for the different stages of the life cycle of a building proposed by EN 15978 (2011) and the results are depicted in Figure III-5. Module B1 integrates the highest number of indicators (117), mainly related to indoor air quality, natural ventilation and lighting, and low emission materials, and thus they are linked to the aspect Comfort and user's well-being. Subsequently, and in order of relevance, there are modules A1-A3, B6, A5, B7, A4 and D. This implies that GBRS confer special relevance to the product stage of the building (A1-A3), when construction products and components are manufactured, from cradle to gate. A total of 88 related indicators were found in this case. The energy consumption during the use stage (module B6) is quite relevant, with 85 indicators. The construction and installation processes together with the transport activities involved in reaching the workplace, modules A4 and A5, clustered 53 and 77 indicators, respectively. Maintenance operations during the use stage (B2-B5) to ensure that the building is well preserved also gained importance among the tools, refurbishment standing out from the rest with 49 indicators. The EoL stage (C1-C4) was found to be the least addressed, which denoted that considering the deconstruction of the building is not a priority among the tools. It can therefore be said that the tools are not focused on planning what to do with the building at the end of its useful life, waste being understood as an opportunity in favour of the Circular Economy principles (The Ellen MacArthur Foundation, 2012). Finally, module D agglutinated 51 indicators.

From the GBRS perspective, the following should be noted: VERDE does not address modules B2-B4; modules C1-C4 are not addressed by BREEAM and Green Star; DGNB, Green Globes, CASBEE, Level(s) and LEED are well aligned with the modules proposed by EN 15978 since they are all covered.

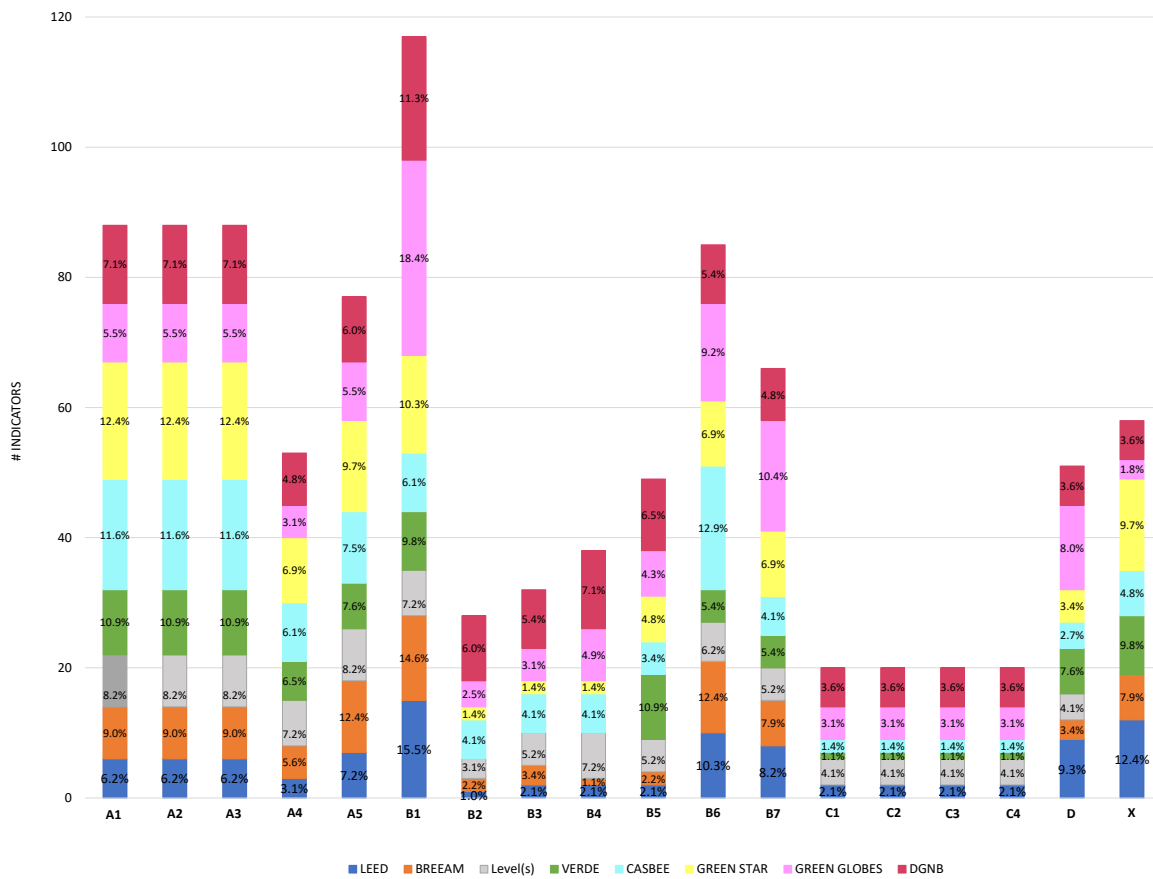


Figure III- 5. Clustering: Information module according to EN 15978 (2011)

However, 58 of the indicators included in the GBRs could not be classified since they are not aligned with any of the modules proposed by EN 15978, thus going beyond the standard. These were clustered in item X in Figure III-5 and are presented in Table III-3. As seen, aspects related to the Building site and planning, Transport and mobility, Building design, Solid waste management, Water pollution and management, Nature and biodiversity, Environmental awareness, As-built documents of the project and Stakeholders are out of the system boundary of the standard. Particularly, indicators related to transport, mobility and proximity to public services and facilities, and promotion of bicycle use should be noted, as they are recurring and widely included in the tools and, in fact, they represent an important impact on a building’s sustainability; however, they are not considered at all by the standard. The same occurs with the great amount of solid waste generated by a building’s users during the use stage, which is not considered in the scope of EN 15978. These aspects and the others presented in Table III-3 should be highlighted and taken into consideration to ensure a holistic approach when conducting an LCA of buildings. The tools with the highest number of unclassified indicators were LEED (12.4%), VERDE (9.8%), Green Star (9.7%) and BREEAM (7.9%), which means that they go beyond the standard’s system boundary.

Table III- 3. Indicators not included within the EN 15978 boundary (clustered as X in Figure III.5)

Aspect	Indicator								
		BREEAM	LEED	CASBEE	Green Star	Green Globes	DGNB	VERDE	Level(s)
Building site and planning	LEED for neighbourhood development location		•						
	High priority site		•						
	Surrounding density and diverse uses		•						
	Regional priority		•						
	Consideration of the townscape and landscape			•					
	Safety and security of the region			•					
	Control of the burden on the local infrastructure			•					
	Influence on the district						•		
Transport and mobility	Proximity to public transport	•	•		•	•	•	•	
	Proximity to equipment and services	•			•		•	•	
	Bicycle facilities		•		•			•	
	Reduced parking footprint		•						
	Sustainable vehicles and fuel-efficient transport	•	•		•		•		
	Provision of parking spaces for cars				•				
	Office at home (working from home)	•							
Building Design	Comprehensive project brief						•		
	Procedure for urban and design planning						•		
	Performance & Green Design Goals					•			
	Integrated design process					•			
	Access to private open spaces				•			•	
	Right to privacy							•	
	Efficiency of spaces							•	
	Private space	•		•					
	Precautions against crime								
	Size and layout of rooms			•					
	Barrier-free design			•					
Solid waste management	Innovation		•		•				
	Segregation of solid waste	•	•		•			•	
	Composting of domestic waste	•							
Water pollution and management	Post occupancy solid waste recycling					•			
	Watercourse pollution				•				
Nature and biodiversity	Discharge to sewer				•				
	Greening of the premises			•					
Environmental awareness	Ensuring the biological habitat			•					
	Preservation of the existing natural environment			•					
	Wildland-urban interface site design					•			
	The building as an educational tool							•	
As-built documents	User communication						•		
	Custody of project documentation							•	
Stakeholders	LEED accredited professional		•						

Stages of the life cycle of the building construction process

The results of this clustering are presented in Figure III-6 and as can be seen, the design stage agglutinated most of the indicators among the tools (58.4% in average), which indicates that it is at this point in the project – briefing and conceptual and technical design – when decisions should be made to truly improve the sustainability of the building. The design stage is followed by the use stage (with 31.6% of indicators, on average), the construction (7.3%) and the EoL (2.8%). So, although the

use stage is the one that has the greatest environmental impact on residential buildings (Nemry et al., 2010), acting here is, in fact, too late. Actions should be carried out during the design of the building to ensure positive reductions in the environmental impact of the life cycle of the building by applying the LCA methodology.

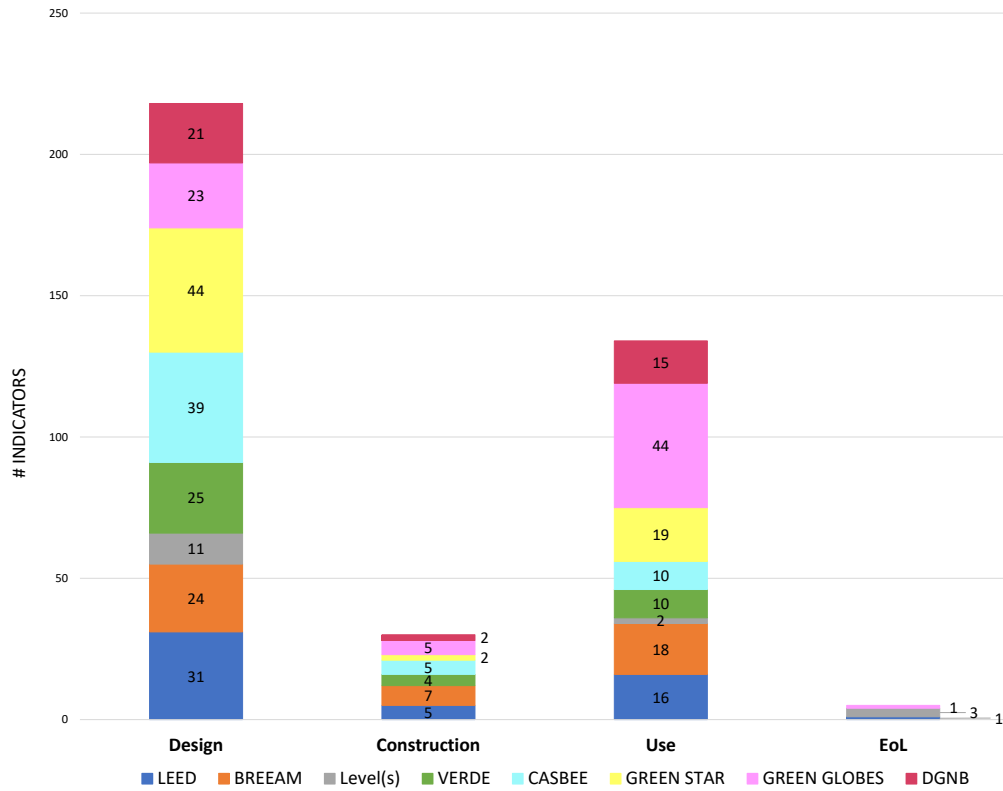


Figure III- 6. Clustering: stage of the life cycle of the building

4. Discussion

Figure III-7 presents a global overview of connection flows among the 387 GBRS indicators analysed through a Sankey diagram. Despite this overview was made from a qualitative perspective, it connects the 387 indicators with all aspects analysed in this study, at the same time: the sustainability dimensions (environmental, social and economic), the information modules proposed by EN 15978 (2011) (A1-D and X) and the stages of the life cycle of the building construction process (design, construction, use and EoL), providing global information. Taking this view into account and the results obtained in the previous section 3 from the clustering, the answers to the three research questions stated at the beginning of the study could be outlined and discussed, as follows.

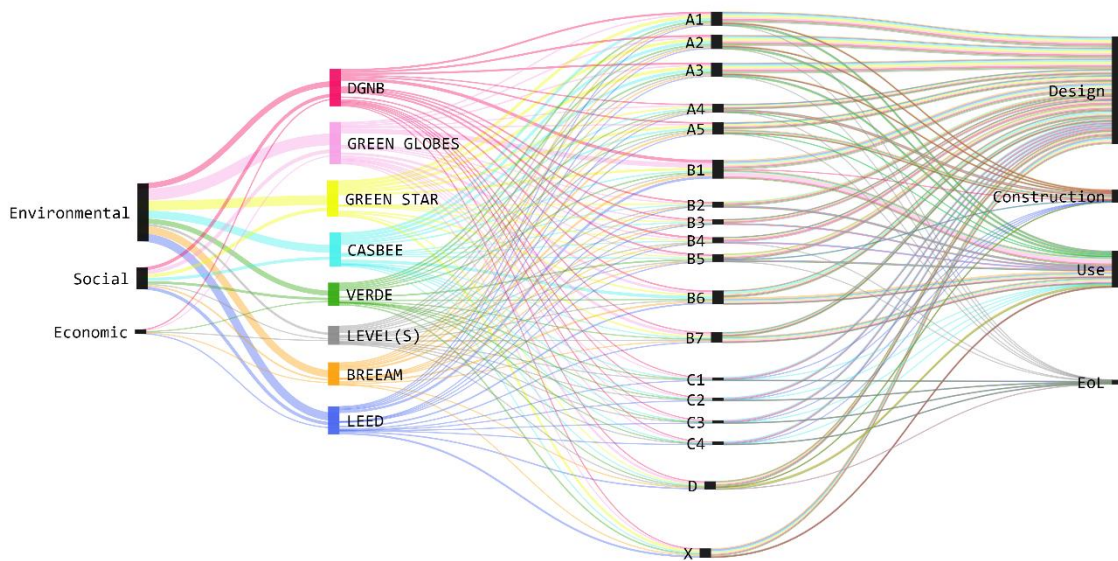


Figure III- 7. Sankey diagram showing connection flows among GBRs indicators

In relation to **RQ1**) Are the three dimensions of sustainability (environmental, social and economic) equitably addressed in GBRs?, the clustering in Figure 4 and the connection flows in Figure III-7 showed that the Environmental dimension is the most considered among the tools and the indicators mainly focused on aspects related to Comfort, Natural resources and climate change, and Energy. The Social and Economic dimensions are barely addressed. Particularly, CASBEE and Green Star did not include any Economic indicator, and for the rest of the tools, the average percentage of indicators is only 5.97%. This denotes that the Economic aspect should be integrated with more emphasis. In the case of Level(s), it represents 13.64%, including one indicator to incorporate LCC assessment. The Social dimension, despite being more present in the GBRs, represents only 25.75%. The tools that integrated it with more emphasis are DGNB, VERDE and CASBEE.

Regarding **RQ2**) Are the indicators included in GBRs considering the information modules for the different stages of the life cycle of a building proposed by EN 15978?, from Figure III-5 and Figure III-7 the following findings can be noted:

- Module A. As for the product stage (A1-A3), the tools with the highest numbers of indicators are Green Star, CASBEE and VERDE, including indicators related to the promotion of materials with environmental labelling (ISO 14021, 2006; ISO 14024, 2018) or EPD (ISO 14025, 2006), local and/or sustainable materials, and LCA calculations. As regards the construction stage, module A4 related to the transportation of materials to the site is addressed by all the GBRs, but with less emphasis than A5, which is related to impacts during the installation process. Here, BREEAM includes a notable number of indicators (11, representing 12.4% of the total).
- Module B. B1 is the most addressed, clustering on average 11.7% of the indicators among the GBRs. Green Globes, LEED and BREEAM are the ones that stand out from the rest. This module is related to Comfort indicators. Modules B2-B5, related to maintenance, repair, replacement and refurbishment, are poorly addressed. DGNB and Level(s) are the ones that

do include specific indicators in these modules, such as Design for adaptability and renovation, Design for deconstruction, reuse and recycling, and LCC assessment during the use stage. However, VERDE did not include any indicators of this type. These modules are the least frequently included in the LCA of buildings. B6, energy consumption during the use stage, is the second most addressed module. Every tool includes several indicators for it, but CASBEE, BREEAM, LEED and Green Globes stand out above the average. B7, water consumption during the use stage, is also addressed by all the tools but with lower intensity. Here, Green Globes, LEED and BREEAM stand out.

- Module C. The EoL stage is poorly approached, since on average, tools only include 1.7% of its indicators in C1-C4. Moreover, BREEAM and Green Star do not include any indicators of this kind. The indicators that are included in C1-C4 are mainly related to construction and demolition waste (CDW) management. Level(s) is more focused on this issue with indicators such as Design for deconstruction, reuse and recycling. It should be noted that, although circular economy principles (The Ellen MacArthur Foundation, 2012) are gaining importance, GBRS are not currently prepared to adopt them.
- Module D. All the tools include some indicators related to benefits and loads beyond the system boundary, such as renewable energy production, water and energy saving strategies, the use of recycled materials or the reuse of existing buildings or land, among others. It can be observed that notable relevance is granted to this module, with 5.5% of the indicators.
- In general, as depicted in Figure III-5, most of the indicators are clustered in modules A1-A5 and B1, which denotes that GBRS are more focused on evaluating embodied impacts of the building, rather than evaluating the whole life cycle. However, it is suggested that tools with an integrated life cycle approach should be developed and, in this line, it is observed that Level(s) and DGNB, despite having fewer indicators (16 and 38, respectively), are the more balanced ones, with a similar number of indicators dedicated to all information modules. This denotes that both have been conceived with a life cycle approach in the right direction.
- On the other hand, it should be noted that a significant number of indicators (58) do not refer to any of the information modules for the different stages of the life cycle of a building. This shows that EN 15978 does not consider aspects such as the site of the building, users' mobility, solid waste management, water pollution, biodiversity and the environmental awareness of users and stakeholders, which are also important and really impact on the building's overall sustainability. This issue should be reconsidered and studied in greater depth in order to align both the GBRS and the LCA frameworks better and to achieve the optimum sustainability performance levels of buildings. This brings to the fore the need for a wider life cycle framework approach that could be addressed with the creation of new information modules covering the aspects mentioned above.

Finally, as for **RQ3**) At which stage of the life cycle of the construction process of the building should the GBRS indicators be assessed to improve a building's sustainability? Figure III-6 and Figure III-7 clearly showed that the Design stage is the most important one to be addressed in order to ensure buildings have lower impacts throughout their lifespans. However, the LCA methodology is recently being applied in the building process, when the building is already constructed and there is no room

for improvement. This is why the need to implement the LCA methodology in early stages becomes especially important, that is, in the first conception of the building design.

Among the indicators that should be considered in the Design stage, we found the most relevant ones to be those related to selection of the site; the proximity of the building to public transport and services to reduce the need for a private vehicle; the building's orientation to reduce the energy demand later during the use stage; materials selection (for instance, thermal insulation of the building envelope); provision of storage spaces for bicycles in order to promote their use by the building's occupants; provision of spaces for domestic waste storage to ensure good waste management rates; and the inclusion of renewable energy systems. If these types of indicators are not taken into account during the design stage, it will be difficult to later contribute to reducing the environmental impact during the subsequent stages of the building's life cycle. CASBEE, Level(s), Green Star and VERDE are the ones that place more emphasis on the Design stage of the building.

5. Conclusions and further research

This work has presented an in-depth analysis of the indicators included in the GBRS applicable to residential buildings worldwide and their relationship with the information modules for the different stages of the life cycle of a building established in EN 15978, with the stages of the life cycle of the building construction process and the three sustainability dimensions. It was identified that GBRS are more focused on the evaluation of the embedded impacts, rather than being designed with a holistic approach throughout the whole of the building's life cycle, since most of the indicators are related to the product and construction stages. Information modules related to maintenance and refurbishment activities (B2-B5) are addressed to some extent, as are EoL modules (C1-C4). Hence, more consistency is required among the GBRS in order to comply with a robust and balanced life cycle approach. For this reason, it is recommended that new indicators addressing these information modules should be developed. In this sense, Level(s) and DGNB are distributed quite proportionally among the information modules, despite having a reduced number of indicators.

On the other hand, a non-negligible number of indicators (58) could not be clustered since they referred to the urban context surrounding the building, such as the site, mobility and biodiversity; resource management, such as domestic waste management and water pollution; or environmental awareness of users and stakeholders. These aspects are beyond the EN 15978 system boundary but, in fact, they have an influence on the environmental, social and economic sustainability of the building under evaluation. The inclusion of new information modules addressing these issues should be considered in future revisions of the standard.

In fact, the two building environmental frameworks are pertinent and aligned in the same direction, but they should be more integrated and can learn from each other.

Furthermore, the aspects most commonly addressed by GBRS are Comfort and Natural resources and climate change, which denoted the high importance granted to environmental issues and human

well-being, both related to the environmental and social dimensions of sustainability. The economic dimension has thus been left aside and requires more attention. The study also revealed that the LCA methodology is usually applied when the building is already built and comes into operation. However, from the detailed analysis of indicators, this should be integrated in the early stage of the project, that is, the design, when decisions are made and have more potential to improve the level of sustainability performance of the buildings throughout their lifespan.

This study was conducted by a panel of experts composed by an architect, and environmental engineer and an industrial engineer with a wide and solid background in environmental and building's sustainability issues, who shape up a multidisciplinary work team that integrated together the disciplines approached within the review and the clustering process of indicators. This process was carried out in several rounds throughout an iterative process, until achieving a consensus in the findings by the three experts. Although this represented a strength of the study, due to the thorough revision done, it should be noted that it could be, at the same time, a limitation, since the review process was made, inevitably, under the viewpoint of experts. This means that a certain degree of subjectivity could be included, naturally associated with the work done by people.

The results of this work can serve as a starting point to establish greater coherence between the building's life cycle and GBRS frameworks, and can help set improvements and common efforts in their approaches in further work. Also, other building types can be explored in further work.

6. References

- Awadh, O., 2017. Sustainability and green building rating systems: LEED, BREEAM, GSAS and Estidama critical analysis. *J. Build. Eng.* 11, 25-29. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.03.010>
- BEAM Society Limited, 2021. BEAM Plus Building Environmental Assessment Method from Hong Kong. Version 2.0. URL https://www.beamsociety.org.hk/en_about_us_0.php (accedido 7.16.21).
- Bernardi, E., Carlucci, S., Cornaro, C., Bohne, R.A., 2017. An analysis of the most adopted rating systems for assessing the environmental impact of buildings. *Sustainability* 9, 1-27. <https://doi.org/10.3390/su9071226>
- Bragança, L., Mateus, R., Koukkari, H., 2010. Building sustainability assessment. *Sustainability* 2, 2010-2023. <https://doi.org/10.3390/su2072010>
- Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M.D., Ruá, M.J., 2015. Sustainability on the urban scale: Proposal of a structure of indicators for the Spanish context. *Environ. Impact Assess. Rev.* 53, 16-30. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.03.002>
- BRE Global, 2016. BREEAM New Construction. Technical Manual. Building Research Establishment.
- BRE Global, 1990. Building Research Establishment Environmental Assessment Method.
- Brundtland, G.H., 1987. Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. Oslo.

- Building Construction Authority, 2013. BCA Green Mark for Non-residential Buildings. Version NRB/4.1.
- CEN-EN 15643, 2012. Sustainability of construction works - Sustainability assessment of buildings - Part 1: General framework.
- COM445, 2014. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on Resource Efficiency Opportunities in the Building Sector.
- del Rosario, P., Palumbo, E., Traverso, M., 2021. Environmental product declarations as data source for the environmental assessment of buildings in the context of Level(s) and DGNB: How feasible is their adoption? *Sustain.* 13. <https://doi.org/10.3390/su13116143>
- DGNB, 2018. Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen System. German Sustainable Building Council.
- Díaz-López, C., Carpio, M., Martín-Morales, M., Zamorano, M., 2021. Defining strategies to adopt Level(s) for bringing buildings into the circular economy. A case study of Spain. *J. Clean. Prod.* 287. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125048>
- Doan, D.T., Ghaffarianhoseini, Ali, Naismith, N., Zhang, T., Ghaffarianhoseini, Amirhosein, Tookey, J., 2017. A critical comparison of green building rating systems. *Build. Environ.* 123, 243-260. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.007>
- Dodd, N., Donatello, S., Cordella, M., 2021. Level(s) – A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings. User Manual 1: Introduction to the Level(s) common framework (Publication version 1.1). European Commission.
- ECD, 2019. Green Globes. Energy and Environmental Canada.
- EN 15804, 2012. Sustainability of construction works, Environmental product declarations, Core rules for the product category of construction products.
- EN 15978, 2011. Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method.
- Eurostat, 2020. Energy consumption and use by households. URL <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/DDN-20200626-1> (accedido 9.9.20).
- Ferrari, S., Zoghi, M., Blázquez, T., Dall’O, G., 2022. New Level(s) framework: Assessing the affinity between the main international Green Building Rating Systems and the European scheme. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 155. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111924>
- GBCe, 2017. VERDE Residencial. Nueva edificación y Rehabilitación edificios existentes. Guía para el Evaluador Acreditado. España.
- GBI, 2009. Green Building Index from Malaysia. Version 1.0. URL <https://www.greenbuildingindex.org/> (accedido 7.16.21).
- GCBA, 2003. Green Star. Green Building Council Australia.
- Haapio, A., Viitaniemi, P., 2008. A critical review of building environmental assessment tools. *Environ. Impact Assess. Rev.* 28, 469-482. <https://doi.org/10.1016/j.ear.2008.01.002>
- HQE, 2016. Haute Qualité Environnementale]. URL www.behqe.com.

- IBEC, 2007. CASBEE for Home. Technical Manual 2007 Edition. Institute for Building Environment and Energy Conservation.
- IGBC Indian Green Building Council, 2015. Green New Building Rating System. Version 3.0. India.
- iiSBE, 2004a. International Initiative for Sustainable Building Environment.
- iiSBE, 2004b. SBTool. International Initiative for Sustainable Building Environment.
- Illankoon, I.M.C.S., Tam, V.W.Y., Le, K.N., Shen, L., 2017. Key credit criteria among international green building rating tools. *J. Clean. Prod.* 164, 209-220. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.206>
- Ismaeel, W.S.E., 2018. Midpoint and endpoint impact categories in Green building rating systems. *J. Clean. Prod.* 182, 783-793. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.217>
- ISO 14021, 2006. Environmental Labels and Declarations. Self-declared Environmental Claims (Type II Environmental Labelling).
- ISO 14024, 2018. Environmental labels and declarations — Type I environmental labelling — Principles and procedures.
- ISO 14025, 2006. Environmental labels and declarations — Type III environmental declarations — Principles and procedures.
- ISO 14040, 2006. Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework. International Organization for Standardization (ISO).
- ISO 14044, 2006. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. International Organization for Standardization (ISO).
- ITACA, 2014. Istituto per l'innovazione e Trasparenza degli Appalti e la Compatibilità Ambientale [WWW Document]. URL www.itaca.org (accedido 7.16.21).
- Kyllili, A., Fokaides, P.A., Lopez Jimenez, P.A., 2016. Key Performance Indicators (KPIs) approach in buildings renovation for the sustainability of the built environment: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 56, 906-915. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.096>
- Lazar, N., Chithra, K., 2021a. Comprehensive bibliometric mapping of publication trends in the development of Building Sustainability Assessment Systems. *Environ. Dev. Sustain.* 23, 4899-4923. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00796-w>
- Lazar, N., Chithra, K., 2021b. Prioritization of sustainability dimensions and categories for residential buildings of tropical climate: A multi-criteria decision-making approach. *J. Build. Eng.* 39, 102262. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102262>
- Li, Y., Chen, X., Wang, X., Xu, Y., Chen, P.H., 2017. A review of studies on green building assessment methods by comparative analysis. *Energy Build.* 146, 152-159. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.076>
- Mateus, R., Bragança, L., 2011. Sustainability assessment and rating of buildings: Developing the methodology SBToolPT-H. *Build. Environ.* 46, 1962-1971. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.023>
- Mattoni, B., Guattari, C., Evangelisti, L., Bisegna, F., Gori, P., Asdrubali, F., 2018. Critical review and methodological approach to evaluate the differences among international green building rating tools. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82, 950-960. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.105>

- Meex, E., Hollberg, A., Knapen, E., Hildebrand, L., Verbeeck, G., 2018. Requirements for applying LCA-based environmental impact assessment tools in the early stages of building design. *Build. Environ.* 133, 228-236. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.02.016>
- Nemry, F., Uihlein, A., Colodel, C.M., Wetzel, C., Braune, A., Wittstock, B., Hasan, I., Kreißig, J., Gallon, N., Niemeier, S., Frech, Y., 2010. Options to reduce the environmental impacts of residential buildings in the European Union-Potential and costs. *Energy Build.* 42, 976-984. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.009>
- Oviir, A., 2016. Life Cycle Assessment (LCA) in the framework of the next generation Estonian Building Standard Building Certification as a strategy for enhancing sustainability. *Energy Procedia* 96, 351-362. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.159>
- Palumbo, E., 2021. Effect of LCA data sources on GBRS reference values: The envelope of an Italian passive house. *Energies* 14. <https://doi.org/10.3390/en14071883>
- RIBA, 2020. RIBA plan of work 2020 - overview. London.
- San-José, J.T., Losada, R., Cuadrado, J., Garrucho, I., 2007. Approach to the quantification of the sustainable value in industrial buildings. *Build. Environ.* 42, 3916-3923. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.013>
- Sánchez-Cordero, A., Gómez- Melgar, S., Andújar-Márquez, J.M., 2019. Green building rating systems and the new framework Level(s): A critical review of sustainability certification within Europe. *Energies* 13, 1-25. <https://doi.org/10.3390/en13010066>
- Sartori, T., Drogemuller, R., Omrani, S., Lamari, F., 2021. A schematic framework for Life Cycle Assessment (LCA) and Green Building Rating System (GBRS). *J. Build. Eng.* 38, 102180. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102180>
- SBA, 2009. Sustainable Building Alliance.
- Shan, M., Hwang, B. gang, 2018. Green building rating systems: Global reviews of practices and research efforts. *Sustain. Cities Soc.* 39, 172-180. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.034>
- The Ellen MacArthur Foundation, 2012. Towards a Circular Economy. Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition.
- Trigaux, D., Allacker, K., Debacker, W., 2021. Environmental benchmarks for buildings: a critical literature review. *Int. J. Life Cycle Assess.* 26, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01840-7>
- US GBC, 2019. LEED Building Design and Construction. United States Green Building Council.
- Vilches, A., Garcia-Martinez, A., Sanchez-Montañes, B., 2017. Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review. *Energy Build.* 135, 286-301. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.042>
- WGBC, 1990. World Green Building Council.

Capítulo IV: Indicadores de sostenibilidad a nivel de edificio. Indicadores de evaluación relacionados con residuos

Exploring how waste management is being approached in green building rating systems. A case study

Jorge-Ortiz, A., Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M.D., 2023b. Exploring how waste management is being approached in green building rating systems: A case study. *Waste Manag. Res.*

<https://doi.org/10.1177/0734242X221143952>

Abstract

Green Building Rating Systems (GBRS) propose sets of indicators to measure the level of sustainability of buildings, and include Waste as one of the categories to be assessed. Yet, both the number of indicators and their aim, as well as the waste fraction they refer to vary greatly from one system to another. This study identifies the waste-related indicators included in 10 global GBRS. They are classified on the basis of different criteria (waste fraction assessed, stages of the life cycle of the building, waste hierarchy and stages that make up the waste management system) so as to make it possible to subsequently analyse the importance given to each indicator through the specific weightings of each GBRS. Finally, the indicators are implemented in the case study of a building located in Colombia, in order to quantify the current level of sustainability achieved in the Waste category of each system and to propose improvement actions that allow this score to be improved. In this way, it is shown that proper waste management can increase the level of sustainability of a building.

Keywords

Green Building Rating System; Life cycle stage; Waste management; Waste Hierarchy; MSW; CDW

Highlights

- A total of 10 GBRS were analysed, 8 at the global level and 2 at the Colombian level.
- Management strategies were classified according to waste hierarchy.
- The case study showed that the best scores are achieved with GBRS adapted to the country context.

1. Introduction

The building sector, which is constantly growing, consumes a large part of the natural resources available and is responsible for the generation of a huge amount of waste. According to the European Commission, in Europe, buildings are responsible for 30% of all construction and demolition waste (CDW) generated in the European Union (COM445, 2014) and in Latin America, specifically in Colombia, this figure rises to 40% (Tecnalia, 2017). CDW is mainly generated during the construction stage and, to a lesser extent, during the use stage of the building, in building rehabilitation and maintenance activities. Yet, the daily activities of the occupants also generate waste that is categorised as municipal solid waste (MSW). The management of both types of waste, CDW and MSW, should be integrated into the life cycle management of the building in order to recover them (Lopez-Yamunaqué and Iannacone, 2021) and promote the sustainability of buildings (García-Valerio and Adame Martínez, 2020)

The regulatory framework relating to waste management promotes waste prevention, minimisation and recovery strategies, as opposed to final disposal. At the European level, it is established by Directive 2008/98/EC (European Parliament and the Council, 2008) and Directive 2018/851/EU (European Parliament, 2018). As regards Colombia, it is established by Resolution 0472/2017 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017), which aims to establish the guidelines for the integrated management of waste generated in construction and demolition activities, and whose lines of action are consistent with the hierarchy levels formulated in the European regulations and Resolution 1257/2021 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021) which updates Resolution 0472/2017, in terms of requirements for: CDW generation, municipalities and environmental authorities, and modifications of the percentages of CDW that each municipality must fulfil.

Powell et al. (2018) analysed the strategies adopted by the 174 countries that take part of the Paris Climate agreement on waste management framework, in which only 67 countries include waste management strategies in their policy, also varying greatly in the scope and level of detail. For instance, landfill and energy recovery strategies are the most frequently strategies formulated by the countries. In the Latin American context, according to Colorado et al. (2022), in most countries with the exception of Brazil, the available information on CDW waste management system is very scarce. Even though, with the available information it is evident that unlike in developed countries, waste minimisation strategies are rarely implemented.

A number of studies focused on analysing waste management evaluation indicators can be found in the literature. Turcott Cervantes et al. (2018) identified the MSW management system evaluation indicators proposed over the period 1980-2018 and classified them according to the stage of the system they affect, the conclusion being that, for the most part, they are linked to the collection stage, followed by recovery and treatment, and finally disposal. Concerning CDW management systems, Menegaki and Damigos (2018) identified a total of 36 factors that have both positive and negative effects on the generation and efficient management of CDW, as well as the statistical correlation between them. They also concluded that factors such as the lack of specific CDW

legislation, non-compliance with legislation or the absence of good practices, among others, have a negative influence on the generation of CDW.

Furthermore, Shi and Xu (2021) concluded that for a correct evaluation of CDW management systems, it is important to incorporate indicators that evaluate parameters such as the distance to the final disposal site, the amount of CDW generated, the potential for recycling or transport. Wang et al. (2014) identified six key factors that have a positive influence on CDW minimisation strategies as of the building design stage and include the use of building elements such as large-panel metal formworks and prefabricated components, carrying out fewer design modifications and using modular design, or, from a bureaucratic perspective, boosting waste reduction investment and promoting economic incentives. However, in the literature reviewed, the indicators found have a top-down approach, and are usually evaluated with macroeconomic data about the country or region in which they are implemented and, therefore, they do not provide a bottom-up view of the strategies that can be implemented at the building and user levels.

On the other hand, in the field of building, there are systems of indicators that are aimed at assessing the sustainability performance of buildings. These systems are grouped under the generic name of Green Building Rating Systems (GBRS) and the best-known are, among others, BREEAM (BRE Global, 1990), LEED (US GBC, 2009) or CASBEE (JaGBC, 2014). Generally, each GBRS is accommodated to the context-specific features of the region under which it was developed (De Góes et al., 2021) and evaluates several aspects clustered in topic categories such as energy, water, pollution, use of material resources, transport, etc., as well as waste (Luangcharoenrat and Intrachooto, 2018). The importance of each of these aspects varies from one system to another, although the Energy and Occupant well-being categories are the most recurrent (Lee, 2013). According to Varma and Palaniappan (2019), however, the Waste category is one of the least present in the GBRS, as the indicators related to it only represent between 2.7% and 14.7% of the total score.

According to Wu et al. (2016), on analysing the waste indicators included in different GBRS, it was found that these indicators are oriented towards fulfilling the principles of the 3R (reduce, reuse and recycle), and are mostly linked to reuse and recycling strategies, neglecting to some extent reduction strategies, which is the first that should be given priority, according to the waste hierarchy. More recently, Lu et al. (2019) concluded that GBRSs do not greatly promote superior CDW performance and the causes, as informed by the experts interviewed, include the design of rating systems themselves, developers' biases, and lack of legal and economic incentives to improve CDW. Legal and economic incentives are more decisive drivers of responsible CWM.

From the literature review, it is observed that there is no study specifically focused on the analysis of the indicators included in the GBRS applicable worldwide that are related to waste management, waste fractions or stages of the life cycle of the building on which they are focused, for example. Neither does the literature appear to contain any studies that analyse these indicators from the perspective of relating them to potential strategies to be implemented in a building in order to improve its waste management system, at the user level and throughout the life cycle of the building, with the ultimate aim of increasing its sustainability performance.

Taking this context into account, the aim of this article is to identify the indicators that address waste management in the main GBRS at the international level and in the specific case of Colombia, and to analyse them from different points of view, such as the stages of the life cycle of the building, the waste hierarchy, and the stages of the management system. It also aims to analyse the level of importance given to these indicators through their weighting within each GBRS and how they can be implemented in a building to improve its level of sustainability. To this end, the following research questions (RQ) are posed, to which this study aims to provide answers:

- RQ1: What and how many indicators exist in the GBRS to assess waste management?
- RQ2: What kind of waste management indicators are they and what do they assess?
- RQ3: What weighting is given to waste management indicators in the assessment of sustainability in the GBRS?

2. Method

In order to carry out this study, a four-phase procedure was followed, as described below. Each of the first three phases answers one of the three research questions posed.

In **Phase I (Selection and review of GBRS indicators)**, different GBRS were selected to assess the level of sustainability of residential buildings. GBRS that are applicable worldwide were selected, with the aim of extracting as many indicators as possible that cover the international context, together with GBRS specifically applicable to Colombia, since this study involves the application to a dwelling located in that country. For each GBRS, all the sustainability assessment indicators included were identified and classified according to the thematic categories proposed by Braulio-Gonzalo et al. (2015), including the Waste category.

In **Phase II (Cluster of indicators)**, the indicators belonging to the Waste category were classified according to the following four criteria:

The waste fraction assessed: MSW or CDW.

The stages of the life cycle of the building process according to the Royal Institute of British Architects Plan of Work (RIBA, 2020) – design, construction, use and end of life – and the information modules for the different stages of the life cycle of a building proposed by EN 15978 (2011) and EN 15804 (2013) – Product stage (A1-A3), Construction stage (A4-A5), Use stage (B1-B7), End of life stage (C1-C4), and Benefits and loads beyond the system boundary (D).

The waste hierarchy proposed by Directive 2008/98/CE (European Parliament and the Council, 2008): prevention, preparation for reuse, recycling, other forms of recovery and disposal.

The stages that make up the waste management system are as follows (Tchobanoglous et al., 1994) pre-collection, collection and transport, treatment and disposal.

Phase III (Weighting analysis) analysed and compared the weighting given to indicators related to waste management for those quantitative GBRS that have a weighting/scoring system.

Finally, in **Phase IV (Case study)**, the set of indicators identified are applied to a case study of a dwelling located in Mosquera (Colombia), as a means of validating the results; after evaluating the indicators, a proposal for improvements to the dwelling is developed.

3. Results and discussion

3.1. Phase I: Selection and review of GBRS indicators

Ten GBRS with global coverage were selected. Eight of them have an international scope: LEED (US GBC, 2019) developed in United States and with versions adapted to more than 160 countries around the world (Doan et al., 2017b); BREEAM (BRE Global, 2016) developed in United Kingdom and also with versions adapted to more than 77 countries; CASBEE (IBEC, 2007b) developed in Japan; Green Star (GCBA, 2003), developed in Australia, Green Globes (ECD, 2019b) developed in Canada; Level(s) (Dodd et al., 2021), recently developed as a common European framework indicator system; DGNB (DGNB, 2018) developed in Germany and adapted to Denmark, Austria, Switzerland and Spain; and Verde (GBCe, 2017b) developed in Spain. The other two GBRS analysed have a specific scope of application in Colombia: CASA (CCCS, 2016b) and the Sustainable Construction Policy of the Metropolitan Area of Valle de Aburrá (La Política de Construcción sostenible del Área Metropolitana del Valle de Aburrá) (AMVA-UPB, 2015c). All the GBRS are quantitative and allow a score to be obtained for the level of sustainability of the building, with the exception of Level(s) and AMVA-UPB, which are qualitative and, although they allow the indicators to be assessed independently, they do not give the building an overall score or establish a weighting system.

The GBRS selected represent a total of 461 indicators: Verde (39), BREEAM (49), LEED (53), Level(s) (16), CASBEE (57), Green Star (65), Green Globes (73), DGNB (38), CASA (41) and AMVA-UPB (30). The Supplementary Material provides an exhaustive list and the codings of the indicators included in each GBRS, although each of them classifies its indicators according to its own system of categories. In order to be able to compare them, the indicators have been classified according to the following common categories: Water, Nature and Climate Change, Materials, Environmental Awareness, Energy, Comfort and Waste, proposed by Braulio-Gonzalo et al. (2015). Figure IV-1 shows, on the one hand, the number of indicators present in each of these categories, thereby identifying a total of 34 indicators related to waste. On the other hand, for each of the 10 GBRS, it shows the number of waste-related indicators and the percentage that this represents in relation to the total number of indicators included. Figure IV-1 shows that the categories with the most indicators are Comfort (123 indicators), Nature and climate change (117 indicators) and Energy (66 indicators), and those with the least are Waste (34 indicators) and Environmental awareness (24 indicators). Thus, on average, the Waste category makes up only 7.9% of the GBRS indicators. It can also be seen that the GBRS with the highest number of indicators related to waste management is BREEAM, with a total of seven indicators that account for 13.5% of the total number of indicators included in the system. The GBRS

that gives the lowest level of importance to this category is the DGNB system, with only one indicator (2.6% of the total number of indicators in the system).

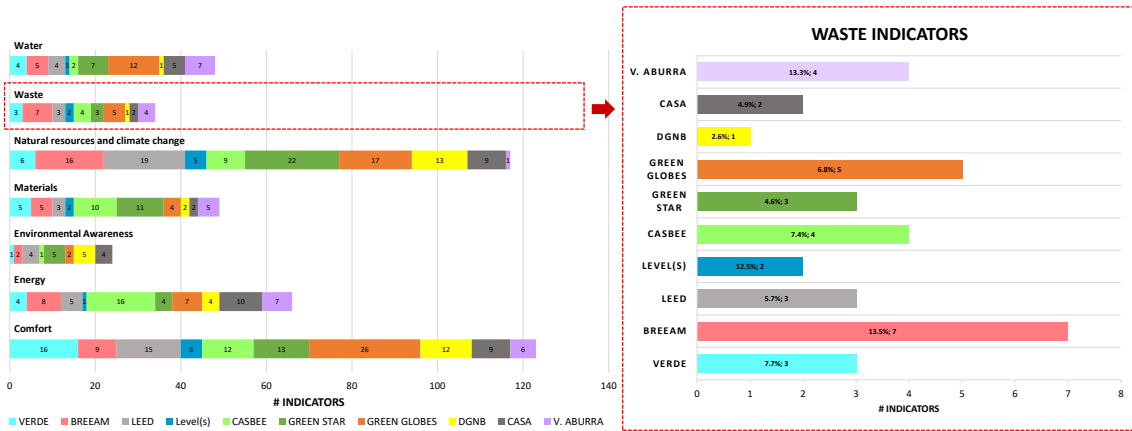


Figure IV- 1. Indicators related to Waste management

The 34 indicators belonging to the Waste category were analysed in depth in order to unify their nomenclature depending on the objective they pursue. Table IV-1 lists all the indicators identified in the GBRS and associates them with a common terminology.

