

Universidad De Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**Incorporación de la huella de carbono en modelos BIM: Caso de aplicación
en una vivienda unifamiliar en condominio**

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

presenta:

José Daniel Vargas Meza

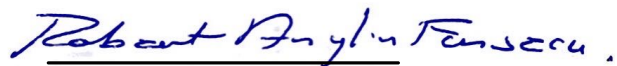
Director de Proyecto de Graduación:

Ing. Robert Anglin Fonseca, MSe.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

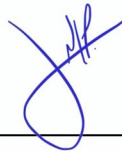
Hoja de Aprobación

Miembros del Tribunal examinador



Ing. Robert Anglin Fonseca, Mse.

Director



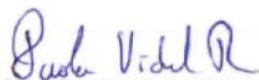
Ing. Harold Guevara Cárdenas

Asesor



Ing. Erick Mata Abdelnour, MBA.

Asesor



Ing. Paola Vidal Rivera

Asesora



José Daniel Vargas Meza

Estudiante

Fecha: 2020, agosto, 14

El suscrito, **José Daniel Vargas Meza**, cédula 4-0231-0747, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné B47376, manifiesta que es autor (a) del Proyecto Final de Graduación **Incorporación de la huella de carbono en modelos BIM: Caso de aplicación en una vivienda unifamiliar en condominio**, bajo la Dirección del **Ing. Robert Anglin Fonseca**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación. Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos Nº 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); “no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

Vargas Meza, José Daniel

Incorporación de la huella de carbono en modelos BIM: Caso de aplicación en una vivienda unifamiliar en condominio

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San Jose, C.R:

J. Vargas M., 2020

iv, 92, [10]h; ils. Col. – 61 refs.

RESUMEN

El cambio climático se debe al aumento de los gases de efecto invernadero (GEI) almacenados en la atmósfera y se manifiesta en un incremento de la temperatura global. Este fenómeno tiene consecuencias graves que amenazan los ecosistemas naturales y, por consiguiente, la vida humana. De la misma manera, la industria de la construcción es responsable del 39% de los GEI a nivel mundial y, por su importancia en el desarrollo de la humanidad, ésta debe ajustarse a las necesidades de la naturaleza. Por tal razón, se decide desarrollar una metodología basada en el Modelado de Información de Edificios (BIM, por sus siglas en inglés) para el cálculo automatizado de la huella de carbono (HC) en proyectos de construcción.

A partir del análisis de investigaciones realizadas sobre la HC de distintos materiales de construcción, tanto nacionales como internacionales, se desarrolló una base de datos que agrupa los principales factores de emisión de los materiales utilizados en una vivienda unifamiliar típica en Costa Rica. Asimismo, con base en normativa internacional como la ISO 19650, el Plan BIM Chile y sistemas de clasificación para construcción; se desarrolló un flujo de trabajo que puede añadirse fácilmente a cualquier Plan de Ejecución BIM para automatizar el proceso de la incorporación de datos de HC en modelos BIM.

Para ilustrar la aplicación y utilidad de la metodología desarrollada, se analizó el aporte de los materiales en la HC de una vivienda unifamiliar típica en un condominio horizontal. A partir de este ejemplo, se concluye que el 60% de las emisiones se deben al uso de mampostería confinada como sistema estructural de la vivienda y por tal razón se presentan algunas recomendaciones para disminuir su impacto ambiental.

INCORPORACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO EN MODELOS BIM: CASO DE APLICACIÓN EN UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR EN CONDOMINIO

Ing. Robert Anglin Fonseca, Mse.

Escuela de Ingeniería Civil

Dedicatoria

A Dios por enseñarme a ser luz.

A mis padres Marianella y Javier, por ser pilares en mi vida y brindarme tanto amor y apoyo.

A mi abuelita Flory, por todos los buenos recuerdos que mantengo en mi corazón.

A Daniela por escucharme y aconsejarme siempre.

Agradecimientos

A toda mi familia y amigos por siempre apoyarme en todo lo que hago.

Al Ing. Robert Anglin por creer en este proyecto aun cuando no nos conocíamos, por su disposición a ayudarme sin límite de horario y por sus consejos profesionales.

Al Ing. Erick Mata por ayudarme a plantear mejor mis ideas.

A la Ing. Paola Vidal por sus valiosas recomendaciones.

Al Ing. Harold Guevara por sus aportes y ayuda.

Al Ing. Pablo Mora, por brindarme su ayuda desinteresadamente y compartir conmigo su tesis de maestría que al final terminó siendo pieza fundamental en este rompecabezas.

Incluyo también a la Cámara Costarricense de la Construcción y a los profesionales de la Comisión de Documentación del BIM Forum Costa Rica por brindarme tanto apoyo y conocimiento que sin duda han sido fundamentales para el resultado de esta investigación.