Table IV- 1. GBRS indicators included in the category Waste and standardised nomenclature

GBRS	Code	Indicator reported in the GBRS	Standardised nomenclature
VERDE	VE.05	Classification of municipal solid waste (MSW)	Amount of waste per fraction
	VE.23	Planning a selective demolition strategy	CDW management system
	VE.24	Construction waste management	CDW management system
BREEAM	BRE.34	Construction waste management	CDW management system
	BRE.35	Recycled aggregates	CDW recovery
	BRE.36	Storage of household waste	MSW segregation
	BRE.37	Composting of household waste	MSW recovery
	BRE.38	Speculative finishes	Design for deconstruction
	BRE.39	Adaptation to climate change	Design for deconstruction
	BRE.40	Functional adaptability	Design for deconstruction
	LEED	LEED.32	Storage and collection of recyclables
LEED.33		Construction and demolition waste management planning	CDW management system
LEED.38		Construction and demolition waste management	CDW management system
Level(s)	LVL.04	Construction & demolition waste and materials	CDW management system
	LVL.06	Design for deconstruction, reuse and recycling	Design for deconstruction
CASBEE	CSB.49	Reduction of Waste in the Production and Construction stages - Production stage (members for building frames)	Minimisation of CDW
	CSB.50	Reduction of waste in the Production and Construction stages - Production stage (members other than those for building frames)	Minimisation of CDW
	CSB.51	Reduction of waste in the Production and Construction stages - Construction stage	Minimisation of CDW
	CSB.52	Promotion of Recycling - Provision of information on materials used	CDW recovery
GREEN STAR	GRS.07	Waste Management	CDW management system
	GRS.42	Recycling Waste Storage	MSW segregation
	GRS.49	Design for Disassembly	Design for deconstruction
GREEN GLOBES	GRG.46	Construction Waste	CDW management system
	GRG.47	Post Occupancy Solid Waste Recycling	MSW recovery
	GRG.48	Supply Chain Waste Minimisation	Minimisation of CDW
	GRG.49	Off-Site Fabrication for Construction Optimisation	Minimisation of CDW
	GRG.50	Design for Deconstruction (DfD)	Design for deconstruction
DGNB	DGNB.23	Ease of recovery and recycling	CDW recovery
CASA	CSC.11	Construction Waste Management Plan	CDW management system
	CSC.28	Waste management plan during project operation	Amount of waste per fraction
Valle de Aburra	VAe.26	Design for Deconstruction	Design for deconstruction
	VAe.27	Construction and demolition waste management (CDDWM)	CDW management system
	VAe.28	Sustainable model	Amount of waste per fraction
	VAe.29	Utilisation of biodegradable fraction	MSW recovery

From the identification of the indicators, it can be seen that **CDW management system** appears in all the GBRS analysed, except for CASBEE and DGNB, and includes a total of 10 indicators, making it the one with the highest number. It is followed by **Design for deconstruction**, encompassing 7 indicators from 5 GBRS, the BREEAM system being the one that addresses this indicator with the

greatest emphasis. **CDW minimisation** comprises 5 indicators, collected in the CASBEE and GREEN GLOBES systems. **CDW/MSW recovery**, **Amount of waste per fraction** and **MSW segregation** each comprise 3 indicators. It should be noted that Design for deconstruction is gaining strength among the GBRS, mainly due to the fact that the new version of BREEAM includes 3 specific indicators for this purpose.

3.2. Phase II: Cluster of indicators

3.2.1. According to the life cycle stage of the building

The indicators belonging to the Waste category have been classified according to the life cycle stage they refer to: Design, Construction, Use or End-of-life. Figure IV-2a shows the distribution of the number of indicators by stage and by GBRS, differentiating between CDW and MSW. The percentage corresponds to the distribution of the number of indicators of each classification in relation to each GBRS. Thus, for example, in the AMVA-UPB GBRS of Colombia, 25% of the waste indicators evaluate the management of CDW in the Design phase, 25% address the management of CDW in the Construction phase and 50% consider the management of MSW in the Use phase.

Regarding the indicators linked to MSW, in Figure IV-2a it can be seen that the indicators are clearly more related to the use stage of the building, which is when this waste fraction is produced. The BREEAM and AMVA-UPB systems are the ones that consider this waste fraction the most, as both segregation and recovery. In the design phase of the building, only **Verde** considers the MSW fraction in terms of a collection and segregation site for this type of waste at the design stage. None of the systems consider indicators related to MSW management during the construction and end-of-life stages.

With regard to CDW-related indicators, Figure IV-2a shows that there are indicators related to all the stages of the life cycle of the building. In the **Construction** stage, there is a greater number of indicators (related to CDW storage on-site or its use, among others), mainly in the CASBEE and BREEAM systems, although with the exception of DGNB, the remaining GBRS analysed have at least one indicator related to this stage. Next in importance is the **Design** stage, with indicators related to the carrying out studies on CDW management studies and design for deconstruction, for example. The GBRS that stands out for having the highest number of indicators linked to this stage is BREEAM (42% of the total), and the only indicator of DGNB relates to this stage. The number of indicators related to the End-of-life (with indicators such as the CDW management system) and Use (with indicators related to maintenance and minor work that may be carried out in the dwelling) stages is reduced compared to the rest of the stages of the life cycle of the building.

Hence, while MSW can only be associated with the use stage, CDW is present in all stages of the life cycle of the building. Because of this, and also in view of the importance given by the GBRS to CDW indicators, the CDW is also classified in a more detailed manner according to the reporting modules set out in EN 15978 (2012). Figure IV-2b shows the distribution of the number of indicators per

information module, together with the percentage represented in each module in relation to the total number of indicators in the Waste category of each GBRS. It should be noted that the same indicator can refer to/assess more than one information module.

It can be seen that, unlike in the classification by stages, the modules most frequently addressed are those assessing the end-of-life (C1-C4), which encompasses the entire CDW management system (transport, treatment, disposal), followed by module A5 (construction), modules A1-A3, which represent the manufacture of construction products and, finally, other limits beyond the system boundary (D). It can also be observed how CDW management is hardly assessed at the use stage of the building in modules B2-B5, as these modules correspond to operations related to the maintenance or rehabilitation of the building. It can be seen that, unlike in the classification by stages, the modules most frequently addressed are those assessing the end-of-life (C1-C4), which encompasses the entire CDW management system (transport, treatment, disposal), followed by module A5 (construction), modules A1-A3, which represent the manufacture of construction products and, finally, other limits beyond the system boundary (D). It can also be observed how CDW management is hardly assessed at the use stage of the building in modules B2-B5, as these modules correspond to operations related to the maintenance or rehabilitation of the building.

3.2.2. According to the strategies of the waste hierarchy

In accordance with Directive 2008/98/EC and Directive 2018/851/EC, the indicators were classified according to the hierarchy level they assess (prevention, reuse, recycling, recovery and disposal). Figure IV-2c shows the distribution of the different waste management indicators in relation to the hierarchy levels and the percentage of indicators belonging to each hierarchy level in relation to the total number of indicators in the Waste category. It is important to note that some indicators may cover more than one hierarchy level.

On analysing the indicators related to the MSW fraction, it can be seen that they are mostly linked to the Prevention strategy and that the system that most promotes this aspect is AMVA-UPB, with indicators such as waste storage. This is followed by the Recycling strategy, where AMVA-UPB also stands out with indicators such as MSW separation. The Recovery strategy is less well represented, with BREEAM placing the greatest emphasis on it. To a lesser extent, Recovery and Disposal strategies are found, with indicators such as the Use of the biodegradable fraction, which is represented with the highest percentage by AMVA-UPB.

On analysing the indicators related to the CDW fraction, it can be seen that the indicators are mostly linked to the Recycling strategy, with DGNB, Level(s) and CASBEE standing out with indicators such as the Ease of recycling materials. The prevention strategy is the second most frequently addressed, with DGNB and CASBEE standing out once again, with indicators such as Minimisation, Incorporating a management system and Design for deconstruction. The Recovery and Reuse strategies, with indicators such as the Possibility of reusing the material, are poorly represented, with DGNB being the system that places the greatest emphasis on them. The Disposal strategy includes indicators such

as minimising the amount of CDW that eventually ends up in landfill, and Green Star is the system that is most closely linked to this strategy.

3.2.3. According to the stages of the waste management system

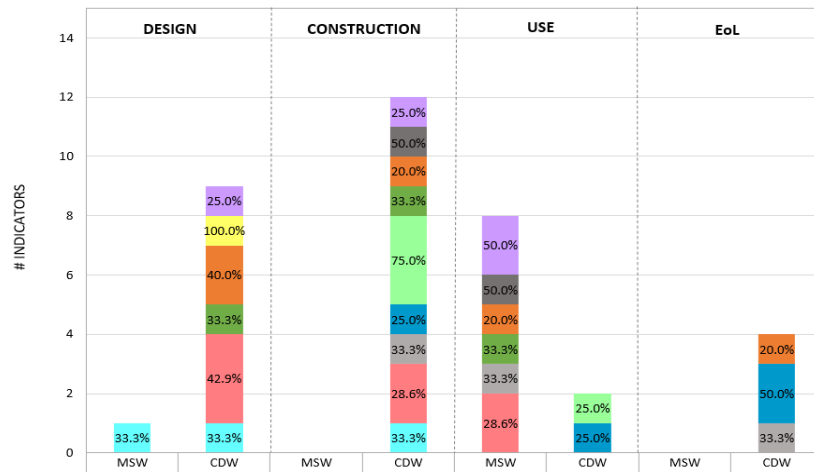
In the same way as the previous criteria, the indicators in the Waste category were classified according to the stages of a waste management system: pre-collection, collection and transport, treatment and disposal, as proposed by Tchobanoglous et al. (1994).

Figure IV-2d shows that the GBRS indicators are most related to the treatment stage in general (Recycling and Other recovery), followed by Pre-collection. It also shows the percentage of indicators belonging to each stage of the management system in relation to the total number of indicators in the Waste category for each system. It is important to note that some indicators may cover more than one stage of waste management.

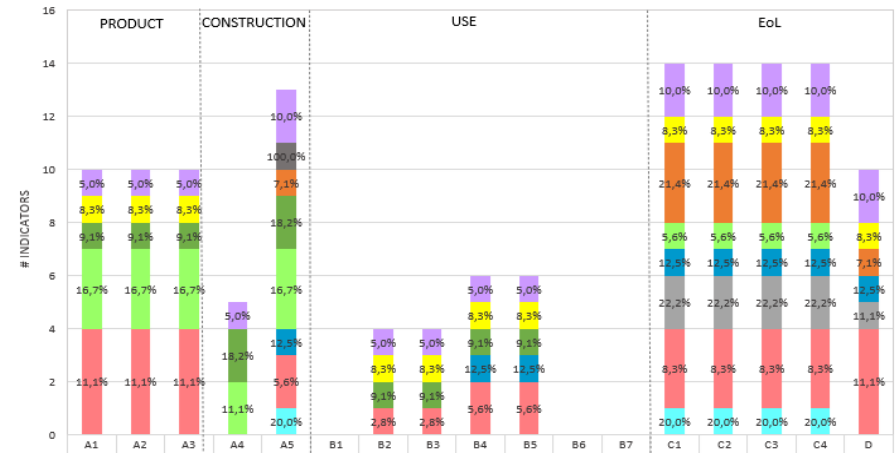
On analysing the indicators related to the MSW fraction, it can be seen that these are mostly linked to the pre-collection stage, with indicators such as the storage of the different fractions represented in a greater proportion by the GBRS Green Star, followed by the treatment stage where recycling and composting of waste is dealt with, and the GBRS Green Star and CASA which have indicators such as Including domestic composting or Considering a storage unit for usable waste. The disposal stage is scarcely represented by the GBRS, where CASA stands out with indicators such as Having a solid waste manager. Other recovery is only considered by Verde, with an indicator related to energy recovery. The collection stage is not linked to any GBRS, as there are no related indicators such as waste collection, transport or coverage.

An analysis of the indicators related to the CDW fraction shows that the indicators analysed are most closely related to the treatment stage from the point of view of recycling and recovery, with CASBEE and DGNB standing out with indicators such as the reuse of materials and the ease with which materials can be recycled. In second place are the pre-collection and disposal stages, and AMVA-UPB and Green Globes stand out for their more detailed assessment of these stages, with indicators such as on-site waste storage and the percentage of waste that reaches final disposal. In the analysis of the CDW management indicators, it was found that they are related to the collection stage through indicators such as the CDW management plan, which at least all the GBRS evaluate with the exception of DGNB, Green Star and Level(s).

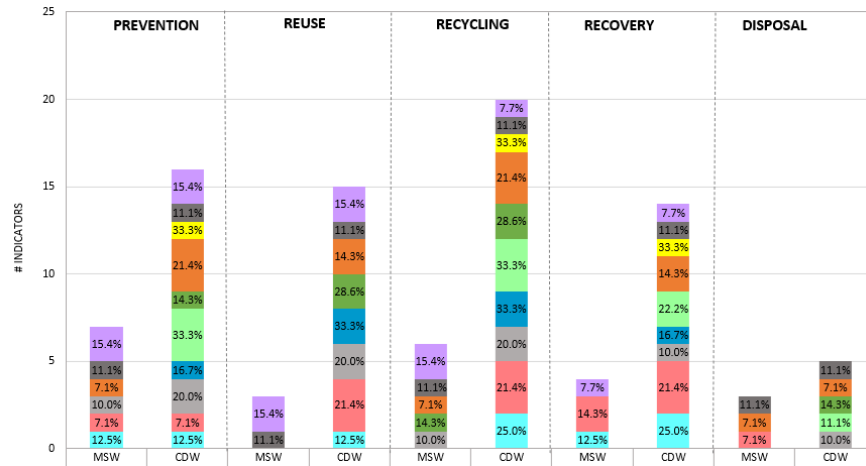
2a) Indicators classified according to the building life cycle stage



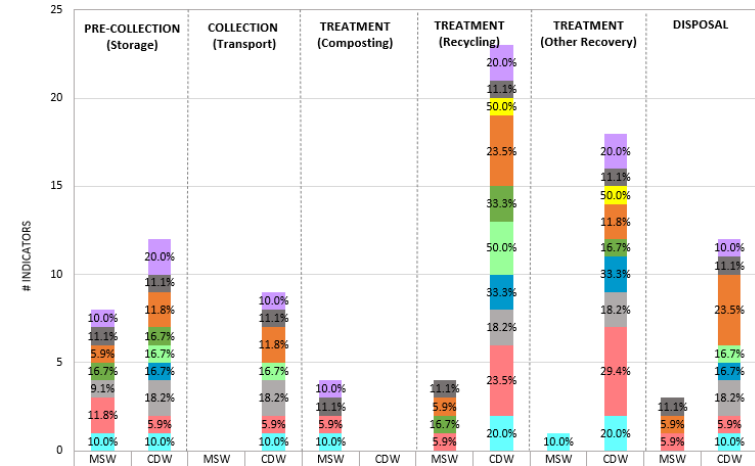
2b) CDW: Classification by the information modules proposed by EN 15978 (EN 15978, 2012a)



2c) Waste hierarchy



2d) Indicators classified according to the stages of a waste management system



VERDE BREEAM LEED Level(s) CASBEE GREEN STAR GREEN GLOBES DGNB CASA VALLE ABURRÁ

Figure IV- 2. Cluster of waste management indicators

3.3. Phase III: Weighting analysis

In this stage, the weight that the indicators belonging to the Waste category have on the overall weight of each GBRS is analysed for the quantitative GBRS (all except Level(s) and AMVA-UPB).

Figure IV-3 shows the distribution of indicators according to the standardised nomenclature in Table IV-1. It can be seen that the GBRS that give the greatest importance to the Waste category are CASBEE and BREEAM, with 7.00% and 6.08% respectively. The other GBRS grant it a level of importance between 3% (DGNB) and 4.55% (CASA). It can also be seen that the indicators that are addressed to a greater extent are those related to the CDW waste management system, as most of the GBRS have at least one related indicator, with the exception of CASBEE and DGNB. In second place is Minimisation of CDW, although it is only assessed in CASBEE and Green Globes. Each of these provides a significant number of indicators that assess the CDW minimisation techniques used at the building level. In third place are CDW recovery (in DGNB, CASBEE and BREEAM) and MSW segregation (in LEED, Green Star and BREEAM). To a lesser extent, we also find Amount of waste per fraction (in Verde), MSW recovery (in BREEAM and Green Globes) and Design for deconstruction (in Green Globes and BREEAM).

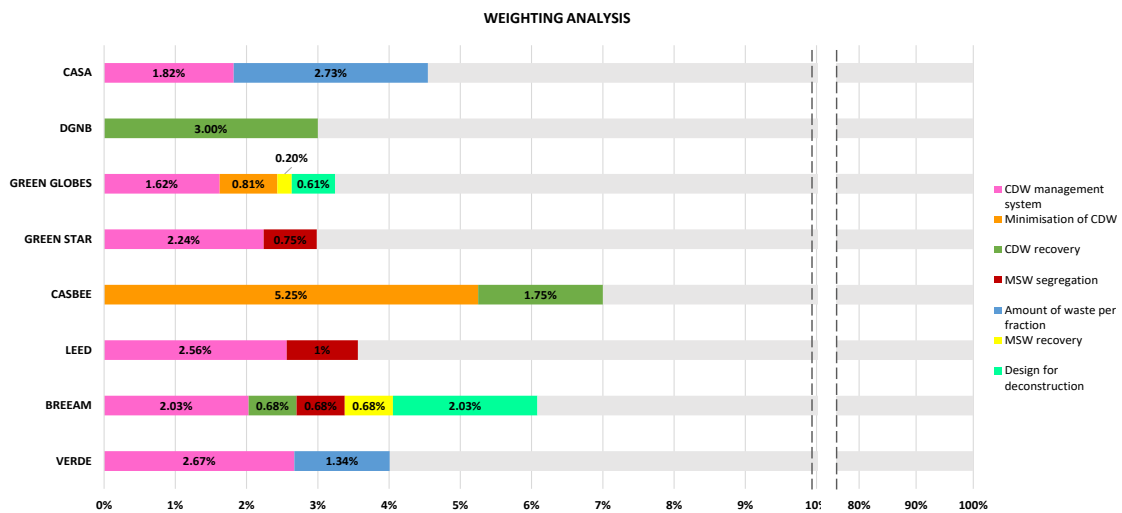


Figure IV- 3. Weighting analysis of waste management indicators by GBRS

3.4. Case study: Mosquera (Colombia)

3.4.1. Description of the case study

The case study chosen to apply the indicators of the different GBRS is a flat in a multi-family residential building located in the urban area of the municipality of Mosquera (Cundinamarca, Colombia). It has a gross internal floor area of 58 m² (54 m² usable area) distributed in 3 bedrooms, 2 bathrooms, living room, kitchen, and laundry room. The building has a common storage room for MSW, which is managed by the municipal company with a collection frequency of 3 days/week and sent to the sanitary landfill "Nuevo Mondoñedo" located 18.8 km away. CDW is also managed by the municipal company and is sent to the municipal tip located 8.1 km away.

Figure IV-4 shows the distribution of MSW storage space, both in the common areas outside the building and inside the dwelling.

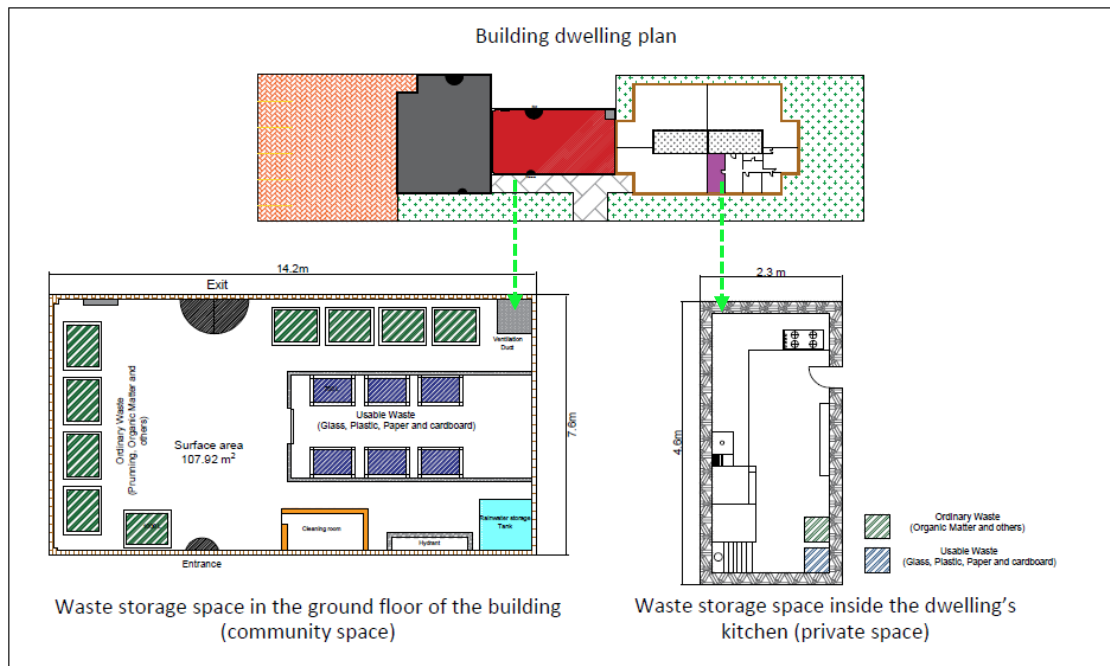


Figure IV- 4. Plan of the waste storage spaces in the building

3.4.2. Indicators' evaluation

The indicators related to the Waste category belonging to each of the 10 GBRS analysed were applied to the case study. As each GBRS has its own rating system, it is necessary to apply a normalisation of the score in order to be able to compare the results among GBRS. This is performed by using eq.1, which allows the data to be normalised on a scale of 0-100%.

$$NI = \sum FV_i / (\sum AV_i) \quad (\text{eq.1})$$

where,

NI= Normalised Index for the waste category in each GBRS (%)

FV= Fulfilled Value for each indicator (%)

AV= Maximum available value for indicators in waste category in each GBRS (%)

The normalised results of the calculation of indicators are shown in Figure IV-5, grouped by the standardised nomenclature set out in Table IV-1. The results for each nomenclature showed that for the CDW fraction the building obtained the highest score in Green Star (24.27%), as the dwelling complies with the fact that at least 50% of this waste is recycled or reused, as required by the indicators contained in the system. It is followed by LEED (18.17%), CASA (15.00%), BREEAM (11.8%), Green Globes (9.35%), as the building complies with indicators such as having a CDW management plan, with a bill of quantities, a minimum percentage of CDW that is reused or recycled, having a certified/authorised manager, and a final report on the waste managed during construction, among others.

The indicators with the next highest percentage are those related to MSW segregation, where LEED (28.06%) is the GBRS where the building obtains the highest score, complying with indicators such as having a common storage room/space in the building. It is followed by Green Star (25.06%), where the building meets all the criteria established in the indicators, such as complying with the minimum area of storage space and carrying out the separation of waste fractions.

The building, with regard to the indicators related to the CDW Minimisation nomenclature, obtained the highest score with the GBRS Green Star (25.23%), followed in second place by CASBEE (12.05%), as the building has prefabricated constructive assemblies and modular parts, both of which are aspects that are taken into high consideration by these GBRS. However, one of the critical points found when evaluating the indicators contained in CDW Minimisation is the lack of information on the production process of the companies where the materials come from.

In CDW recovery, the building scored higher in CASBEE (24.98%), as it uses information about the materials and their composition in order to know the recovery potential. These criteria fit better than in DGNB (15.38%), since in the latter it is necessary to fulfil certain criteria, such as the fact that the building incorporates industrialised construction solutions, and this is not the case, since its constructive assemblies are those traditionally used in Colombia.

In terms of Amount of waste per fraction, although this is assessed in different GBRS, the building only scored in CASA (46.65%) and Verde (8.35%). In CASA the building complies with criteria such as having waste storage space, but it does not establish any minimum measurements for such spaces. In Verde, criteria such as the minimum required area of storage space and signage are not met. In

both GBRS the existence of recovery strategies is evaluated, such as having implemented home composting of waste, which is non-existent in the dwelling.

The MSW assessment for the case study only yielded results in Green Globes with 3.08%, where criteria such as indoor (in the dwelling) and outdoor (in the building) storage space and recyclability are met.

Design for deconstruction is covered by BREEAM and Green Globes. The case study scored only 22.37% with BREEAM, as it meets criteria such as having at least three standardised/industrialised building solutions in all the dwellings and being designed for climate change. However, it is important to note that the building did not obtain any score with Green Globes, as the dwelling does not meet any of the indicators established for its assessment in this GBRS, such as having a deconstruction plan right from the design phase.

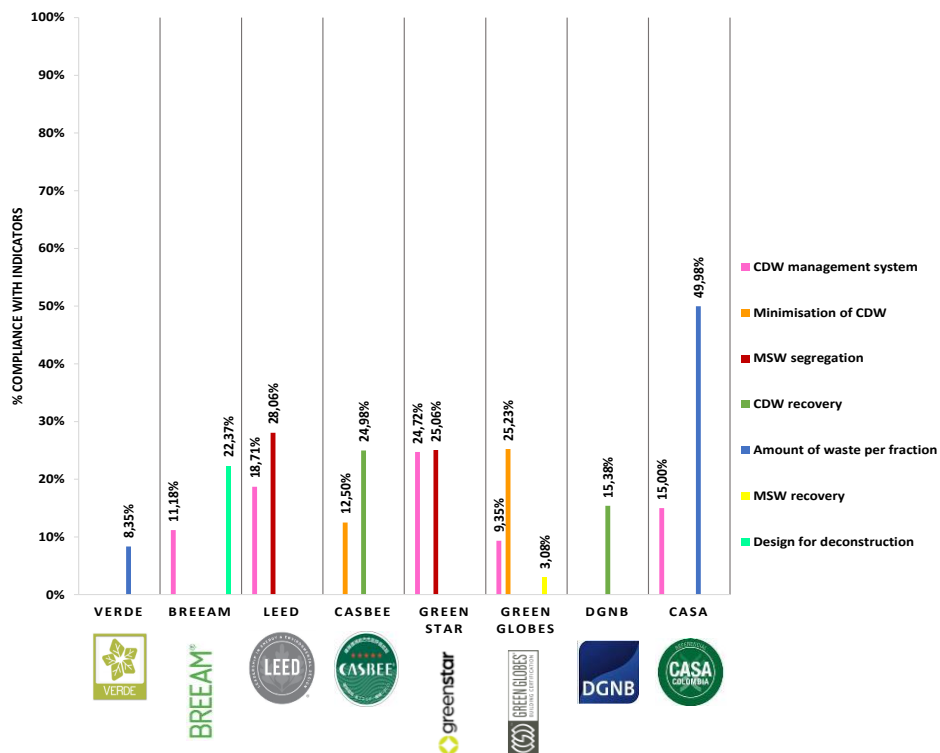


Figure IV- 5. Analysis by indicator of the case study (Baseline)

As for the GBRS that do not have quantifiable/measurable indicators (AMVA-UPB and Level(s)), Table IV-A.1 in Appendix A describes the degree to which the building complies with the indicators proposed by the GBRS.

3.4.3. Proposal for improving

Due to the fact that the dwelling used for the case study scored below 70% in all GBRS, it is considered that there is room for improvement. Therefore, a proposal for improvements is put forward to

increase this score. Taking into account the strategies and protocols for sustainable management of CDW and MSW at the building level proposed by the European policies (European Commission, 2016; European Parliament and the Council, 2008) and recent literature (Ortega Acosta et al., 2015; Rondinel-Oviedo, 2021), Table IV-2 shows those selected as applicable to the case study, together with the indicators concerned and the information module of EN 15978 (2012a) to which each proposed strategy relates.

Table IV- 2. Improvement strategies for the case study

ID	Waste fraction	Improvement strategies	Indicator affected	Information modules (EN 15978, 2012a)								
				B (use stage)				C (EoL)				D
				B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	D
1	MSW	Add a third container inside the dwelling for the proper separation of MSW, as follows: - White container: Usable waste. - Black container: non-usable waste. - Green container: Usable organic waste.	VAe.28, CSC.28, BRE.36									
2	MSW	Install a community composter for the use of organic matter: - Provide the area for the composter. - Design the waste composting plan.	BRE.37, CSC.28, VAe.29, VE.05									
3	CDW	Pre-demolition audit. - Bill of quantities. - Potential recovery of CDW identification.	BRE.34, LVL.04, VE.23			X	X					
4	CDW	Design a CDW management plan. - Process of reuse of CDW. - Strategies for non-usable materials. - Material flows definition. - CDW recovery. - Personnel in charge and functions assignment. - Third party CDW certification.	VE.24, LEED.33, GRG.50, VAe.27, CSC.11					X	X	X	X	
5	CDW	Segregate CDW on-site, ensuring that at least 80% is recycled.	LVL.04, GRG.46, BRE.34, LEED.38 GRS.07, CSC.11, LEED.38, BRE.34, GRG.46					X	X	X	X	
6	CDW	Replacement of conventional materials with modular and prefabricated/ industrialised materials. - Easy disassembly of construction assemblies. - Independent parts and reversible connections. - Easy separation of sub-products. - Easy maintenance.	LVL.06, DGNB.23	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Because the suggested improvement measures are independent of each other, six scenarios were evaluated again, each of which consists in implementing these improvement measures separately and a final scenario where these improvements are implemented together. Figure IV-6a) shows the score of the dwelling in each scenario, Figure IV-6b) shows the percentage improvement compared to the Baseline scenario.

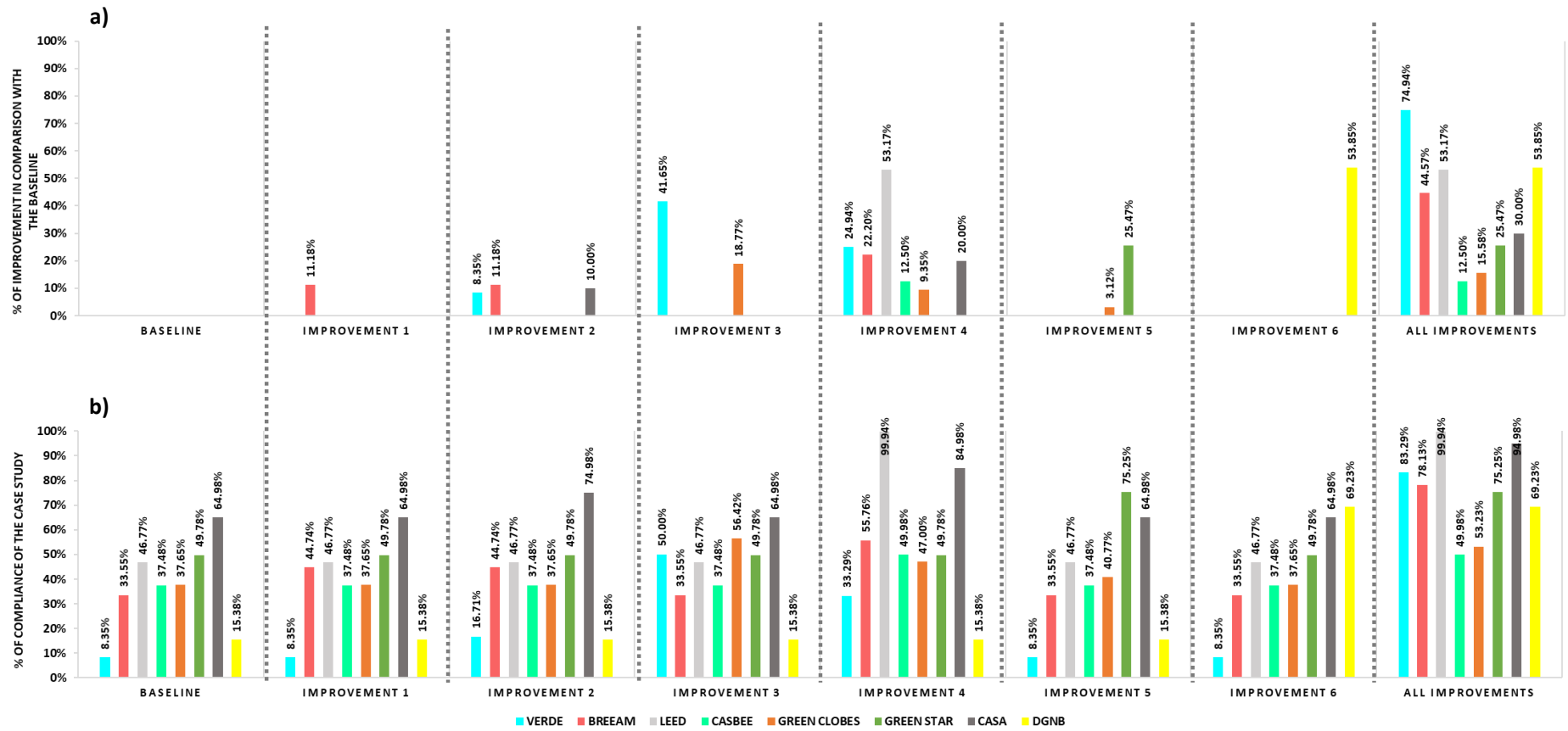


Figure IV- 6. Results of the proposal for improvement. a) Percentage of compliance of the case study; b) Percentage of improvement of the case study in comparison to the baseline

4. Conclusion

This study investigates the indicators dedicated to waste management in buildings in Green Building Rating Systems (GBRS). Ten international GBRS were selected, two of which are specifically applicable in the context of Colombia. It was found that the Waste category, on average, represents only 7.4% of the total number of indicators contained in the GBRS.

To answer RQ1, regarding what and how many indicators exist in the GBRS to assess waste management, a common nomenclature was established according to the objective of each indicator, and it was concluded that the indicators most addressed, in terms of the number, are: CDW management system, Design for deconstruction, CDW minimisation, CDW/MSW recovery, Amount of waste per fraction and MSW segregation, in that order.

On the other hand, the waste-related indicators were classified according to various criteria, which made it possible to explore what kind of indicators they are and what they assess, thus answering RQ2. It was observed that the GBRS are mostly oriented to assessing indicators related to CDW management, and these indicators are mainly linked to the design life cycle stage, followed by the construction stage. It is important to stress that the end-of-life stage is one of the least addressed by the GBRS. As for the use stage in the GBRS, indicators are only considered in the case of building rehabilitation.

In terms of the relationship between the indicators of the Waste category and the hierarchy established in Directive 2008/98/EC, the CDW indicators are mostly linked to the prevention and recycling strategies. In addition, MSW indicators are mostly linked to the use stage, and most of these indicators are related to the prevention hierarchy level, with the Storage and separation at source indicator being the one most addressed by the GBRS. Within the stages of the management system, the indicators are mostly linked to the stage of pre-collection and storage of MSW.

With regard to RQ3, on analysing the weightings attributed to the indicators of the Waste category within the GBRS, it was found that they place greater emphasis on the following terminologies, in this order: CDW Management System, CDW Minimisation, CDW Recovery and MSW Separation. CASBEE and BREEAM are the GBRS that give the greatest relevance to the Waste category, representing an average weighting of 4.4%.

Applying the set of indicators to a case study showed that the highest scores for the building are those obtained in the GBRS that were adapted to the characteristics of the region under study. Furthermore, the case study shows that implementing improvement strategies in a building related to waste management improves its level of sustainability. Finally, it should be noted that in the case of an existing building, there are improvements that cannot be implemented, as these are strategies that should be taken into account in the design stage of the building before it is constructed. This indicates the importance of making decisions from the conception of the building project in the

design stage, with a global life cycle approach, as its sustainability performance throughout its useful life will depend on them.

Finally, it can be also concluded that the indicators proposed to evaluate the waste management system, both MSW and CDW, should be able to be adapted to the geographical context and the social and economic specificities of the country where applied. Therefore, as further development and research, it is proposed to widening the scope of the study to other Latin American countries with similar socioeconomic features than Colombia, with the aim of testing if the set of indicators are currently measurable or, otherwise, it is required to improve or adapt the existing sources for data collection.

5. References

- AMVA-UPB, 2015. Guía 4. Guía para el diseño de edificaciones sostenibles, en: Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Universidad Pontificia Bolivariana. (Eds.), Política de construcción sostenible del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. p. 132.
- Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M.D., Ruá, M.J., 2015a. Sustainability on the urban scale: Proposal of a structure of indicators for the Spanish context. *Environ. Impact Assess. Rev.* 53, 16–30. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.03.002>
- Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M.D., Ruá, M.J., 2015b. Sustainability on the urban scale: Proposal of a structure of indicators for the Spanish context. *Environ. Impact Assess. Rev.* 53, 16–30. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.03.002>
- BRE Global, 2016. BREEAM New Construction. Technical Manual. Building Research Establishment.
- BRE Global, 1990. Building Research Establishment Environmental Assessment Method.
- CCCS, 2016. CASA Colombia. Para el Diseño y Construcción de Soluciones Habitacionales Sostenibles. Bogotá.
- CEN-EN 15643, 2021. Sustainability of construction works - Sustainability assessment of buildings - Part 1: General framework.
- Colorado, H.A., Muñoz, A., Monteiro, S.N., 2022. Circular Economy of Construction and Demolition Waste: A Case Study of Colombia. *Sustain.* 14. <https://doi.org/10.3390/su14127225>
- COM445, 2014. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on Resource Efficiency Opportunities in the Building Sector.
- De Góes, M.B., Rioga, C.L., Campos, I.L. de A., 2021. As certificações internacionais de sustentabilidade da construção: LEED, BREEAM e CASBEE, e suas contextualizações / International construction sustainability certifications: LEED, BREEAM and CASBEE, and their contextualizations. *Brazilian J. Dev.* 7, 90382–90402. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n9-277>
- DGNB, 2018. Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen System. German Sustainable Building Council.
- Doan, D.T., Ghaffarianhoseini, Ali, Naismith, N., Zhang, T., Ghaffarianhoseini, Amirhosein, Tookey, J., 2017. A critical comparison of green building rating systems. *Build. Environ.* 123, 243–260. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.007>

- Dodd, N., Donatello, S., Cordella, M., 2021. Level(s) – A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings. User Manual 1: Introduction to the Level(s) common framework (Publication version 1.1). European Commission.
- ECD, 2019. Green Globes for New Construction 2019. Technical Reference Manual. Energy and Environmental Canada.
- EN 15804, 2013. Standards Publication Sustainability of construction works — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products.
- EN 15978, 2012. Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method. CSN Standards.
- European Commission, 2016. EU Construction & Demolition Waste Management Protocol.
- García-Valerio, A., Adame Martínez, S., 2020. Manejo de residuos sólidos urbanos en grandes metrópolis: una revisión. *Meio Ambient.* 2, 78–095. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4460470>
- GBCe, 2017. VERDE Residencial. Nueva edificación y Rehabilitación edificios existentes. Guía para el Evaluador Acreditado. España.
- GCBA, 2003. Green Star. Green Building Council Australia.
- IBEC, 2007. CASBEE for Home. Technical Manual 2007 Edition. Institute for Building Environment and Energy Conservation.
- JaGBC, 2014. CASBEE Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency. Japan Green Building Council.
- Lee, W.L., 2013. A comprehensive review of metrics of building environmental assessment schemes. *Energy Build.* 62, 403–413. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.014>
- Lopez-Yamunaqué, A., Iannacone, J., 2021. Integral management of urban solid waste in Latin America. *Paideia* XXI 11, 453–474. <https://doi.org/10.31381/paideia.v11i2.4087>
- Lu, W., Chi, B., Bao, Z., Zetkalic, A., 2019. Evaluating the effects of green building on construction waste management: A comparative study of three green building rating systems. *Build. Environ.* 155, 247–256. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.050>
- Luangcharoenrat, C., Intrachoto, S., 2018. Comparative Analysis of Green Building Rating Standards for Improvement Opportunities. *Period. Polytech. Archit.* 50, 41–49. <https://doi.org/10.3311/ppar.12656>
- Menegaki, M., Damigos, D., 2018. A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management. *Curr. Opin. Green Sustain. Chem.* 13, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.02.010>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017. Resolución 472. «Por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de Construcción y Demolición (RCD) y se dictan otras disposiciones.». Colombia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021. Resolución 1257. «Por la cual se modifica la Resolución 0472 de 2017 sobre la gestión integral de Residuos de Construcción y Demolición – RCD y se adoptan otras disposiciones».
- Ortega Acosta, A.I., Orozco Gutiérrez, C.J., González, C.P., Forero Díaz, D.A., Casas Camargo, H.L., Albarracín, J., Pérez Parra, L.F., Naranjo Velasco, S.O., Montoya Villarreal, S.P., 2015. Bogotá

D.C., hacia una nueva cultura en la gestión integral de los residuos de construcción y demolición. Secretaría Distrital de Ambiente (SDA). Bogotá, Colombia.

Parlamento Europeo, 2018. Directiva 2018/851/UE por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos.

Parlamento Europeo, 2008. Directiva 2008/98/CE. sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas.

Powell, J.T., Chertow, M.R., Esty, D.C., 2018. Where is global waste management heading? An analysis of solid waste sector commitments from nationally determined contributions. *Waste Manag.* 80, 137–143. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.09.008>

RIBA, 2020. RIBA plan of work 2020 - overview. London.

Rondinel-Oviedo, D.R., 2021. Construction and demolition waste management in developing countries: a diagnosis from 265 construction sites in the Lima Metropolitan Area. *Int. J. Constr. Manag.* 1–12. <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1874677>

Shi, Y., Xu, J., 2021. BIM-based information system for econo-enviro-friendly end-of-life disposal of construction and demolition waste. *Autom. Constr.* 125. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103611>

Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S., 1994. *Gestión Integral de residuos sólidos*. Madrid. McGraw-Hill.

Tecnalia, 2017. Estudio en la intensidad de utilización de materiales y economía circular en Colombia para la Misión de Crecimiento Verde. Producto 1. Diagnóstico de eficiencia en el uso de materiales y cierre de ciclos en los sectores manufacturero y de construcción.

Turcott Cervantes, D.E., López Martínez, A., Cuartas Hernández, M., Lobo García de Cortázar, A., 2018. Using indicators as a tool to evaluate municipal solid waste management: A critical review. *Waste Manag.* 80, 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.046>

US GBC, 2019. LEED Building Design and Construction. United States Green Building Council.

US GBC, 2009. LEED ND Leadership in Energy and Environmental Design for neighborhood development. The U.S. Green Building Council.

Varma, C.R.S., Palaniappan, S., 2019. Comparison of green building rating schemes used in North America, Europe and Asia. *Habitat Int.* 89, 101989. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2019.05.008>

Wang, J., Li, Z., Tam, V.W.Y., 2014. Critical factors in effective construction waste minimization at the design stage: A Shenzhen case study, China. *Resour. Conserv. Recycl.* 82, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.11.003>

Wu, Z., Shen, L., Yu, A.T.W., Zhang, X., 2016. A comparative analysis of waste management requirements between five green building rating systems for new residential buildings. *J. Clean. Prod.* 112, 895–902. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.073>

6. Appendix A

Table IV A. 1. Non-quantifiable GBRs indicators

GBRS	Code	Standardised nomenclature (see Table IV- 1)	Level of fulfilment
Level(s)	LVL.04	CDW management system	<ul style="list-style-type: none"> - Recycling of inert waste - Bill of Quantities - Prefabricated materials - Building as material bank
	LVL.06	Design for deconstruction	<ul style="list-style-type: none"> - Standardised material dimensions - Homogeneous materials
AMVA-UPB	VAe.26	Design for deconstruction	<ul style="list-style-type: none"> - Use of non-toxic materials - Labelling of materials - Easily disassembled parts - Modular parts

7. Supplementary Material

Table IV S1. BREEAM

Code	Indicator
BRE.01	Contractors' code of social and environmental conduct
BRE.02	Impacts in the works' site
BRE.03	Home User Guide
BRE.04	Natural lighting
BRE.05	High frequency lighting
BRE.06	Indoor air quality
BRE.07	Thermal zoning
BRE.08	Acoustic insulation
BRE.09	Private space
BRE.10	Accessible housing
BRE.11	External lighting
BRE.12	Low carbon or zero carbon technologies
BRE.13	Lifts
BRE.14	Energy efficient appliances
BRE.15	Home emission rate
BRE.16	Thermal envelope of the building
BRE.17	Internal lighting: housing
BRE.18	Internal lighting: common areas
BRE.19	Space for natural clothes drying
BRE.20	Availability of public transport services
BRE.21	Close to public services
BRE.22	Alternative means of transport
BRE.23	Home Office
BRE.24	Water consumption
BRE.25	Water meters
BRE.26	Water recycling
BRE.27	Irrigation system
BRE.28	Sustainable water treatment on site
BRE.29	Façade conservation
BRE.30	Conservation of the structure
BRE.31	Low environmental impact materials
BRE.32	Responsible sourcing of materials - building essentials
BRE.33	Responsible sourcing of materials - finishing elements
BRE.34	Construction waste management
BRE.35	Recycled aggregates
BRE.36	Household waste storage
BRE.37	Composting of household waste
BRE.38	Speculative finishes
BRE.39	Adaptation to climate change
BRE.40	Functional adaptability
BRE.41	Reuse of soil
BRE.42	Contaminated soil
BRE.43	Ecological value of the site and protection of elements with ecological value
BRE.44	Ecological impact mitigation
BRE.45	Impact on site and long-term management plan of biodiversity
BRE.46	Project footprint area
BRE.47	Control of erosion
BRE.48	GWP of refrigerants - building facilities
BRE.49	NOx emissions from the heating source
BRE.50	Flood risk
BRE.51	Minimization of contamination of water courses
BRE.52	Reduction of night light pollution

Table IV S2. LEED

Code	Indicator
LEED.01	LEED for Neighborhood Development Location
LEED.02	Sensitive Land Protection
LEED.03	High-Priority Site
LEED.04	Surrounding Density and Diverse Uses
LEED.05	Access to Quality Transit
LEED.06	Bicycle Facilities
LEED.07	Reduced Parking Footprint
LEED.08	Green Vehicles
LEED.09	Construction Activity Pollution Prevention
LEED.10	Environmental Site Assessment
LEED.11	Site Development—Protect or Restore Habitat
LEED.12	Open Space
LEED.13	Rainwater Management
LEED.14	Heat Island Reduction
LEED.15	Light Pollution Reduction
LEED.16	Tenant Design and Construction Guidelines
LEED.17	Outdoor Water Use Reduction
LEED.18	Indoor Water Use Reduction
LEED.19	Cooling Tower Water Use
LEED.20	Building-Level Water Metering
LEED.21	Fundamental Commissioning and Verification
LEED.22	Minimum Energy Performance
LEED.23	Building-Level Energy Metering
LEED.24	Fundamental Refrigerant Management
LEED.25	Enhanced Commissioning
LEED.26	Optimize Energy Performance
LEED.27	Advanced Energy Metering
LEED.28	Demand Response
LEED.29	Renewable Energy Production
LEED.30	Enhanced Refrigerant Management
LEED.31	Green Power and Carbon Offsets
LEED.32	Storage and Collection of Recyclables
LEED.33	Construction and Demolition Waste Management Planning
LEED.34	Building Life-Cycle Impact Reduction
LEED.35	Building Product Disclosure and Optimization—Environmental Product Declarations
LEED.36	Building Product Disclosure and Optimization – Sourcing of Raw Materials
LEED.37	Building Product Disclosure and Optimization – Material Ingredients
LEED.38	Construction and Demolition Waste Management
LEED.39	Minimum Indoor Air Quality Performance
LEED.40	Environmental Tobacco Smoke Control
LEED.41	Minimum Acoustic Performance
LEED.42	Enhanced Indoor Air Quality Strategies
LEED.43	Low-Emitting Materials
LEED.44	Construction Indoor Air Quality Management Plan
LEED.45	Indoor Air Quality Assessment
LEED.46	Thermal Comfort
LEED.47	Interior Lighting
LEED.48	Daylight
LEED.49	Quality Views
LEED.50	Acoustic Performance
LEED.51	Innovation
LEED.52	LEED® Accredited Professional
LEED.53	Regional Priority

Table IV S3. CASBEE

Code	Indicator
CSB.01	Basic performance - Ensuring thermal insulation and airtightness performance
CSB.02	Basic performance - Sunlight adjustment capability
CSB.03	Preventing summer heat - Allowing breezes in and heat out
CSB.04	Preventing summer heat - Proper planning for cooling
CSB.05	Preventing winter cold - Proper planning for heating
CSB.06	Countermeasures against chemical contaminants
CSB.07	Proper planning for ventilation
CSB.08	Precautions against crime
CSB.09	Use of daylight
CSB.10	Quietness
CSB.11	Building frames
CSB.12	Exterior wall materials
CSB.13	Roof materials/flat roof
CSB.14	Resistance against natural disasters
CSB.15	Fire preparedness - Fire-resistant structure (excluding openings)
CSB.16	Fire preparedness - Early detection of fire
CSB.17	Maintenance system - Ease of maintenance
CSB.18	Maintenance system - Maintenance system
CSB.19	Size and layout of rooms
CSB.20	Barrier-free design
CSB.21	Consideration of the Townscape and Landscape
CSB.22	Greening of the premises
CSB.23	Ensuring the biological habitat
CSB.24	Safety and Security of the Region
CSB.25	Utilizing Regional Resources and Inheriting the Regional Housing Culture
CSB.26	Control of thermal load of building
CSB.27	Natural energy use
CSB.28	Air-conditioning systems - Heating system
CSB.29	Air-conditioning systems - Cooling system
CSB.30	Hot-water equipment - Hot-water supply equipment
CSB.31	Hot-water equipment - Heat insulation of bathtub
CSB.32	Hot-water equipment - Hot-water plumbing
CSB.33	Lighting fixtures, home electric appliances, and kitchen equipment
CSB.34	Ventilation system
CSB.35	Highly energy-efficient equipment - Home cogeneration system
CSB.36	Highly energy-efficient equipment - Solar power generation system
CSB.37	Water-saving systems
CSB.38	Rainwater use
CSB.39	Presentation of lifestyle advice
CSB.40	Management and control of energy
CSB.41	Building frames (wooden, steel-frame or concrete)
CSB.42	Ground-reinforcing materials, foundation work, and foundations
CSB.43	Exterior materials
CSB.44	Interior materials
CSB.45	Materials for the external area
CSB.46	Production stage (members for building frames)
CSB.47	Production stage (members other than those for building frames)
CSB.48	Construction stage
CSB.49	Provision of information on materials used
CSB.50	Consideration of Global Warming
CSB.51	Control of the burden on the local infrastructure
CSB.52	Preservation of the existing natural environment
CSB.53	Reduction of noise, vibration, exhaust, and exhaust heat
CSB.54	Improvement of the thermal environment of the surrounding area

Table IV S4. Green Star

Code	Indicator
GRS.01	Green Star Accredited Professional
GRS.02	Commissioning
GRS.03	Building Tuning
GRS.04	Independent Commissioning Agent
GRS.05	Building Users' Guides
GRS.06	Environmental Management
GRS.07	Waste Management
GRS.08	Metering
GRS.09	Provision of Car Parking
GRS.10	Fuel-Efficient Transport
GRS.11	Cyclist Facilities
GRS.12	Commuting Mass Transport
GRS.13	Trip Reduction Mixed-Use
GRS.14	Ecological value of the site
GRS.15	Topsoil
GRS.16	Reuse of Land
GRS.17	Reclaimed Contaminated Land
GRS.18	Change of Ecological Value
GRS.19	Communal Garden Facilities
GRS.20	Dwelling Ventilation
GRS.21	Natural Ventilation
GRS.22	Daylight
GRS.23	Thermal Comfort
GRS.24	Hazardous Materials
GRS.25	Internal Noise Levels
GRS.26	Volatile Organic Compounds
GRS.27	Formaldehyde Minimisation
GRS.28	Electric Lighting Levels
GRS.29	Private External Space
GRS.30	Energy - Conditional Requirement
GRS.31	Greenhouse Gas Emissions
GRS.32	Peak Energy Demand Reduction
GRS.33	Unoccupied Areas
GRS.34	Energy Efficient Appliances
GRS.35	Occupant Amenity Water
GRS.36	Water Meters
GRS.37	Landscape Irrigation
GRS.38	Heat Rejection Water
GRS.39	Fire System Water
GRS.40	Water Efficient Appliances
GRS.41	Swimming Pool/Spa Water Efficiency
GRS.42	Recycling Waste Storage
GRS.43	Building Re-use
GRS.44	Recycled Content and Reused Products & Materials
GRS.45	Concrete
GRS.46	Steel
GRS.47	PVC Minimisation
GRS.48	Sustainable Timber
GRS.49	Design for Disassembly
GRS.50	Dematerialisation
GRS.51	Flooring
GRS.52	Joinery
GRS.53	Internal Walls
GRS.54	Universal Design
GRS.55	Refrigerant ODP
GRS.56	Refrigerant GWP
GRS.57	Refrigerant Leaks
GRS.58	Insulant ODP
GRS.59	Watercourse Pollution
GRS.60	Discharge to Sewer
GRS.61	Light Pollution
GRS.62	Legionella
GRS.63	Innovative Strategies and Technologies
GRS.64	Exceeding Green Star Benchmarks
GRS.65	Exceeding Green Star Scope

Table IV S5. Green Globes

Code	Indicator
GRG.01	Performance & Green Design Goals
GRG.02	Integrated Design Process
GRG.03	Site and Building Resilience
GRG.04	Environmental Management System (EMS)
GRG.05	LCCA or Building Service Life Planning: Path A or B
GRG.06	Moisture Control Design Analysis
GRG.07	Commissioning or Systems Manual & Training: Path A or B
GRG.08	Urban Infill and Urban Sprawl
GRG.09	Greenfields, Brownfields, and Floodplains
GRG.10	Transportation
GRG.11	Site Erosion
GRG.12	Site Disturbance
GRG.13	Tree and Shrub Preservation
GRG.14	Mitigating Heat Island Effect
GRG.15	Stormwater Management
GRG.16	Landscaping
GRG.17	Exterior Light Pollution: Path A or B
GRG.18	Wildland-Urban Interface Site Design
GRG.19	Energy Performance: Path A, B, or C
GRG.20	Vertical, Horizontal, and Inclined Transport Systems - Efficiency Measures
GRG.21	Load Shedding
GRG.22	Plug Load and Process Energy Management
GRG.23	Metering
GRG.24	Monitoring and Reporting
GRG.25	Verification
GRG.26	On-Site Renewable Energy
GRG.27	Off-Site Renewable Energy Credits
GRG.28	Plumbing Fixture and Fitting Standards
GRG.29	Residential Indoor Appliances
GRG.30	Cooling Towers
GRG.31	Boilers and Water Heaters
GRG.32	Domestic Hot Water Systems
GRG.33	Water Features and Pools
GRG.34	Water Treatment for End Uses
GRG.35	Alternate Water Sources for Indoor Uses
GRG.36	Alternate Water Sources for Outdoor Uses
GRG.37	Graywater Treatment
GRG.38	Water Metering
GRG.39	Irrigation
GRG.40	Whole Building Life Cycle Assessment
GRG.41	Product Life Cycle
GRG.42	Screening-Level Product Risk Assessment
GRG.43	Product Sustainable Materials Attributes
GRG.44	Structural Systems and Non-Structural/Interior Elements
GRG.45	Material Reuse from Off-Site
GRG.46	Construction Waste
GRG.47	Post Occupancy Solid Waste Recycling
GRG.48	Supply Chain Waste Minimization
GRG.49	Off-Site Fabrication for Construction Optimization
GRG.50	Design for Deconstruction (DfD)
GRG.51	Ventilation Air Quantity
GRG.52	Air Change Effectiveness
GRG.53	Air Handling Equipment
GRG.54	CO ₂ Sensing and Ventilation Control Equipment
GRG.55	Volatile Organic Compounds
GRG.56	Pre-Occupancy Indoor Air Quality Testing
GRG.57	Carbon Monoxide Monitoring
GRG.58	Legionellosis Mitigation in the Building Water Systems
GRG.59	Pest and Contamination Control
GRG.60	Other Indoor Pollutants (Tobacco, Radon)
GRG.61	Daylighting and Views
GRG.62	Lighting Design Quantity
GRG.63	Lighting Design Quality
GRG.64	Lighting Sustainability
GRG.65	Thermal Control Zones
GRG.66	Thermal Comfort Design
GRG.67	Airborne Noise Isolation
GRG.68	Sound Masking System
GRG.69	Structure Borne Noise Isolation

Code	Indicator
GRG.70	Reverberation Time or Ceiling Noise Reduction Coefficient (NRC)
GRG.71	Mechanical Noise
GRG.72	Airborne HVAC Noise
GRG.73	Electrical System Noise

Table IV S6. DGNB

Code	Indicator
DGNB.01	Building life cycle assessment
DGNB.02	Local environmental impact
DGNB.03	Sustainable resource extraction
DGNB.04	Potable water demand and waste water volume
DGNB.05	Land use
DGNB.06	Biodiversity at the site
DGNB.07	Life cycle cost
DGNB.08	Flexibility and adaptability
DGNB.09	Commercial viability
DGNB.10	Thermal comfort
DGNB.11	Indoor air quality
DGNB.12	Acoustic comfort
DGNB.13	Visual comfort
DGNB.14	User control
DGNB.15	Quality of indoor and outdoor spaces
DGNB.16	Safety and security
DGNB.17	Design for all
DGNB.18	Fire safety
DGNB.19	Sound insulation
DGNB.20	Quality of the building envelope
DGNB.21	Use and integration of building technology
DGNB.22	Ease of cleaning building components
DGNB.23	Ease of recovery and recycling
DGNB.24	Emissions control
DGNB.25	Mobility infrastructure
DGNB.26	Comprehensive project brief
DGNB.27	Sustainability aspects in tender phase
DGNB.28	Documentation for sustainable management
DGNB.29	Procedure for urban and design planning
DGNB.30	Construction site / construction process
DGNB.31	Quality assurance of the construction
DGNB.32	Systematic commissioning
DGNB.33	User communication
DGNB.34	FM-compliant planning
DGNB.35	Local environment
DGNB.36	Influence on the district
DGNB.37	Transport access
DGNB.38	Access to amenities

Capítulo V: Indicadores de sostenibilidad en edificios. Caracterización constructiva

Caracterización del parque edificatorio residencial de los pisos térmicos frío y templado en Colombia.

Jorge-Ortiz, A., Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M.D., 2024. Caracterización del parque edificatorio residencial de los pisos térmicos frío y templado en Colombia. *Cuad. Geogr. Rev. Colomb. Geogr.* 33, 234–251

<https://doi.org/10.15446/rcdg.v33n1.103672>

Resumen

El crecimiento demográfico en los municipios de Colombia ha influido notablemente en la calidad de la vivienda. Este artículo tiene como objetivo proponer un método para caracterizar el parque edificatorio residencial de los municipios ubicados en los pisos térmicos frío y templado, estructurado en tres niveles de caracterización que arrojan diferentes resultados: (I) Caracterización temporal, (II) Caracterización de la vivienda y (III) Caracterización de las soluciones constructivas. En el Nivel I se obtienen cinco periodos temporales marcados por eventos históricos, sociales y normativos. Como resultado de los Niveles I y II se obtiene la taxonomía edificatoria, que puede ser determinada en función de varios criterios: emplazamiento urbano (barrio o urbanización), tipología residencial (unifamiliar o multifamiliar), adyacencia (aislada, esquinera o entre medianeras) y número de plantas (1, 2/3, más de 3). En el Nivel III se analizan las soluciones constructivas y se elabora un catálogo de soluciones típicas para cada uno de los periodos temporales y tipologías. Los resultados del estudio sirven como herramienta a los entes gubernamentales para sugerir el nivel de estratificación socioeconómica de las viviendas atendiendo a la tipología y calidad constructiva.

Palabras clave

Entorno construido, Tipología residencial, Soluciones constructivas, Estratificación, Crecimiento demográfico

Ideas destacadas

Artículo de investigación que aborda una alternativa para la adecuada caracterización del parque edificatorio residencial en Colombia en los pisos térmicos templado y frío, teniendo en cuenta criterios constructivos, demográficos y socioeconómicos.

1. Introducción

De acuerdo con las Naciones Unidas, el 55 % de la población mundial vive en los perímetros urbanos de las ciudades y se estima que para el 2050 este porcentaje aumente en un 13 %. La mayor causa de la aglomeración de población en los núcleos urbanos es la migración de las áreas rurales a las urbanas, cuyo efecto se produce con mayor celeridad en los países de ingresos bajos y medios, como ocurre en Latinoamérica (ONU 2018). Actualmente en Latinoamérica, el 81 % de la población se encuentra en las áreas urbanizadas y, en el caso de Colombia, en el 2018 el 71,8 % de la población habitaba los centros urbanos (DANE 2019). El aumento de la población requiere de una gestión adecuada de los planes territoriales, en cuanto a temas como la vivienda, los servicios públicos y el transporte, entre otros (ONU 2018). Por ello es necesario, como punto de partida, disponer de una caracterización del parque edificatorio existente.

A nivel global existen diferentes metodologías para caracterizar el parque edificatorio. El proyecto TABULA-EPISCODE (European Project Partners 2012; Diefenbach, Loga y Stein 2014) estableció las bases para realizar dicha caracterización en Europa, considerando diferentes variables, entre las que destacan la tipología edificatoria, el año de construcción y la transmitancia térmica de la envolvente térmica de los edificios. En el marco de este proyecto, países del este de Europa (Hungría, Bulgaria, Serbia y República Checa) implementaron esta metodología (Csoknyai et ál. 2016) y también del sur, como España (Serrano-Lanzarote et ál. 2016) e Italia (Corrado y Ballarini 2016). En Grecia, Dascalaki et ál. (2016) fueron un paso más allá y plantearon diferentes escenarios de rehabilitación del parque residencial existente, integrando también las instalaciones, a la vez que estimaron sus efectos en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. En línea con este proyecto, en España, Braulio-Gonzalo et ál. (2016) caracterizaron el parque residencial teniendo en cuenta variables propias del edificio (tipología y año de construcción), pero también variables urbanas (la forma de la manzana urbana, la orientación y la proporción del ancho de calle). Y, más recientemente, en Suiza, Sasso, Chambers y Patel (2023) propusieron también incluir en la caracterización de los edificios el tipo de urbanización y la forma urbana. Estos últimos estudios denotan un creciente interés por la integración de los aspectos urbanos en la caracterización del parque edificatorio. A nivel de Latinoamérica, hasta la fecha, solo existe un estudio (Yepes-Estrada et ál. 2017) donde se caracteriza el parque edificatorio en el que se realiza un inventario de edificaciones teniendo en cuenta el riesgo sísmico y las características comunes de construcción en los países de Perú, Chile, Venezuela, Bolivia y Colombia.

La literatura existente en materia de caracterización pone de manifiesto la importancia de clasificar el parque edificatorio existente considerando las características propias de cada región o país. No existe hasta la fecha ningún estudio centrado en el caso de Colombia, por lo que este estudio lo considera, teniendo en cuenta sus particularidades de planeamiento y socioeconómicas.

Colombia es un país ubicado en la zona de convergencia intertropical (ZCIT), por lo que, debido a la convergencia de aire cálido y húmedo, se encuentra clasificado como un país tropical en el cual no existen estaciones. Sin embargo, debido a su vasta orografía marcada por el sistema de cordilleras

(occidental, central y oriental), hace que exista una gran variedad de climas (Eslava R. 1993), siendo este un factor determinante en la distribución de la precipitación, la nubosidad y la humedad, entre otras variables climatológicas.

Desde los inicios del siglo XVII se ha clasificado a Colombia mediante zonas climáticas. El primero en hacerlo fue Caldas en 1802, quien propuso que, dependiendo de la altitud y de la temperatura (°C) de cada región, se clasificara en pisos térmicos: cálido, templado, frío, muy frío, extremadamente frío y nival. Posteriormente en 1915, Lang propuso otra clasificación en la que, a partir de coeficientes donde se relacionaba el régimen de precipitación y la temperatura, se obtuvieron seis categorías de clima: desértico, árido, semiárido, semihúmedo, húmedo y superhúmedo. En 1962, Paul Schaufelberguer combinó la clasificación de Caldas y Lang, obteniendo 25 tipos de clima (IDEAM 2011).

Actualmente, Colombia se clasifica climáticamente en 8 pisos térmicos: cálido, desértico, árido, semiárido, semihúmedo, húmedo, templado y frío (IDEAM 2011). El clasificar las regiones en estos pisos climáticos sirve para establecer la distribución espacial de la sociedad, dependiendo de los servicios ecosistémicos que cada una de zonas climáticas ofrece, además de poder regular la frecuencia de los fenómenos meteorológicos (IDEAM-UNAL 2018).

El piso térmico cálido es el predominante en el país, aunque la mayor población y el mayor desarrollo se da en las regiones cuyo piso térmico es templado y frío (correspondiente a la región Andina), debido a la necesidad de un mayor confort térmico de la población y a la variedad de servicios ecosistémicos que existen en dichos climas (González Rozo 2010). Otra de las razones de que estas regiones sean las más pobladas son los fenómenos demográficos de mediados de la década de los cincuenta, marcados por la migración de población en el siglo XV desde diferentes regiones de la zona rural a las grandes ciudades, por desplazamiento forzado o búsqueda de oportunidades de empleo, entre otros factores (Flórez 1995). En estos pisos térmicos se encuentran las ciudades principales como Bogotá, Medellín y Cali, donde se concentra alrededor del 56,7 % de la población del país, dando lugar a la mayoría de los asentamientos urbanos (DANE 2018). Dentro de las características socioeconómicas de la región, hay que denotar la gran desigualdad existente en términos de ingresos, educación y salud, lo que limita las oportunidades para mejorar la calidad de vida de la población (Baena et ál. 2020).

Debido al fuerte crecimiento urbano acelerado, el Estado tuvo que intervenir y formular políticas que adaptaran las ciudades para que tuvieran la capacidad de satisfacer las necesidades de los habitantes, en tema de vivienda, salud, industria y educación, a lo que diferentes planificadores denominaron la “ciudad moderna” (Ramírez Ríos 2011). Sin embargo, estas políticas fueron ineficaces debido a la falta de recursos para atender a la población, que incrementaba gradual y aceleradamente, haciendo que fuera difícil emplear un mecanismo de ordenamiento (DNP 2017). Para ese entonces, el crecimiento de ciudades como Bogotá, Medellín y Cali era difícil de controlar, al igual que el crecimiento de viviendas en asentamientos informales ubicadas en las periferias de los centros urbanos (Valbüena, Mena y César 2013), alterando los límites urbanos. Esta expansión

incontrolada hizo que la calidad de vida de la población fuera en deterioro debido a los problemas que trajo consigo, como la congestión vehicular, el incremento en los índices de delincuencia y la variabilidad en la calidad de las edificaciones, también condicionada por las diferentes condiciones socioeconómicas que caracterizaban a la población.

Debido al deterioro de la calidad de vida en las principales ciudades, nuevamente se generó la migración de la población a los municipios aledaños a estas. No obstante, estos municipios no contaban con la calidad urbanística para proporcionar la adecuada calidad de vida, lo que provocó un hacinamiento y por tanto un déficit de vivienda (Galvis 2015; Hernández Garzón 2019). Como respuesta a disminuir este déficit de vivienda, nació una variedad de tipologías de vivienda y de calidades constructivas, dependiendo del nivel de ingresos en el hogar.

Debido a las diferencias de ingresos en los diferentes hogares de los centros poblados y en respuesta a gestionar el adecuado urbanismo, el gobierno de Colombia formula la metodología de estratificación socioeconómica (DANE 2015), donde, además de clasificar de acuerdo con el ingreso económico de los hogares, se tiene en cuenta la calidad de vivienda. Sin embargo, para determinar el estrato socioeconómico al que corresponde cada vivienda, solo se tienen en cuenta los materiales predominantes de cubierta, fachadas y paredes, cuya información y datos se recogen a partir de una encuesta multipropósito (DANE 2018) realizada en los hogares generalizando todas las zonas del país, sin importar el clima o el año de construcción de las viviendas.

En el 2021, el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) reunió a varios expertos para analizar la metodología actual de estratificación, y encontró posibles errores en dicha asignación del estrato, como es la desactualización catastral de predios, el no tener en cuenta las condiciones constructivas de las viviendas sino solo la cantidad de superficie construida (en metros cuadrados) y el hecho de estratificar la manzana en lugar del predio. Ello conlleva a que a algunas viviendas se les asigne un estrato relativamente más alto al que en realidad deberían tener (DANE 2021). Actualmente algunos organismos gubernamentales han cuestionado también dicha metodología, como es el caso de Bogotá, que propone una nueva metodología en donde se integren las características de la vivienda y la capacidad del hogar (SDP 2021a, 2021b). En dicha metodología se propone un indicador global que mide la calidad de vida de los habitantes tanto en su entorno como en la calidad de la vivienda.

Sin embargo, en ninguna de estas nuevas metodologías emergentes la evaluación de las características de las viviendas se realiza de manera desglosada, pues solo se tiene en cuenta el tipo de vivienda y se siguen generalizando las soluciones constructivas de las viviendas de acuerdo con su ubicación, dejando fuera criterios como el año de construcción y el análisis detallado de las soluciones constructivas empleadas para su construcción, que determinan en gran medida la calidad de la vivienda. Pues, a mejor calidad de materiales y mejor diseño, aumenta el confort térmico y la protección frente a los fenómenos climatológicos (Suárez, Jiménez y Millán 2015).

Partiendo de lo anteriormente expuesto, a la fecha no existe ningún tipo de metodología que permita caracterizar las tipologías de vivienda y sus soluciones constructivas, específicas de cada región climática, que tenga en cuenta los diferentes periodos temporales de construcción, por lo que el objetivo principal del presente artículo es proponer un método para la caracterización de parque edificatorio residencial en los pisos climáticos frío y templado de Colombia, que sirva como herramienta para proponer el nivel de estratificación de un predio específico.

2. Método

De acuerdo con los antecedentes y el objetivo de la investigación, el presente trabajo propone un método para la caracterización del parque edificatorio residencial en los pisos climáticos frío y templado en Colombia, que abarca desde la identificación de la tipología edificatoria en su entorno urbano hasta la caracterización de las soluciones constructivas empleadas. Se compone de los tres niveles de caracterización que se muestran en la Figura V-1 y que se describen a continuación.

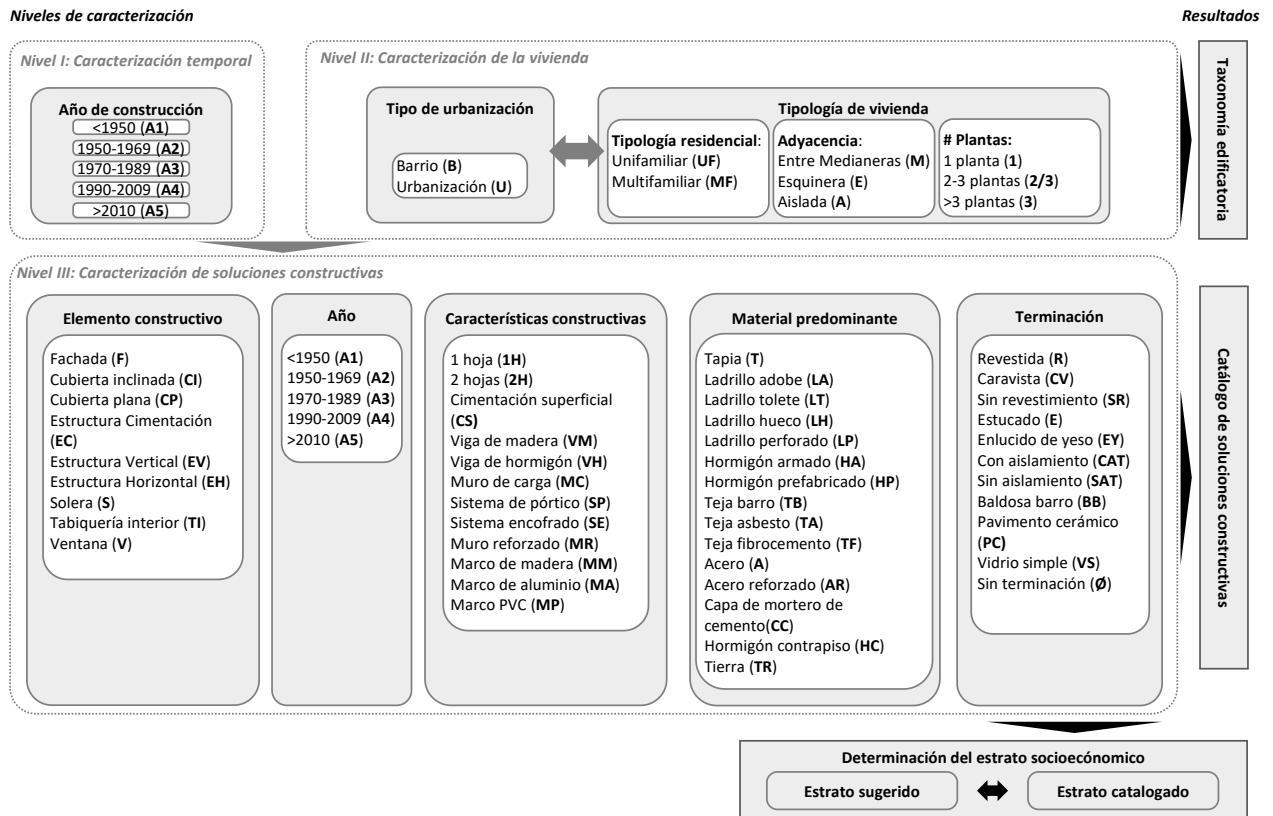


Figura V- 1. Método propuesto.

- Nivel I caracterización temporal:** se describen los periodos temporales que marcaron hitos en la evolución del parque edificatorio residencial atendiendo a criterios normativos e históricos.
- Nivel II caracterización de vivienda:** se describe el tipo de vivienda en función de los siguientes criterios: morfología del área urbana en la que se emplaza (barrio o urbanización) y tipología de

la propia vivienda, diferenciando entre residencial (unifamiliar o multifamiliar), adyacencia (aislada, esquinera o entre medianeras) y número de plantas (1, 2/3, más de 3).

3. **Nivel III caracterización de soluciones constructivas:** se describen los elementos constructivos de fachada, cubierta, estructura, solera, tabiquería interior y ventanas que constituyen cada una de las tipologías de vivienda identificadas en el nivel II, y en cada periodo del nivel I.

El método propuesto permite obtener varios resultados. El primero es la **taxonomía edificatoria**, basada en los criterios de caracterización definidos en los niveles I y II, que contribuye a definir un conjunto de tipologías edificatorias propias de la región catalogada como piso térmico frío o templado en Colombia y a clasificar cualquier edificio residencial ubicado en ella. El segundo resultado es un **catálogo de soluciones constructivas** características de las diferentes tipologías edificatorias. Como tercer resultado, se obtiene la lectura de la **estratificación socioeconómica** en la que puede clasificarse la vivienda, teniendo en cuenta su tipología y sus soluciones constructivas. La obtención de este estrato socioeconómico sugerido puede ser contrastado con el estrato socioeconómico en el que el gobierno de Colombia cataloga la vivienda (DANE 2015), lo que sirve como herramienta para sugerir el nivel de estratificación socioeconómica de la vivienda de acuerdo con su calidad.

3. Niveles de caracterización

3.1. Nivel I: caracterización temporal

Para realizar la caracterización temporal y establecer unos periodos de tiempo que permitan delimitar las características del parque residencial, se realiza una revisión bibliográfica de la evolución de la vivienda en Colombia en función de los eventos históricos, sociales y normativos.

Desde la perspectiva histórica, Ceballos (2008) y Saldarriaga Roa (1995) analizaron la evolución de las políticas de vivienda en Colombia y la dividieron en cinco periodos:

1. Higienista (1918-1942), marcado por la Ley 46 de 1918 (Congreso de la República de Colombia 1918) que estableció la necesidad de dotar a la clase obrera de una vivienda higiénica.
2. Institucional (1942-1965), donde el Instituto de Crédito Territorial (ICT) formuló normativas que fijaron criterios sobre la localización de los barrios o proyectos, equipamientos, vías de acceso, número de habitaciones, áreas mínimas, iluminación y ventilación, la proporción de los baños respecto a otros espacios, y los materiales de construcción.
3. De transición (1965-1970), marcado por la alta migración de la población de la zona rural a las principales zonas urbanas de municipios como Bogotá o Medellín. Se estableció la normativa para mejorar la malla vial de las ciudades en expansión y mejorar la cobertura del sistema de

acueducto y alcantarillado, pero no se establecieron normativas sobre edificación, que principalmente son viviendas de autoconstrucción.

4. Corporaciones de ahorro (1971-1990), caracterizado por un crecimiento desmedido de las grandes ciudades y de las principales zonas urbanas, provocando un déficit de vivienda. El ICT construyó las primeras viviendas subsidiadas por el Estado.
5. Concepción de mercado y subsidios de vivienda (1990-2012), en el que se generalizó la construcción de las viviendas subsidiadas por el Estado: Viviendas de Interés Social (VIS), donde el estado financia una parte con los subsidios, y las Viviendas de Interés Prioritario (VIP), que son viviendas para la población en condición de vulnerabilidad.

Simultáneamente a estos cinco periodos, y desde la perspectiva social, diferentes acontecimientos condicionan el crecimiento demográfico, el tipo de construcción y, por tanto, la tipología de vivienda. Las primeras migraciones a las principales ciudades se dieron posteriormente al finalizar la Guerra de los Mil Días (1902), debido a que la mayoría de las zonas terminaron en ruinas y sumidas en la pobreza. Otro evento histórico que marcó el crecimiento demográfico en las ciudades fue Bogotazo en 1948, que generó el desplazamiento de miles de habitantes de los municipios de la región Andina a las principales ciudades. Fruto de esto nacieron los primeros barrios populares obreros en las principales ciudades, en forma de asentamientos de índole informal o como producto de la parcelación de haciendas.

Desde la perspectiva normativa, la evolución de la vivienda estuvo marcada por los movimientos sísmicos acontecidos en el país y al auge de la construcción de viviendas de más de dos plantas, lo que llevó a expedir el Decreto 1400 de 1984, que constituye el primer intento de código de la edificación para unificar el diseño y la construcción de las viviendas de más de dos pisos. En dicho decreto se describen los materiales de construcción a emplear dentro de los sistemas estructurales (García 2014), dependiendo del riesgo sísmico de cada municipio, y tuvo vigencia durante 14 años.

En 1997 mediante la Ley 388 (Congreso de la República de Colombia 1997) se decretó que todas las ciudades y municipios sin importar su tamaño formulen e implementen un plan de ordenamiento territorial (POT), en el cual se deben establecer las metas ambientales, sociales y económicas a largo plazo en cuanto al uso, la ocupación y la transformación del entorno físico, urbano y rural (Villegas Rodríguez et ál. 2010). Dichos planes de ordenamiento entraron en vigor en el 2000.

En 1998 se estableció la primera actualización de normativa sobre construcción sismorresistente (NSR-981, 998), en la que se catalogaron los municipios dependiendo de su clasificación sísmica y se definieron los sistemas de construcción según dicha clasificación. Asimismo, se incorporó el uso de materiales prefabricados para la construcción de las viviendas.

En el 2010 la norma técnica NSR-98 se actualizó nuevamente y pasó a denominarse NSR-10 (2010), que introdujo la mejora de los materiales de construcción y los espesores que se deben emplear en

la envolvente de la vivienda. Desde entonces, la normativa no ha tenido ninguna modificación y es, actualmente, la guía de referencia para la construcción de edificaciones.

Por otro lado, cabe destacar que Colombia no contaba con ninguna norma básica de construcción que tuviera en cuenta el piso térmico de la región y las condiciones con las que debían construirse los edificios para mejorar su eficiencia energética y reducir el consumo de recursos. Así pues, los edificios residenciales generan un alto consumo de energía y de recursos (Giraldo-Castañeda, Czajkowski y Gómez 2021) que, además, ha aumentado notoriamente en las últimas décadas debido a la necesidad de la población de tener un confort térmico mediante sistemas de refrigeración y calefacción (Rubiano Martín 2016). Ante esta problemática, el Estado formuló la Resolución 0549 (2015), que obliga a los nuevos proyectos tipo VIS y VIP a cumplir con las estrategias para el ahorro de agua y energía, dependiendo de la zona climática en la que se ubican.

La Figura V-2 muestra una síntesis de la evolución descrita mediante una línea temporal. A partir de ella, se propone fijar los cinco periodos temporales representativos que han marcado la evolución constructiva en Colombia y que se muestran en la parte inferior de dicha figura. Estos son: A1 (<1950), A2 (1950-1969), A3 (1970-1989), A4 (1990-2009) y A5 (>2010).

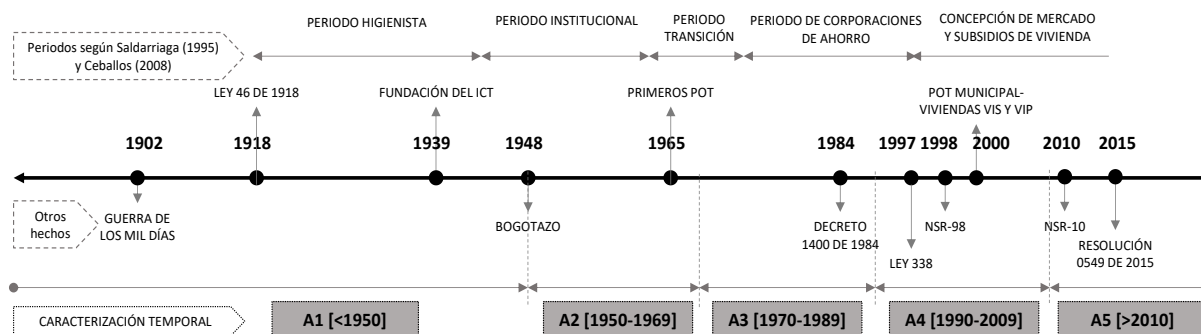


Figura V- 2. Caracterización temporal de la vivienda en Colombia.

3.2. Nivel II: caracterización de vivienda

La caracterización de la vivienda puede realizarse atendiendo a diferentes criterios: zona o área urbana en la que se encuentra ubicada, tipología de vivienda y adyacencia.

En cuanto a la zona o área urbana, según el informe de huella de urbana de la Región de Bogotá en Colombia (IDOM 2018), tanto las principales ciudades como la mayoría de los municipios se encuentran distribuidos espacialmente en barrios y urbanizaciones, cuyas características se describen a continuación:

1. Barrio (B): se define como un espacio físico resultante de la parcelación de tierras, las cuales se pueden encontrar dentro de los límites geográficos municipales dispuestos formando asentamientos legales, o bien en asentamientos fuera de los límites geográficos en zonas de riesgo, formando barrios ilegales o marginales (Ludeña 2006). Así pues, en los barrios puede

encontrarse una gran diversidad de viviendas, marcadas por sus características constructivas que, en su mayoría, son resultado de la autoconstrucción, lo que genera a su vez una morfología en el barrio de tipo irregular.

2. Urbanización (U): se define como un espacio físico resultante de la parcelación homogénea del territorio, el cual cumple con las normas y licencias correspondientes a nivel de urbanismo (Uribe Tami 2014), generando una morfología urbana de tipo regular. La construcción en este espacio físico puede ser desarrollada por entes gubernamentales o promotores privados dando origen a las viviendas VIS, VIP y privado; dependiendo del proyecto, el conjunto de viviendas tendrá las mismas características constructivas.

La tipología de vivienda depende de la zona o área urbana en la que se encuentra ubicada, pues la disposición del entramado urbano (manzanas) determina si los edificios se construyen de forma contigua, es decir, compartiendo muros medianeros, o bien, si se construyen de forma aislada, por ejemplo, en condominios cerrados. Así, las viviendas unifamiliares suelen encontrarse tanto en barrio como en urbanización, mientras que las viviendas ubicadas en edificios multifamiliares suelen emplazarse en urbanizaciones.

En cuanto a la tipología residencial, las viviendas pueden clasificarse como unifamiliar o multifamiliar, con las siguientes características:

1. Unifamiliar (UF): unidad básica de vivienda caracterizada por ser de baja altura destinada a un núcleo familiar y que por el tipo de construcción puede ser de autoconstrucción, VIS, VIP o privado.
2. Multifamiliar (MF): constituye un edificio en altura que aglutina un conjunto de viviendas y por tanto más de dos núcleos familiares. Estas solo son de origen: VIS, VIP o privado.

Por su tipo de adyacencia, las viviendas pueden ser de tipo:

1. Aislada (A): viviendas o edificios que se encuentran exentos, no anexionados a ningún otro. Por tanto, todas sus fachadas están libres y en contacto con el ambiente exterior.
2. Entre medianeras (M): viviendas o edificios contiguos a otro, de forma que comparten muros medianeros. Al menos, tienen una fachada libre.
3. En esquina (E): viviendas o edificios que constituyen el vértice de una cuadra o manzana urbana, por lo que tienen al menos dos fachadas libres.

El número de plantas determina la altura del edificio y, por tanto, su morfología. Las viviendas se clasifican, por su número de plantas, en:

1. Una planta (1): altura propia de las viviendas unifamiliares.
2. Dos o tres plantas (2/3): altura propia de las viviendas unifamiliares.
3. Más de tres plantas (3): altura propia de los edificios multifamiliares.

Teniendo en cuenta tanto la caracterización temporal como la de la vivienda, que dará como resultado la taxonomía edificatoria, se observa lo siguiente. En el periodo A1 (<1950) los principales municipios estaban compuestos morfológicamente por barrios y las viviendas que ocupaban mayoritariamente el suelo eran de tipo unifamiliar entre medianeras de una planta.

En el periodo A2 (1950-1969), al igual que para A1 (<1950) los municipios estaban distribuidos en barrios compuestos por viviendas de tipo unifamiliar y esquinera, debido a la geometría de la parcela. En las principales ciudades y en los municipios con mayor población se comienzan a construir viviendas de 2 o 3 plantas.

Para el periodo A3 (1970-1989), los barrios comenzaron a experimentar los cambios normativos, de manera que algunas viviendas que anteriormente eran de una planta se adecuaron para agregar una planta más. También siguió en auge la construcción de viviendas unifamiliares de 2 o 3 plantas.

Con la llegada de los subsidios de vivienda, la dinámica morfológica de los municipios se vio modificada, ya que aparecieron las primeras urbanizaciones. Así, durante el periodo A4 (1990-2009) el auge de la construcción de viviendas unifamiliares del periodo anterior dio paso a las viviendas multifamiliares, para mitigar el déficit de vivienda en los municipios.

En el periodo A5 (>2010), debido a la alta demanda de vivienda, la morfología de los municipios pasó de ser netamente de barrio o de urbanización a ser tipo mixta, encontrando viviendas de todo tipo: unifamiliar autoconstruida de 1 planta o 2/3 plantas, unifamiliar de tipo VIS, VIP o privada, y multifamiliar.

3.3. Nivel III: caracterización de soluciones constructivas

Las tipologías de vivienda de un mismo periodo se construyeron en el mismo contexto histórico y de acuerdo con la misma normativa, por lo que se caracterizan por presentar las mismas o muy similares soluciones constructivas.

Con el fin de analizar las soluciones constructivas de cada uno de los periodos temporales definidos en el nivel I para los sistemas constructivos de fachadas, cubiertas inclinadas/planas, estructuras de cimentación/vertical/horizontal, soleras, tabiques internos y ventanas, se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica, cuyos principales estudios se detallan en la Tabla V-1.

Tabla V- 1. Revisión bibliográfica

Referencia	Objetivo	Región analizada	Elemento constructivo									
			F	CI	CP	EC	EV	EH	S	TI	V	
CENAC (1977)	Analiza las soluciones constructivas de los municipios de la región de Cundinamarca.	Cundinamarca	x	x			x	x	x			x
CENAC-ITC (1980)	Descripción de las viviendas de los barrios populares en la década de los ochenta.	Andina	x	x		x	x	x	x	x		x
Saldarriaga Roa (1984)	Caracterización de las tipologías rurales en Colombia.	Colombia	x	x		x	x	x	x	x		
Presidencia de la República (1984)	Norma sismorresistente de Colombia (primera versión).	Colombia	x			x	x	x				
Mejía (1998)	Descripción de sistemas constructivos de los barrios populares en Colombia.	Colombia	x		x					x	x	x
Presidencia de la República (1998)	Norma sismorresistente de Colombia (segunda versión).	Colombia	x	x	x	x	x	x	x	x		
Herrera y Madrid (1999)	Definición de sistemas estructurales y no estructurales cuyo material predominante es la mampostería.	Colombia	x				x	x	x	x		
Universidad de Los Andes (2000)	Descripción de los sistemas constructivos utilizados en las viviendas VIS	Cundinamarca	x	x	x		x	x	x	x		
Alcaldía Mayor de Bogotá, D. C. (2002)	Memoria de tipologías de viviendas VIS.	Bogotá	x	x		x	x	x	x	x		x
AIS (2004)	Descripción de las viviendas construidas en adobe y tapia.	Andina	x	x		x	x	x	x	x		
Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo territorial (2010)	Norma sismorresistente de Colombia (tercera versión).	Colombia	x	x	x	x	x	x	x	x		
Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (2011)	Guía básica de los materiales de construcción usados en las viviendas VIS y VIP	Colombia	x	x	x	x	x	x	x	x		x
Torres Tovar y Rincón García (2011)	Descripción de los proyectos de barrios populares de 1990-2010.	Bogotá	x				x	x	x	x		
Valbuena, Mena y García (2013)	Caracterización de materiales de las viviendas autoconstruidas en Bogotá.	Bogotá	x	x	x	x	x	x	x	x		x
Pérez (2014)	Descripción de los proyectos de barrios populares de 1918-2014.	Bogotá	x			x	x					x

A partir del análisis de contenido de cada uno de los estudios detallados en la Tabla 1, se extraen las siguientes conclusiones para cada sistema constructivo:

1. Fachada (F): las fachadas pueden estar constituidas por un muro simple de una hoja o por un muro de doble hoja, lo que permite crear una cámara de aire intermedia que proporciona cierto aislamiento térmico a la fachada. Los materiales predominantes de los que están constituidas las fachadas son la tapia, el adobe, la mampostería y el hormigón. En algunas ocasiones, a las fachadas se les da un tratamiento de revestimiento exterior para embellecerlas, que puede ser un estucado o un revestimiento cerámico, mientras que, en otras, las fachadas carecen de cualquier revestimiento, quedando visto el propio material principal por el que están constituidas o el ladrillo caravista, que embellece por sí mismo. En las fachadas de las viviendas construidas en el periodo <1950 (A1) el material que predomina es el muro de una hoja de tapia sin revestimiento; en el periodo 1950-1969 (A2), predominan las fachadas de una hoja de tipo caravista de ladrillo de adobe revestido al exterior y al interior. Para el periodo 1970-1989 (A3) las fachadas siguen siendo muros a una hoja, cambiando el material predominante por ladrillo tolete; estos muros eran revestidos en el exterior con material cerámico, estucado o con caravista. En el periodo 1990-2009 (A4) las fachadas de las viviendas pueden ser de dos tipos: de una hoja o de dos hojas. En las fachadas de una hoja el material predominante puede ser ladrillo hueco o ladrillo perforado, lo que varía el tipo de acabado que se proporciona a la fachada. En las fachadas de ladrillo hueco el revestimiento exterior es material cerámico o estucado, mientras que, en las fachadas de ladrillo perforado, el tipo de acabado es el propio ladrillo, que es caravista. En cuanto a las fachadas de dos hojas, estas hojas se disponen contiguas sin crear una cámara de aire intermedia; el material predominante es el ladrillo tolete y el tipo de acabado es caravista.
2. En los años posteriores (A5, >2010), a las fachadas de dos hojas se les incorpora la cámara de aire, el material predominante es el ladrillo hueco y el tipo de acabado sigue siendo el ladrillo caravista. En este periodo se introducen las fachadas de hormigón prefabricado, en las que también se incorpora aislamiento térmico.
3. Cubierta inclinada (Ci): debido a las condiciones climáticas de los pisos térmicos fríos y templados, que conllevan altos niveles de precipitación anual, la mayoría de las viviendas cuenta con cubiertas inclinadas, a un agua o a dos.
4. Para las viviendas construidas en los periodos A1 y A2 (hasta el 1969), las cubiertas se encuentran soportadas mediante vigas de madera, el material de cobertura es la teja de barro cocida y no cuentan con aislamiento térmico. En el periodo A3 (1970-1989) las tejas de cobertura pasan de ser de barro cocido a tejas de fibrocemento. En los periodos A4 y A5 (desde 1990 hasta la actualidad) las cubiertas inclinadas se encuentran soportadas mediante vigas de hormigón armado y el material de cobertura es la teja de fibrocemento. Cabe indicar que en el periodo A5

(>2010) ya se incorpora material de aislamiento térmico, habitualmente de 30 mm de espesor, lo que proporciona un mejor comportamiento térmico de las viviendas.