Por último, agradezco con todo mi corazón a las personas que de una u otra manera conocí en mi paso por la universidad, de todas he aprendido muchísimo.

Índice

| | |
|---|----|
| Capítulo 1. Introducción..... | 1 |
| 1.1. Importancia..... | 3 |
| 1.2. Antecedentes teóricos y prácticos del problema..... | 5 |
| 1.3. Objetivos..... | 11 |
| 1.3.1. Objetivo general..... | 11 |
| 1.3.2. Objetivos específicos | 11 |
| 1.4. Alcance | 11 |
| 1.5. Limitaciones | 14 |
| 1.6. Metodología..... | 15 |
| Capítulo 2. Marco teórico | 18 |
| 2.1. Metodología BIM y sus herramientas | 18 |
| 2.1.1. Estándares BIM | 19 |
| 2.1.2. Herramientas BIM..... | 23 |
| 2.2. Estándares de clasificación para proyectos de construcción | 28 |
| 2.3. Huella de carbono | 30 |
| 2.3.1. Factores de emisión de carbono | 35 |
| 2.3.2. Análisis de datos de huella de carbono recolectados..... | 42 |
| Capítulo 3. Guía para incorporar información en modelos BIM | 47 |

| | | |
|-------------|--|----|
| 3.1. | Solicitud de Información BIM (SDI BIM)..... | 48 |
| 3.2. | Plan de Ejecución BIM (PEB)..... | 51 |
| 3.2.1. | Definiciones iniciales..... | 52 |
| 3.2.2. | Creación de parámetros especiales | 54 |
| 3.2.3. | Incorporación de la información a materiales BIM..... | 56 |
| 3.2.4. | Modelado BIM..... | 57 |
| 3.2.5. | Cálculo de huella de carbono de elementos BIM | 59 |
| 3.2.6. | Extracción de la información del modelo BIM..... | 60 |
| 3.2.7. | Análisis de resultados extraídos de los modelos BIM..... | 61 |
| Capítulo 4. | Ejemplo de aplicación y sus resultados..... | 63 |
| 4.1. | Definiciones iniciales..... | 63 |
| 4.1.1. | Alcance de huella de carbono del proyecto | 63 |
| 4.1.2. | Objetivos BIM | 64 |
| 4.1.3. | Usos BIM | 64 |
| 4.1.4. | Tipos de información requeridos..... | 65 |
| 4.1.5. | Nivel de desarrollo necesario | 65 |
| 4.1.6. | Coordinación de estándares de clasificación y unidades de medición | 66 |
| 4.1.7. | Definición de factores de emisión para Modelos BIM | 68 |
| 4.2. | Modelo BIM de vivienda unifamiliar | 70 |
| 4.2.1. | Cálculo de huella de carbono de elementos BIM | 74 |

| | |
|--|-----|
| 4.3. Análisis de resultados | 77 |
| Capítulo 5. Conclusiones y futuras investigaciones | 83 |
| 5.1. Conclusiones..... | 83 |
| 5.2. Futuras investigaciones | 85 |
| Referencias bibliográficas..... | 87 |
| Anexos | 93 |
| A. Flujo de trabajo planteado | 93 |
| B. Algoritmos de Autodesk Dynamo® para automatización..... | 94 |
| B.1. Algoritmo para incorporar información a materiales BIM..... | 94 |
| B.2. Algoritmo para calcular huella de carbono de elementos | 95 |
| B.3. Algoritmo para parámetros especiales..... | 97 |
| B.4. Algoritmo para exportar los datos de huella de carbono del modelo BIM | 99 |
| C. Planos arquitectónicos vivienda utilizada | 102 |

Tabla de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Línea de tiempo de los tratados internacionales sobre el medio ambiente..... | 5 |
| Figura 2. Logotipo de C-Neutral Costa Rica..... | 7 |
| Figura 3. Esquema de la metodología del Trabajo Final de Graduación | 15 |
| Figura 4. Comparación del organigrama de comunicación usando o no BIM..... | 19 |
| Figura 5. Tipos de estándares BIM..... | 19 |
| Figura 6. Usos BIM típicos..... | 21 |
| Figura 7. Ejemplo Niveles de Desarrollo en BIM | 22 |
| Figura 8. Funcionalidad multidisciplinaria de Autodesk® Revit® | 24 |
| Figura 9. Jerarquía de elementos de Revit®..... | 25 |
| Figura 10. Ejemplo de la clasificación de los elementos Revit® | 26 |
| Figura 11. Ejemplo de las tablas de planificación en Revit® | 26 |
| Figura 12. Esquema de trabajo de Autodesk® Dynamo® | 27 |
| Figura 13. Esquema de una programación básica en Autodesk Dynamo | 28 |
| Figura 14. Fases de un LCA..... | 32 |
| Figura 15. Ejemplo de un sistema de productos..... | 33 |
| Figura 16. Unidades funcionales de base de datos nacional | 37 |
| Figura 17. Matriz eléctrica en Costa Rica y en Reino Unido | 44 |
| Figura 18. Proceso de desarrollo de datos de huella de carbono en modelos BIM..... | 48 |