5. Cubierta plana (CP): las cubiertas planas cobran importancia en los periodos A4 y A5 (a partir de 1990), siendo el material predominante el hormigón armado de tipo prefabricado, el cual se soporta también sobre vigas de hormigón armado. La diferencia entre los periodos de A4 y A5 es que en este último se incorpora el aislamiento térmico de 30 mm de espesor. Cabe indicar que, aunque se trata de cubiertas planas, no son transitables.
6. Estructura de cimentación (EC): la cimentación de las viviendas construidas en el periodo de A1 (<1950) se ejecutaba con rocas de tamaño irregular compactadas con el mortero de cal y arena. En el periodo A2 (1950-1969) la cimentación pasó a incorporar el ladrillo tolete como material predominante. A partir del periodo A3 (1970-1989) a la época actual, la cimentación se realiza con zapatas y losas de hormigón armado.
7. Estructura vertical (EV): en el periodo A1 (<1950) los muros de carga eran construidos principalmente con tapia revestida con cal, tanto al exterior como al interior. En el periodo A2 (1950-1969) predominan los muros de adobe de doble hoja revestida con mortero de cemento, y, en el periodo A3 (1970-1989), los muros estructurales son de ladrillo macizo de doble hoja revestidos en el exterior y en el interior. Posteriormente, con las políticas para hacer frente a la estabilidad sismorresistente, se introdujeron los sistemas estructurales de tipo pórtico, estructural y dual. Los sistemas estructurales predominantes en las viviendas construidas en el periodo A4 (1990-2009) eran de mampostería reforzada con barras de acero o de sistema dual, mezclando mampostería y columnas y vigas de hormigón armado. En las viviendas construidas con posterioridad al 2010 (A5) se incorpora el hormigón como material predominante en el sistema estructural, formando parte como muro de hormigón reforzado o en el sistema dual de hormigón armado con vigas y columnas de acero.
8. Estructura horizontal (EH): las estructuras horizontales en el periodo de A1 (<1950) eran nulas debido a que el tipo de edificación predominante era de tan solo una planta y su techo estaba formado por la propia cubierta, plana o inclinada. A partir del periodo A2 (1950-1969) hasta el periodo de A3 (1970-1989) las estructuras horizontales que dividían un piso del otro eran construidas principalmente con vigas de madera con material predominante de acabado en el piso de baldosa de barro cocido. En los periodos A4 y A5 (desde 1990 hasta la actualidad), las estructuras horizontales pasaron de ser de madera a ser de hormigón armado, con pavimento cerámico como material predominante de revestimiento.
9. Solera (s): las soluciones constructivas que componen la solera de las viviendas también han tenido diferentes adaptaciones dependiendo de los periodos de construcción. En el periodo de A1 (<1950) las viviendas tenían soleras de tierra compactada y una capa fina de mortero de cemento como pavimento. Ya en el periodo A2 (1950-1969) al suelo compactado se le agrega una capa de contrapiso construido con ladrillo tolete junto con una capa de mortero y

revestimiento de baldosa de barro cocido. A partir del periodo A3 (1970-1989) hasta la fecha, la solera se construye a partir de una losa de hormigón armado, seguida por un hormigón de contrapiso cuya función es nivelar completamente la superficie, y seguido por un revestimiento de suelo que puede ser cerámico, de madera o textil (moqueta).

10. Tabique interior (τ_i): en el periodo A1 (<1950) los tabiques de partición eran de tapia sin ningún tipo de revestimiento en ninguna de sus caras; en el periodo A2 (1950-1969) eran de adobe enlucido en ambas caras; en A3 (1970-1989) de ladrillo tolete enlucido en ambas caras; en A4 (1990-2009) de ladrillo hueco también enlucidos en ambas caras; y en el periodo A5 (>2010), además de los tabiques de mampostería enlucidos, se incluyen tabiques de hormigón armado, enlucidos en ambas caras.
11. Ventanas (v): en Colombia solo se utilizan vidrios simples de tipo monolítico, aunque a través de los años han variado su espesor, pasando de los vidrios monolíticos de 2 mm en el periodo A1 (<1950) a los vidrios monolíticos de 4 mm en el periodo A5 (>2010). La carpintería comenzó siendo a base de marcos hechos en madera en los periodos A1 y A2 hasta 1969. En los periodos A3, A4 Y A5 (desde 1970 hasta la actualidad) predominan los marcos de aluminio, y en el periodo A5 (>2010) se incorporan también los marcos de PVC en algunas viviendas.

Teniendo en cuenta la evolución histórica de la tradición constructiva en Colombia en la zona climática fría y templada, pueden caracterizarse las soluciones constructivas de fachada, cubierta, estructura, solera y ventanas, típicamente empleadas en cada uno de los periodos temporales, lo que ayuda a generar un catálogo de soluciones constructivas propio de la región estudiada. Para la caracterización, se emplea la codificación que se muestra en la Tabla V-2

Tabla V- 2. Codificación de los elementos constructivos








Nombre	Código	Nombre	Código
Elemento constructivo		Material predominante	
Fachada	F	Tapia	T
Cubierta inclinada	CI	Ladrillo adobe	LA
Cubierta plana	CP	Ladrillo tolete	LT
Estructura cimentación	EC	Ladrillo hueco	LH
Estructura vertical	EV	Ladrillo perforado	LP
Estructura horizontal	EH	Hormigón armado	HA
Solera	S	Hormigón prefabricado	HP
Tabique interno	TI	Teja barro	TB
Ventana	V	Teja asbesto	TA
Periodo		Teja fibrocemento	TF
<1950	A1	Acero	A
1950-1969	A2	Acero reforzado	AR
1970-1989	A3	Capa de mortero cemento	CC
1990-2009	A4	Hormigón contrapiso	HC
>2010	A5	Tierra	TR
Características constructivas		Terminación constructiva	-
Una hoja	1H	Revestida	R
Dos hojas	2H	Caravista	CV
Cimentación superficial	CS	Sin revestimiento	SR
Viga madera	VM	Estucado	E
Viga hormigón	VH	Enlucido yeso	EY
Muro carga	MC	Con aislamiento térmico	CAT
Sistema pórtico	SP	Sin aislamiento térmico	SAT
Sistema encofrado	SE	Baldosa barro	BB
Muro reforzado	MR	Pavimento cerámico	PC
Marco madera	MM	Vidrio simple	VS
Marco aluminio	MA	Sin terminación	∅
Marco PVC	MP	-	-

4. Resultados

4.1. Taxonomía edificatoria

Como resultado de los niveles I y II de caracterización, se obtiene la taxonomía edificatoria del parque residencial de Colombia, en los pisos frío y templado. Esta taxonomía queda recogida en la Tabla V-3, que establece un total de 22 tipologías edificatorias en función de los criterios de caracterización anteriormente definidos, que son: el año de construcción (A1-A5), la tipología de urbanización en la que se ubica la vivienda (U o B), la tipología residencial (UF o MF), el tipo de adyacencia (M, E o A) y el número de plantas (1, 2/3 o 3). Así, cada vivienda queda denominada mediante un código que incluye estos cinco criterios: Año - Tipo de urbanización - Tipo residencial - Adyacencia - #plantas. Por ejemplo, una vivienda codificada como A2-B-UF-M-2/3 corresponde a una vivienda construida en el periodo A2 (1950-1969), ubicada en barrio, de tipo unifamiliar entre medianeras con 2 o 3 plantas.

Tabla V- 3. Caracterización de vivienda

Tipología de urbanización		Barrio (B)				Urbanización (U)		
Tipología residencial		Unifamiliar (UF)				Unifamiliar (UF)		Multifamiliar (MF)
								
# plantas		1 planta (1)		2-3 plantas (2/3)		2-3 plantas (2/3)		>3 plantas (3)
Año/ Adyacencia		Entre medianeras (M)	En esquina (E)	Entre medianeras (M)	En esquina (E)	Entre medianeras (M)	Aislada (A)	Aislada (A)
A1	<1950	A1-B-UF-M-1	-	-	-	-	-	-
A2	1950-1969	A2-B-UF-M-1	A2-B-UF-E-1	A2-B-UF-M-2/3	-	-	-	-
A3	1970-1989	A3-B-UF-M-1	A3-B-UF-E-1	A3-B-UF-M-2/3	A3-B-UF-E-2/3	-	-	-
A4	1990-2009	A4-B-UF-M-1	A4-B-UF-E-1	A4-B-UF-M-2/3	A4-B-UF-E-2/3	A4-U-UF-M-2/3	A4-U-UF-A-2/3	A4-U-MF-A-3
A5	>2010	A5-B-UF-M-1	A5-B-UF-E-1	A5-B-UF-M-2/3	A5-B-UF-E-2/3	A5-U-UF-M-2/3	A5-U-UF-A-2/3	A5-U-MF-A-3

4.2. Catálogo de soluciones constructivas

Como resultado del análisis de las soluciones constructivas en los diferentes periodos temporales se obtiene el catálogo de soluciones constructivas existentes en cada periodo y para cada elemento de fachada, cubierta, estructura (de cimentación, vertical y horizontal), de solera, de tabiquería interior y de ventanas. Así, se establece una denominación para una de ellas, mediante un código, que atiende a los criterios de caracterización definidos en el nivel III, y que es: Elemento constructivo - Año - Características constructivas - Material predominante - Terminación. La codificación de las soluciones constructivas del catálogo se presenta en la Tabla V-4. Por ejemplo, el elemento F-A3-1H-LT-E resulta ser una fachada propia del periodo A3 (1970-1989) de una hoja de ladrillo tolete con estucado como terminación; y el elemento V-A5-MA-VS corresponde a una ventana típica del periodo A5 (>2010) con marco de aluminio y vidrio monolítico simple.

En el Anexo 1 se detallan las características de cada una de las soluciones constructivas recogidas en la Tabla 4

Tabla V- 4. Catálogo de soluciones constructivas

	A1 (<1950)	A2 (1950-1969)	A3 (1970-1989)	A4 (1990-2009)	A5 (>2010)
Fachadas	F-A1-1H-T-SR	F-A2-1H-LA-E	F-A3-1H-LT-CV	F-A4-1H-LH-E	F-A5-2H-LH-CV
			F-A3-1H-LT-E	F-A4-1H-LH-R	F-A5-1H-HP-R
			F-A3-1H-LT-R	F-A4-1H-LP-CV	F-A5-1H-LP-CV
				F-A4-2H-LT-CV	
Cubiertas	CI-A1-VM-TB-SAT	CI-A2-VM-TB-SAT	CI-A3-VM-TA-SAT	CI-A4-VH-TF-SAT	CI-A5-VH-TF-CAT
				CP-A4-VH-HA-SAT	CP-A5-VH-HA-CAT
Estructura cimentación	EC-A1-CS-R-Ø	EC-A2-CS-LT-Ø	EC-A3-CS-HA-Ø	EC-A3-CS-HA-Ø	EC-A3-CS-HA-Ø
Estructura vertical	EV-A1-MC-T-SR	EV-A2-MC-LA-E	EV-A3-MC-LT-E	EV-A4-MR-LH-E	EV-A5-SP-AR-SR
			EV-A3-MR-LH-E	EV-A4-SE-LP-E	EV-A5-MR-LH-E
					EV-A5-SE-LP-E
					EV-A5-SE-HA-E
Estructura horizontal		EH-A2-VM-TR-BB	EH-A3-VM-TR-BB	EH-A4-VH-CC-PC	EH-A5-VH-CC-PC
Solera	S-A1-TR-CC-SR	S-A2-LT-CC-BB	S-A3-HA-HC-R	S-A4-HA-HC-R	S-A5-HA-HC-R
Tabique interior	TI-A1-1H-T-SR	TI-A2-1H-LA-EY	TI-A3-1H-LT-EY	TI-A4-1H-LH-EY	TI-A5-1H-HA-EY
					TI-A5-1H-LH-EY
Ventanas	V-A1-MM-Ø-VS	V-A2-MM-Ø-VS	V-A3-MA-Ø-VS	V-A4-MA-Ø-VS	V-A5-MP-Ø-VS
					V-A5-MA-Ø-VS

Nota: el catálogo de soluciones constructivas completo puede consultarse en el siguiente enlace: www.lcsa.uji.es/catalogo_solconst_colombia.pdf (Ver Tabla V-6)

La Figura V-3 muestra un ejemplo de descripción gráfica de cómo se encuentran compuestas las soluciones constructivas para el periodo A5 (>2010). Como se observa, en los elementos constructivos los materiales que predominan son la mampostería y el hormigón.

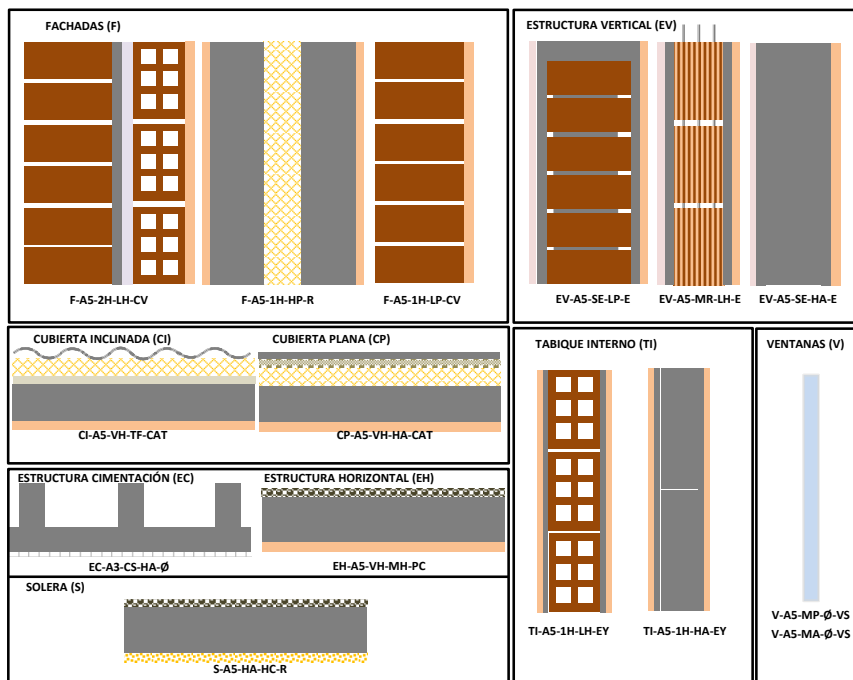


Figura V- 3. Descripción gráfica del catálogo de soluciones para el periodo A5.

4.3. Estratificación socioeconómica

Tomando como base el catálogo de soluciones constructivas (véase Tabla V-4), los resultados de las encuestas multipropósito elaboradas por el Gobierno de Colombia (DANE 2018) y referentes académicos (Valbuena, Mena y César 2013; Suárez, Jiménez y Millán 2015) donde se enumeran los materiales predominantes de las viviendas dependiendo del nivel socioeconómico, es posible asignar un estrato a cada predio dependiendo de la taxonomía edificatoria y del catálogo de soluciones constructivas propuestos. Los resultados se muestran en la Tabla V-5.

Tabla V- 5. Propuesta de estratificación

Código vivienda	Estrato propuesto
A1-B-UF-M-1	Bajo (E1-E2)
A2-B-UF-M-1	Bajo (E1-E2)
A2-B-UF-E-1	Bajo (E1-E2)
A3-B-UF-M-1	Medio (E3-E4)
A3-B-UF-E-1	Medio (E3-E4)
A3-B-UF-M-2/3	Medio (E3-E4)
A3-B-UF-E-2/3	Medio (E3-E4)
A4-B-UF-E-1	Medio (E3-E4)
A4-B-UF-M-2/3	Medio (E3-E4)
A4-B-UF-E-2/3	Medio (E3-E4)
A4-U-UF-M-2/3	Medio (E3-E4)
A4-U-UF-A-2/3	Alto (E5-E6)
A4-U-MF-A-3	Medio (E3-E4)
A5-B-UF-E-1	Medio (E3-E4)
A5-B-UF-M-2/3	Medio (E3-E4)
A5-B-UF-E-2/3	Medio (E3-E4)
A5-U-UF-M-2/3	Medio (E3-E4)
A5-U-UF-A-2/3	Alto (E5-E6)
A5-U-MF-A-3	Alto (E5-E6)

Como se puede observar en la Tabla V-5, a las viviendas construidas en los periodos A1 y A3 se le asigna el estrato bajo, debido a la baja calidad de las características edificatorias. En los periodos A3, A4 y A5, a las viviendas autoconstruidas se les asigna un estrato medio, pues se emplean materiales de mejor calidad constructiva. Sin embargo, en cuanto a las viviendas construidas en los periodos A4 y A5 de tipo VIS y VIP, debido a que deben cumplir con las directrices del Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (2011), son viviendas de estrato medio. En cuanto a las viviendas de tipo aislado pertenecientes a los periodos A4 y A5, ubicadas en urbanizaciones con población de poder adquisitivo medio y alto, se les asigna el estrato alto debido a la buena calidad de construcción y de materiales utilizados.

5. Conclusiones

Este trabajo presenta un método para caracterizar el parque edificatorio residencial en los pisos climáticos frío y templado en Colombia, a partir de tres niveles: temporal, vivienda y solución constructiva. Ello ha permitido obtener como resultado la definición de una taxonomía edificatoria propia y un catálogo de soluciones constructivas para cada tipología de vivienda dependiendo del año de construcción y de la zona urbana donde esté ubicada.

Estos resultados permiten, además, la asignación de un estrato a cada una de las viviendas del parque edificatorio residencial en los pisos climáticos frío y templado en Colombia.

Los resultados obtenidos pueden ser útiles tanto para entes públicos como privados. A nivel público, entidades gubernamentales como alcaldías y personal técnico de los departamentos de planificación (arquitectos e ingenieros) pueden emplearlos en el diseño de planes de ordenamiento territorial, en los procesos de gestión del patrimonio residencial, en la priorización de intervenciones de rehabilitación, así como en la concesión de licencias de obra nueva y rehabilitación, entre otros. Además, los resultados facilitan la asignación del estrato de manera independiente a cada predio en función de su calidad constructiva real, en vez de asignar el estrato dependiendo del estado actual de toda la manzana urbana, como se realiza actualmente, que puede dar lugar a imprecisiones.

Por otro lado, a nivel privado, los resultados pueden asistir a empresas del sector de la construcción y la edificación durante los procesos de diseño o a la ejecución de obras de viviendas nuevas y de rehabilitación.

Además de servir como herramienta para sugerir el nivel de estratificación, los resultados de la caracterización pueden ser útiles a futuro para:

1. Identificar qué medidas de ahorro energético pasivo se pueden implementar en caso de llevar a cabo procesos de rehabilitación y renovación en las viviendas, dependiendo de su condición climática.
2. Estimar el consumo energético de las viviendas y el impacto ambiental de los materiales utilizados en la construcción.

Como futuros desarrollos, se plantea continuar el estudio implementando los resultados en una herramienta de análisis espaciotemporal empleando un Sistema de Información Geográfica (SIG). Para finalizar, el estudio podría completarse integrando la variable ambiental y económica a cada una de las soluciones identificadas en la taxonomía.

6. Referencias

- AIS, 2004. Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada. Asoc. Colomb. Ing. Sísmica 90.
- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2000. Ciudadela El Recreo: Memoria del modelo de gestión de Metrovivienda. Bogotá.
- Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M.D., Ruá, M.J., Juan, P., 2016. A methodology for predicting the energy performance and indoor thermal comfort of residential stocks on the neighbourhood and city scales. A case study in Spain. *J. Clean. Prod.* 139, 646–665. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.059>
- Ceballos, O., 2008. Vivienda social en Colombia. Una mirada desde su legislación 1918-2005. Universidad Javeriana, Bogotá.
- CENAC-ICT, 1980. Sistemas constructivos en la vivienda masiva Popular. Bogotá.
- Congreso de la República de Colombia, 1997. Ley 388 de 1997.
- Congreso de la República de Colombia, 1918. Ley 46 de 1918. Por la cual se dicta una medida de salubridad pública y se provee a la existencia de habitaciones higiénicas para la clase proletaria.
- Corrado, V., Ballarini, I., 2016. Refurbishment trends of the residential building stock: Analysis of a regional pilot case in Italy. *Energy Build.* 132, 91–106. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.022>
- Csoknyai, T., Hrabovszky-Horváth, S., Georgiev, Z., Jovanovic-Popovic, M., Stankovic, B., Villatoro, O., Szendrő, G., 2016. Building stock characteristics and energy performance of residential buildings in Eastern-European countries. *Energy Build.* 132, 39–52. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.062>
- DANE, 2021. Mesa de expertos de Estratificación Socioeconómica (Informe Final). Bogotá. Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia.
- DANE, 2019. Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. Bogotá. Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia.
- DANE, 2018. Boletín técnico Encuesta Multipropósito (EM) 2017 Bogotá 18 de julio de 2018, Boletín técnico DANE. Bogotá. Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia.
- DANE, 2015. Metodología de estratificación socioeconómica urbana para servicios públicos domiciliarios. Bogotá. Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia.
- Dascalaki, E.G., Balaras, C.A., Kontoyiannidis, S., Droutsas, K.G., 2016. Modeling energy refurbishment scenarios for the Hellenic residential building stock towards the 2020 & 2030 targets. *Energy Build.* 132, 74–90. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.003>
- Diefenbach, N., Loga, T., Stein, B., 2014. EPISCOPE. Energy Performance Indicators for Building Stocks 23.
- DNP, 2017. Manual técnico del programa POT -modernos. Departamento Nacional de Planeación de Colombia.
- Eslava R., J.A., 1993. Climatología y diversidad climática de Colombia. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*
- European Project Partners, 2012. Project EIE TABULA-Intelligent Energy Europe.

- Flórez, J.E., 1995. ¿Transición demográfica en Colombia? Cuad. Geogr. Rev. Colomb. Geogr. 5, 133–146.
- Fonseca, W., Baena, D., Horta, S., Fuentes, J., Pino, L., Marín, S., 2020. Contexto Regional Andina. Bogotá D.C.
- Galvis, L.A., 2015. Crecimiento económico y demográfico regional en Colombia, 1985-2012. Rev. Econ. Inst. 17, 183–201. <https://doi.org/10.18601/01245996.v17n33.08>
- García, L.E., 2014. Desarrollo de la normativa sismo resistente colombiana en los 30 años desde su primera expedición 1. Rev. Ing. 71–77. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i41.785>
- Giraldo-Castañeda, W., Czajkowski, J.D., Gómez, A.F., 2021. Confort térmico en vivienda social multifamiliar de clima cálido en Colombia. Rev. Arquít. 23, 115–124. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2021.2938>
- González Rozo, P., 2010. El clima y principios de diseño arquitectura bioclimática en los andes tropicales 23.
- Hernández Garzón, M., 2019. Análisis territorial de la problemática ambiental urbana: el caso del municipio de Facatativá, Cundinamarca, Colombia (1980-2010). Perspect. Geográfica 24, 92–115. <https://doi.org/10.19053/01233769.9074>
- Herrera, A., Madrid, G., 1999. Manual de Construcción de mampostería de Concreto. Medellín.
- IDEAM, 2011. Clasificaciones Climáticas Colombia. II Congr. Nac. del Clima 1–5. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá
- IDEAM - UNAL, 2018. Variabilidad Climática y el cambio climático en Colombia, Bogotá, D.C.
- IDOM, 2018. Estudio de crecimiento y evolución de la huella urbana para los municipios que conforman el área Bogotá - Región.
- Mejía, O., 1998. Materiales y sistemas constructivos innovadores aplicados al habitat popular. <https://doi.org/9589054552>
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo territorial, 2010. NSR-10. Norma Sismo Resistente del 2010. Bogotá.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2011. Los materiales en la construcción de vivienda de interés social, Serie Guías de Asistencia Técnica para Vivienda de Interés Social.
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2015. Resolución 0549 de 2015. Parámetros y lineamientos de construcción sostenible y se adopta la guía para el ahorro de agua y enegía en Edificaciones. Colombia.
- ONU, 2018. Las ciudades seguirán creciendo, sobre todo en los países en desarrollo. URL <https://www.un.org/development/desa/es/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>
- Pérez, A.L., 2014. El hábitat residencial según sus transformaciones. Bitácora 24, 61–76.
- Presidencia de la República, 1998. Decreto 33 de 1998. Por el cual se establecen los requisitos de carácter técnico y científico para construcciones sismorresistentes NSR-98. Gobierno de Colombia
- Presidencia de la República, 1984. Decreto 1400 de 1984. Por el cual se adopta el Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes. Gobierno de Colombia

- Ramírez Ríos, J.F., 2011. La planeación urbana en Colombia: años sesenta-ochenta. Discursos, consultores y comunidades académicas. *Rev. Estud. Soc.* 115–125.
- Rubiano Martín, M.A., 2016. La fachada ventilada y el confort climático: un instrumento tecnológico para edificaciones de clima cálido en Colombia. *Dearq* 138–145. <https://doi.org/10.18389/dearq18.2016.08>
- Saldarriaga Roa, A., 1995. Medio siglo vivienda social en Colombia 1939-1989. INURBE, Bogotá.
- Saldarriaga Roa, A., 1984. La arquitectura de la vivienda rural en Colombia, Colciencia. ed. Bogotá.
- Sasso, F., Chambers, J., Patel, M.K., 2023. Space heating demand in the office building stock: Element-based bottom-up archetype model. *Energy Build.* 295, 113264. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113264>
- SDP, 2021a. Hacia una nueva Metodología de estratificación socioeconómica urbana. Secretaria Distrital de Planeación. Bogotá, Colombia.
- SDP, 2021b. La estratificación como instrumento de focalización. Secretaria Distrital de Planeación. Bogotá, Colombia.
- Serrano-Lanzarote, B., Ortega-Madrigal, L., García-Prieto-Ruiz, A., Soto-Francés, L., Soto-Francés, V.M., 2016. Strategy for the energy renovation of the housing stock in Comunitat Valenciana (Spain). *Energy Build.* 132, 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.087>
- Suarez, D.F., Jiménez, I.F., Millán, M.F., 2015. Calidad de vida según la estratificación socioeconómica. *Univ. EAN* 4–9.
- Torres Tovar, C.A., Rincón García, J.J., 2011. Suelo urbano y vivienda social en Bogotá, La primacía del mercado y el sacrificio del interés general 1990-2010, Universida. ed. Bogotá.
- Universidad de Los Andes, 2000. Vivienda de interes social: Inventario de sistemas constructivos, Metrovivie. ed. Bogotá.
- Universidad de Los Andes, 1977. Tecnología regional de la construcción y tipologías arquitectónicas de la vivienda rural en Colombia: informe final primera etapa. Bogotá.
- Uribe Tami, M.F., 2014. La morfología urbana de la vivienda social en Colombia. *Congr. Int. Vivienda Colect. Sostenible. “I Congr. Int. Vivienda Colect. Sostenible, Barcelona, 25, 26 y 27 febrero 2014”* 174–179.
- Urquiza, W.L., Ciudad, B.Y., Urbanística, H., Cuestión, Y.L.A., Referencia, D.D.E., Caso, E.L., 2006. Barrio y ciudad Historiografía urbanística y la cuestión del dominio de referencia. *Bitácora Urbano Territ.* 1, 82–105.
- Valbuena, S., Mena, M., César, G., 2013. Características típicas de la vivienda en sectores de población vulnerable en Bogotá. *Tecnura* 17, 113–121.
- Villegas Rodríguez, E., Cifuentes G., A., Contreras G., D., Fernández A, L., 2010. Ordenamiento territorial como instrumento, para la zonificación ambiental a traves de la Estructura Ecologica Principal, como apoyo a la formulación de los POTs y los POMCAS en Colombia. *Rev. Colomb. Geogr.* 19, 97–109.
- Yepes-Estrada, C., Silva, V., Valcárcel, J., Acevedo, A.B., Tarque, N., Hube, M.A., Coronel, G., María, H.S., 2017. Modeling the Residential Building Inventory in South America for Seismic Risk Assessment. *Earthq. Spectra* 33, 299–322. <https://doi.org/10.1193/101915EQS155DP>

7. Material suplementario

Tabla V- 6. Catálogo de soluciones constructivas empleadas en los pisos frío y templado de Colombia

<1950 (A1)				
F-A1-1H-T-SR				
Material	e (m)	Densidad (kg/m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Pintura de cal	0,01	1.450		0,80
Tapia pisada	0,46	2.000	\$ 283.200	1,10
Pintura de cal	0,01	1.450	m ²	0,80
CI-A1-VM-TB-SAT				
Material	e (m)	Densidad (kg/m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Teja de barro	0,01	2.000		1,00
Capa de tierra	0,10	2.050		0,52
Amarre en fibra Natural	0,03	750	\$ 464.846,00	0,20
Viguetas de madera rolliza	0,10	435	m ²	0,15
Vigas de madera	0,20	565		0,18
EC-A1-CS-R-Ø				
Material	e (m)	Densidad (kg/m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Mortero de cal y arena		1.450		0,80
Roca	0,50	1.600		0,55
Roca	h	1.600		0,55
Arena		1.700		2,00
EV-A1-MC-T-SR				
Material	e (m)	Densidad (kg/m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Pintura de cal	0,01	1.450		0,80
Tapia pisada	0,46	2.000	\$ 283.200	1,10
Pintura de cal	0,01	1.450	m ²	0,80
S-A1-TR-CC-SR				
Material	e (m)	Densidad (kg/m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Mortero de cemento	0,04	1.450		0,80
Capa de tierra	0,10	2.050	\$ 15.043	0,52
Recebo	0,10	2.200	m ²	2,00
Mortero de Cal y Arena	0,10	1.000		0,41
TI-A1-1H-T-SR				
Material	e (m)	Densidad (kg/m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Tapia pisada	0,23	2.000	\$ 83.200	1,10
Pintura de cal	0,01	1.450	m ²	0,80
V-A1-MM-Ø-VS				
Material	e (m)	Densidad (kg/m ³)	U vt (W/ m ² K)	UHz (W/ m ² K)
Marco de madera	-	700	2,20	2,40
Vidrio monolítico 2mm	-	2.500		

Tabla V- 6. Catálogo de soluciones constructivas empleadas en los pisos frío y templado de Colombia
(continuación)

1950-1969 (A2)				
F-A2-1H-LA-E				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Estucado	0,01	1.300		0,57
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80
Adobe	0,60	1.200		0,82
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450	\$ 283.200	0,80
Enlucido de yeso	0,01	1.300	m ²	0,57
CI-A2-VM-TB-SAT				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Teja de barro	0,01	2.000		1,00
Capa de tierra	0,10	2.050		0,52
Amarre en fibra Natural	0,03	750		0,20
Viguetas de madera rolliza	0,10	435	\$ 464.846	0,15
Vigas de madera	0,20	565	m ²	0,18
Cielo raso	0,02	750		0,25
EC-A2-CS-LT-Ø				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Mortero de cal y arena		1.450		0,80
Ladrillo Adobe	0,50	1.800		0,87
Roca	h	1.600		0,55
Arena		1.700		2,00
EV-A2-MC-LA-E				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Estucado	0,01	1.300		0,57
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80
Adobe	0,60	1.200	\$ 283.200	0,82
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450	m ²	0,80
Enlucido de yeso	0,01	1.300		0,57
EH-A2-VM-TR-BB				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Baldosa barro cocido	0,01	2.300		1,30
Capa de tierra	0,10	2.050	\$ 61.247	0,52
Encañado	0,01	750	m ²	0,20
Vigas de madrera	0,20	565		0,18
Cielo Raso	0,02	750		0,25
S-A2-LT-CC-BB				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Baldosa barro cocido	0,02	2.300		1,30
Mortero de cemento	0,04	1.450	\$ 80.370	0,80
Ladrillo Tolete	0,25	1.800	m ²	0,87
Suelo compactado	0,10	2.050		0,52
TI-A2-1H-LA-EY				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Enlucido de yeso	0,01	1.300		0,57
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80
Adobe	0,30	1.200	\$ 62.700	0,82
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450	m ²	0,80
Enlucido de yeso	0,01	1.300		0,57
V-A2-MM-Ø-VS				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	U vt (W/ m ² K)	UHz (W/ m ² K)
Marco de madera	-	700	2,20	2,40
Vidrio monolítico 3mm	-	2.500		

Tabla V- 6. Catálogo de soluciones constructivas empleadas en los pisos frío y templado de Colombia
(continuación)
1970-1989 (A3)

F-A3-1H-LT-CV				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Estucado	0,01	1.300		0,57
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80
Ladrillo Tolete	0,12	1.800		0,87
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450	\$ 91.635	0,80
Enlucido de yeso	0,01	1.300	m ²	0,57
F-A3-1H-LT-E				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Ladrillo tolete	0,12	1.800		0,87
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450	\$ 137.245	0,80
Enlucido de yeso	0,01	1.300	m ²	0,57
F-A3-1H-LT-R				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Mármol, piedra, cerámica	0,02	2.000		1,00
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80
Ladrillo tolete	0,12	1.800	\$ 126.168	0,87
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450	m ²	0,80
Enlucido de yeso	0,01	1.300		0,57
CI-A3-VM-TA-SAT				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Teja de Asbesto	0,01	1.250		0,23
Capa de tierra	0,10	1.350		0,53
Amarre en fibra Natural	0,03	750		0,20
Viguetas de madera rolliza	0,10	435	\$ 464.846	0,15
Vigas de madrera	0,20	565	m ²	0,18
Cielo raso	0,02	750		0,25
EC-A3-CS-HA-Ø				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Hormigón armado 2500		2.500		2,50
Acero 3/8"	h	7.800	\$ 526.960	50,00
Acero 1/2"		7.800	m ³	50,00
Malla electrosoldada Ø 9mm		7.800		50,00
EV-A3-MC-LT-E				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Estucado	0,01	1.300		0,57
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80
Ladrillo Tolete	0,26	1.200	60.389,50	0,82
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450	m ²	0,80
Enlucido de yeso	0,01	1.300		0,57
EV-A3-MR-LH-E				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Estucado	0,01	1.300		0,57
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80
Acero 3/8"	0,01	7.800	\$ 46.773	50,00
Ladrillo hueco	0,10	650	m ²	0,32
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80
Enlucido de yeso	0,01	1.300		0,57
EH-A3-VM-TR-BB				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Baldosa barro cocido	0,01	2.300		1,30
Capa de tierra	0,10	2.050	\$ 61.247	0,52
Encañado	0,01	750	m ²	0,20
Vigas de madrera	0,20	565		0,18
Cielo Raso	0,02	750		0,25
S-A3-HA-CC-R				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Revestimiento de suelo	0,01	2.000		1,00
Hormigón de contrapiso	0,08	1.450	\$ 53.025	0,80
Hormigón armado 2500	0,10	2.500	m ²	2,50
Arena y grava	0,30	2.200		2,00

1970-1989 (A3)

TI-A3-1H-LT-EY				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Enlucido de yeso	0,01	1.300		0,57
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80
Ladrillo Tolete	0,12	1.800	\$ 65.315	0,87
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450	m ²	0,80
Enlucido de yeso	0,01	1.300		0,57
V-A3-MA-Ø-VS				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	U vt (W/ m ² K)	UHz (W/ m ² K)
Marco de aluminio	-	-	5,7	7,20
Vidrio monolítico 3mm	-	-		

Tabla V- 6. Catálogo de soluciones constructivas empleadas en los pisos frío y templado de Colombia
(continuación)

1990-2009 (A4)				
F-A4-1H-LH-E				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Estucado	0,01	1.300		0,57
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80
Ladrillo hueco	0,10	770	\$ 32.410	0,32
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450	m ²	0,80
Enlucido de yeso	0,01	1.300		0,57
F-A4-1H-LH-R				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Mármol, piedra, cerámica	0,02	2.000		1,00
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80
Ladrillo hueco	0,10	650	\$ 206.750	0,32
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450	m ²	0,80
Enlucido de yeso	0,01	1.300		0,57
F-A4-1H-LP-CV				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Ladrillo perforado	0,12	780		0,35
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450	\$ 27.512	0,80
Enlucido de yeso	0,01	1.300	m ²	0,57
F-A4-2H-LT-CV				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Ladrillo Tolete	0,12	1.800		0,87
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80
Ladrillo Tolete	0,12	1.800		0,87
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450	\$ 175.710	0,80
Enlucido de yeso	0,01	1.300	m ²	0,57
CI-A4-VH-TF-SAT				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Teja de fibrocemento	0,01	1.250		0,23
Viguetas de acero	0,10	7.800	\$ 164.786	50,00
Vigas de hormigón	0,30	1.240	m ²	0,23
Cielo raso	0,02	750		0,24
CP-A4-VH-HA-SAT				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Capa de mortero de cemento	0,02	1.800		1,30
Impermeabilización	0,00	-		-
Loza de hormigón	0,04	2.500		2,50
Vigas de hormigón	0,30	1.240	\$ 155.435	0,23
Cielo raso	0,02	750	m ²	0,25
EC-A4-CS-HA-Ø				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Hormigón armado 2500		2.500		2,50
Acero 3/8"		7.800	\$ 526.960	50,00
Acero 1/2"	0,25	7.800	m ³	50,00
Malla electrosoldada Ø 9mm		7.800		50,00
EV-A4-MR-LH-E				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Estucado	0,01	1.300		0,57
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80
Acero 3/8"	0,01	7.800	\$ 46.773	50,00
Ladrillo hueco	0,10	650	m ²	0,32
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80
Enlucido de yeso	0,01	1.300		0,57
EV-A4-SE-LP-E				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Estucado	0,01	1.300		0,57
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80
Malla electrosoldada tipo XX 50, 25x25 cm y Ø 4-4 mm	-	7.800		50,00
Hormigón armado 2500	-	2.500	\$ 59.946,91	2,50
Acero corrugado	-	7.800	m ²	50,00
Ladrillo perforado	0,12	780		0,35
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80
Enlucido de yeso	0,01	1.300		0,57

1990-2009 (A4)

EH-A4-VH-CC-PC				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Pavimento cerámico	0,01	2.000		1,00
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450	\$ 185.548	0,80
Vigas de hormigón	0,25	1.240	m ²	0,23
Cielo Raso	0,02	750		0,25
S-A4-HA-CC-R				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Revestimiento de suelo	0,01	2.000		1,00
Hormigón de contrapiso	0,08	1.450	\$ 53.025	0,80
Hormigón armado 2500	0,10	2.500	m ²	2,50
Arena y grava	0,30	2.200		2,00
TI-A4-1H-LH-EY				
Material	e (m)	Densidad (kg/m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Enlucido de yeso	0,01	1.300		0,57
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80
Ladrillo hueco	0,10	650	\$ 21.440	0,32
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450	m ²	0,80
Enlucido de yeso	0,01	1.300		0,57
V-A4-MA-Ø-VS				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	U vt (W/ m ² K)	UHz (W/ m ² K)
Marco de aluminio	-	-	5,70	7,20
Vidrio monolítico 4mm	-	-	5,7	

Tabla V- 6. Catálogo de soluciones constructivas empleadas en los pisos frío y templado de Colombia
(continuación)

>2010 (A5)				
F-A5-2H-LH-CV				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Ladrillo perforado	0,12	780		0,35
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80
Cámara de aire	0,03	-		
Ladrillo hueco	0,10	770	\$ 62.634	0,30
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450	m ²	0,80
Enlucido de yeso	0,01	1.300		0,57
F-A5-1H-HP-R				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Estucado	0,01	1.300		0,57
hormigón armado	0,10	2.500		2,50
EPS	0,06	-	\$ 233.681	0,03
hormigón armado	0,10	2.500	m ²	2,50
Enlucido de yeso	0,01	1.300		0,57
F-A5-1H-LP-CV				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Ladrillo perforado	0,12	780		0,35
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450	\$ 27.512	0,80
Enlucido de yeso	0,01	1.300	m ²	0,57
CI-A5-VH-TF-CAT				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Teja de fibrocemento	0,01	1.250		0,23
Capa de mortero de cemento	0,02	1.800		1,30
EPS	0,03	-	\$ 165.213,49	0,03
Viguetas de acero	0,10	7.800	m ²	50,00
Vigas de hormigón	0,30	1.240		0,23
Cielo raso	0,02	750		0,24
CP-A5-VH-HA-CAT				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Capa de mortero de cemento	0,02	1.800		1,30
Impermeabilización	0,00	-		-
EPS	0,03	-		0,03
Loza de hormigón	0,04	2.500		2,50
Vigas de hormigón	0,30	1.240	\$ 241.044,55	0,23
Cielo raso	0,02	750	m ²	0,25
EC-A5-CS-HA-Ø				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Hormigón armado 2500	0,30	2.500		2,50
Acero 3/8"		7.800	\$ 526.959,68	50,00
Acero 1/2"		7.800	m ³	50,00
Malla electrosoldada Ø 9mm		7.800		50,00
EV-A5-SP-AR-SR				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Hormigón armado 2500	0,13	2.500		2,50
Acero 3/8"		7.800	\$ 864.010,57	50,00
Acero 1/2"		7.800	m ³	50,00
EV-A5-MR-LH-E				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Estucado	0,01	1.300		0,57
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80
Acero 3/8"	0,01	7.800	\$ 46.772,76	50,00
Ladrillo hueco	0,10	650	m ²	0,32
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80
Enlucido de yeso	0,01	1.300		0,57
EV-A5-SE-LP-E				
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)
Estucado	0,01	1.300		0,57
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80
Malla electrosoldada tipo XX 50, 25x25 cm y Ø 4-4 mm	-	7.800	\$ 59.946,91	50,00
Hormigón armado 2500	-	2.500	m ²	2,50
Acero corrugado	-	7.800		50,00
Ladrillo perforado	0,12	780		0,35
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80
Enlucido de yeso	0,01	1.300		0,57

>2010 (A5)					
EV-A5-SE-HA-E					
Material	e (m)	Densidad (kg/m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)	
Estucado	0,01	1.300		0,57	
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80	
Malla electrosoldada tipo XX 50, 25x25 cm y Ø 4-4 mm	-	7.800		50,00	
Acero laminado A 36	-	7.800		2,50	
Acero corrugado	-	7.800		50,00	
Hormigón armado 2500	0,12	2.500		50,00	
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450	\$ 555.593	2,50	
Enlucido de yeso	0,01	1.300	m ³	0,80	
EH-A5-VH-CC-PC					
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)	
Pavimento cerámico	0,01	2.000		1,00	
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450	\$ 185.548,13	0,80	
Vigas de hormigón	0,25	1.240	m ²	0,23	
Cielo Raso	0,02	750		0,25	
S-A5-HA-CC-R					
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)	
Revestimiento de suelo	0,01	2.000		1,00	
Hormigón de contrapiso	0,08	1.450	\$ 53.025	0,80	
Hormigón armado 2500	0,10	2.500	m ²	2,50	
Arena y grava	0,30	2.200		2,00	
TI-A5-1H-HA-EY					
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)	
Enlucido de yeso	0,01	1.300		0,57	
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80	
hormigón armado	0,10	2.500	\$ 38.715	2,50	
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450	m ²	0,80	
Enlucido de yeso	0,01	1.300		0,57	
TI-A5-1H-LH-EY					
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	Costo (\$)	λ (W/mK)	
Enlucido de yeso	0,01	1.300		0,57	
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450		0,80	
Ladrillo hueco	0,10	650	\$ 21.440	0,32	
Capa de mortero de cemento	0,02	1.450	m ²	0,80	
Enlucido de yeso	0,01	1.300		0,57	
V-A5-MA-Ø-VS					
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	U vt (W/ m ² K)	UHz (W/ m ² K)	
Marco de Aluminio	-	-	2,20	2,40	
Vidrio monolítico 4mm	-	-	5,7		
V-A5-MP-Ø-VS					
Material	e (m)	Densidad (kg/ m ³)	U vt (W/ m ² K)	UHz (W/ m ² K)	
Marco de PVC	-	-	5,70	7,20	
Vidrio monolítico 4mm	-	-	5,7		

Capítulo VI: Indicadores de sostenibilidad a nivel urbano y de edificio. Herramienta para la evaluación ambiental y económica del parque edificatorio

Environmental and economic performance of the residential building stock: LCA|LCC tool and case study in Colombia.

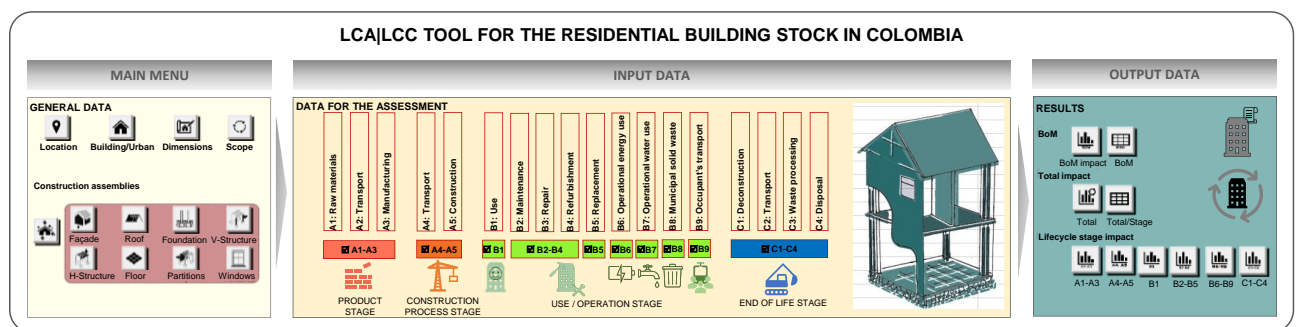
Jorge-Ortiz, A., Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M.D., 2024. Environmental and economic performance of the residential building stock: lca|lcc tool and case study in Colombia. Building and Environment.

(under review)

Abstract

In Colombia, buildings are responsible for 35% of GHG emissions. Although policies have been established to improve the environmental performance of new and existing buildings in many countries, yet Colombia lacks mandatory regulations. The present work aims to bridge this gap and develops a Colombia-specific software tool intended to facilitate the assessment of the environmental and economic performance of residential buildings in an intuitive and user-friendly manner, supported with the programming language Visual Basic for Applications (VBA) in Microsoft Excel. The tool is based on the Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Costing (LCC) methodologies and aligned with EN 15978 and is conceived to evaluate all a building's life cycle stages (A1–A3, A4–A5, B1–B7, C1–C4), plus two additional modules, B8 and B9, beyond the scope of the standard. The paper presents in detail the method and theoretical basis used for the LCA|LCC tool design, also putting the focus on the development of the comprehensive database, encompassing geographical locations, urban and building context data, construction assemblies with materials, process techniques and machinery typical to Colombia, and maintenance and refurbishment alternatives, including both environmental and economic factors. The tool is applied to a residential building in Mosquera (Colombia) and provides results both graphically and numerically — as well as disaggregated by life cycle stages, building elements, and material groups. The findings contribute users and stakeholders to make informed decisions with transparency and to make progress in the development of environmental and building stock renovation policies in Colombia.

Graphical Abstract



Keywords

Life cycle assessment (LCA); Life Cycle Costing (LCC); software tool; built environment; residential buildings; Colombia.

Highlights

- LCA|LCC tool for assessing the Colombian residential building stock
- Context-specific database with environmental and economic factors
- Life cycle perspective aligned with EN 15978 plus modules B8 (waste) and B9 (occupant mobility)
- User-friendly interface supported in Excel and disaggregated results display
- Stakeholders' decision-making tool for design, renovation, and policy development

1. Introduction

The building sector around the world is a major contributor to environmental impact. In the European Union (EU), buildings consume 42% of energy and generate 35% of greenhouse gases (GHG) (COM445, 2014). In the United States, they emit approximately 39% (Amini Toosi et al., 2020). According to statistics in Colombia, buildings in this country are responsible for 35% of GHG emissions, and this percentage is estimated to increase at an equivalent annual rate of 1.8% (IDEAM et al., 2022).

It is currently estimated that at least 85% of buildings in Europe are obsolete, in energy terms, because most of them were built before 2001. Therefore, they are unable to meet the comfort needs of the occupants (European Commission, 2022), provoking the use of active air conditioning systems and thus increasing energy consumption.

Buitelaar et al. (2021) described the causes and types of the obsolescence of a building, highlighting the natural wear and tear on materials and the lack of maintenance to reverse this damage, which causes a deterioration in the environment and affects the quality of life of the occupants.

Due to this global problem, the formulation of policies promoting an increase of energy efficiency in the existing building stock through retrofitting has arisen. In the UE, COM 662 (2020) urged an annual renovation rate of the building stock of 3% with the aim of reducing energy demand for heating and cooling, reducing related GHG emissions, and extending their lifetime. However, for this to be truly effective, major refurbishments must be undertaken. To date, there is no policy in Colombia obligating building refurbishment.

However, prior to implementing refurbishment strategies in the existing building stock to minimise their environmental impact, it is important to first ascertain the current performance of the buildings in order to be able to model different alternatives, so stakeholders involved in the construction value chain can make informed decisions. To this end, the life cycle assessment (LCA) methodology (ISO 14040, 2006) provides a consolidated framework widely recognised by the scientific community.

Various tools have been developed worldwide to carry out LCA studies related to the building sector. Most are based on standard EN 15804 (2013), the scope of which is construction products, and on EN 15978 (2012), which specifically establishes the method for assessing the environmental performance of buildings, following the LCA methodology proposed by ISO 14040 (2006). Zamagni et al. (2008) estimate that there are 42 tools worldwide that can be used to conduct LCA studies, the most widely used being Simapro (Prè Consultants, 2016) and Gabi (Sphera, 2021) at the generic level, and Athena (Athena Sustainable Materials Institute, 2022) at the building-specific level (Jorge-Ortiz et al., 2022b). However, in general terms, these tools have some limitations, such as the difficulty of adapting the Life Cycle Inventory (LCI) databases they incorporate to different regions of the world, meaning the results cannot be adjusted to the reality of the geographical and socio-economic context of the region under study.

On the other hand, the cost dimension is also a key aspect, which should be integrated as a decision factor when performing both building design and renovation activities, along the construction value chain. The Life Cycle Costing (LCC) methodology ISO 15686-5 (2017) provides a consistent framework aligned with the LCA approach, for conducting a systematic economic evaluation of the life cycle of a building.

In the context of Colombia, a few studies have analysed the life cycle of buildings, the most relevant to date being those conducted by González Velandia et al. (2019) and Ortiz-Rodríguez et al. (2010), which use generic tools such as SimaPro. This is because, so far, no specific tool has been designed for the country that takes into account the construction technique specificities and the typical materials in the country, nor the geographical and socioeconomic contexts.

The aim of this study is to design a LCA|LCC tool with a building life cycle approach adapted to the specific context of the Colombian residential building stock, which enables the calculation of the environmental and economic performance of buildings in an intuitive and user-friendly manner. The intended users of the tool are mainly represented by stakeholders involved in the construction process, such as designers (architects and engineers), contractors and public administration (government, regional, and local authorities, etc.). Following the LCA|LCC tool design, a residential building in Mosquera (Colombia) was assessed with the tool, as a case study.

2. Background

Interest in assessing the environmental and cost performance of buildings has increased considerably in recent years, and various tools have been developed and applied to different case studies. To understand the state of the art in this field, a literature review was carried out with two objectives. The first is to identify which commercial tools have been developed to analyse the environmental/cost performance of buildings; while the second is to explore the existence of additional non-commercial tools or methodologies developed in the literature specifically for buildings, whether supported by computing software or not.

Related to commercial LCA and LCC software, well-known tools exist which enable the evaluation of different products, processes, and systems, such as SimaPro (Prè Consultants, 2016), GaBi (Sphera, 2021), and OpenLCA (GreenDelta, 2021). However, these tools are not specifically developed and adapted to the particular case of buildings (Hollberg et al., 2021). A total of 13 main commercial tools specifically developed for the building sector were identified: Athena (Athena Sustainable Materials Institute, 2022), Tally (KTINNOVATIONS, 2014), eToolLCD (eTool, 2016), LCAQuick (BRANZ, 2022), COMFIE-PLIADAS (izuba, 2019), OneClickLCA (One Click LCA, 2021), ALCYONE and NovaEQUER (IZUBA, n.d.), TOTEM (OVAM et al., 2024), cove.tool (Pattern r+d, 2024), BHoM (Building transparency, 2024a), EC3 (Building transparency, 2024b), and EPIC (EHDD, 2024). Table 1 presents the main features of each tool: whether it consists of an LCA and/or LCC tool, the developer, the country of origin, the year of creation, the economic cost of the license, the LCI data specificities, the environmental impact assessment method used, the input data required for calculations, and the

way in which the results are reported. Furthermore, the information modules are considered according to the standard EN 15978 (2012):

- (A1-A3) Product: raw materials supply, transport, and manufacturing.
- (A4-A5) Construction process: transport to site and construction.
- (B1) Use/operation: use.
- (B2-B4) Use/operation: maintenance, repair, and replacement.
- (B5) Use/operation: refurbishment.
- (B6-B7) Use/operation: operational energy use and operational water use.
- (C1-C4) End of Life (EoL): deconstruction/demolition, transport, waste processing, and disposal.

Table VI-1 shows that the existing software programs enable the environmental performance of buildings to be analysed, but only Athena, Tally, and TOTEM also analyse the economic performance. Regarding the countries with the highest number of tools, they are the United States of America (USA) and European countries. Most of the tools analyse the impacts produced during the whole life cycle of buildings but place more importance on the early stages of production, construction, and EoL, and only partially analyse the stages of use, especially energy consumption. For instance, Athena and Tally, the most widely implemented tools, focus on product and EoL stages, while more recent software such as OneClickLCA and COMFIE-PLIEADES widen their scope to the whole life cycle. Only COMFIE-PLIEADES assesses the impact generated by the occupants' daily activities, such as the generation and management of municipal waste.

In terms of data entry, the majority of the tools ask the user for data on energy and water consumption during the operation of the building, but few of them consider this consumption during the construction stage. The transport and distances of the materials and products from the manufacturing companies to the works site are also hardly considered. Maintenance and renovation activities during the use stage of the building are addressed by half of the tools, these being activities with a considerable foreseeable impact, taking into account the long lifespan of buildings.

Regarding the environmental performance, the tools mainly use Environmental Product Declarations (EPD) and Ecoinvent (Ecoinvent, 2020) for the LCI model. However, Athena and eToolLCD integrate their own database, and Tally and EC3 use GaBi databases (Sphera, 2021). Only three tools suggest default data to facilitate data entry for the user (Athena, eToolLCD, and COMFIE-PLIEADES), and only two allow the database to be adapted to the construction specificities of the regional context (eTool and OneClickLCA). In relation to the life cycle impact assessment (LCIA) method, the greater part of the tools use mid-point methods, with TRACI and CML being the most common.

Regarding the economic performance, only those addressing LCC (Athena, Tally, and TOTEM) include cost data for materials and processes or monetised indicators, through multiplying by a monetisation factor for carbon emissions.

When analysing the way output results are displayed to the user, it was found that the tools generally present results both graphically and numerically in tables. However, in general, the life cycle impact of the building is usually displayed as a whole, and few tools can break down the results by building element (Athena, Tally, and EPIC) or by material group (Athena, Tally, OneClickLCA, TOTEM, EC3, and EPIC). Pertinently, most of the tools can differentiate results by life cycle stage (A1–A3, A4–A5, B1–B7, C1–C4, according to the nomenclature proposed in EN 15804 (2013), or by impact category (GWP, AP, etc.), which increases the room for improvement when LCA is used as a design tool in the early stages of a building's project. In this regard, only OneClickLCA can offer improvement scenarios (i.e., maintenance, renovation measures, etc.). Finally, most of the tools can import or export to other formats through plug-ins (BIM, spreadsheets, etc.) to transfer data to software with other functionalities, except for Athena, TOTEM, and EC3

Table VI- 1. Review of existing specific LCA and LCC software for buildings

	COMFIE- PLEIADES	ALCYONE	NovaEQUER	Athena	Tally	BHoM	cove.tool	EC3	eToolLCD	EPIC	LCAQuick	OneClickLCA	TOTEM
Aspect	LCA	LCA	LCA	LCA/LCC	LCA/LCC	LCA	LCA	LCA	LCA	LCA	LCA	LCA	LCA/LCC
LCA/LCC tool	LAB	LAB	Izuba	The Athena Sustainable Materials Institute	Building transparency	Building transparency	Pattern r+d	Building transpa rency	Cerclos	EHDD	Brandz	Bionova	OVAM Brussels Environment Public Service of Wallonia
Developer	recherché environne ment	recherché environnem ent											
Origin	France	France	France	USA	USA	USA	USA	USA	UK	Australia	New Zealand	Finland	Belgium
Year	1990	1990	2011	1997	2013	N/A	N/A	2018	2010	N/A	2019	2020	2023
Cost	Licence fee	Licence fee	Licence fee	Free	Licence fee	Free	Licence fee	Free	Licence fee	Free	Free	Licence fee	Free
Life cycle stages (EN 15804, EN 15978)													
A1–A3	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●
A4–A5	●	●	●	●	○	●	○	●	●	●	●	●	●
B1–B5	●	●	●	○	○	●	○	○	●	○	●	●	○
B6–B7	●	●	●	○	●	●	●	○	●	○	●	●	●
C1–C4	●	●	●	●	●	●	○	○	●	○	●	●	●
D	●	●	●	●	●	●	○	○	●	●	●	●	●
Additional modules beyond EN 15978 boundary (i.e., waste management)	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Data input													
Energy used in construction process (electricity, gas, etc.)	●	○	○	○	●	○	○	○	○	○	●	○	○
Transport distances	●	○	○	●	●	○	○	●	○	○	○	●	○
Maintenance and renovation activities during use stage	●	●	●	○	●	●	○	●	○	○	●	●	○
Operational energy use	●	●	●	○	●	●	●	●	●	○	●	○	●
Operational water use	●	●	●	○	●	○	●	●	●	○	●	○	●
Environmental performance													
Inventory database	EPD Ecoinvent	EPD Ecoinvent	EPD Ecoinvent	Athena BEES	GaBi 2018	EPD	EPD	GaBi 2018	eTool EPD Ecoinvent BRE impact	EPD	EPD LCAQuickK	EPD Ecoinvent	EPD Ecoinvent
Open data	●	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	●
Suggestion of default data	●	○	○	●	●	○	○	○	●	○	●	○	●
Ability to adapt the database to regional context (include new materials/construction assemblies)									●			●	

Aspect	COMFIE- PLEIADES	ALCYONE	NovaEQUER	Athena	Tally	BHoM	cove.tool	EC3	eToolLCD	EPIC	LCAQuick	OneClickLCA	TOTEM
Impact assessment method (Mid-point)	CML	CML	CML	TRACI	TRACI	TRACI	N/A	TRACI	CML ReCipe	N/A	ReCipe	CML TRACI EN 15804+A2	CML EN 15804+A2
Economic performance													
Cost data	○	○	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	●
Output and results													
Graphic results	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Numeric results (table)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Can break down life cycle impact by building element (structure, façade, floor, etc.)	○	○	○	●	●	○	○	●	○	●	○	○	○
Can break down life cycle impact by material group (concrete, steel, masonry, plastic, etc.)	○	○	○	●	●	●	●	●	○	●	○	●	●
Can break down life cycle impact by life cycle stage (A1–A3, A4–A5, B, etc.)	●	●	●	○	○	●	●	●	●	●	●	●	●
Can break down life cycle impact by impact category (GWP, AP, etc.)	●	●	●	●	○	●	●	●	●	●	●	●	●
Can offer improvement scenarios (i.e., maintenance, renovation measures, etc.)	○	○	○	●	●	●	○	●	○	●	○	●	○
Can import/export to other formats (BIM, spreadsheets, etc.)	●	●	●	●	●	●	●		●	●	●	●	○
Key: ● met; ○ not met													

To address the second objective of exploring the existence of additional non-commercial tools and methodologies, a literature review was carried out using Google Scholar and Scopus as search engines. The search strings used were a combination of “LCA tool”, “LCA building”, and “LCA building tool” to identify recent papers (published in the last decade, since 2014) that specifically developed a method or a tool for the assessment of the environmental performance of buildings, and were supported (or not) by software. Initially, 44 studies were found; however, about half of them were only focused on modelling construction materials or building elements/assemblies, not the building as a whole. Therefore, these were discarded. Finally, 21 studies were included in the review.

Table VI-2 compiles the 21 studies and classifies them according to the country of origin; the building type assessed; the scope of the assessment throughout the life cycle stage (modules A1–A3, A4–A5, etc., according to EN 15804 (EN 15804, 2013) and EN 15978 (EN 15978, 2012)); the LCI database and the LCIA method for the environmental analysis, and the economic unit for the economic analysis; and the programming language or algorithm used for calculations. They also feature the building elements included in the assessment (structure, façade, windows, foundation, etc.), the data entry requirements for conducting calculations, and the way the tool finally communicates the results.

It can be observed that the majority of the tools have been designed principally for residential buildings, including both multifamily or single-family typologies, and only a few of them also assess the impact of buildings at the urban or neighbourhood scales (Famiglietti et al., 2022; Llatas et al., 2021; Trigaux et al., 2017). Regarding the life cycle stages included in the evaluation, it was found that only a small number of them adopt a real life cycle approach integrating both the product, the construction, the use, and the EoL stages. These are Säwén et al. (Säwén et al., 2022), Tecchio et al. (Tecchio et al., 2019), and Trigaux et al. (Trigaux et al., 2017). It was estimated that about 50% of the tools evaluate the embodied impacts in the product stage (A1–A3), followed by the impact related to construction activities (A4–A5), the energy use during operation (B6), and the EoL stage (C1–C4). To a lesser extent, the impact related to indoor emissions of the standing materials (B1); the scenarios for maintenance, repair, replacement, and rehabilitation (B2–B5); and water consumption (B7) are evaluated. None of the tools include impact derived from the occupants’ lifestyle during the use stage.

The data input requirements often include the location; the climatic zone; the building type and geometry; the building elements; the kind of materials the building is composed of, together with their quantities; and the operational energy consumption. Furthermore, albeit with a lesser emphasis, transport, construction activities, solar orientation, total floor area, electrical equipment, thickness of building elements, and cost data are featured. Within the output data, all the tools report the results in bar charts and tables, although some also employ Key Performance Indicators (KPI).

As for the LCA analysis, all the tools generally follow the methodology proposed by ISO 14040 (ISO 14040, 2006) and EN 15978 (EN 15978, 2012). The LCI database used by 55% of the tools is Ecoinvent (Ecoinvent, 2020), followed by the Athena database (Athena Sustainable Materials Institute, 2022),

GaBi (Sphera, 2021), and IPCC 2013 (Stocker et al., 2013). To a lesser extent, EPDs are used, and in some cases, specific databases adapted to the geographical context are also employed. This is the case of Llatas et al. (Llatas et al., 2021), which uses data collected from construction companies in Spain; and Kanafani et al. (Kanafani et al., 2021), which adopts the Ökodaut (BBSR, 2021) database, specifically developed for the German building stock. All the tools made the selection of the building elements to be evaluated available to the user. It was found that façades, windows, structure, and roofs are the most commonly addressed aspects. With regard to the LCIA method, different impact categories are used (GWP, OFHH, FPMF, OFTE, TA, TET, IR, HCT, LU, WU, FPMF, GWP, ecosystem quality, HH, see abbreviations in Table 2), although 85% include the GWP as the predominant category, followed by ODP and CED.

With regard to LCC, only 30% of the tools consider the economic performance [31, 33, 37, 39–43], generally using the euro (€) to represent the cost performance.

In terms of calculations, mathematical equations predominate, but several other computing languages are also frequently used, such as Python, C#, and BAIA.

Concerning the input data, almost every tool includes a general section to enter information such as project details, location, climatic zone, year of construction, and estimated lifespan. In further detail, other sections include more specific data on building type and dimensions; solar orientation, in some cases; building elements and materials; energy and source facilities information; and cost information, for those which conducted LCC. It was observed that urban information about a building's surroundings is systematically lacking in the tools.

Concerning the output data, the results are presented in various formats such as bar charts, tables, KPIs, and box plots. Normally, results are presented in terms of total impact and also split into life cycle stages. Tecchio et al. (Tecchio et al., 2019), additionally, provide the Bill of Materials (BoM) results.

In addition to the studies analysed in Table VI-2, the EeBGuide Project (Gantner et al., 2015) was created to enable LCA practitioners, from both private and public organisations, to quantify environmental impacts by means of a common methodology — based on ISO 14040 (ISO 14040, 2006), EN 15978 (EN 15978, 2012), and EN 15804 (EN 15804, 2013) — and proposed additional life cycle modules not included in the referred standards. These were the following:

- B8 Use/operation: for the municipal solid waste (MSW) management generated by occupants of the building during the use stage.
- B9 Use/operation: for the mobility and transport of occupants for daily and work activities.

Neither of these modules were included in the studies reviewed.

Considering the research conducted to date, it can be deduced, on the one hand, that a comprehensive life cycle environmental and economic assessment tool should meet the context specificities of the region where it is applied and integrate accurate and contrasted data to provide well-founded and proven results. And, on the other hand, that no specific tool for the Colombian context has been developed to date that enables both the environmental and economic performance assessment of the residential building stock. To address this lack, the work presented herein aims to design a tool for this purpose that integrates a life cycle approach, includes all the necessary data and calculation algorithms for facilitating the user the assessment, and also provides a user-friendly interface.

Table VI- 2. Review on building LCA studies.

Reference	Country	Building type	Life cycle stages (EN 15804, EN 15978)	LCI	LCC (unit)	LCA (impact categories)	Algorithm	Building components	Data input	Output and results
(Apostolopoulos et al., 2023b)	Greece	Residential (multifamily)	A1–A3, A4–A5, B1–B7	Eurostat, PVGis	✓(€)	(GWP, CED)	Modelica	Passive components (walls, windows) Active components (PV panels, boilers heat pumps)	Project details, climatic zone, building characteristics, financial factors, land use, lifetime, building elements, electrical equipment, energy consumption	KPIs, Bar charts
(Arbulu et al., 2023)	Spain	Residential (multifamily)	A1–A3, B4, B6	Ecoinvent	✓	(GWP, NRPE)	Phyton	Façade	Reference period, scenarios data, material quantity, processes heating surface, inflation rate, heating operational	Charts
(Gillott et al., 2023)	UK	All types of buildings	C1–C4, D	N/A		N/A	N/A	Substructure, roof, walls, windows, and doors	Circularity principles, building elements, indicators	Charts and tables
(Feng et al., 2023)	USA	Residential	A1–A3	N/A		GWP, OFHH, FPMF, OFTE, TA, TET, IR, HCT, LU, WU, FPMF	mathematical equations	N/A	Building type, materials	Charts
(Hassan et al., 2022)	Egypt	Residential	A1–A3, B4	Ecoinvent, IPCC 2013		GWP, ecosystem quality, HH	C#	External walls	Project details, climatic zone, orientation, external area, exterior finish, thickness, R-value, materials, impact factor	Charts
(Famiglietti et al., 2022)	Italy	Urban Scale Residential	B6	Ecoinvent, Environmental footprint, CENED	✓(€)	GWP, ODP, IR, POF, PM, HTNC, HTC, AP, EF, EM, ET, LU, CC, WU, NRPE, MRM	Phyton	Active components (PV panels, boilers heat pumps)	Location, energy consumption	Charts and tables
(Mouton et al., 2022)	Belgium	Residential	B1, B3, B5, B7, D	N/A		GWP	N/A	Floors, external walls, internal walls, doors	Building type, building elements, materials	Bar charts
(Såwén et al., 2022)	Sweden	All types of buildings	A1–A3, A4–A5, B1–B7, C1–C4, D	N/A		GWP	N/A	N/A	Building type, building elements, materials	Bar charts
(Kanafani et al., 2021)	Denmark	All types of buildings	A1–A3, B4, B6, C3–C4	Ökodaut, EPD, BUILD	✓(€)	GWP, ODP, AP, EP, POCP, APDE, ADPF, NRPE	BIM, xml files	Foundations, columns, Building services, sloped roof area, stairs, Balconies	Building type, material quantities, gross area, heat gross area, operational energy, lifespan (years), floor height, basement floors, above terrain floors, technical shafts	Charts and tables
Llatas et al., 2021)	Spain	Urban Scale Residential	C1–C4	Companies involved, public databases		GWP, AP, EP, ODP, HTP, POCP, EP	N/A	Structure, Façade, roof	Location, building type, construction company, developer, gross area, building elements	Charts
(Song et al., 2021)	China	Residential	B6	Ecoinvent		CED	C#	External walls	Climatic zone, materials, energy consumption	Bar charts

Reference	Country	Building type	Life cycle stages (EN 15804, EN 15978)	LCI	LCC (unit)	LCA (impact categories)	Algorithm	Building components	Data input	Output and results
	USA	Residential (single, multifamily)	A1–A3, A4–A5, B1–B7, C1–C4, D	Ecoinvent, USLCI, Athena, Gabi		GWP, AP, EP, ODP	mathematical equations	External walls	Location, climatic zone, building type, net area, thermal insulation	BoM, Charts
	Sri Lanka	All types of buildings	A1–A3, A4–A5, B3, B4, B6, C1–C4	Companies involved		GWP	mathematical equations	Structure, floors	Project details, location, building type, lifespan (years), building elements, material quantities, construction stage Activities (machinery), energy consumption, demolition quantities	Charts
	Portugal	Residential	A5, B6, B4, C1–C4	Ecoinvent	✓	CED, NRPE, GWP, ODP, AP, EP	BAIA	Roof, external walls, windows	Location, building type, building elements, materials, gross area, construction company	Bar charts
	Spain	Residential	A1–A3, A4–A5	Ecoinvent, EPD		GWP	mathematical equations	Façade, Cladding, roof, partitions, equipment, insulation, finishes, carpentry, windows	Building elements, building type, material quantities, equipment	Bar charts
	USA	Residential	A1–A3, A4–A5, B4, B6, C1–C4	Ecoinvent, USLCI, Athena, Gabi	✓	GWP	BAIA	Roof, external walls, windows, internal walls, doors, floor, ceiling foundation	Project details, building geometry, building elements, material attributes, financial factors, energy consumption, occupants, equipment	Box plots
	Belgium	Residential neighbourhoods	A1–A3, A4–A5, B1–B7, C1–C4	Ecoinvent	✓	MMG indicators	N/A	External walls, internal floor, flat roof, windows	Project details, thermal boundary, building type, financial factors, solar gains, heating energy demand	Bar charts
	China	All types of buildings	A4–A5, B1–B7, C1–C4	EPD		GWP	mathematical equations	all building elements	Country, building geometry, energy consumption	Charts
	China	Residential	A1–A3, A4–A5, B6	N/A		GWP, CED	E-R model MFC	Passive components (walls, windows) active components (PV panels, boilers heat pumps)	Project details, building type, lifespan (years), material quantities, energy, factors for transport vehicles, machinery and equipment	Charts and tables
	China	Residential	A4–A5	ICE, IPCC		GWP	Browser/server (B/S)	Substructure, roof, walls, windows, and doors	Material quantities, transport distance, transport type, waste disposal, cost	Bar charts and tables
	USA	Residential	A1–A3, B2–B4, B6	Ecoinvent, Athena	✓	GWP	Sensitivity analysis	Substructure, shell, interior, services	Location, building type, gross area, building elements, material quantities, thickness	Bar charts

Abbreviations. Life Cycle Inventory (LCI), Life Cycle Assessment (LCA), Life Cycle Cost (LCC), Not available (N/A), R-value (thermal resistance value), Global Warming Potential (GWP), Cumulative Energy Demand (CED), Non-renewable Primary Energy (NRPE), Ozone Depletion Potential (ODP), Human Health (HH), Ozone formation, Human health (OFHH), Fine particulate matter formation (FPMF), Ozone formation, Terrestrial ecosystems (OFTE), Terrestrial acidification (TA), Terrestrial ecotoxicity (TET), Human carcinogenic toxicity (HCT), Land use (LU), Water consumption (WC), Ionising radiation (IR), Human non-carcinogenic toxicity (HNCT), Fine particulate matter formation (FPMF) Acidification Potential (AP), Climate Change (CC), Particulate Matter (PM), Water use (WU), Photochemical Ozone Formation (POF), Eutrophication Freshwater (EF), Eutrophication Marine (EM), Eutrophication Terrestrial (ET), Material Resources (MRM), Photochemical Ozone Creation Potential (POCP), Eutrophication Potential (EP), Eutrophication potential (EP), Abiotic depletion potential- elements (ADPE), Abiotic depletion potential-fossils (ADFP), Environmental profile of building elements (MMG indicators)

3. Materials and methodology

To achieve the objective of this work, the methodology depicted in Figure VI-1 was conducted, the stages of which are described in detail in the subsequent sections. Section 4 of this paper approaches, first, the selection of the requirements that the proposed LCA|LCC tool should meet; second, the description of the database development to be integrated in the tool, including both environmental and economic factors; and third, the algorithms for the calculation of a building's environmental and economic impact. As a result of the study, Section 5 presents, on the one hand, the LCA|LCC tool design by including the main menu interface, the required data to be entered by the user, and the output data provided; and, on the other hand, a case study for a residential building in Mosquera (Colombia), as an application for the tool.

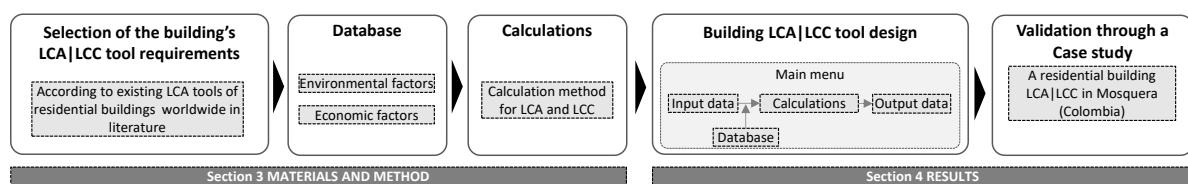


Figure VI- 1. Research methodology

3.1. Selection of the building LCA|LCC tool requirements

Based on the conclusions drawn from the literature review, the tool should include the following requirements:

Regarding the tool interface layout and usability:

- To present a structure split into different modules for entering input data, for database storage, for computing calculations, and for displaying results.
- To provide a user-friendly and intuitive interface, without needing external auxiliary calculations.
- To include a graphical and intuitive communication of results by means of icons and colour codes that facilitate the comprehensibility of the tool.
- The results should be provided both graphically and with numerical values in tables, in terms of global impact and also split into detail by life cycle stages, building elements, and material group.

Regarding the method and calculations:

- To be aligned with the LCA and LCC methodologies: definition of the objective, boundaries and reference time period, environmental and cost inventory development, and application of the impact assessment method.

- To be conceived with a life cycle approach, considering the entire lifespan of the building and including the stages and modules in LCA/LCC: product (A1–A3), construction (A4–A5), use (B1–B7), and EoL (C1–C4); but also additional modules not included in EN 15978 standard, such as waste management (B8) and occupant mobility (B9).

Regarding the geographical context adaptation of the database:

- The characteristics of the urban context should be integrated in the tool, considering aspects such as climatic zones, socioeconomic strata, population density, and overcrowding rates from the country.
- The LCI database should be specific to the region under study; this means that, among others, aspects such as the local materials, the electricity mix, the existing surrounding facilities, and the average distances from manufacturers to construction site and landfill should be included.
- The LCI database should include the environmental emission and economic factors of the region.
- The LCI should be capable of being updated and extended to include new materials/processes.
- The tool should provide a set of options of construction assemblies typically used in the region under study, considering a building's age and typology, to facilitate data entry for the user.
- The tool should offer the possibility to upload default values based on national average data and information when a building's data are not available, thereby reducing data input and time consumption.

3.2. Database

The database is the core of the tool, since it relates the input data supplied by the user to the calculations, which are necessary to obtain the output data (results). Various databases have been developed and later integrated in the tool, as described below. These are Location, Urban/Building, Construction materials and processes, Construction assemblies, Maintenance and refurbishment, and Machinery.

3.2.1. Location database

The Location database provides the location and demographic data of Colombia, including the departments, municipalities, altitudes, climate zones, and the population. This information was based on DANE (2019) and Resolución 0549 (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2015). Figure VI-2 presents a country map including the geographical scope of the tool, which are the cold and temperate climates in Colombia.

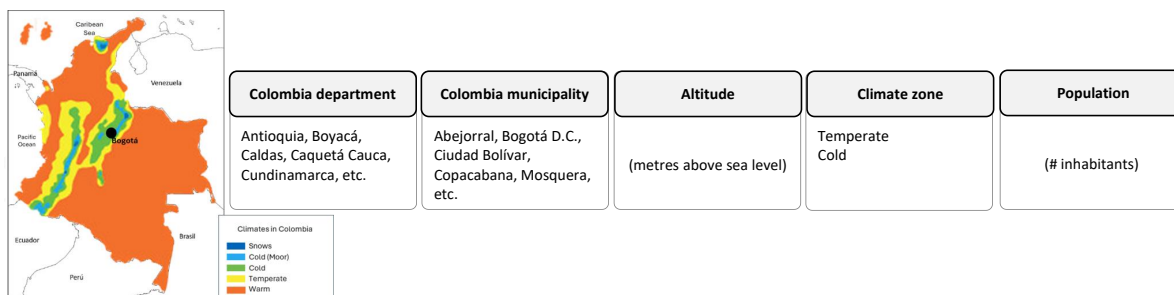


Figure VI- 2. Location database (according to Jorge-Ortiz et al. (2024))

3.2.2. Urban/Building database

The Urban/Building database was designed by using the building characterisation previously developed by Jorge-Ortiz et al. (Jorge-Ortiz et al., 2024). A code was assigned to each housing typology of the Colombian residential stock, for the cold and temperate climates, according to the nomenclature reported in Figure VI-3, by considering jointly the year of construction, the urbanisation type, the residential typology, the adjacency, and the number of floors. In addition, the socioeconomic strata (low, medium, high) was assigned for each housing typology, following the Colombian government guidelines (DANE, 2015), as represented with a colour code in Figure VI-3.

Urbanisation type	Neighbourhood (B)				Urbanisation (U)		
	Single-family (UF)				Multifamily (UF)		Multifamily (MF)
Residential typology							
# floors	1 floor (1)		2-3 floors (2/3)		2-3 floors (2/3)		>3 floors (3)
Year / Adjacency	Terraced (M)	Corner (E)	Terraced (M)	Corner (E)	Terraced (M)	Detached (A)	Detached (A)
A1 <1950	A1-B-UF-M-1	-	-	-	-	-	-
A2 1950-1969	A2-B-UF-M-1	A2-B-UF-E-1	A2-B-UF-M-2/3	-	-	-	-
A3 1970-1989	A3-B-UF-M-1	A3-B-UF-E-1	A3-B-UF-M-2/3	A3-B-UF-E-2/3	-	-	-
A4 1990-2009	A4-B-UF-M-1	A4-B-UF-E-1	A4-B-UF-M-2/3	A4-B-UF-E-2/3	A4-U-UF-M-2/3	A4-U-UF-A-2/3	A4-U-MF-A-3
A5 >2010	A5-B-UF-M-1	A5-B-UF-E-1	A5-B-UF-M-2/3	A5-B-UF-E-2/3	A5-U-UF-M-2/3	A5-U-UF-A-2/3	A5-U-MF-A-3

Estrata code: **Low**, **Medium**, **High**

Figure VI- 3. Building stock characterisation and code for the Colombian cold and temperate climate (according to Jorge-Ortiz et al. (2024))

3.2.3. Construction materials and processes database

The tool includes an exhaustive list of construction materials traditionally used in Colombian architecture. This investigation was previously conducted in Jorge-Ortiz et al.(2023,2024) The building elements were composed of a set of individual materials that were grouped into additives, aggregates, carpentry (M), cements, concrete, fabrics, glass, gypsum, thermal-acoustic insulation, masonry, metals, mortars, pavements, tiles, unions, and wood, as Table VI-3 reports. For each material, the environmental and economic factors (FENV and FECO, respectively) needed for calculating the environmental and economic impact are obtained.

The FEnv depends on the impact category (i). Five impact categories were analysed — Global Warming (GWP), Ozone depletion (ODP), Acidification (AP), Eutrophication (EP), Abiotic depletion-elements (ADPE), Abiotic depletion-fossils (ADFP) — as proposed by the PCR of buildings (International EPD System, 2019a). To obtain the FENVi, the following data sources were applied:

- Environmental Product Declaration (EPD) of construction materials specific to the region under study. Since very few EPDs for construction materials and building elements have been developed in the context of Colombia, the model was completed with EPDs from countries closer to the study region, such as Brazil and Mexico.
- The Ecoinvent (Ecoinvent, 2020) and CML methods (Leiden University, 2016) were used for materials without EPD, and also for the Colombian electricity mix, natural gas, tap water, municipal solid waste (MSW), construction and demolition waste (CDW), chemicals substances (mainly volatile organic compounds, VOC), and transport. It is worth noting that different MSW and CDW waste treatment scenarios were considered, such as recycling, incineration, and final disposal.
- Data derived from other LCA studies in the literature (González et al., 2019; Ortiz-Rodríguez et al., 2010), were applied when there were not available data on construction activities in the region.

For the FEco, CYPE Colombia (CYPE Ingenieros S.A., 2022) was used to obtain the unit price of each material, Ministry of Transport (2012) for transportation-related economic data, and DANE (2018) for energy, water, and waste management prices.

Table VI- 3. Construction materials

Material group	Material	Environmental sources	Cost sources
Additives	Neutral silicone, adhesive sealant, lime paint, mortar pigment, SBS elastomer-modified bitumen film, polymer resin-based primer, granular primer, self-adhesive weather seal, film-forming agent, release agent	- EPDs (Danosa Building Together, 2019a; International EPD System, 2017a, 2017b; PPG Architectural Finishes, 2018) - Ecoinvent (Ecoinvent, 2020)	CYPE (CYPE Ingenieros S.A., 2022)
Aggregates	Soil, rock, petrified material, gravel, mortar sand, screened sand, expanded clay, homogenised coarse aggregate	- Ecoinvent (Ecoinvent, 2020)	CYPE (CYPE Ingenieros S.A., 2022)
Carpentry	PVC frame, wooden frame, aluminium frame	- Ecoinvent (Ecoinvent, 2020)	CYPE (CYPE Ingenieros S.A., 2022)
Cements	Cement CEM II/B-P 32,5 N, Portland cement, cementitious adhesive for fixing insulating panels, natural hydraulic lime, improved cementitious adhesive, cementitious adhesive exclusively for interior use	- EPDs (ANFAPA, 2017; FEICA, 2016; IECA, 2022; International EPD System, 2022) - Ecoinvent (Ecoinvent, 2020)	CYPE (CYPE Ingenieros S.A., 2022)
Concrete	Prestressed joist, precast prestressed concrete hollow-core slab	- EPD's (EPD Latin America, 2019a)	CYPE (CYPE Ingenieros S.A., 2022)

Material group	Material	Environmental sources	Cost sources
Fabrics	Non-woven geotextile, woven fibreglass mesh	- Ecoinvent (Ecoinvent, 2020)	CYPE (CYPE Ingenieros S.A., 2022)
Glass	Flat glass products, 2 mm, 3 mm, 4 mm	- EPDs (International EPD System, 2016)	CYPE (CYPE Ingenieros S.A., 2022)
Gypsum	Plasterboard, plaster paste, gypsum plasterboard, plaster joint paste	- EPD's (Dapco, 2022; EPD Latin America, 2021, 2019b; Placo Saint-Gobain) - Ecoinvent (Ecoinvent, 2020)	CYPE (CYPE Ingenieros S.A., 2022)
Insulation	XPS, EPS, MW, GW, cellulose, and polyurethane	- EPDs (Danosa Building Together, 2019b; Institut Bauen und Umwelt, 2017; Saint Gobain, 2021, 2017) - Ecoinvent (Ecoinvent, 2020)	CYPE (CYPE Ingenieros S.A., 2022)
Masonry	Perforated brick, cavity brick, adobe brick, clay brick	- EPDs (AENOR, 2017a) - Ecoinvent (Ecoinvent, 2020)	CYPE (CYPE Ingenieros S.A., 2022)
Plastics	PVC wall bushing, PVC glazing beads, PVC crosspieces, PVC reeds, PVC profile	- Ecoinvent (Ecoinvent, 2020)	CYPE (CYPE Ingenieros S.A., 2022)
Metals	Steel rod, metal screws, telescopic metal prop, modular metal panels, electro-welded mesh, metal sheet for forming columns, supporting structure for recoverable formwork, steel wire, rolled steel, steel in rebar, aluminium profile, wall cladding profile	- EPDs (Aceros AZA S.A., 2017; BARBIERI, 2021; Institut Bauen und Umwelt, 2019) - Ecoinvent (Ecoinvent, 2020)	CYPE (CYPE Ingenieros S.A., 2022)
Mortars	Joint mortar, cement mortar, lime mortar, industrial plastering mortar, finished trowelled mortar	- EPDs (AENOR and Cementos capa S.L, 2019; AENOR and Chemical Building Project, 2020; AENOR and PROPAMSA, 2021; Cementos capa S.L, 2024; Grupo Puma, 2023; International EPD System, 2019b)	CYPE (CYPE Ingenieros S.A., 2022)
Pavement tiles	Ceramic, pressed terracotta tile	- EPDs (ACESCO, 2016; AENOR, 2017b; Dapco, 2016) - Ecoinvent (Ecoinvent, 2020)	CYPE (CYPE Ingenieros S.A., 2022)
Roof tiles	Fibre cement roof tile with insulation, fibre cement roof tile, clay roof tile, asbestos roof tile, zinc roof tile	- EPDs (ACESCO, 2016; AENOR, 2017b; Dapco, 2016) - Ecoinvent (Ecoinvent, 2020)	CYPE (CYPE Ingenieros S.A., 2022)
Unions	Self-drilling wood screw, approved spacer for beams, approved spacer for foundations, plastic approved spacer, fixing accessories kit, steel fittings and metal thread screws, self-tapping screw, natural fibre tie, steel nails, mechanical fastening for insulating panels	- Ecoinvent (Ecoinvent, 2020)	CYPE (CYPE Ingenieros S.A., 2022)
Wood	Wood board, wood for formwork, coniferous wood, sawn timber	- Ecoinvent (Ecoinvent, 2020)	CYPE (CYPE Ingenieros S.A., 2022)

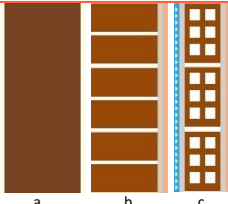
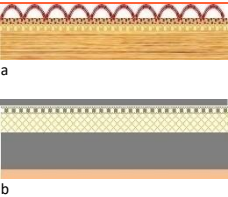
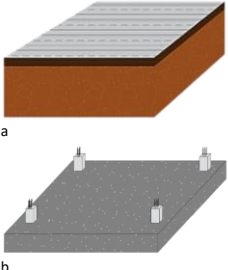
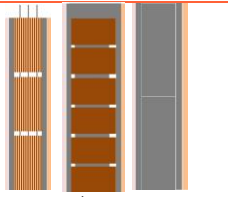
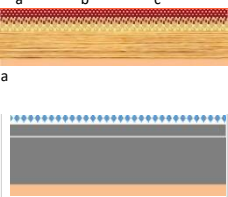
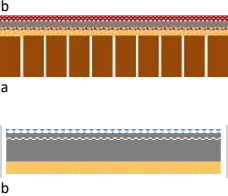
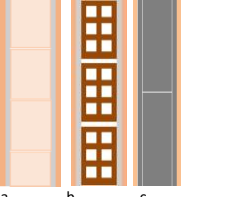
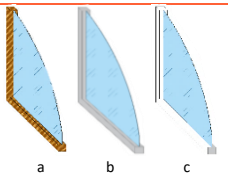
Abbreviations. SBS: styrene-butadiene-styrene, PVC: polyvinyl chloride, CEM: cement designation, EPD: Environmental Product Declaration, XPS: Extruded polystyrene, EPS: Expanded polystyrene, MW: Mineral Wool, GW: Glass Wool.

3.2.4. Construction assemblies database

This database includes traditional construction assemblies of Colombian architecture, based on the residential construction assemblies catalogue proposed by Jorge-Ortiz et al.(2023,2024). Each construction assembly is composed of a group of individual construction materials (Table VI-3), which together compose a single functional unit (1 m²) for each building element (façade, roof, foundation, vertical V-structure, horizontal H-structure, floor, internal partitions or window). Data were contrasted with CYPE (CYPE Ingenieros S.A., 2022) and IVE (IVE, 2022). Table VI-4 shows, as an example, an excerpt of some assemblies for each building element. For instance, applying the nomenclature described in Table VI-4, F-A1-1H-T-SR corresponds to a structural façade made of adobe with exterior lime cladding, without insulation.

The environmental and economic impact of each construction assembly is obtained from the compilation of the individual impacts of the construction materials in Table VI-3, and these are principally used to calculate the embodied impact in modules A1–A3 according to EN 15978 (2012).

Table VI- 4. Example of building assemblies for each building element (excerpt from Jorge-Ortiz et al. (2024))

Building element	Building assembly name	Drawing	Description
Façade	F-A1-1H-T-SR (a) F-A3-1H-LT-CV (b) F-A4-1H-LH-R (c)		(a) Structural façade made of adobe with exterior lime cladding, no insulation (b) Structural façade, 1 layer, <i>caravista tolete</i> brick, no insulation (c) Non-structural façade, 1 layer, hollow ceramic brick, external mortar coating, no insulation
Roof	CI-A1-VM-TB-SAT (a) CP-A5-VH-HA-CAT (b)		(a) Sloped roof, ceramic tiles on wooden beams, no insulation (b) Flat roof non-ventilated, trafficable, on concrete beams, insulation 30 mm, ceramic flooring
Foundation	EC-A1-CS-R-Ø (a) EC-A4-CS-HA-Ø(L)(b)		(a) Foundation with rocks and natural soil, lime and sand mortar (b) Foundation of reinforced concrete, in previous excavation
V-structure	EV-A3-MR-LH-E (a) EV-A4-SE-LP-E (b) EV-A5-SE-HA-E (c)		(a) Structural masonry wall (ceramic hollow brick) reinforced with corrugated steel (b) Structural masonry wall (ceramic perforated brick), formwork (c) Structural concrete formwork wall
H-structure	EH-A2-VM-TR-BB (a) EH-A4-VH-CC-PC (b)		(a) Wooden beams slab, hemp fibre reed, earth layer, terracotta tile (b) Reinforced concrete and steel slab, rib "in situ", concrete vault for ribs, electro-welded steel mesh, compression layer
Floor	S-A2-LT-CC-BB (a) S-A5-HA-CC-R (b)		(a) Floor made with <i>tolete</i> brick, earth layer, terracotta tile (b) Reinforced concrete slab, cement mortar layer
Internal partition	TI-A2-1H-LA-EY (a) TI-A4-1H-LH-EY (b) TI-A5-1H-HA-EY (c)		(a) Internal partition wall with <i>adobe</i> brick, gypsum plaster on both sides (b) Internal partition wall with hollow brick, gypsum plaster on both sides (c) Internal partition wall with prefabricated concrete, gypsum plaster on both sides
Window	V-A1-MM-Ø-VS (a) V-A5-MP-Ø-VS (b) V-A5-MA-Ø-VS (c)		(a) Single glazed window (2 mm), wood carpentry (b) Single glazed window (4 mm), PVC carpentry (c) Single glazed window (4 mm), aluminium carpentry

3.2.5. Maintenance and refurbishment database

The database for maintenance/refurbishment activities in the building during the use stage (modules B2–B5 according to EN 15978 (2012)) consisted of the elements reported in Table VI-5, which were classified according to the type of building element, either structural or non-structural. To estimate the quantities of materials in each alternative (for 1 m²), the same procedure used in A1–A3 was applied, and the data sources for the environmental and economic LCI were the same as in Table VI-3.

Table VI- 5. Maintenance and refurbishment alternatives

Building element	Type	Maintenance/Refurbishment Alternatives
Façade	Structural	Repair of cracks in masonry, by sewing with metal staples Masonry reinforcement on the inner side
	Non-structural	Facade cleaning Repairing cracks in gypsum plastering Exterior paint maintenance Repair of cladding Non-structural concrete repair Floor jointing Reconstruction of window/door openings
Roof	Non-structural	Repair of tile coverings on sloped roofs Treatment of pine wood Fungicide treatment on gypsum ceiling Replacement of asbestos roof tiles Slope formation
V-structure	Structural	Structural repair of masonry walls with lime mortar Replacement of bricks Brick joints filling/rendering Structural concrete repair
	Non-structural	Brick joints filling with mortar Cleaning of masonry joints Wall cleaning Repair of small cracks in ceramic brick masonry structure
H-structure	Non-structural	Fungicide treatment on gypsum ceiling Floor jointing Consolidation of terracotta flooring Flooring cleaning
Floor	Structural	Consolidation of flooring
	Non-structural	Floor jointing Non-structural concrete repair Flooring replacement Flooring cleaning
Internal partition	Non-structural	Repair of cladding Interior paint maintenance
Window	Non-structural	Replacement of carpentry ironwork Glazing replacement Carpentry replacement Glazing cleaning

3.2.6. Machinery database

The majority of construction activities imply the use of several means of transport, which have a related environmental and economic impact. Transport, in various forms, is included in modules A1–A3 for the raw materials transport to the manufacturing companies, and in A4–A5 for the

transportation of materials and products from the manufacturing companies to the works site to be installed, which are usually carried by trucks. Trucks are also used during the maintenance and refurbishment activities in modules B2–B5, and in the EoL stage, when deconstructed elements must be transported to undergo waste treatment or be finally disposed of in CDW landfills. Information from the Ministerio de Transporte (Ministerio de Transporte, 2012) was used for transportation-related economic data, while Ecoinvent (Ecoinvent, 2020) and various EPDs were mainly used for the environmental data (see Table VI-6) for details. However, during the use stage, the occupants’ daily activities also involve transportation and mobility with some kind of vehicle (module B9): sometimes by private car with a higher related impact; sometimes by public transport, with a lower impact; among other means. MSW generated during the use stage by occupants (module B8) must be transported from the building site to the landfill, by some kind of truck. Finally, the demolition machinery and the transport of CDW are included in modules C1–C4.

Table VI-6 presents the different means of transport included in the database and the sources from which the data were retrieved. For the construction activities data, conclusions drawn in building LCA studies by other authors within the scope of the region were taken as reference, as indicated in Table VI-6.

Table VI- 6. Transport and machinery data

Building stage	Load	Transport/machinery type	Alternatives	Environmental sources	Cost sources
A1–A3	Raw materials	Truck	16–32 tones > 32 tones	EPD Ecoinvent (2020)	CYPE (2022) Ministry of Transport (Ministerio de Transporte, 2012)
A4–A5	Materials, products and CDW (works)	Truck	16–32 tones > 32 tones	Ecoinvent (2020)	CYPE (2022) Ministry of Transport (Ministerio de Transporte, 2012)
		Construction machinery		Asdrubali et al. (2013); Evangelista et al. (2018); González Velandia et al. (2019); Martínez & Casas (2012); Moňoková & Vilčeková (2019); Petrovic et al. (2019); and Tomková (2020)	CYPE (2022) Ministry of Transport (Ministerio de Transporte, 2012)
B8	MSW	Truck	16–32 tones	Ecoinvent (2020)	CYPE (2022) Ministry of Transport (Ministerio de Transporte, 2012)
B9	People	Private car Motorbike Public transport	Vehicle (petrol) Motorbike (petrol) Bus (diesel)	Ecoinvent (2020)	CYPE (2022) Ministry of Transport (Ministerio de Transporte, 2012)
C1–C4	CDW	Truck	16–32 tones > 32 tones	Ecoinvent (2020)	CYPE (2022) Ministry of Transport (Ministerio de Transporte, 2012)
		Demolition machinery	Backhoe loader Pneumatic hammer	Ecoinvent (2020)	CYPE (2022) Ministry of Transport (Ministerio de Transporte, 2012)

3.3. Calculation method

The environmental impact (I_{Env}) assessment of the whole life cycle of the building is obtained from the sum of each of the modules, equation (1), and is applied for each of the selected impact categories (i); while the economic impact (I_{Eco}) assessment is calculated by equation (2).

$$I_{Env i} = I_{Env(A1-A3)i} + I_{Env(A4-A5)i} + I_{Env(B1)i} + I_{Env(B2-B5)i} + I_{Env(B6-B9)i} + I_{Env(C1-C4)i} \quad (1)$$

$$I_{Eco} = I_{Eco(A1-A3)} + I_{Eco(A4-A5)} + I_{Eco(B1)} + I_{Eco(B2-B5)} + I_{Eco(B6-B9)} + I_{Eco(C1-C4)} \quad (2)$$

Where,

in equation (1), $I_{Env i}$ is the environmental indicator for the whole life cycle of the building and for the impact category i , which takes the following values: GWP (kg CO₂ eq), ODP (kg CFC-11 eq), AP (kg SO₂ eq), EP (kg PO₄ eq), ADPE (kg Sb eq), ADPF (MJ); and $I_{Env(A1-A3)}$, $I_{Env(A4-A5)}$, $I_{Env(B1)}$, $I_{Env(B2-B5)}$, $I_{Env(B6-B9)}$, and $I_{Env(C1-C4)}$ are the environmental impact results for each information module. These are calculated according to equations 3, 5, 7, 9, 11, and 13.

in equation (2), I_{Eco} is the economic indicator for the whole life cycle of the building, and $I_{Eco(A1-A3)}$, $I_{Eco(A4-A5)}$, $I_{Eco(B1)}$, $I_{Eco(B2-B5)}$, $I_{Eco(B6-B9)}$ and $I_{Eco(C1-C4)}$ are the economic impact results for each information module. These are calculated according to equations 4, 6, 8, 10, 12, and 14 and are expressed in the Colombian currency (\$COP).

3.3.1. Calculations for modules A1–A3

These information modules evaluate the impact of each material and/or product that shapes the construction assemblies. $I_{Env(A1-A3)i}$ and $I_{Eco(A1-A3)}$ can be calculated as the sum of each construction assembly of which the building is composed, according to equations (3) and (4), respectively.

$$I_{Env(A1-A3)i} = \sum_{j=1}^a \left[\sum_{k=1}^b (m_{kj} \times f_{Env-mki}) \right] \quad (3)$$

$$I_{Eco(A1-A3)} = \sum_{j=1}^a \left[\sum_{k=1}^b (m_{kj} \times f_{Eco-mk}) \right] \quad (4)$$

Where,

j is the building assemblies of each building element (façade, roof, foundation, V-structure, H-structure, floor, internal partitions and windows), k is the material types in each building assembly, m_{kj} is the quantity of material type k corresponding to each building assembly j (kg), $f_{Env-mki}$ is the environmental emission factor for each material type k and for each environmental impact category (i) (kg eq/kg), and f_{Eco-mk} is the economic factor for each material type k (\$COP/kg).

3.3.2. Calculations for modules A4–A5

These information modules evaluate the impact of materials and/or products transport from factory to works site and during construction process stage. $I_{Env(A4-A5)i}$ and $I_{Eco(A4-A5)}$ can be calculated according to equations (5) and (6), respectively.

$$I_{Env(A4-A5)i} = \sum_{j=1}^a \left[\sum_{k=1}^b (m_{kj} \times dist_k \times f_{Env-tki}) \right] \quad (5)$$

$$I_{Eco(A4-A5)} = \sum_{j=1}^a \left[\sum_{k=1}^b (dist_k \times f_{Eco-tk}) \right] \quad (6)$$

Where,

k, j and m_{kj} are the same as in equations (3) and (4), $dist_k$ is the distance from factory to the site for each material type k (km), $f_{Env-tki}$ is the environmental emission factor related to transport type t used for each material type k and for each environmental impact category i (kg eq/kg km), and f_{Eco-tk} is the economic factor related to transport type t used for each material type k (\$COP/km).

3.3.3. Calculations for modules B1

The information module evaluates the environmental and economic impacts and aspects arising from the normal conditions of use of the components of the building, including, for example, the generation of substances produced by agents such as indoor VOCs. $I_{Env(B1)i}$ and $I_{Eco(B1)}$ can be calculated according to equations (7) and (8).

$$I_{Env(B1)i} = \sum_{l=1}^c (s_l \times f_{Env-li}) \times Y \quad (7)$$

$$I_{Eco(B1)} = \sum_{l=1}^c (s_l \times f_{Eco-l}) \times Y \quad (8)$$

Where,

s_l is the annual amount of substance l generated inside the building (kg/year), f_{Env-li} is the environmental emission factor for each substance l and for each environmental impact category i (kg eq/kg), f_{Eco-l} is the economic factor for each substance l (\$COP/kg), and Y is the lifetime of the building (years).

3.3.4. Calculations for modules B2–B5

These information modules evaluate the activities related to the renovation (maintenance, repair, refurbishment, or replacement) of the building during the use and operation stage. $I_{Env(B2-B5)i}$ and $I_{Eco(B2-B5)}$ can be calculated according to equations (9) and (10), respectively.

$$I_{Env(B2-B5)i} = \sum_{j=1}^d \left[\left(\sum_{k=1}^e (r_{kj} \times f_{Env-rki}) + \sum_{k=1}^e (r_{kj} \times dist_k \times f_{Env-tki}) \right. \right. \\ \left. \left. + \sum_{k=1}^e (d_{kj} \times f_{Env-dki}) + \sum_{k=1}^e (d_{kj} \times dist_k \times f_{Env-tki}) + \sum_{k=1}^e (d_{kj} \times f_{Env-qi}) \right) \times ((f_j \times Y) - 1) \right] \quad (9)$$

$$I_{Eco(B2-B5)i} = \sum_{j=1}^d \left[\left(\sum_{k=1}^e (r_{kj} \times f_{Eco-rk}) + \sum_{k=1}^e (dist_k \times f_{Eco-tk}) + \sum_{k=1}^e (d_{kj} \times f_{Eco-dk}) + \sum_{k=1}^e (dist_k \times f_{Eco-tk}) + \sum_{k=1}^e (d_{kj} \times f_{Eco-qi}) \right) \times ((f_j \times Y) - 1) \right] \quad (10)$$

Where,

r_{kj} is the quantity of material type k corresponding to each building assembly j that is renovated in the existing building assembly (kg), $f_{Env-rki}$ is the environmental emission factor of each renovated material and for each environmental impact category i (kg eq/kg), $dist_k$ is the distance for the transport of the renovated material from the factory to the building site or for the transport of the demolished/deconstructed material from the building to the treatment facility/landfill (km), $f_{Env-tki}$ is the environmental emission factor related to the transport type t used for each material type k and for each environmental impact category i (kg eq/kg km), d_{kj} is the quantity of material type k corresponding to each building assembly j that is demolished/deconstructed (kg), $f_{Env-dki}$ is the environmental emission factor related to the machinery used for the demolition of the material type k included in each demolished building assembly (kg eq/kg), f_{Env-qi} is the environmental emission factor related to the treatment of each demolished/deconstructed material type k for each environmental impact category i (kg eq/kg). Finally, f_j is the annual frequency (number of times/year) of renovation activities carried out in the existing building assembly j during the building's lifespan (Y). And f_{Eco-rk} is the economic factor for each renovated material type k (\$COP/kg), f_{Eco-tk} is the economic factor related to transport type t used for each material type k (\$COP/km), f_{Eco-dk} is the economic factor related to the machinery used for demolition in each material type k (\$COP/kg), and f_{Eco-qi} is the economic factor related to the treatment given to each material type k (\$COP/kg).

3.3.5. Calculations for modules B6–B9

These modules include, according to EN 15978 (2011), the energy used by the building-integrated technical systems during the operation of the building (B6) and the operational water use and its treatment (pre- and post-use) (B7). Additional modules have been incorporated, following the guidelines of EeBGuide (Gantner et al., 2015), the waste generated by occupants (B8) and emissions generated by the transport of the building's occupants (B9). $I_{Env(B6-B9)i}$ and $I_{Eco(B6-B9)i}$ can be calculated according to equations (11) and (12), respectively.

$$I_{Env(B6-B9)i} = \left[el \times f_{Env-el} + ng \times f_{Env-ng} + tw \times f_{Env-tw} + \sum_{h=1}^n [(w_h \times f_{Env-wh}) + (w_h \times d_h \times f_{Env-th})] \right] \times n_{ocup} \quad (11)$$

$$I_{Eco(B6-B9)i} = \left[el \times f_{Eco-el} + ng \times f_{Eco-ng} + tw \times f_{Eco-tw} + \sum_{h=1}^n [(w_h \times f_{Eco-wh}) + (w_h \times d_h \times f_{Eco-th})] \right] \times n_{ocup} \quad (12)$$

Where,

el is the unit annual electricity consumption of the building (kWh), ng is the unit annual natural gas consumption (m^3), tw is the unit annual tap water consumption (m^3), w_h is the unit annual waste generation for each h waste fraction (mixed, glass, paper, etc.) (kg), $f_{env-el/ngi/twi/whi}$ are the environmental emission factors for electricity, natural gas, tap water, and waste fraction, respectively, for each environmental impact category i , d_h is the distance to the treatment facility/landfill for each waste fraction h (km), $f_{env-thi}$ is the environmental emission factor for the transport of each waste fraction h for each environmental impact category i , n_{ocup} is the number of occupants living in the dwelling, $f_{eco-el/ng/tw/wh}$ are the economic factors for electricity, natural gas, tap water, and waste fraction (\$COP/consumption unit), respectively, and f_{eco-th} is the economic factor for the transport of each waste fraction h (\$COP/km).

3.3.6. Calculations for modules C1–C4

These modules include the end-of-life stage of a building, which starts when the building is decommissioned and is not intended to have any further use. At this point, the building's demolition/deconstruction may be considered as a multi-output process that provides a source of materials, products, and building assemblies that are to be discarded, recovered, recycled, or reused. $I_{env(C1-C4)i}$ and $I_{Eco(C1-C4)}$ can be calculated according to equations (13) and (14), respectively.

$$I_{Env(C1-C4)i} = \sum_{j=1}^a \left[\sum_{k=1}^b (d_{kj} \times f_{Env-dki}) + \sum_{k=1}^b (d_{kj} \times dist_k \times f_{Env-tki}) + \sum_{k=1}^b (d_{kj} \times f_{Env-qki}) \right] \quad (13)$$

$$I_{Eco(C1-C4)i} = \sum_{j=1}^a \left[\sum_{k=1}^b (d_{kj} \times f_{Eco-dk}) + \sum_{k=1}^b (dist_k \times f_{Eco-tk}) + \sum_{k=1}^b (d_{kj} \times f_{Eco-qk}) \right] \quad (14)$$

Where,

d_{kj} is the quantity of material type k corresponding to each building element j that is demolished/deconstructed (kg), $f_{Env-dki}$ is the environmental emission factor related to the machinery used for demolition in each material type k (kg eq/kg), $dist_k$ is the distance for the transport of the demolished/deconstructed material from the building to the treatment facility/landfill (km), $f_{Env-qki}$ is the environmental emission factor related to the treatment of each demolished/deconstructed material type k for each environmental impact category i (kg eq/kg). And f_{Eco-dk} is the economic factor related to the machinery used for demolition in each material type k (\$COP/kg), f_{Eco-tk} is the economic factor related to transport type t used for each material type k (\$COP/km), and f_{Eco-qk} is the economic factor related to the treatment given to each material type k (\$COP/kg).

4. Results and discussion

Based on the requirements established and the database and calculations development described in Section 3, the tool was designed using the programming language Visual Basic for Applications (VBA) in Microsoft Excel Professional Plus (Microsoft, 2019). It was developed in the official language of Colombia, Spanish. The following subsections describe, on the one hand, the conceptual design interface, consisting of a main menu and the modules for input data and output data; and on the other hand, a case study applied to a residential building in Mosquera (Colombia).

4.1. Building LCA|LCC tool design

4.1.1. Main menu

The main menu (Table VI-4) is permanently visible on the left-hand side of the screen and allows users to access the data entry and results screens by means of intuitive graphical buttons. It has been structured into two main modules (input data and output data) connected by the database and calculations described above. The database and calculation formula remains hidden to the user, although the database offers the developer the possibility to update and/or add new data.

Once the required input data for a specific case study have been entered, the necessary buttons are automatically activated in the left-hand main menu, allowing the user to move and navigate smoothly from one button to another. Intuitive and representative icons have been designed and included in the tool to facilitate the identification of the modules and screens.

Figure VI-4 presents on the left-hand side the main menu, and on the right-hand side, conceptually, the input/output data in different sections/screens. Some parameters must be manually entered by the user; others can be selected from a drop-down cell, while some others are automatically filled in once specific parameters have been entered (marked as grey text in Figure VI-4). Furthermore, the related databases from where the data are retrieved for calculations are indicated in blue boxes. Additionally, modules that provide default data, furnishing users with options to enter unknown or inaccessible data, are indicated in green boxes.

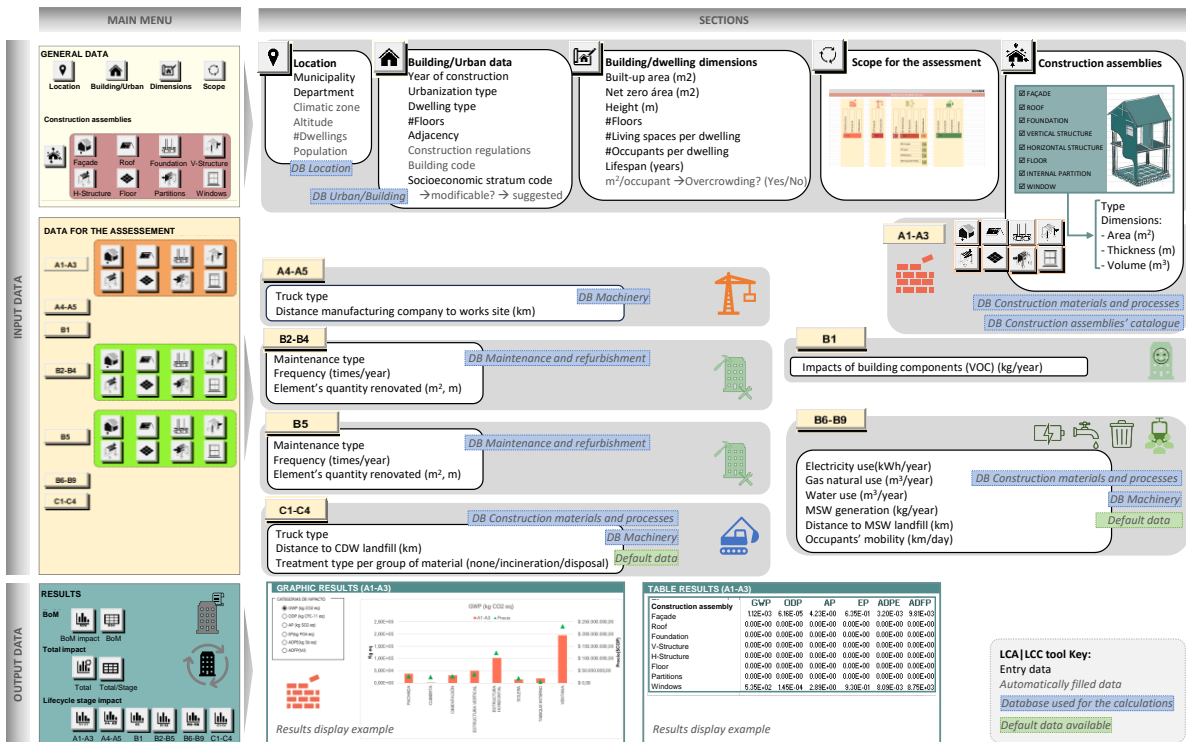
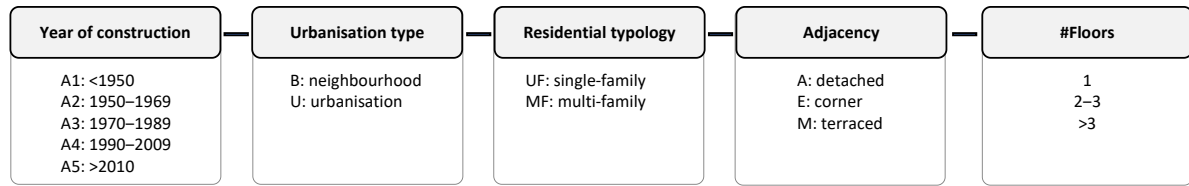


Figure VI- 4. Building LCA|LCC tool interface

4.1.2. Input data

The required input data for calculations includes information about the building and its components, as described in detail below and represented graphically in Figure VI-4:

- General data:
 - Location: the Colombian municipality and department where the building is located must be introduced and, automatically, the tool returns information on the climatic zone, the altitude, the population, and the number of dwellings in the municipality, retrieved from the Location database, as indicated in Figure VI-2.
 - Building/Urban data: once the year of construction, the urbanisation type, the residential typology, the adjacency, and the number of floors have been introduced, the tool generates a building code using these parameters jointly (see Figure VI-5). The existing building typologies in Colombia's temperate and cold climates are retrieved from the Urban/Building database (see Figure VI-3), along with the socioeconomic stratum where the building is located, according to the proposal of the Colombian government guidelines (DANE, 2015). In addition, the Colombian regulations applicable to the building are also retrieved from the Urban/Building database and returned to the screen.



Code exemple for **A3-B-UF-M-2/3** Building tipology: terraced single-family house, with 2–3 floors, built between 1970–1989 in a neighbourhood urban area

Figure VI- 5. Building code formation (proposed in Jorge-Ortiz et al. (2024))

- Building dimensions: built-up area and net zero area (m²), height (m), number of floors, number of living spaces, number of occupants in the dwelling, and the building's lifespan (years). The tool returns information on the area per occupant (m²/occ.) and whether the housing unit is overcrowded or not.
- Scope for the assessment: according to EN 15978 (2012) and the principle of modularity, the impacts are assigned to each life cycle information module. Two additional information modules beyond the scope of EN 15978 (2012), which consider the occupants' lifestyles, were included by the authors following the recommendations in the EeBGuide project (Gantner et al., 2015). As a result, the life cycle information modules included in the tool, and which must be selected by the user to define the scope for the assessment, are the following: (A1–A3), (B1), (B2–B4), (B5), (B6–B7), (B8), (B9) and (C1–C4).
- Construction assemblies selection: in this section the user must select the items (façade, roof, V-structure, floor, etc.) to be included in the evaluation.

Data for the assessment, structured in life cycle modules:

- A1–A3. Construction assemblies: once an item has been selected in the General Data section, its specific button is automatically activated, and a new screen appears in which to enter construction data. The screen intuitively assists the user in the item definition, allowing them to select the construction assembly type from among several options displayed in a drop-down cell, retrieved from the Construction assemblies catalogue database (Table 4). The dimensions of the element must also be introduced here (area, m², thickness, m, volume, m³). The construction assembly's material composition is used to calculate the Bill of Materials (BoM), which is key in modules A1–A3 for determining the embodied impacts of the building. Also, the resulting BoM are used in C1–C4, to determine the impact of CDW generated at the EoL stage.
- A4–A5. Construction processes information: for each group of materials (additives, insulation material, aggregates, plastics, mortars, etc.), the user must provide information related to the transportation (type of truck and distance, in km) from its manufacturing company to the works site. Data for calculations are retrieved from the Machinery database (Table 6).
- B1. Impacts related to the normal use of building components: herein, chemical substances, mainly VOC emissions, generated by materials and finishings in the indoor environment during the use stage, either by their degradation or by maintenance activities, are contemplated. The list of chemical substances considered is based on the approved guide of NTP 521 (INSST, 2005), namely, formaldehyde, xylenes, toluene, toluene diisocyanate,

acetone, chloroform, benzene, butyl acetate, radon, acetaldehyde, and asbestos fibres. The user must introduce the quantity in kg/year.

- B2–B5. Maintenance and refurbishment activities during the use stage: the tool considers the possibility of the building's elements/assemblies being maintained (B2), repaired (B3), replaced (B4), or refurbished (B5), during the use stage. For this purpose, a set of renovation alternatives were designed and modelled for the building elements in the Maintenance and refurbishment database (Table 5), which can be selected by the user from a drop-down cell, together with the frequency of the renovation (times/year) and the total quantity of renovated element (area, m², thickness, m).
- B6–B9. Consumption and operational information during the use stage: the input and output flows related to the operation of the building during its lifespan are introduced herein. These are the energy use (B6) within the typical Colombian energy mix (electricity, kWh/year, and/or natural gas, m³/year), water use (B7) (m³/year), the generation of MSW (B8) (quantity, kg/year, and distance from the building to the MSW landfill, km), and the mobility of occupants (B9) related to their daily activities by different means of transport (km/day by private car, motorbike, or public transport). To this end, both the Construction materials and processes database (Table VI-3) and the Machinery database (Table VI-6) are used.
- C1–C4. CDW management information during EoL: herein, the construction and demolition waste management from the demolition of the building at the end of its lifespan is considered. The kind of treatment considered for the CDW can be selected from a drop-down cell from among various options included in the EoL database (Table VI-7) (none, incineration, and final disposal), as well as the type of truck (Machinery database in Table VI-6) and the distance from the building site to the CDW landfill (km). The quantity of CDW generated is estimated from the BoM of construction assemblies, previously calculated for modules A1–A3.

Since certain kinds of data are not easily accessible, unavailable, or can be difficult for users to estimate, some sections offer the possibility to introduce default data, to facilitate calculations. These are the energy and water use consumption, MSW generation, and distances from the building to CDW landfills, taken from Colombian Resolution 0549/2015 (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2015); and the waste generation and occupant mobility values from DANE (2019) projections.

4.1.3. Output data: report

Once the input data have been entered, the tool performs the calculations described in Section 3.3 internally, offering the user the possibility to visualise the results in two different ways: by means of tables and graphically (Figure VI-4). The results are displayed to the user as follows:

- Bill of Materials (BoM): the quantities presented both in tables and graphically, split into material groups (additives, insulation, aggregates, etc.). On the one hand, the quantities in kg of the input materials for the construction of the building are presented, and on the other hand, the quantities of CDW generated, split into treatment given or disposal. The results are also expressed in percentages in a pie chart.

- Environmental impact of BoM: this is outlined in a bar graph by material group and quantity. A selection box allows the user to move from one environmental impact category to another (GWP, ODP, AP, EP, ADPE, and ADFP).
- Environmental impact, for the whole building: this is presented in a bar graph split into life cycle stages (A1–A3, A4, A5, B1, B2–B4, B5, B6, B7, B8, B9, C1, C2, C3, C4). A selection box allows the user to move from one environmental impact category to another (GWP, ODP, etc.). Furthermore, the user can visualise the numerical values in a table, both in total and by life cycle stage.
- Environmental and economic impact, by life cycle stage: a more detailed analysis of results is provided by means of a set of bar graphs, one specific graph for each life cycle stage, where both the environmental and economic impacts, when considered, are indicated. For modules A1–A3 and B2–B5, related to building elements/assemblies, the tool performs an eco-efficiency analysis, including together environmental and economic impact (in \$COP) results. A selection box allows the user to move from one environmental impact category to another (GWP, ODP, etc.). The results are shown depending on the related information; for instance, for modules A1–A3 and B2–B5, the results are split according to building element (façade, structure, foundation, etc.), and for the use/operation stage, results are displayed for each specific activity: electricity and natural gas consumption in B6; water consumption and treatment in B7; MSW treatment and disposal in B8; and the impact related to the use of private car, motorbike, and bus in B9.

4.2. Case study

4.2.1. Description: a residential building in Mosquera (Colombia)

The case study where the LCA|LCC tool was applied is a detached multi-family residential building located in the urban area of the municipality of Mosquera (Cundinamarca, Colombia). The building was built in 2013 within a socio-economic stratification 3, being catalogued as VIS (*vivienda de interés social* — social housing) by the Colombian government. The building has a built-up area of 1,183.95 m² distributed over six floors, each one having four dwellings with a floor area of 42 m². Each dwelling consists of three bedrooms, two bathrooms, a living room, a kitchen, and a laundry room, as Figure VI-6 shows. The main building elements are a V-structure made of concrete formwork wall, an H-structure made of concrete beams, a brick facing façade without insulation, a sloped roof with fibrocement tiles, and aluminium windows with single glazing. The dwellings lack any HVAC system or domestic hot water system.

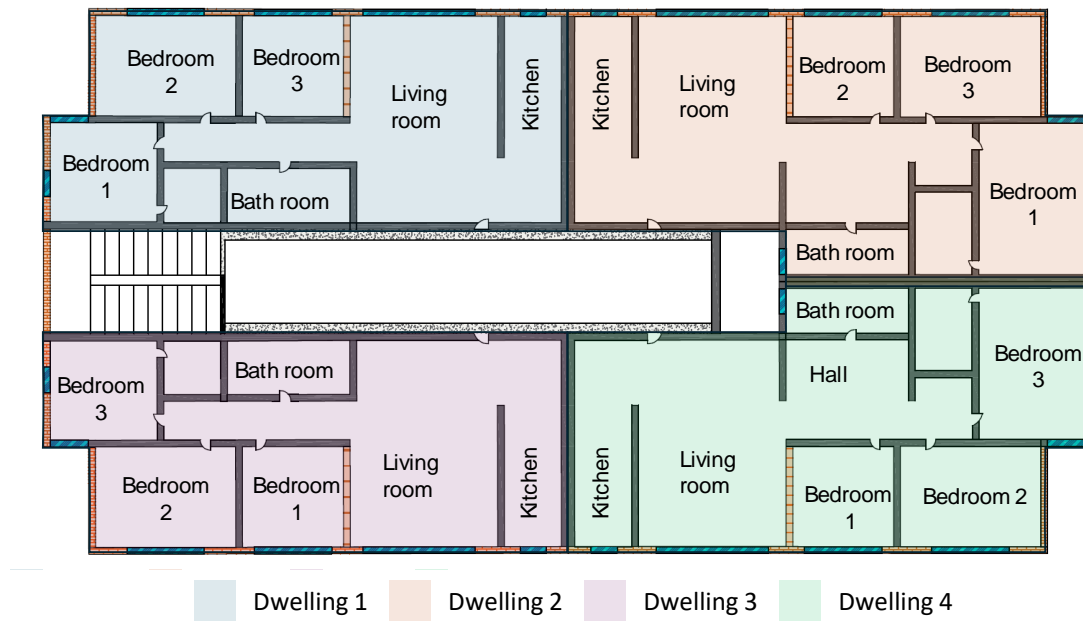


















Figure VI- 6. Layout of the standard floor plan of the building

4.2.2. Input data

The scope for the study includes all the life cycle stages. The building elements to be analysed are the façade, roof, vertical and horizontal structure, internal partitions, and windows. The reference lifespan of the building considered is 80 years. Table VI-7 presents in detail the input data for the case study.

Table VI- 7. Transport and machinery data

Tool section	Tool icon	Parameter	Data entry
GENERAL DATA			
Location		Department	Cundinamarca
		Municipality	Mosquera
Building/Urban data		Year of construction	2013
		Urbanisation	Urbanisation
		Dwelling type	Multi-family
		No. of floors	>3 floors
		Adjacency	Detached (A)
		Stratum according to Colombian taxation	Stratum 3
		Building/Dwelling dimensions	
Net zero area	1,066.20 m ²		
Building height	19.5 m		
No. of living spaces building/dwelling	72/3		
No. occupants building/dwelling	96/4		
Lifespan	80 years		
No. of floors (building)	6		
Construction assemblies		Façade	Caravista brick (F-A3-1H-LT-CV)
		Roof	Sloped (CP-A5-VH-HA-CAT)

Tool section	Tool icon	Parameter	Data entry
GENERAL DATA			
		Foundation	Reinforced concrete slab (EC-A4-CS-HA-Ø(L))
		Vertical structure	Concrete formwork wall (EV-A5-SE-HA-E)
		Horizontal structure	Concrete beams (EH-A4-VH-CC-PC)
		Floor	Ceramic flooring
		Internal partitions	Hollow brick (TI-A4-1H-LH-EY)
		Windows	Aluminium
DATA FOR THE ASSESSMENT			
A1–A3		South façade area	28.09 m ²
		North façade area	28.09 m ²
		West façade area	11.12 m ²
		East façade area	21.50 m ²
		Façade thickness	0.13 m
		Roof area	205 m ²
		Foundation area	61.5 m ³
		Vertical structure area	830.09 m ²
		Vertical structure thickness	0.13 m
		Horizontal structure area	793.32 m ²
		Floor area	205 m ²
		Internal partition area	155.52 m ²
		Internal partition thickness	0.13 m
		Window area	281.72 m ²
Window thickness	0.05 m		
A4–A5		Truck type	Default values
		Distance from factory to works site	Default values
B1		Formaldehyde presence	89 kg/year
		Acetone presence	768 kg/year
		Radon presence	98 kg/year
B2–B5		Façade maintenance or repair type	Cleaning
		Frequency	2 times/year
		Façade maintenance area	88.78 m ²
		Façade maintenance thickness	0.13
		Roof maintenance or repair type	Cleaning
		Frequency	Once a year
B6–B9		Electricity consumption	Default values
		Natural gas consumption	Default values
		Water consumption	Default values
		Municipal solid waste generation	Default values
		Distance to disposal site	Default values
C1–C4		Vehicle type	Truck 16–32 tn
		CDW treatment type	None
		CDW disposal type	Landfill

4.2.3. LCA|LCC results

After entering the input data, the LCA|LCC tool conducted calculations and returned the results for the environmental and economic assessment of the building under study. Figure VI-7, Figure VI-8 and Figure VI-9 present the results in the same way that the LCA|LCC tool shows them to the user. Figure

VI-7 displays the BoM results (in kg) and the environmental impact for the GWP category (kg CO₂ eq), split into material groups. As shown, despite aggregates being the most abundant material, followed by cements and masonry, they are not the elements with the highest impact — these being aluminium carpentry and mortars, followed by cements and aggregates.

Figure VI-8 displays the whole building’s environmental impact split into each building’s life cycle stage, for the GWP. The stage with the highest impact is that of use/operation, predominantly module B6 (operational energy use), followed by the product stage of modules A1–A3 (raw materials supply, transport, and manufacturing). It is worth noting that modules B8 and B9 (mobility of occupants for daily activities) which are not included in the standard EN 15978 (EN 15978, 2012) should not be overlooked, since they have a relevant environmental impact on the whole building’s life cycle stage. Therefore, the tool provides added value in this sense and differentiates itself from others.

Figure VI-9 displays in detail, as an example, the environmental and economic impact for modules A1–A3 within the Product stage, divided by building element. As shown, aluminium windows are the element with the highest impact, followed by the building’s structure and foundation (horizontal and vertical, made of aggregates and cement) and the façade made of tolete brick. The graph shows together the economic impact in terms of cost (\$COP) for each element. The user can choose in the tool the desired results to be shown in detail for each building’s life cycle stage (A1–A3, Product; A4–A5, Construction process; B1, Use; B2–B5, Use maintenance; B6|B7|B8|B9, energy, water, waste, and mobility; and C1–C4 EoL). The complete results for the case study are included in the Supplementary material, as well as the results for the other environmental impact categories (ODP, AP, EP, ADPE, and ADFP) that can be displayed by the tool, just by the user clicking the required indicator on the selection box. In addition to the graphic presentation, the results are provided by the tool in tables in a numerical format, both in total terms and split into life cycle stage and material group or building element.

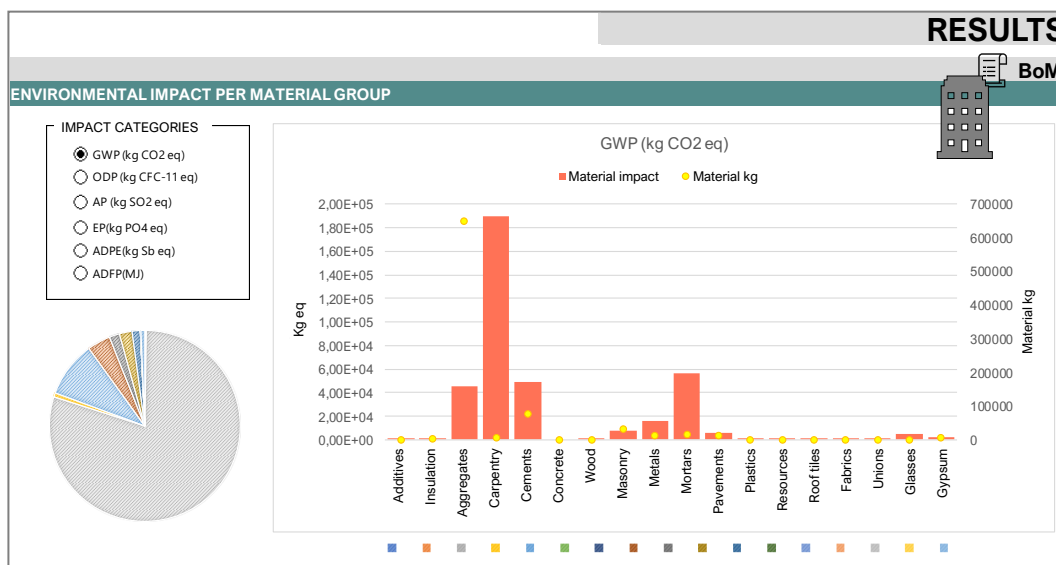


Figure VI- 7. BoM results and BoM impact for the whole building, by material group

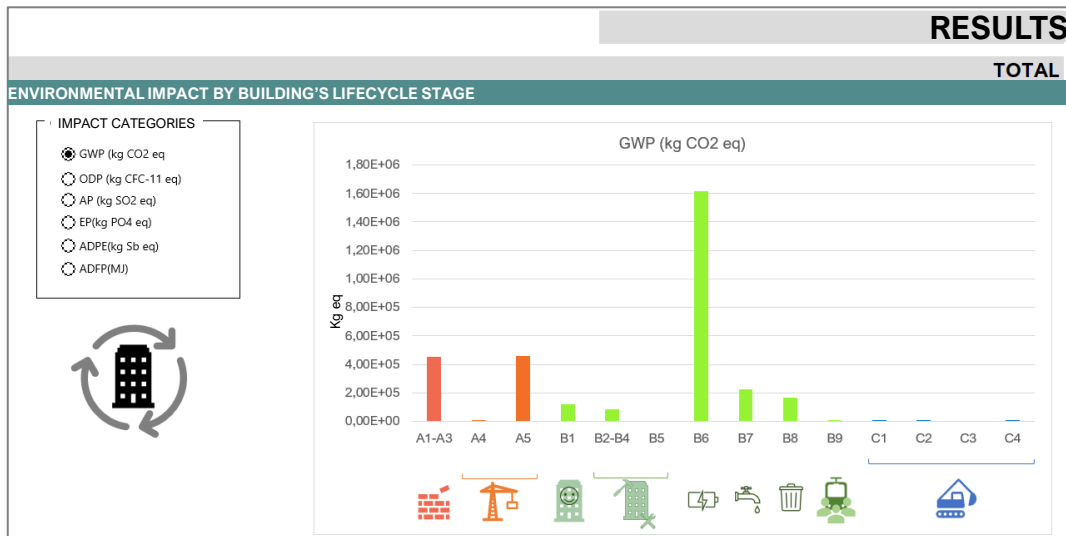


Figure VI- 8. Total environmental impact by the building's life cycle stage (for the whole building)

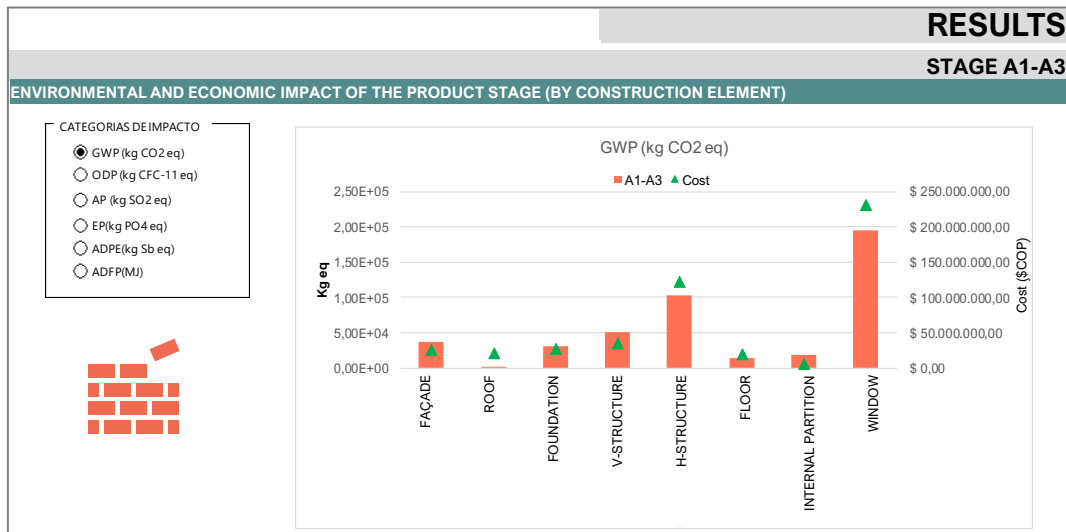


Figure VI- 9. Environmental and economic impact for the product stage (A1-A3), by construction assembly

5. Conclusion

This work presents the entire design process of a tool intended to assess the environmental and economic performance of residential buildings in the context of Colombia, which integrates a life cycle approach aligned to LCA and LCC methodologies and includes all the necessary data and calculation algorithms to assist the user with the assessment in an intuitive and user-friendly manner. The motivation of the study was to bridge the gap of a lack of context-specific tools for the country — tools which integrate contrasted data to provide well-founded results and which are aligned with government guidelines and regulations.

To this end, it was especially important to make major efforts to develop an exhaustive database containing information about geographical locations; urban context data, both physical and socio-

economic; and the construction techniques, materials and building elements/assemblies typically used throughout Colombian history. A Colombian construction assemblies catalogue was created as part of this work — something which had not previously been developed in the literature. Furthermore, the tool includes information on maintenance and refurbishment activities, which are usually overlooked by the existing tools. The database incorporates both environmental and economic factors specific to the region in order to conduct LCA and LCC assessments, regarding items such as the electricity mix, the existing surrounding factories, and the average distances from manufacturers to construction site and landfill, among others. When a building's data are not available, the tool suggests default values to the user, which also reduces the time involved in data entry. The database can be also updated and extended by the developers to include new materials. A noteworthy aspect is that the integration of all the data and information together in a common environment allows the user to evaluate the building without requiring external auxiliary calculations or consultations, which also contributes to mitigate time-consuming assessments.

The assessment scope approaches a whole life cycle perspective integrating the stages proposed by EN 15978, Product (A1–A3), Construction process (A4–A5), Use/operation (B1–B7) and EoL (C1–C4), but it goes further than the standard and includes two additional modules related to the use stage — these being solid waste management generated by occupants (B8) and the occupants' mobility and transport for daily activities (B9), neither of which are included among the existing tools.

Regarding interface and usability, the tool has been conceived to be user-friendly, presenting a clear structure with different modules or sections to easily enter the input data, and with an improved appearance featuring graphical icons and colours specifically created to facilitate intuitive management and usage of the tool. The results are presented both graphically in bar/pie charts and numerically in tables, and split into life cycle stages and modules, building elements and material groups, to provide the maximum amount of disaggregated information to users and enable them to make informed decisions.

The tool, thus, can be used both as a design instrument in the early stages of the building process for new buildings (briefing, planning, and project) by planners, architects, and engineers; or as a decision-making instrument to assist stakeholders in the renovation of existing buildings when considering and evaluating alternative scenarios.

The tool has been applied to a case study in a real multi-family residential building in Mosquera (Colombia), demonstrating its applicability and confirming the aspects discussed above. The results showed how the environmental and economic evaluation of the building can clearly communicate to users detailed information on the impact throughout the various building life cycle stages, which materials and building elements/assemblies have the highest impact, and how the tool can assist them in decision-making. In addition, and as depicted from the case study results, modules B8 and B9 should not be underestimated, as they have a great impact, despite not being included in EN 15978. This aspect gives added value to the tool and differentiates it from others, this being a noteworthy aspect.

Among the limitations of the tool, it should be noted that, to date, the tool has been developed to perform analyses of buildings located in the temperate and cold climates of Colombia. Further efforts will be made to approach all climatic zones in the country. Furthermore, although the construction assemblies catalogue includes a long list of typical items used in the country, it is not exhaustive. However, the database can be updated with new materials and assemblies, which can be progressively added to complete it. An Excel version of the tool is currently available, although an online version is planned for the future, which will be available free of charge following registration.

The results of the study can be used by stakeholders involved in the construction process, such as designers (planners, architects, and engineers) and contractors, and also public administration (government, regional, and local authorities, etc.) to make progress in the development of environmental and building stock renovation policies in the construction and buildings sector. The methodology proposed in this study to design the LCA|LCC tool, despite being applied specifically to residential buildings in the Colombian context, can be adapted to develop other similar tools intended to evaluate buildings with other particularities.

6. References

- Aceros AZA S.A., 2017. Declaración Ambiental de Producto Barras de Refuerzo Acero, The International EPD System.
- ACESCO, 2016. Declaración ambiental de producto. Teja de zinc.
- AENOR, 2017a. Declaración Ambiental de Producto Ladrillos cerámicos.
- AENOR, 2017b. Declaración Ambiental de Producto. Tejas cerámicas.
- AENOR, Cementos capa S.L, 2019. Declaración Ambiental de Morteros para juntas.
- AENOR, Chemical Building Project, 2020. Declaración Ambiental de Producto Morteros para revoco y enlucido.
- AENOR, PROPAMSA, 2021. Declaración Ambiental de Producto individual de empresa. Morteros para revoco y enlucido.
- Amini Toosi, H., Lavagna, M., Leonforte, F., Del Pero, C., Aste, N., 2020. Life Cycle Sustainability Assessment in Building Energy Retrofitting; A Review. *Sustain. Cities Soc.* 60, 102248. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102248>
- ANFAPA, 2017. Declaración Ambiental de Mortero para la colocación de baldosas cerámicas.
- Apostolopoulos, V., Mamounakis, I., Seitaridis, A., Tagkoulis, N., Kourkoumpas, D.S., Iliadis, P., Angelakoglou, K., Nikolopoulos, N., 2023a. An Integrated Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing Approach Towards Sustainable Building Renovation Via a Dynamic Online Tool. *Appl. Energy* 334, 120710. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120710>
- Apostolopoulos, V., Mamounakis, I., Seitaridis, A., Tagkoulis, N., Kourkoumpas, D.S., Iliadis, P., Angelakoglou, K., Nikolopoulos, N., 2023b. An Integrated Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing Approach Towards Sustainable Building Renovation Via a Dynamic Online Tool. *Appl. Energy* 334, 120710. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120710>

- Arbulu, M., Oregi, X., Etxepare, L., 2023. Environmental and economic optimization and prioritization tool-kit for residential building renovation strategies with life cycle approach. *Build. Environ.* 228, 109813. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109813>
- Asdrubali, F., Baldassarri, C., Fthenakis, V., 2013. Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings. *Energy Build.* 64, 73–89. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.018>
- Athena Sustainable Materials Institute, 2022. Athena]. URL <http://www.athenasmi.org/our-software-data/lca-databases/>
- BARBIERI, 2021. Declaración Ambiental de Producto. Perfiles de acero galvanizado drywall.
- Basbagill, J.P., Flager, F.L., Lepech, M., 2014. A multi-objective feedback approach for evaluating sequential conceptual building design decisions. *Autom. Constr.* 45, 136–150. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.04.015>
- BBSR, 2021. ökobau.dat [WWW Document]. URL <http://www.oekobaudat.de/archiv/oekobaudat-2011.html>
- BRANZ, 2022. LCAQuick: Life cycle assessment tool. URL <https://www.branz.co.nz/environment-zero-carbon-research/framework/lcaquick/>
- Building transparency, 2024a. URL BHoM. <https://bhom.xyz/>
- Building transparency, 2024b. EC3. URL <https://www.buildingtransparency.org/ec3-resources/ec3-docs/>
- Buitelaar, E., Moroni, S., De Franco, A., 2021. Building obsolescence in the evolving city. Reframing property vacancy and abandonment in the light of urban dynamics and complexity. *Cities* 108, 102964. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102964>
- CAATEEB, 2011. Declaración ambiental de Producto Baldosa cerámica prensada en seco.
- Cementos capa S.L, 2024. Declaración Ambiental de Morteros para reparación.
- COM 662, 2020. A Renovation Wave for Europe - greening our buildings, creating jobs, improving lives.
- COM445, 2014. Comunicación de la Comisión al parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las regiones oportunidades para un uso más eficiente de los recursos en el sector de la construcción. Bruselas.
- CYPE Ingenieros S.A., 2022. Generador de precios de la construcción. Colombia. URL <http://www.colombia.generadordeprecios.info/>
- DANE, 2019. Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. Bogotá. Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia.
- DANE, 2018. Boletín técnico Encuesta Multipropósito (EM) 2017 Bogotá 18 de julio de 2018, Boletín técnico DANE. Bogotá. Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia.
- DANE, 2015. Metodología de estratificación socioeconómica urbana para servicios públicos domiciliarios. Bogotá. Departamento Administrativo Nacional de Estadística de Colombia.
- Danosa Building Together, 2019a. Declaración Ambiental de Producto de Sistemas de Impermeabilización con Membrana Bituminosa.
- Danosa Building Together, 2019b. Declaración ambiental de productos de plancha de aislamientos térmico de espuma de poliestireno extruido (XPS).

- Dapco, 2022. Declaración ambiental de producto. Trasdado de yeso.
- Dapco, 2016. Declaración ambiental de productos. Fibrocemento Volcanboard.
- Ecoinvent, 2020. Ecoinvent Database. URL <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>
- EHDD, 2024. EPIC. URL <https://epic.ehdd.com/>
- EN 15804, 2013. Standards Publication Sustainability of construction works — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products.
- EN 15978, 2012. Sustainability of Construction Works - Assessment of Environmental Performance of Buildings - Calculation Method. España.
- EPD Italy, 2018. Environmental Product Declaration Ceramic tiles.
- EPD Latin America, 2021. Environmental Product Declaration. Indoor gypsum boards.
- EPD Latin America, 2019a. Concrete Environmental Product Declaration.
- EPD Latin America, 2019b. Environmental Product Declaration. Gypsum boards.
- eTool, 2016. Life Cycle Assessment. International Residential Benchmark.
- European Commission, 2022. Eurostat:Sustainable Development in the European Union, Sustainable Development in the European Union.
- Evangelista, P.P.A., Kiperstok, A., Torres, E.A., Gonçalves, J.P., 2018. Environmental performance analysis of residential buildings in Brazil using life cycle assessment (LCA). *Constr. Build. Mater.* 169, 748–761. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.045>
- Famiglietti, J., Toosi, H.A., Dénarié, A., Motta, M., 2022. Developing a new data-driven LCA tool at the urban scale: The case of the energy performance of the building sector. *Energy Convers. Manag.* 256. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115389>
- FEICA, 2016. Environmental Product Declaration Sikafloor®-156.
- Feng, H., Zhao, J., Hollberg, A., Habert, G., 2023. Where to focus? Developing a LCA impact category selection tool for manufacturers of building materials. *J. Clean. Prod.* 405. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136936>
- Fu, F., Luo, H., Zhong, H., Hill, A., 2014. Development of a carbon emission calculations system for optimizing building plan based on the LCA framework. *Math. Probl. Eng.* 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/653849>
- Gantner, J., Wittstock, B., Lenz, K., Fischer, M., Sedlbauer, K., 2015. EeBGuide Guidance Document - Part B: Buildings Operational guidance for Life Cycle Assessment studies of the Energy Efficient Building Initiative. Stuttgart.
- Gillott, C., Mihkelson, W., Lanau, M., Cheshire, D., Densley Tingley, D., 2023. Developing regenerate: A circular economy engagement tool for the assessment of new and existing buildings. *J. Ind. Ecol.* 1–13. <https://doi.org/10.1111/jiec.13377>
- González, K., Pérez, L.F., Galeano, E., 2019. Análisis del ciclo de vida de un edificio residencial en Colombia. *Inventum* 14, 3–14. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.14.27.2019.3-14>
- González Velandia, K.D., Pérez, L.F., Galeano, E., 2019. Análisis del ciclo de vida de un edificio residencial en Colombia. *Inventum* 14, 3–14. <https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.14.27.2019.3-14>

- GreenDelta, 2021. LCIA Methods & Databases. URL <https://www.openlca.org/lcia-methods-databases/>
- Grupo Puma, 2023. Declaración Ambiental de Morteros para revoco y enlucido.
- Hassan, S.R., Megahed, N.A., Abo Eleinen, O.M., Hassan, A.M., 2022. Toward a national life cycle assessment tool: Generative design for early decision support. *Energy Build.* 267, 112144. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112144>
- Hester, J., Gregory, J., Ulm, F.J., Kirchain, R., 2018. Building design-space exploration through quasi-optimization of life cycle impacts and costs. *Build. Environ.* 144, 34–44. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.08.003>
- Hollberg, A., Kiss, B., Röck, M., Soust-Verdaguer, B., Wiberg, A.H., Lasvaux, S., Galimshina, A., Habert, G., 2021. Review of visualising LCA results in the design process of buildings. *Build. Environ.* 190. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107530>
- IECA, 2022. Declaración ambiental de producto Cemento CEM II.
- INSST, 2005. NTP 521: Indoor air quality: Emissions from building materials and cleaning products.
- Institut Bauen und Umwelt, 2019. Environmental Product Declaration Hot dip galvanized steel with pure Zinc coating.
- Institut Bauen und Umwelt, 2017. Expanded Polystyrene (EPS) Foam Insulation.
- International EPD System, 2022. Declaración ambiental de producto Morteros de fijación.
- International EPD System, 2019a. Product category rules (PCR): Buildings.
- International EPD System, 2019b. Environmental product declaration. Morteros.
- International EPD System, 2017a. Environmental Product Declaration - Environmental Product Declaration.
- International EPD System, 2017b. EPD Lime paint Graphenstone.
- International EPD System, 2016. Environmental Product Declaration. Flat glass products.
- ISO 14040, 2006. Environmental management - Life Cycle Assessment - Principles and Framework.
- ISO 15686-5, 2017. Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 5: Life-cycle costing.
- IVE, 2022. Base de datos de construcción. URL <https://bdc.f-ive.es/BDC22/1>
- IZUBA, 2019. Informations générales sur Pleiades ACV URL https://docs.izuba.fr/v4/fr/index.php/Informations_générales
- IZUBA, n.d. L'optimisation énergétique des bâtiments. URL : <https://www.izuba.fr/>
- Jorge-Ortiz, A., Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M., 2022a. Residential building stock characterization of Mosquera (Colombia) from urban level to construction assemblies, in: 26th International Congress on Project Management and Engineering (Terrassa), CIDIP 2022. Terrassa. Spain, pp. 393–406.
- Jorge-Ortiz, A., Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M.D., 2024. Caracterización del parque edificatorio residencial de los pisos térmicos frío y templado en Colombia. *Cuad. Geogr. Rev. Colomb. Geogr.* 33, 234–251. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v33n1.103672>

- Jorge-Ortiz, A., Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M.D., 2022b. Análisis de ciclo de vida en el sector de la edificación residencial: estado del arte, in: 26th International Congress on Project Management and Engineering (Terrassa), CIDIP 2022. pp. 407–419.
- Kanafani, K., Zimmermann, R.K., Rasmussen, F.N., Birgisdóttir, H., 2021. Learnings from developing a context-specific LCA tool for buildings—the case of Icabyg 4. *Sustain.* 13, 1–23. <https://doi.org/10.3390/su13031508>
- KTINNOVATIONS, 2014. Tally- Autodesk. URL <https://choosetally.com/>
- Kumanayake, R., Luo, H., 2018. A tool for assessing life cycle CO2 emissions of buildings in Sri Lanka. *Build. Environ.* 128, 272–286. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.11.042>
- Leiden University, 2016. CML-IA. URL <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors>
- Li, D., Cui, P., Lu, Y., 2016. Development of an automated estimator of life-cycle carbon emissions for residential buildings: A case study in Nanjing, China. *Habitat Int.* 57, 54–163. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2016.07.003>
- Llatas, C., Bizcocho, N., Soust-Verdaguer, B., Montes, M. V., Quiñones, R., 2021. An LCA-based model for assessing prevention versus non-prevention of construction waste in buildings. *Waste Manag.* 126, 608–622. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.047>
- Martínez, A.G., Casas, J.N., 2012. Life Cycle Assessments of Three Dwellings in Andalusia (Spain): the Significance of the Regional Context / Trijų Gyvenamųjų Būstų Andalūzijoje (Ispanija) Gyvavimo Ciklo Vertinimas: Reikšmė Regiono Kontekste. *Moksl. - Liet. ateitis* 4, 106–112. <https://doi.org/10.3846/mla.2012.22>
- Microsoft, 2019. Microsoft Excel Professional Plus. <https://www.office.com/>
- Ministerio de Transporte, 2012. Costo por movilización y por tiempos logísticos - Septiembre 2012 - Definitivo ministerio. Gobierno de Colombia.
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2015. Resolución 0549 de 2015. Parámetros y lineamientos de construcción sostenible y se adopta la guía para el ahorro de agua y energía en Edificaciones. Colombia.
- Moňoková, A., Vilčeková, S., 2019. Environmental impact analysis of five family houses in Eastern Slovakia through a life cycle assessment. *Sel. Sci. Pap. - J. Civ. Eng.* 14, 81–92. <https://doi.org/10.1515/sspjce-2019-0009>
- Mouton, L., Trigaux, D., Allacker, K., Crawford, R.H., 2022. Development of environmental benchmarks for the Belgian residential building stock. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 1078. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012077>
- One Click LCA, 2021. One Click LCA® LIFE CYCLE ASSESSMENT FOR BUILDINGS.
- Ortiz-Rodríguez, O., Castells, F., Sonnemann, G., 2010. Life cycle assessment of two dwellings: One in Spain, a developed country, and one in Colombia, a country under development. *Sci. Total Environ.* 408, 2435–2443. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.02.021>
- OVAM, Environment Brussels, Public Service of Wallonia, 2024. TOTEM.
- Pattern r+d, 2024. cove.tool. URL: <https://cove.tools/>
- Peng, C., 2016. Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling. *J. Clean. Prod.* 112, 453–465. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.078>

- Petrovic, B., Myhren, J.A., Zhang, X., Wallhagen, M., Eriksson, O., 2019. Life cycle assessment of a wooden single-family house in Sweden. *Appl. Energy* 251, 113253. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.056>
- Placo Saint-Gobain, n.d. Declaración Ambiental de producto. Pasta para juntas de yeso.
- PPG Architectural Finishes, 2018. Environmental Product Declaration – SEAL GRIP® Acrylic Universal Primer / Sealer.
- Prè Consultants, 2016. SimaPro Database 8.3.2. URL: <https://simapro.com/>
- Rodrigues, C., Kirchain, R., Freire, F., Gregory, J., 2018. Streamlined environmental and cost life-cycle approach for building thermal retrofits: A case of residential buildings in South European climates. *J. Clean. Prod.* 172, 2625–2635. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.148>
- Saint Gobain, 2021. Environmental product declaration mineral wool 33, 1–17. URL: <https://www.isover-technical-insulation.com/documents/epd/epd-unfaced-ultimate-slabs-and-rolls-dec2021.pdf>
- Saint Gobain, 2017. Declaración ambiental de producto lana de vidrio.
- Säwén, T., Magnusson, E., Sasic Kalagasidis, A., Hollberg, A., 2022. Tool characterisation framework for parametric building LCA. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 1078. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012090>
- Solís-Guzmán, J., Rivero-Camacho, C., Alba-Rodríguez, D., Martínez-Rocamora, A., 2018. Carbon footprint estimation tool for residential buildings for non-specialized users: OERCO2 project. *Sustain.* 10. <https://doi.org/10.3390/su10051359>
- Song, Y., Zhang, H., Mo, H., 2021. A LCA-based Optimization Method of Green Ecological Building Envelopes: A Case Study in China. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 696. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/696/1/012023>
- Sphera, 2021. GaBi Solutions. URL <https://abi.sphera.com/international/databases/>
- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M., 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Researchgate.Net. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Tecchio, P., Gregory, J., Olivetti, E., Ghattas, R., Kirchain, R., 2019. Streamlining the Life Cycle Assessment of Buildings by Structured Under-Specification and Probabilistic Triage. *J. Ind. Ecol.* 23, 268–279. <https://doi.org/10.1111/jiec.12731>
- Tomková, Z., 2020. LCA analysis of Slovak residential building. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 867. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/867/1/012043>
- Trigaux, D., Oosterbosch, B., De Troyer, F., Allacker, K., 2017. A design tool to assess the heating energy demand and the associated financial and environmental impact in neighbourhoods. *Energy Build.* 152, 516–523. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.057>
- Zamagni, A., Buttol, P., Porta, P., Buonamici, R., Masoni, P., Guinée, J., Heijungs, R., Ekvall, T., Bersani, R., Bienkowska, A., Pretato, U., 2008. Critical review of the current research needs and limitations related to ISO-LCA practice.

Capítulo VII: Resultados globales y Discusión

En el presente capítulo se presenta, de forma conjunta y según la estructura de objetivos y etapas de la tesis, los resultados obtenidos en los capítulos II-VI, y su discusión.

1. Con relación al Objetivo 1.

Revisar y actualizar el estado del arte en relación con la sostenibilidad del parque edificatorio residencial a nivel urbano y edificatorio, en el contexto internacional y específico de Colombia.

1.1. Etapa I: Revisión del estado del arte en relación con el parque edificatorio residencial.

En cada una de las publicaciones se realizó un análisis detallado del estado del arte en cuanto a los avances en términos de sostenibilidad, a nivel internacional y a nivel de Colombia, del que se desprenden los principales hallazgos en relación con cada uno de los siguientes niveles y aspectos.

Evaluación de la sostenibilidad a nivel urbano

A nivel urbano, los estudios realizados para evaluar el nivel de sostenibilidad de las ciudades intermedias realizados en Latinoamérica demostraron que se deben proponer indicadores específicos y adaptados al contexto político, geográfico y socioeconómico. Es importante destacar que algunos métodos aplicados para el diseño de estos sistemas de indicadores tienden a ser dispares en criterios considerados, algo ambiguos, y dejan algunos aspectos por tratar.

En lo referente a las dimensiones que se evalúan en estos sistemas de indicadores, en su mayoría predominan los aspectos ambientales que intervienen en el entorno urbano, pero menos abordados son los aspectos socioeconómicos. Además, se vio que la evaluación de las ciudades incluidas en estos estudios se dirige principalmente a la ciudad como un sistema completo, pero no cubre la evaluación de unidades urbanas más pequeñas, como son el barrio o el distrito, lo que permitiría identificar diferentes niveles de sostenibilidad dentro de la misma ciudad. Esto es importante que sea abordado, ya que es previsible hallar diferentes niveles de sostenibilidad debido a las marcadas diferencias físicas y socioeconómicas que suelen ocurrir incluso dentro de la misma área urbana.

En Colombia, medir la sostenibilidad de ciudades intermedias es crucial para identificar problemas ambientales y socioeconómicos específicos. Se han adoptado legislaciones y herramientas enfocadas en la construcción y urbanismo sostenibles, como la política CONPES 3919 (2018), que promueve criterios sostenibles en el ciclo de vida de los edificios con instrumentos de monitoreo e incentivos financieros. Esta política se basa en iniciativas anteriores como el CONPES 3819 (2014) y el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018, que buscan consolidar el desarrollo urbano y mitigar el cambio climático.

Cabe indicar que las ciudades principales como Bogotá y la región del Valle de Aburrá han desarrollado políticas propias de sostenibilidad. La política de ecourbanismo y construcción sostenible de Bogotá (2014) aborda el cambio climático apoyándose en estándares internacionales

como LEED, BREEAM y CASBEE. La política del Valle de Aburrá (2015) implementa la construcción sostenible en varias fases del ciclo de vida de los edificios, con un enfoque en la ecoeficiencia y en la reducción del impacto ambiental, influyendo también en la planificación urbana. No obstante, las grandes dimensiones de estas ciudades no atienden a la casuística predominante de municipios de tamaño medio en el país.

A pesar de estos esfuerzos, falta una metodología general de evaluación de la sostenibilidad urbana en Colombia que abarque las dimensiones ambiental, social, económica, e incluso la institucional y de innovación, y permita evaluar municipios de tamaño medio y áreas más pequeñas dentro de las ciudades.

Evaluación de la sostenibilidad a nivel de edificio

Actualmente existen sistemas de indicadores denominados herramientas de evaluación de sostenibilidad en edificios (HESE) y a nivel mundial se han desarrollado muchas de ellas, principalmente en Estados Unidos y en Europa, siendo mucho menor su presencia en Latinoamérica. Estas herramientas, sin embargo, deben adaptarse al contexto del país en términos de políticas, soluciones constructivas, tecnologías disponibles, etc.

En Colombia son prácticamente nulas las iniciativas para evaluar nivel de sostenibilidad de los edificios existentes (CCCS, 2024), por lo que se identifica la necesidad de desarrollar herramientas o sistemas de indicadores con dicho objetivo. Para ello, se requiere explorar en detalle cómo están planteadas las HESE mayormente reconocidas a nivel internacional, y si en ellas se abordan de forma equitativa las tres dimensiones de la sostenibilidad (ambiental, social y económica), si los indicadores incluidos están alineados con el enfoque de ciclo de vida de la norma EN 15978 (2012), y en qué etapa del proceso edificatorio resulta clave actuar para garantizar un nivel alto de sostenibilidad de los edificios.

Evaluación de la gestión de los residuos asociados al ciclo de vida del edificio

De la revisión del estado del arte sobre la sostenibilidad a nivel urbano y edificatorio, se ha observado que la gestión de residuos en el sector de la edificación es un aspecto poco abordado entre las herramientas y sistemas de indicadores, siendo sin embargo un aspecto fundamental que contribuye a mejorar la dimensión ambiental.

Se ha observado que resulta necesario realizar un análisis más detallado y profundo de los indicadores que existen en la bibliografía para evaluar este aspecto, por lo que se han tomado un conjunto de herramientas, políticas e instrumentos, de referencia tanto a nivel internacional como de Colombia, para determinar aspectos como qué fracciones de residuos consideran (RSU, RCD y/u otros), en qué etapas del ciclo de vida se integran para la evaluación ambiental, o qué peso o importancia adoptan en el marco de estos instrumentos.

Herramientas para evaluación de la sostenibilidad del parque edificatorio

A nivel comercial existen muchos softwares, y se revisaron concretamente 13 ampliamente extendidos y utilizados en el panorama internacional. Estos son potentes herramientas para llevar a cabo la evaluación ambiental, y en algunos casos, económica, de edificios. La mayoría de los softwares toman la información recurriendo a bases de datos también comerciales como Ecoinvent (2020) o GaBi (Sphera, 2021), algunas incorporan una base de datos propia con información característica de la región de estudio, y otras emplean información incluida en las DAP de los materiales y productos de construcción. Hoy en día, se detecta una falta de información específica para la región de Latinoamérica para hacer una evaluación tanto ambiental como económica bien adaptada y contextualizada a la región de estudio, que proporcione resultados fiables.

A nivel de literatura científica, se revisaron también metodologías o métodos desarrollados por autores, que no atienden necesariamente al desarrollo de un software o herramienta. Nuevamente, estos estudios son escasos en la región Latinoamericana, y especialmente en Colombia. Aunque la mayoría de los estudios sí se basan en la metodología de ACV y módulos de información, pocos adoptan un enfoque global para evaluar todo el ciclo de vida del edificio, centrándose con mayor frecuencia en las etapas iniciales de producto y construcción, y dejando de lado la etapa de uso. En la etapa de uso, los aspectos habitualmente incluidos son el uso operacional de energía y agua, obviando la generación de RSU, mientras que las actividades de rehabilitación y mantenimiento que deberían llevarse a cabo a lo largo de la vida útil del edificio para extenderla no son habitualmente tenidas en cuenta.

Así, se observa que no existen herramientas o metodologías específicas para el contexto de Colombia que permitan evaluar tanto el comportamiento ambiental y económico del parque edificatorio residencial. Por ello, se enfatiza la necesidad de desarrollar una herramienta para tal fin que pueda ser utilizada de manera intuitiva y amigable por las partes interesadas en el proceso constructivo, principalmente por diseñadores (arquitectos e ingenieros), contratistas y administración pública (gobierno, autoridades regionales y locales, etc.).

El análisis detallado de estos softwares y metodologías desarrolladas en la literatura hasta la fecha ha permitido conocer en profundidad los métodos empleados para la evaluación de los edificios y sus características, y poder determinar qué requerimientos deben ser tenidos en cuenta en el diseño y desarrollo de la nueva herramienta que se propone en el marco de esta tesis.

2. Con relación al Objetivo 2.

Proponer una metodología de evaluación de la sostenibilidad urbana aplicable al contexto de Colombia.

2.1. **Etapa II: Identificación de las herramientas de evaluación de la sostenibilidad a nivel urbano en el panorama internacional y análisis de la índole de los indicadores incluidos y cómo se relacionan estos con las dimensiones de la sostenibilidad.**

Para abordar esta etapa, se realizó una búsqueda y selección de programas de indicadores urbanos en el contexto de la región en estudio y se identificaron los indicadores incluidos en cada uno de ellos. Los programas seleccionados fueron CONPES 3919 (CONPES 3919, 2018), BOGOTÁ (Secretaría Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, 2014), VALLE DE ABURRA (AMVA-UPB, 2015), CALI (DAGMA, 2019) y LEED (USGBC, 2009). Debido a que cada uno de los programas utiliza una nomenclatura diferente para nombrar aspectos similares, fue necesario primero plantear una estructura común homogénea. Así pues, una vez identificados los indicadores, estos se clasificaron y agruparon de acuerdo con una estructura común y jerárquica, similar a la utilizada en trabajos previos de Arrieta et al. (2016) y Córdoba et al. (2020). Esta estructura jerárquica se compuso por categorías temáticas (nivel 1), subcategorías (nivel 2) e indicadores (nivel 3), tal y como propusieron previamente Braulio-Gonzalo et al. (2015).

Como resultado, se obtuvo una estructura compuesta por 14 categorías, 69 subcategorías y un total de 115 indicadores, tal y como se observó en la Tabla II-2 y Figura II-3 del Artículo I (capítulo II). Esta clasificación permitió identificar la contribución de los programas a cada aspecto de la sostenibilidad. La mayoría de estos programas se centran en evaluar el nivel de perturbación al hábitat (*site and soil, nature and biodiversity*), seguido por la morfología urbana, la edificación (*building and housing*), y los recursos (consumo de agua, energía y recursos, y generación de contaminación y residuos). De forma muy superficial se abordan los aspectos sociales y económicos, así como de gestión y de innovación.

2.2. **Etapa III: Propuesta de un sistema indicadores de evaluación de la sostenibilidad a nivel urbano y sus métricas.**

A partir de la propuesta del sistema de indicadores se propusieron un total de 105 indicadores adaptados al contexto de Colombia, clasificándolos en cuantitativos o cualitativos según su naturaleza. A cada indicador se le asignó una métrica específica, aplicable a diferentes escalas urbanas, desde nivel de país hasta distrito o barrio. A continuación, se propuso un método de calificación o puntaje para cada indicador y una forma de representación gráfica agregada de los mismos mediante gráficos de araña y escalas de colores para establecer tres niveles de clasificación de la sostenibilidad urbana: bajo (color rojo), medio (color amarillo) o alto (color verde).

La Figura VII-1 muestra, a nivel conceptual, la forma de representar los resultados para la evaluación de la sostenibilidad urbana a través del conjunto de indicadores propuesto, y para cada una de las 14 categorías temáticas propuestas.

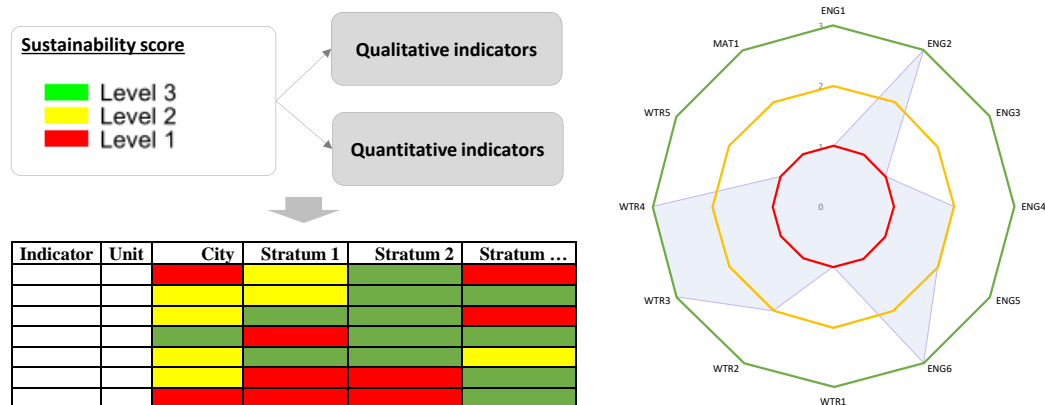


Figura VII- 1. Propuesto de representación gráfica de indicadores de sostenibilidad urbana

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el capítulo II (Artículo 1), se observa que el proponer una metodología integral para analizar las dinámicas que pueden existir en un entorno urbano, es de gran utilidad ya que permite identificar y analizar las áreas específicas donde los diferentes estratos socioeconómicos enfrentan mayores desafíos de sostenibilidad.

Esto facilita la formulación de políticas y estrategias más efectivas y focalizadas para mejorar la calidad de vida y promover un desarrollo urbano sostenible. Además, al considerar una variedad de indicadores y contextos internacionales, se puede obtener una visión más completa y comparativa de los factores que influyen en la sostenibilidad urbana, lo que puede inspirar la implementación de mejores prácticas y la adaptación de soluciones exitosas en diferentes regiones.

En términos generales, el conjunto de estos indicadores con su representación gráfica permite identificar los puntos críticos en los que se pueden aplicar estrategias de minimización y mitigación del impacto. Para ello, la participación y el apoyo del gobierno local son esenciales para asegurar la colaboración entre las partes interesadas y para hacer un compromiso serio hacia la sostenibilidad urbana. Además, debido a la dinámica de estratificación social que existe en Colombia, aplicar el sistema de indicadores en estos estratos permite obtener una radiografía para identificar la distribución espacial de los diferentes servicios a los que puede acceder la población, tales como administrativos, educativos, de salud, entre otros.

3. Con relación al Objetivo 3.

Diseñar una herramienta de evaluación de la sostenibilidad ambiental y económica del parque edificatorio residencial aplicable al contexto de Colombia.

- 3.1. **Etapa IV:** Identificación de las herramientas de evaluación de sostenibilidad en edificios (HESE) existentes en el panorama internacional y analizar la índole de los indicadores incluidos y cómo se relacionan estos con las dimensiones de la sostenibilidad y con el marco de análisis de ciclo de vida de los edificios.

Se obtuvieron los resultados que se describen a continuación:

Relativos a la identificación de herramientas e indicadores:

Teniendo en cuenta los hallazgos encontrados en la fase de revisión del estado del arte, se seleccionaron y analizaron en profundidad ocho HESE aplicables a edificios residenciales en diversas regiones del mundo: LEED, BREEAM, CASBEE, Green Star, Green Globes, VERDE, DGNB y Level(s). En global, se identificaron 387 indicadores de sostenibilidad que abarcan diferentes aspectos ambientales, sociales y económicos.

Analizando el ámbito de aplicación de las HESE, se observó que algunas de ellas están adaptadas a países específicos, como, por ejemplo, Green Star, que, a pesar de haberse establecido en Australia, se adaptó posteriormente a Sudáfrica, Brasil y Chile, o LEED, originaria de Estados Unidos, y aplicada en muchos países de América del Sur, como México, Colombia y Perú.

Analizando la antigüedad de cada una de estas HESE, se obtuvo que LEED, BREEAM, CASBEE, Green Star y Green Globes son las herramientas más antiguas y ya están ampliamente implementadas a nivel mundial. Existen otras que se adaptan a diferentes contextos sin necesidad de adaptar los indicadores en términos normativos tal como DGNB, el cual surge en Alemania, pero es empleado en países cercanos como Austria, Suiza, Dinamarca y España. VERDE, derivado de SBTool, es la adaptación de esta herramienta para España. Por último, Level(s), desarrollado por la Comisión Europea, es la herramienta más reciente y está diseñada para ser aplicable internacionalmente, aunque ha recibido poca atención en la literatura hasta el momento.

Relativos a la agrupación/clasificación de indicadores:

Se propuso una estructura común para clasificar los 387 indicadores identificados en las ocho HESE analizadas. Las categorías comunes seleccionadas fueron: Confort, Energía, Conciencia ambiental, Materiales, Recursos naturales y cambio climático, Residuos y Agua, tal y como muestra la Figura III-3 del Artículo 2 (capítulo III) a través de un diagrama de *Sankey*.

Se obtuvo que la categoría más abordada es la de "Confort", presente en 108 indicadores, cuyo objetivo principal es priorizar el bienestar del usuario. Esta está seguida por la categoría de "Recursos

naturales y cambio climático" con 107 indicadores. Los aspectos "Residuos" y "Conciencia ambiental" son evaluados en menor medida, con 25 y 20 indicadores, respectivamente. En promedio, el peso asignado por las HESE es de 28,5% a Confort, 27,9% a Recursos naturales y cambio climático, 12,3% a Energía, 10,9% a Materiales, 8,5% a Agua, 6,9% a Residuos, y 5% a Conciencia ambiental. Es importante destacar que las HESE están bastante equilibradas entre los aspectos, excepto Level(s), que no cubre "Conciencia ambiental".

Relativos al peso otorgado a los indicadores:

Para analizar el peso que se le da a cada indicador, los 387 indicadores se clasificaron de acuerdo con tres criterios: dimensiones de la sostenibilidad, módulos de información propuestos en la norma EN 15978 (2012) y etapas del ciclo de vida.

Al clasificar los indicadores en las dimensiones de sostenibilidad, se pudo observar que la dimensión ambiental es, con diferencia, la más abordada por las HESE, con un promedio del 68,3% de los indicadores dedicados a ella. La dimensión social representa el 25,8% y la económica solo el 6%. La dimensión económica es cubierta por seis HESE, pero con un porcentaje muy bajo de indicadores: Level(s) (13,6%), DGNB (12,5%), LEED (10%), VERDE (5,9%), Green Globes (4%) y BREEAM (1,8%). Entre estos indicadores se incluyen aspectos como el costo de construcción, medidas de eficiencia energética para ahorrar en facturas, guías de usuario del edificio con estrategias de ahorro monetario y la consideración de la evaluación de costos del ciclo de vida.

En cuanto al peso que se le asigna dentro de los sistemas de indicadores a los módulos de información de la norma EN 15978 (2012), se destaca el módulo B1 (uso) con indicadores que evalúan la calidad de aire interior, las tasas de ventilación y la calidad de iluminación, seguido por la etapa de producción (A1-A3) y el consumo de energía durante el uso (B6). La etapa de fin de vida (C1-C4) es la menos tratada, lo que sugiere una baja prioridad en la deconstrucción y en la gestión de los RCD. Sin embargo 58 indicadores de los 387 indicadores no están relacionados con los módulos de información, como el transporte de los ocupantes, aspectos de diseño, gestión de residuos domésticos y de RCD, etc. Estos aspectos, aunque recurrentes y ampliamente incluidos en las herramientas, no están considerados en la norma EN 15978 (2012), lo que sugiere la necesidad de una visión más holística al analizar el ciclo de vida de edificios desde las tres perspectivas de la sostenibilidad. Las herramientas con mayor número de indicadores no clasificados son LEED (12,4%), VERDE (9,8%), Green Star (9,7%) y BREEAM (7,9%), lo que significa que van más allá de los límites del sistema de la norma y que pueden contribuir a ampliar su alcance de evaluación.

En cuanto a las etapas, la mayoría de los indicadores en las HESE se concentran en la etapa de diseño (58,4%), lo que destaca la importancia de tomar decisiones sostenibles desde el inicio del proyecto. Aunque la etapa de uso tiene un gran impacto ambiental, intervenir durante el diseño es crucial para reducir efectivamente el impacto ambiental a lo largo de su vida útil.

El analizar las HESE permitió conocer el nivel de detalle en el que se evalúan la sostenibilidad de los edificios, revelando que existe una brecha entre la cantidad de indicadores que evalúen de manera equitativa las dimensiones de sostenibilidad, así como también la necesidad de integrar estas herramientas desde etapas tempranas de diseño, ya que esto permite conocer las sinergias que pueden llevar a implementar estrategias integrales que permitan reducir costos y mejoren los resultados a nivel de sostenibilidad. Este análisis también ha permitido establecer nuevas adaptaciones a las normas actuales, de manera que se amplíe su alcance para incluir las interacciones que causan los ocupantes en la etapa de uso.

3.2. **Etapa V: Análisis detallado de los indicadores incluidos en las HESE relacionados con la categoría de residuos, tanto a nivel urbano como a nivel edificatorio, y analizar la ponderación de importancia otorgada.**

Se obtuvieron los resultados que se describen a continuación:

Relativos a la identificación de herramientas e indicadores:

Se seleccionaron diez HESE de evaluación de la sostenibilidad de edificios residenciales para el análisis: ocho internacionales (LEED, BREEAM, CASBEE, Green Star, Green Globes, Level(s), DGNB y Verde) y dos específicas de Colombia (CASA y la Política de Construcción Sostenible del Área Metropolitana del Valle de Aburrá). Todos las HESE permiten obtener una puntuación cuantitativa del nivel de sostenibilidad del edificio, excepto Level(s) y AMVA-UPB, que son cualitativas y no ofrecen una puntuación global ni un sistema de ponderación.

Los indicadores de las HESE fueron identificados y clasificados según las categorías temáticas ya mencionadas anteriormente, incluyendo la categoría de residuos: Confort, Energía, Conciencia ambiental, Materiales, Recursos naturales y cambio climático, Residuos y Agua, tal y como mostró la Figura IV-1 del Artículo 3 (capítulo IV). BREEAM, Green Globes y Valle de Aburrá son las herramientas que más indicadores de residuos aglutinan.

De un análisis en detalle de la índole de los indicadores, se obtuvo que el sistema de gestión de RCD aparece en todas las HESE analizadas, excepto en CASBEE y DGNB, e incluye un total de 10 indicadores, siendo el que tiene el mayor número. Le sigue el Diseño para la deconstrucción, que abarca 7 indicadores en 5 HESE, siendo el BREEAM el que aborda este indicador con mayor énfasis. La minimización de RCD comprende 5 indicadores, recopilados en los sistemas CASBEE y Green Globes. La recuperación de RCD/RSU, la cantidad de residuos por fracción y la segregación de MSW comprenden cada uno 3 indicadores. Cabe destacar que el Diseño para la deconstrucción está ganando fuerza entre las HESE, principalmente debido a que la nueva versión de BREEAM incluye 3 indicadores específicos para este propósito.

Relativo a la agrupación/clasificación de indicadores:

Los indicadores relacionados con la categoría de residuos fueron clasificados según cuatro criterios, diferenciando la fracción de residuos evaluada (RSU o RCD), tal y como quedó reflejado en la Figura IV-2 del Artículo 3 (capítulo IV):

- Etapas del ciclo de vida del proceso de construcción según el *Royal Institute of British Architects* (RIBA, 2020). Se obtuvo que los RSU se gestionan principalmente en la fase de uso, con BREEAM y AMVA-UPB destacándose en la segregación y recuperación, y Verde considerando el almacenamiento y separación en el diseño. Ninguna herramienta aborda la gestión de RSU en construcción y fin de vida. En contraste, los RCD se gestionan en todas las etapas, siendo la construcción la más cubierta, especialmente por CASBEE y BREEAM. La fase de diseño también es significativa, con BREEAM liderando en indicadores relacionados.
- Módulos de información propuestos por EN 15978 (2012) y EN 15804 (2013). Se obtuvo que los indicadores sobre RCD se enfocan principalmente en el fin de vida (módulos C1-C4), seguido por el módulo A5 (construcción) y los módulos A1-A3 (fabricación de productos). La gestión de RCD durante la fase de uso es escasa. Esto refleja un énfasis en la gestión de RCD en la etapa de fin de vida y construcción, mientras que la gestión en el uso y mantenimiento del edificio es menos representada.
- Jerarquía de residuos de la Directiva 2008/98/CE. Se obtuvo que los indicadores para RSU se centran en prevención y reciclaje, destacando AMVA-UPB en ambos aspectos, mientras que BREEAM se enfoca más en la valorización. La prevención y el reciclaje son también importantes para los RCD, con DGNB, Level(s) y CASBEE liderando en reciclaje, y DGNB en prevención. Las estrategias de reutilización y eliminación están menos representadas, con GREEN STAR destacando en eliminación.
- Etapas del sistema de gestión de residuos según Tchobanoglous et al. (1994). Se obtuvo que los indicadores están mayoritariamente relacionados con el tratamiento, seguido de la pre-recolección. Para los RSU, se observa un enfoque en la pre-recolección y tratamiento, con GREEN STAR destacando en almacenamiento y CASA en la gestión de residuos sólidos. La etapa de disposición está poco representada. Para los RCD, el tratamiento es la etapa más cubierta, especialmente en reciclaje y valorización, con CASBEE y DGNB destacando. La pre-recolección y la disposición también se abordan, con AMVA-UPB y Green Globes destacando en almacenamiento y porcentaje de residuos en disposición final. La etapa de recolección está cubierta en menor medida por todos las HESE excepto DGNB, Green Star y Level(s).

Relativos al peso otorgado a los indicadores:

Se evaluó y comparó la ponderación de los indicadores de gestión de residuos en aquellas HESE cuantitativas que cuentan con un sistema de pesos o puntaje. Tal y como reflejó la Figura IV-3 del Artículo 3 (capítulo IV), se observó que los HESE que otorgan mayor importancia a la categoría de Residuos son CASBEE y BREEAM, con un 7,00% y un 6,08%, respectivamente. Los otros HESE le otorgan un nivel de importancia entre el 3% (DGNB) y el 4,55% (CASA). También se observó que los

indicadores que se abordan en mayor medida son los relacionados con el sistema de gestión de residuos de RCD, ya que la mayoría de los HESE tienen al menos un indicador relacionado, con la excepción de CASBEE y DGNB. En segundo lugar, está la minimización de RCD, aunque solo se evalúa en CASBEE y Green Globes. Cada uno de estos proporciona un número significativo de indicadores que evalúan las técnicas de minimización de RCD utilizadas a nivel de edificio. En tercer lugar, se encuentran la recuperación de RCD (en DGNB, CASBEE y BREEAM) y la segregación de RSU (en LEED, Green Star y BREEAM). En menor medida, también encontramos la cantidad de residuos por fracción (en Verde), la recuperación de RSU (en BREEAM y Green Globes) y el Diseño para la deconstrucción (en Green Globes y BREEAM).

El analizar las categorías singulares que componen las HESE, permitió establecer que estrategias se deben implementar en edificaciones nuevas como existentes para poder cumplir con los criterios establecidos; sin embargo, en el caso de los edificios existentes no todas las estrategias propuestas en estos sistemas se pueden ejecutar, siendo la mayor limitante la superficie que ya está construida. También permite analizar que las mejores puntuaciones que puede obtener un proyecto son cuando se emplean las HESE que están adaptadas a su contexto normativo y geográfico.

3.3. Etapa VI: Caracterización del parque edificatorio residencial de Colombia integrando aspectos climáticos, socioeconómicos, temporales y arquitectónico-constructivos.

En esta etapa se caracterizó el parque edificatorio residencial de los pisos templado y frío de Colombia, atendiendo a dos niveles, tal y como mostró la Figura V- 1 del Artículo 4 (capítulo V).

- Caracterización temporal, donde se identificaron cinco periodos temporales por año de construcción de los edificios (A1 (<1950), A2 (1950-1969), A3 (1970-1989), A4 (1990-2009), A5 (>2010)).
- Caracterización de tipologías de edificios, donde se identificaron aspectos relativos a morfología del área urbana en la que se emplaza (barrio o urbanización) y tipología de la propia vivienda, diferenciando entre residencial (unifamiliar o multifamiliar), adyacencia (aislada, esquinera o entre medianeras) y número de plantas (1, 2/3, más de 3).

Como resultado de este proceso de caracterización, se obtuvo una propuesta de taxonomía del parque edificatorio residencial de los pisos templado y frío de Colombia (Figura V -3 del Artículo 4 (capítulo V)), lo que permitió clasificar a los edificios y predecir, su morfología y características constructivas, información que fue necesaria para el proceso de evaluación ambiental y económica.

3.4. Etapa VII: Elaboración de catálogo de soluciones constructivas del parque edificatorio residencial de Colombia con información ambiental y económica.

La caracterización anterior del parque de vivienda permitió realizar un análisis sistemático y en detalle de las características constructivas de cada tipología de edificio, dado que los edificios construidos según cada tipología atienden a un mismo periodo temporal, contexto histórico y

normativo, por lo que se les presumen las mismas o muy similares soluciones constructivas. Los criterios considerados para la caracterización de las soluciones constructivas son los recogidos en la Figura V- 1 del Artículo 4 (capítulo V), que fueron tomados de una exhaustiva revisión bibliográfica de diversos estudios realizados en el país.

Como resultado de esta etapa se obtuvo el catálogo de soluciones constructivas que se mostró en la Tabla V- 4 del Artículo 4 (capítulo V), donde las soluciones constructivas se clasificaron y codificaron según el período temporal y elemento constructivo (fachada, cubierta, estructura (de cimentación, vertical y horizontal), de solera, de tabiquería interior y de ventanas). Este catálogo ha permitido estandarizar las soluciones constructivas y conocer los materiales y cantidades que los constituyen. Además, las soluciones del catálogo son fácilmente asociables a las tipologías edificatorias definidas en la Etapa VI, lo que permite intuir qué tipología de fachada, cubierta, etc. se encuentra en cada edificio. El catálogo resulta ser un instrumento clave para llevar a cabo la evaluación ambiental y económica de cada solución constructiva en etapas posteriores, lo que facilita y simplifica enormemente al agente evaluador.

3.5. Etapa VIII: Diseño de la herramienta de evaluación de la sostenibilidad ambiental y económica del parque edificatorio residencial aplicable al contexto de Colombia, que permita, a su vez, proponer estrategias de mejora.

Se diseñó una herramienta en el entorno Microsoft Excel y utilizando el lenguaje de programación *Visual Basic for Applications* (VBA), capaz de realizar la evaluación ambiental y económica, con enfoque de ciclo de vida del edificio y alineada con las metodologías de ACV y CCV, y adaptada al contexto específico del parque edificatorio residencial de Colombia. Permite evaluar la sostenibilidad de dicho parque de una manera intuitiva y amigable. Sus elementos principales se muestran en la Figura VII- 2.

En la herramienta se incorporó una base de datos que incluye información relativa a la localización (Etapas II y III), estratos socioeconómicos de Colombia (bajo, medio, alto) y tipologías edificatorias de acuerdo con la Etapa VI, materiales y procesos de construcción que se utilizan como base para la constitución del catálogo de soluciones constructivas (Etapa VII) y alternativas para mantener/rehabilitar los elementos de fachada, cubierta, estructura, suelos, particiones interiores y ventanas, del edificio. Finalmente, se incorporó a la base, información relativa a los medios de transporte necesarios para el movimiento de dichos materiales. Además, se incluyeron los factores de emisión (ambientales y económicos) unitarios de cada uno de los elementos de la base datos. De tal forma, que es posible calcular el impacto ambiental y económico del sistema bajo estudio y mostrar los resultados en diferentes formatos, tanto gráficos como numéricamente, así como desglosados por etapas del ciclo de vida, elementos de construcción y grupos de materiales, para contribuir a que las personas usuarias obtengan la información lo más atomizada posible y puedan tomar decisiones fundamentadas con objetividad y transparencia.

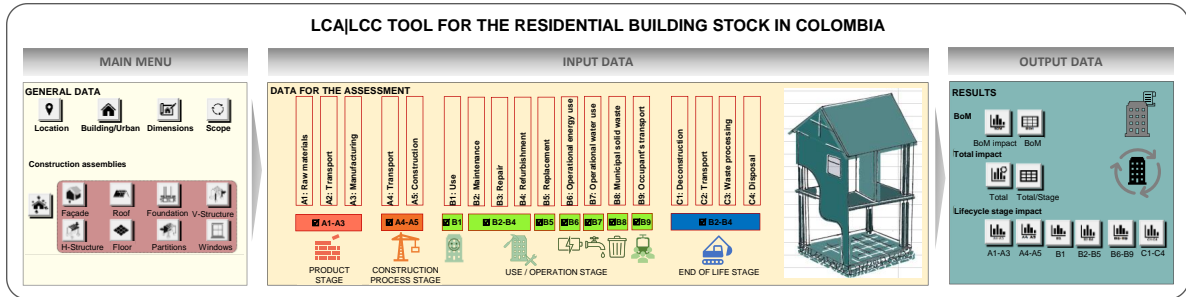


Figura VII- 2. Diseño conceptual de la herramienta de evaluación ACV|CCV

4. Con relación al Objetivo 4.

Validar cada una de las metodologías y herramienta propuestas a través de casos de aplicación en el contexto de Colombia.

Para la aplicación y validación de las metodologías propuestas a lo largo de las Etapas II, III, IV, V, VI y VII de la tesis, se tomó como caso de estudio el municipio de Mosquera (Cundinamarca, Colombia), en el que se aplican tres casos de estudio, tanto en el nivel urbano como en el nivel de edificio y vivienda. La Figura VII- 3 presenta cómo las etapas de la metodología se integran con los tres casos de aplicación:

- **Caso de aplicación I:** Evaluación de la sostenibilidad urbana del municipio de Mosquera (Cundinamarca, Colombia) a través de una propuesta de indicadores y sus métricas.
- **Caso de aplicación II:** Evaluación de la gestión de residuos en una vivienda del municipio de Mosquera (Cundinamarca, Colombia).
- **Caso de aplicación III:** Evaluación de la sostenibilidad ambiental y económica de un edificio residencial del municipio de Mosquera (Cundinamarca, Colombia).

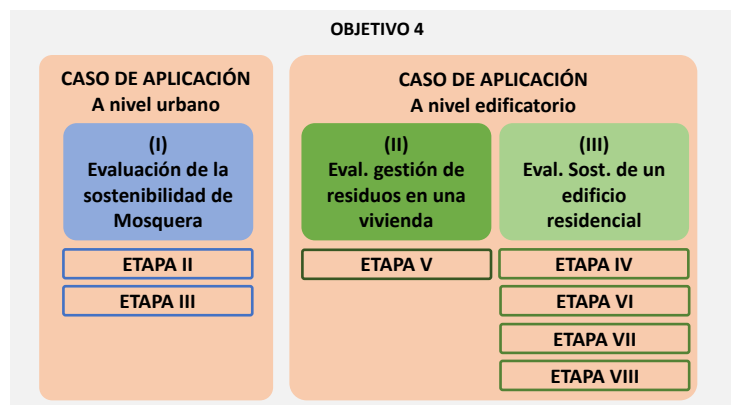


Figura VII- 3. Relación de los casos de aplicación con las etapas de la metodología de la tesis.

La Figura VII-4 muestra un esquema del municipio, barrio y vivienda utilizado en cada caso de aplicación.

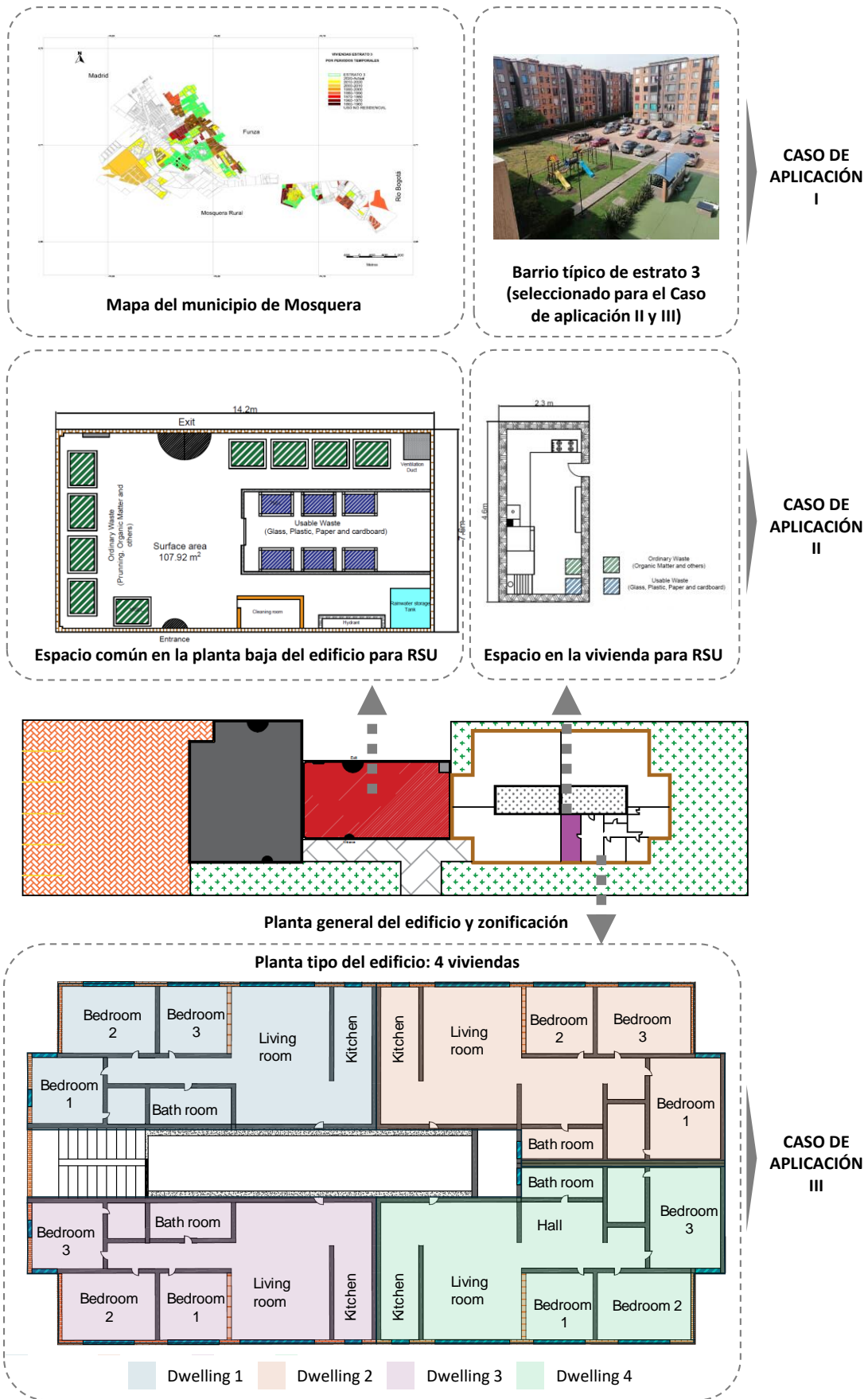


Figura VII- 4. Descripciones gráficas de los casos de aplicación I, II y III.

4.1. Caso de aplicación I: Evaluación de la sostenibilidad urbana del municipio de Mosquera (Cundinamarca, Colombia) a través de una propuesta de indicadores y sus métricas.

Tras aplicar la metodología de evaluación de la sostenibilidad urbana establecida en las Etapas II y III, se obtuvo el mapa de sostenibilidad mostrado en la Figura II- 6 del Artículo 1 (capítulo II), y se determinó el nivel de sostenibilidad (1-bajo, 2-medio o 3-alto) en los estratos socioeconómicos del municipio. Los resultados mostraron que ninguno de los estratos socioeconómicos alcanzó el nivel más alto de sostenibilidad. Los estratos 2 y 3 alcanzaron el nivel medio, mientras que los estratos 1, 4, 5 y 6 presentaron los niveles más bajos. Cabe destacar que, paradójicamente, los barrios de estrato socioeconómico elevado (5 y 6), no son los que presentan niveles de sostenibilidad más altos.

Además del mapa, se obtuvieron los resultados en formato de gráfico de araña, como se pueden encontrar en el Capítulo II (Artículo 1). Como extracto, se muestran las métricas para el Estrato 3 analizado, en la Figura VII- 4. También empleando gráficos de araña tales como los de la Figura VII- 5., se representaron los indicadores de sostenibilidad para cada una de las categorías temáticas analizadas: Sitio y biodiversidad, Infraestructura, Metabolismo urbano-*Inputs* (energía, agua, materiales), Metabolismo urbano-*Outputs* (residuos, contaminación), Social, Económico, Institucional e innovación.

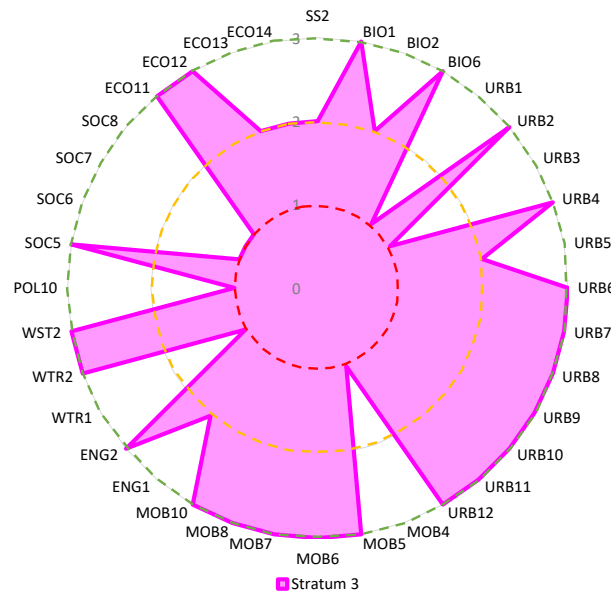


Figura VII- 5. Métricas y representación gráfica de indicadores urbanos del Estrato 3

Los barrios ubicados en los estratos socioeconómicos 2 y 3 cubrieron satisfactoriamente un gran número de indicadores, especialmente aquellos relacionados con URB y MOB. El hecho de que estén ubicados cerca del centro de la ciudad mejora su rendimiento en sostenibilidad, debido a una mayor compacidad de los edificios y la presencia de edificios de uso mixto (tanto viviendas como equipamientos), lo que acerca a las personas a los servicios y ayuda a reducir las distancias y el uso

de vehículos privados. El Estrato 1, ubicado en asentamientos periféricos informales y caracterizado por viviendas autoconstruidas, alberga a las familias con los ingresos más bajos y presenta el nivel más bajo de sostenibilidad en cuanto a infraestructura, debido a la baja calidad de los servicios de agua y energía, la proximidad a puntos de descarga de aguas residuales, la falta de áreas verdes y las dificultades para tener acceso directo a los servicios cotidianos. Los estratos 4, 5 y 6, a pesar de albergar a personas con mayores niveles de ingresos y estar compuestos por edificios residenciales de buena calidad, también suelen estar ubicados en distritos periféricos fuera del centro de la ciudad. Esto implica menor compacidad y áreas residenciales dispersas con poco acceso directo tanto a los servicios (grandes distancias) como al transporte público, lo que disminuye el nivel de sostenibilidad.

Los resultados obtenidos al aplicar los indicadores al caso de estudio en Mosquera reflejaron una tendencia similar a la de los hallazgos revisados en la literatura existente. En el contexto colombiano, diversos autores al implementar un sistema de indicadores similar establecen conclusiones comparables, utilizando una escala de evaluación de tres niveles (no cumplido, parcialmente cumplido, cumplido).

4.2. Caso de aplicación II: Evaluación de la gestión de residuos en una vivienda del municipio de Mosquera (Cundinamarca, Colombia).

Los indicadores de sostenibilidad extraídos de la Etapa V, pertenecientes a las 10 HESE analizadas, y relacionados específicamente con la categoría de residuos, se aplicaron al edificio mostrado en la Figura VII- 4, obteniéndose los resultados que se mostraron en la Figura IV- 5 del Artículo 3 (capítulo IV).

El análisis de los resultados mostró que el edificio obtiene las puntuaciones más altas en Green Star para la fracción de residuos de construcción y demolición (RCD), con un 24,27%. Esto se debe a que cumple con el requisito de reciclar o reutilizar al menos el 50% de estos residuos. Le siguen LEED con un 18,17%, CASA con un 15,00%, BREEAM con un 11,8%, y Green Globes con un 9,35%. Estos sistemas valoran aspectos como un plan de gestión de RCD, un presupuesto detallado, un porcentaje mínimo de reciclaje o reutilización, la presencia de un gestor certificado y un informe final sobre los residuos gestionados.

En cuanto a la segregación de RSU, LEED se destacó con una puntuación de 28,06%, ya que cumple con indicadores como la existencia de un espacio de almacenamiento común para residuos. Green Star sigue en segundo lugar con un 25,06%, cumpliendo con todos los criterios establecidos para el área mínima de almacenamiento y la separación de fracciones de residuos.

Para la minimización de RCD, Green Star obtuvo la puntuación más alta con un 25,23%, valorando la incorporación de ensamblajes constructivos prefabricados y partes modulares. CASBEE ocupó el segundo lugar con un 12,05%. Sin embargo, se identificó una falta de información sobre el proceso de producción de los materiales, lo que dificulta la evaluación completa.

En la recuperación de RCD, CASBEE destacó con una puntuación de 24,98% por su enfoque en el uso de información sobre los materiales para evaluar el potencial de recuperación. DGNB obtuvo un 15,38%, ya que requiere soluciones de construcción industrializadas que no se aplican en este edificio, dado que utiliza ensamblajes constructivos tradicionales en Colombia.

Respecto a la cantidad de residuos por fracción, el edificio obtuvo una puntuación significativa en CASA con un 46,65%, cumpliendo con criterios como el espacio de almacenamiento para residuos, aunque sin establecer medidas mínimas para estos espacios. En Verde, la puntuación fue baja, con un 8,35%, debido a que no se cumplieron criterios como el área mínima requerida de almacenamiento y la señalización. Ambas HESE también evaluaron la existencia de estrategias de recuperación, como el compostaje doméstico, que no se implementa en la vivienda.

La recuperación de RSU solo arrojó resultados en Green Globes con una puntuación de 3,08%, donde se valoraron el espacio de almacenamiento interior y exterior y la reciclabilidad.

Finalmente, en términos de diseño para la deconstrucción, BREEAM otorgó una puntuación de 22,37% al cumplir con criterios como la inclusión de soluciones constructivas estandarizadas y el diseño para el cambio climático. Por otro lado, Green Globes no otorgó puntuación, ya que el edificio no cumplió con los indicadores necesarios para tener un plan de deconstrucción desde la fase de diseño.

Partiendo de esta línea base como referencia, se propusieron estrategias de mejora susceptibles de mejorar el nivel de sostenibilidad del edificio, en cuanto a gestión de residuos. Estas se detallaron en la Tabla IV- 2 del Artículo 3 (capítulo IV), y se relacionaron con las etapas y módulos de información de la norma EN 15978 en las que intervienen. La nueva evaluación del edificio aplicando estas mejoras denotó la mejora de su nivel de sostenibilidad, aumentando la puntuación por encima del 70% en la mitad de las HESE (LEED, CASA, Verde, BREEAM y Green Star).

Es importante destacar que las mejoras relacionadas con los RSU y que afectan a la fase de uso del edificio no fue posible clasificarlas con más detalle acorde a la norma EN 15978, ya que no existe ningún módulo que aborde la gestión de los RSU. Por ello, se identificó la necesidad de incluir un nuevo módulo de información dentro de la EN 15978 que abordara este aspecto. Este nuevo módulo (B8) fue incorporado en la herramienta de evaluación de la sostenibilidad de edificios propuesta en el marco de esta tesis.

La aplicación del conjunto de indicadores de residuos al edificio, como caso de estudio, mostró que las puntuaciones más altas se obtienen en las HESE que están adaptadas a las características de la región en estudio.

Finalmente, cabe señalar que, en el caso de un edificio existente, hay mejoras que no pudieron ser implementadas, ya que eran estrategias que debían tenerse en cuenta en la etapa de diseño del edificio, antes de su construcción. Esto indica la importancia de tomar decisiones desde la

concepción del proyecto del edificio en la etapa de diseño, con un enfoque global del ciclo de vida, ya que su desempeño en sostenibilidad a lo largo de su vida útil dependerá de ellas.

4.3. Caso de aplicación III: Evaluación de la sostenibilidad ambiental y económica de un edificio residencial del municipio de Mosquera (Cundinamarca, Colombia).

En el último caso de aplicación se evaluó ambiental y económicamente el edificio objeto de estudio en su conjunto, a través de la herramienta de ACV y CCV diseñada en la Etapa VIII, pero que incorpora también las aportaciones de las Etapas IV, VI y VII.

A partir de la información mostrada en las Figuras VI- 7, -8 y -9 del Artículo 5 (capítulo VI), se obtuvo que:

- Teniendo en cuenta el BoM (*Bill of Materials*, en kg) y el impacto ambiental para la categoría GWP (kgCO₂eq), dividido en grupo de material, se observó que los áridos fueron el material más abundante (en peso), seguido de los cementos y la albañilería. Sin embargo, no fueron los que más impactan desde la perspectiva ambiental, sino la carpintería de aluminio y los morteros, seguidos de los cementos y los áridos.
- Teniendo en cuenta el impacto ambiental de todo el edificio dividido en cada etapa del ciclo de vida del edificio, para el GWP, se observó que la etapa de mayor impacto fue la de uso, predominando el módulo B6 (uso operacional de energía), seguida de la etapa de producto con los módulos A1-A3 (suministro de materias primas, transporte y fabricación). Cabe destacar que los módulos B8 (gestión de los RSU) y B9 (movilidad de los ocupantes para las actividades diarias), que no están incluidos en el alcance de la norma EN 15978 (2012), no son menospreciables y no deben pasarse por alto, ya que también tienen un impacto medioambiental relevante. Así pues, la herramienta aporta valor en este sentido y se diferencia de otras existentes hasta la fecha.

5. Con relación al Objetivo 5.

Difusión de los resultados de investigación.

Los resultados derivados de la tesis doctoral han sido publicados en un total de cinco artículos en revistas científicas indexadas en JCR (uno de ellos se encuentra en revisión) y en 7 congresos internacionales.

Además, la autora de la tesis doctoral ha colaborado previamente como autora en otros dos artículos JCR relacionados también con la temática de la tesis.

El detalle de las publicaciones puede consultarse en las secciones [Compendio de publicaciones](#) y [Otras publicaciones](#).

6. Referencias.

- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., 2014. Política pública de ecourbanismo y construcción sostenible. Documento técnico de soporte. Bogotá.
- AMVA-UPB, 2015. Política Pública de Construcción Sostenible. Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín.
- Arrieta, G., Requena, I., Toro, J., Zamorano, M., 2016. Adaptation of EVIAVE methodology for monitoring and follow-up when evaluating the environmental impact of landfills. *Environ. Impact Assess. Rev.* 56, 168–179. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.10.001>
- Braulio-Gonzalo, M., Bovea, M.D., Ruá, M.J., 2015. Sustainability on the urban scale: Proposal of a structure of indicators for the Spanish context. *Environ. Impact Assess. Rev.* 53, 16–30. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.03.002>
- CCCS, 2024. Programa LEED® en Colombia. URL <https://www.cccs.org.co/wp/capacitacion/talleres-de-preparacion-leed/>
- Córdoba, C., Triviño, C., Calderón, J.T., 2020. Agroecosystem resilience. A conceptual and methodological framework for evaluation. *PLoS One* 15, 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220349>
- DAGMA, 2019. Manual de Construcción Sostenible. Alcaldía de Cali. Colombia.
- DNP, 2018. CONPES 3919. Política Nacional De Edificaciones Sostenibles, Consejo Nacional de Política Económica y Social República De Colombia. Departamento Nacional De Planeación (DNP). Bogotá.
- DNP, 2014. CONPES 3819: Política nacional para consolidar el sistema de ciudades en Colombia, Consejo Nacional de Política Económica y Social República De Colombia. Departamento Nacional De Planeación (DNP). Bogotá.
- Ecoinvent, 2020. Ecoinvent Database. URL <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>
- EN 15804, 2013. Standards Publication Sustainability of construction works — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products.
- EN 15978, 2012. Sustainability of Construction Works - Assessment of Environmental Performance of Buildings - Calculation Method.
- RIBA, 2020. RIBA plan of work 2020 - overview. London.
- Sphera, 2021. GaBi Solutions URL <https://gabi.sphera.com/international/databases/>
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S., 1994. Gestión Integral de residuos sólidos. Madrid. McGraw-Hill.
- US GBC. (2009). LEED ND Leadership in Energy and Environmental Design for neighborhood development. The U.S. Green Building Council.

Capítulo VIII: Conclusiones y futuros desarrollos

1. Conclusiones

Con relación al Objetivo 1. Revisar y actualizar el estado del arte en relación con la sostenibilidad del parque edificatorio residencial a nivel urbano y edificatorio, en el contexto internacional y específico de Colombia.

- La revisión y actualización del estado del arte en sostenibilidad del parque edificatorio residencial, tanto a nivel urbano como edificatorio, proporciona una visión actualizada de las mejores prácticas y estándares internacionales, así como de las adaptaciones específicas para el contexto colombiano. Este proceso permite identificar avances recientes y áreas de mejora, asegurando que las estrategias de sostenibilidad estén alineadas con las tendencias globales y las necesidades locales.
- Integrar enfoques internacionales con consideraciones locales garantiza que las soluciones propuestas sean efectivas y viables en el contexto colombiano, promoviendo un desarrollo urbano y edificatorio más sostenible y ajustado a las características ambientales y sociales específicas del país.

Con relación al Objetivo 2. Proponer una metodología de evaluación de la sostenibilidad urbana aplicable al contexto de Colombia.

- El sistema de indicadores propuesto por 105 indicadores evalúa los tres ejes fundamentales de la sostenibilidad urbana en Colombia, ambiental, social y económico, además de incluir la dimensión institucional. Al ser adaptados a este contexto geográfico se convierte en una herramienta para comparar el desarrollo equitativo entre los diferentes estratos socioeconómicos del país y para monitorear la sostenibilidad a lo largo del tiempo.
- La implementación de estos indicadores y su representación gráfica y mapeada facilita la evaluación y mejora de la sostenibilidad urbana, además de ofrecer a los gobiernos locales un medio para demostrar sus avances y fomentar la transparencia administrativa.
- Es importante que cuando se vaya a aplicar el sistema de indicadores, el nivel de información sea detallado a pequeña escala. Es decir, a nivel de estrato o barrio, con el fin de obtener la menor desviación en el análisis, así como también que las fuentes de información de referencia estatales deben estar actualizadas constantemente.

Con relación al Objetivo 3. Diseñar una herramienta de evaluación de la sostenibilidad ambiental y económica del parque edificatorio residencial aplicable al contexto de Colombia.

- El análisis de los indicadores de evaluación integrados en las herramientas de evaluación de la sostenibilidad de edificios (HESE) permitió identificar que la dimensión de la sostenibilidad más abordada es la ambiental, quedando la social y la económica en un segundo plano, lo que motivó al desarrollo de la herramienta de evaluación en el marco de esta tesis integrando los tres aspectos. También este análisis revela la necesidad de implementar la herramienta en las etapas tempranas de diseño, como instrumento de ayuda a la toma de

decisiones que reduzcan el impacto de los edificios, tanto a nivel ambiental, económico como social.

- Los indicadores para la evaluar específicamente la gestión de los residuos en los edificios están escasamente abordados por las herramientas, a pesar de que tienen un potencial notable para mejorar el nivel de sostenibilidad, si se implementan las estrategias adecuadas desde fases tempranas del diseño de los edificios.
- Las normas de referencia que establecen metodologías para evaluar el impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida de los edificios (EN 15978 y EN 15804) no integran aspectos relacionados con el estilo de vida de los ocupantes y los usuarios de los edificios, como puede ser su movilidad (B9) y la gestión de los residuos sólidos urbanos (RSU) (B8) generados durante la etapa de uso. La introducción de nuevos módulos de información para evaluar estos aspectos resulta clave, y es una de las aportaciones de esta investigación.
- El diseñar una metodología para caracterizar las viviendas en Colombia permitió desarrollar una taxonomía edificatoria que resulta esencial, ya que ayuda a definir un conjunto de tipologías edificatorias que son características de la región clasificada como piso térmico frío y templado en Colombia. Además, esta taxonomía proporciona una base sólida para la clasificación de cualquier edificio residencial que se encuentre en esta región específica, asegurando así la identificación de características locales y la simplificación del proceso de evaluación del parque edificatorio.
- Como hito principal en este objetivo se obtuvo el primer catálogo de soluciones constructivas para la región fría y templada, que ofrece detalles sobre las técnicas y materiales de construcción que son típicamente empleados en cada tipo de edificación. Al disponer de esta información, se pueden tomar decisiones más informadas sobre los métodos de construcción que mejor se adaptan a las condiciones locales, mejorando así la calidad y sostenibilidad de las edificaciones. De la misma manera, el contar con un catálogo de soluciones se convierte en una herramienta fundamental para la formulación de un certificado de eficiencia energética de los edificios en Colombia, inexistente hasta la fecha, tal como existe en los países europeos y que, a nivel de Latinoamérica, ya se está impulsando en Chile y en Argentina.
- En términos sociales el método permite una lectura precisa acerca de los niveles de estratificación ya que, a diferencia de la metodología tradicional empleada por el DANE, esta incorpora características propias de la vivienda, como la calidad constructiva real y no basado principalmente en estadísticas.
- La herramienta desarrollada se dirige a personas usuarias representadas principalmente por las partes interesadas del sector de la construcción, como diseñadores (arquitectos e ingenieros), contratistas y administración pública (gobierno, autoridades regionales y locales, etc.).
- La metodología propuesta para el diseño de la herramienta puede adaptarse para desarrollar herramientas similares en otros contextos del país, como por ejemplo otras zonas climáticas, o incluso al contexto de países vecinos de Latinoamérica.

- Los resultados de la evaluación de la sostenibilidad de los edificios, obtenidos de la herramienta, pueden servir a los agentes implicados en el proceso constructivo para avanzar en el desarrollo de políticas medioambientales y de renovación y rehabilitación del parque edificado en el sector de la edificación en Colombia.

Con relación al Objetivo 4. Validar cada una de las metodologías y herramienta propuestas a través de casos de aplicación en el contexto de Colombia.

El aplicar cada una de las metodologías propuestas en el municipio de Mosquera (Cundinamarca, Colombia) permitió comprender su situación sociodemográfica y la evolución de su morfología urbana, conocer el nivel de sostenibilidad a pequeña escala de barrio o distrito, la caracterización de las viviendas, y el impacto ambiental y económico derivado de su entorno construido, destacando lo siguiente:

- A nivel urbano se observan las diferencias en el nivel de sostenibilidad existentes entre los distintos estratos socioeconómicos, que no necesariamente es más alto en aquellos entornos más favorecidos. El paliar esta brecha requiere mayores esfuerzos institucionales, especialmente en la participación y apoyo del gobierno local, que son fundamentales para garantizar la colaboración entre los actores y el compromiso con la sostenibilidad urbana. Para asegurar una implementación exitosa es crucial revisar, enfocar y fortalecer aspectos como la falta de inspección y la validación por terceros, el apoyo financiero insuficiente y la no obligatoriedad e irregularidad en la medición de los indicadores.
- A nivel edificatorio, la metodología de caracterización del parque edificatorio permitió sistematizar y simplificar el proceso de evaluación ambiental y económica. Por otro lado, la evaluación de un edificio representativo de un municipio de tamaño medio de Colombia permitió verificar qué etapas del ciclo de vida tienen mayor impacto, así como los materiales y sistemas constructivos que contribuyen en mayor medida a dicho impacto.
- La gestión de residuos en los edificios, tanto respecto a la fracción de RCD como de RSU (menormente abordados en el ámbito edificatorio), ofrece un notable potencial para mejorar su sostenibilidad a través de la implementación de estrategias preferiblemente en etapas tempranas de diseño de edificios nuevos. En edificios existentes, a pesar de ser más dificultosas de implementar, también determinadas estrategias contribuyen a su mejora.
- La aplicación de la herramienta desarrollada para evaluar el impacto ambiental y económico de los edificios existentes resulta intuitiva y de fácil manejo para usuarios, y permite establecer las estrategias de mitigación y minimización de los impactos generados a lo largo de todo el ciclo de vida. Así mismo permite incidir en la toma de decisiones de la etapa de uso, que es la que mayor impacto genera, y disponer de una amplia gama de opciones y estrategias para realizar un correcto mantenimiento preventivo o una posible rehabilitación que asegure una mayor durabilidad del edificio y de sus componentes.

Con relación al Objetivo 5. Difusión de los resultados de investigación.

- La difusión de los resultados sobre indicadores de sostenibilidad en el ámbito urbano y edificatorio en Colombia es esencial para fomentar la adopción de prácticas sostenibles. Al comunicar estos hallazgos a responsables de políticas, urbanistas y profesionales del sector de la construcción, se facilita la implementación de estrategias efectivas y se promueve un desarrollo urbano más sostenible en el país.

2. Futuros desarrollos

Considerando los resultados y las conclusiones obtenidas de la tesis doctoral, se identifican algunas posibles líneas de trabajo a futuro que permitirían seguir avanzando en la evaluación de la sostenibilidad del entorno construido, y del parque edificatorio en Colombia en particular. Se plantean los siguientes futuros desarrollos:

- Seguir avanzando en el **desarrollo de indicadores** que contribuyen a la evaluación ambiental y económica de los edificios, y dirigir los esfuerzos a la **dimensión social de la sostenibilidad**, que ha resultado la menos abordada en esta tesis.
- Aplicar las **metodologías** propuestas en otros municipios de Colombia, de diferente tamaño (más grandes y/o más pequeños) para adaptarlas a las particularidades que pudieran existir, y validar su aplicación mediante otros casos de estudio, tanto a nivel urbano como de edificio.
- Adaptar la **herramienta** propuesta para la evaluación ambiental y económica de los edificios residenciales en Colombia ubicados en los climas frío y templado, y su base de datos, a otras regiones del país, como es la zona cálida, con información propia del contexto, lo que resultaría clave para garantizar su **transferencia y aplicabilidad**. Por ello, sería necesario llevar a cabo diversas acciones, como:
 - Integración de las características del contexto urbano en la herramienta, considerando aspectos como zonas climáticas, estratos socioeconómicos, densidad de población y tasas de hacinamiento del país, propias de otras regiones de Colombia.
 - Adaptación de la base de datos con información propia de la región, en cuanto a aspectos como materiales locales, mix eléctrico, instalaciones existentes en el entorno, distancias medias desde los fabricantes hasta el lugar de construcción y el vertedero residuos, entre otros; incluyendo factores económicos y de emisiones ambientales.
 - Ampliar el conjunto de alternativas de soluciones constructivas típicamente utilizados en la región objeto de estudio, considerando la antigüedad y tipología del edificio.
 - Inclusión de aspectos sociales para que la herramienta sea capaz de realizar también la evaluación de la dimensión social de la sostenibilidad.
 - Alojamiento de la herramienta en un soporte informático o plataforma de entorno web para proveer a las personas usuarias de un fácil, intuitivo y amigable manejo.
- Incorporar en la herramienta la **metodología BIM (Building Information Modeling)** y sus **archivos IFC (Industry Foundation Classes)**. Para las etapas de uso en el caso de edificaciones nuevas, se podrían incluir extensiones para que por medio de un archivo IFC se pueda establecer

el impacto que se puede generar en la etapa de uso, analizando la dispersión de los contaminantes, el confort térmico y el desempeño acústico, de esta manera además de analizar el impacto ambiental de esta etapa, se podría establecer el nivel de sostenibilidad conectando con las diferentes HESE, como por ejemplo, con LEED o CASA en el contexto colombiano.

- Acciones de **difusión y transferencia** para dar a conocer la herramienta a entidades y partes interesadas de Colombia (gobiernos locales, universidades, asociaciones de arquitectos e ingenieros, entidades de cooperación local, etc.) y fomentar/facilitar la aplicabilidad de la herramienta en el contexto del país mediante, por ejemplo, la organización de talleres/seminarios de formación.

Anexo:
Autorización coautoría

Este Anexo contiene las autorizaciones de todos los coautores que han contribuido a las diferentes publicaciones científicas que se han utilizado como parte de esta tesis doctoral. Al emitir estas autorizaciones, las coautoras entienden y se comprometen a no utilizar estas publicaciones como parte de otras tesis doctorales.

Marta Braulio Gonzalo, como coautora de los artículos que se detallan a continuación, doy mi **autorización** a **Andrea Jorge Ortiz** para la presentación de los mismos como parte de su tesis doctoral.

Relación de publicaciones:

Título	Assessing urban sustainability: a proposal for indicators, metrics and scoring - a case study in Colombia
Autoría	Jorge-Ortiz A, <u>Braulio-Gonzalo M*</u> , Bovea MD
Referencia	Environment Impact and Sustainability (2022)
DOI	https://doi.org/10.1007/s10668-022-02554-6
JCR	Índice de impacto: 4,080 (2021) Q2
Título	How are indicators in Green Building Rating Systems addressing sustainability dimensions and life cycle frameworks in residential buildings?
Autoría	<u>Braulio-Gonzalo M*</u> , Jorge-Ortiz A, Bovea MD
Referencia	Environmental Impact Assessment Review 95:106793 (2022)
DOI	https://doi.org/10.1016/j.ear.2022.106793
JCR	Índice de impacto: 6,122 (2022) Q1
Título	Exploring how waste management is being approached in green building rating systems: A case study
Autoría	Jorge-Ortiz A, <u>Braulio-Gonzalo M*</u> , Bovea MD
Referencia	Waste Management and Research: 0734242X2211439 (2023)
DOI	https://doi.org/10.1177/0734242X221143952
JCR	Índice de impacto: 4,432 (2021) Q2
Título	Caracterización del parque edificatorio residencial de los pisos térmicos frío y templado en Colombia
Autoría	Jorge-Ortiz A, <u>Braulio-Gonzalo M*</u> , Bovea MD
Referencia	Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía 33 (2024)
DOI	https://doi.org/10.15446/rcdg.v33n1.10367
JCR	Índice de impacto: 0,16 (2023) Q4
Título	Environmental and economic performance of the residential building stock: LCA LCC tool and case study in Colombia
Autoría	Jorge-Ortiz A, <u>Braulio-Gonzalo M*</u> , Bovea MD
Referencia	En revisión
DOI	
JCR	

Asimismo, **renuncio** a poder utilizar estas publicaciones como parte de otra tesis doctoral.

Y para que conste firmo el presente documento,

Castelló de la Plana (España), el 2 de septiembre de 2024



Marta Braulio Gonzalo

Todo ello, atendiendo al artículo 28 del Reglamento de los estudios de doctorado de la Universitat Jaume I de Castelló, regulados por el RD 99/2011, en la Universitat Jaume I (Aprobado en la sesión nº 8/2020 del Consejo de Gobierno de 02 /10/2020):

"(...)

4. En el caso de publicaciones conjuntas, todas las personas coautoras deberán manifestar explícitamente su autorización para que la doctoranda o doctorando presente el trabajo como parte de su tesis y la renuncia expresa a presentar este mismo trabajo como parte de otra tesis doctoral. Esta autorización se adjuntará como documentación en el momento del inicio de evaluación de la tesis.

M^a Dolores Bovea Edo, como coautora de los artículos que se detallan a continuación, doy mi autorización a Andrea Jorge Ortiz para la presentación de los mismos como parte de su tesis doctoral.

Relación de publicaciones:

Título	Assessing urban sustainability: a proposal for indicators, metrics and scoring - a case study in Colombia
Autoría	Jorge-Ortiz A, Braulio-Gonzalo M*, Bovea MD
Referencia	Environment Impact and Sustainability (2022)
DOI	https://doi.org/10.1007/s10668-022-02554-6
JCR	Índice de impacto: 4,080 (2021) Q2
Título	How are indicators in Green Building Rating Systems addressing sustainability dimensions and life cycle frameworks in residential buildings?
Autoría	Braulio-Gonzalo M*, Jorge-Ortiz A, Bovea MD
Referencia	Environmental Impact Assessment Review 95:106793 (2022)
DOI	https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106793
JCR	Índice de impacto: 6,122 (2022) Q1
Título	Exploring how waste management is being approached in green building rating systems: A case study
Autoría	Jorge-Ortiz A, Braulio-Gonzalo M*, Bovea MD
Referencia	Waste Management and Research: 0734242X2211439 (2023)
DOI	https://doi.org/10.1177/0734242X221143952
JCR	Índice de impacto: 4,432 (2021) Q2
Título	Caracterización del parque edificatorio residencial de los pisos térmicos frío y templado en Colombia
Autoría	Jorge-Ortiz A, Braulio-Gonzalo M*, Bovea MD
Referencia	Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía 33 (2024)
DOI	https://doi.org/10.15446/rcdg.v33n1.10367
JCR	Índice de impacto: 0,16 (2023) Q4
Título	Environmental and economic performance of the residential building stock: LCA LCC tool and case study in Colombia
Autoría	Jorge-Ortiz A, Braulio-Gonzalo M*, Bovea MD
Referencia	En revisión
DOI	
JCR	

Asimismo, **renuncio** a poder utilizar estas publicaciones como parte de otra tesis doctoral. Y para que conste firmo el presente documento,

Castelló de la Plana (España), el 2 de septiembre de 2024



M^a Dolores Bovea Edo

Todo ello, atendiendo al artículo 28 del Reglamento de los estudios de doctorado de la Universitat Jaume I de Castelló, regulados por el RD 99/2011, en la Universitat Jaume I (Aprobado en la sesión nº 8/2020 del Consejo de Gobierno de 02 /10/2020):
“(…)

4. En el caso de publicaciones conjuntas, todas las personas coautoras deberán manifestar explícitamente su autorización para que la doctoranda o doctorando presente el trabajo como parte de su tesis y la renuncia expresa a presentar este mismo trabajo como parte de otra tesis doctoral. Esta autorización se adjuntará como documentación en el momento del inicio de evaluación de la tesis.