| | |
|---|----|
| Figura 19. Flujo de trabajo de incorporación de datos huella de carbono en un modelo BIM | 52 |
| Figura 20. Incorporación de nuevos parámetros a modelos BIM en Autodesk Revit® - Parte A | 55 |
| Figura 21. Incorporación de nuevos parámetros a modelos BIM en Autodesk Revit® - Parte B | 55 |
| Figura 22. Incorporación de clasificación en materiales BIM..... | 56 |
| Figura 23. Ingresar a Dynamo desde Autodesk Revit® | 56 |
| Figura 24. Algoritmo para incorporar información en materiales BIM | 57 |
| Figura 25. Parámetros sin llenar y parámetros llenados después del algoritmo | 57 |
| Figura 26. Pasos para definir la clasificación Unifomat en los elementos del modelo | 58 |
| Figura 27. Algoritmo para estimar la huella de carbono de los elementos – Parte B | 59 |
| Figura 28. Algoritmo para exportar información de elementos a hoja de cálculo..... | 60 |
| Figura 29. Principios de Tidy Data aplicados a bases de datos BIM..... | 61 |
| Figura 30. Curva "S" modificada para huella de carbono de un proyecto..... | 62 |
| Figura 31. Diferencia entre LOD 300 y LOD 350..... | 66 |
| Figura 32. Vista general del Modelo BIM Estructural del proyecto seleccionado | 70 |
| Figura 33. Vista en corte de detalles Modelo BIM Estructural del proyecto seleccionado..... | 71 |
| Figura 34. Vista general del Modelo BIM Arquitectónico del proyecto seleccionado | 71 |
| Figura 35. Vista en corte de detalles Modelo BIM Arquitectónico del proyecto seleccionado . | 72 |
| Figura 36. Vista en corte de Modelo BIM Federado del proyecto seleccionado | 72 |

| | |
|--|----|
| Figura 37. Detalles de modelación de las diferentes capas que componen los elementos | 73 |
| Figura 38. Algoritmo para estimar los parámetros de Ventanas utilizados en cálculos posteriores | 74 |
| Figura 39. Algoritmo para estimar los parámetros de Escaleras utilizados en cálculos posteriores | 75 |
| Figura 40. Algoritmo para estimar los parámetros de Puertas utilizados en cálculos posteriores | 75 |
| Figura 41. Algoritmo para el cálculo de huella de carbono utilizando parámetros especiales . | 75 |
| Figura 42. Modelo BIM Federado IFC con información de CO _{2eq} | 76 |
| Figura 43. Cronograma de obra para vivienda | 78 |
| Figura 44. Emisiones de carbono equivalente por tipo de material..... | 79 |
| Figura 45. Emisiones de carbono equivalente por tipo de elemento funcional..... | 81 |
| Figura 46. Curva S modificada de emisiones para el proyecto | 82 |
| Figura 47. Algoritmo para incorporar información a materiales BIM – Total..... | 94 |
| Figura 48. Algoritmo para incorporar información a materiales BIM – Parte A | 94 |
| Figura 49. Algoritmo para incorporar información a materiales BIM – Parte B | 95 |
| Figura 50. Algoritmo para calcular huella de carbono de elementos – Total | 95 |
| Figura 51. Algoritmo para calcular huella de carbono de elementos – Parte A | 96 |
| Figura 52. Algoritmo para calcular huella de carbono de elementos – Parte B | 96 |
| Figura 53. Algoritmo para parámetros especiales – Total..... | 97 |
| Figura 54. Algoritmo para parámetros especiales – Parte A..... | 97 |

| | |
|---|-----|
| Figura 55. Algoritmo para parámetros especiales – Parte B..... | 98 |
| Figura 56. Algoritmo para parámetros especiales – Parte C..... | 98 |
| Figura 57. Algoritmo para exportar información de elementos a hoja de cálculo – Total..... | 99 |
| Figura 58. Algoritmo para exportar información de elementos a hoja de cálculo – Parte A ... | 99 |
| Figura 59. Algoritmo para exportar información de elementos a hoja de cálculo – Parte B . | 100 |
| Figura 60. Algoritmo para exportar información de elementos a hoja de cálculo – Parte C . | 101 |
| Figura 61. Algoritmo para exportar información de elementos a hoja de cálculo – Parte D . | 101 |
| Figura 62. Plano arquitectónico de la vivienda utilizada: Primer Nivel | 102 |
| Figura 63. Plano arquitectónico de la vivienda utilizada: Segundo Nivel | 103 |

Tabla de Cuadros

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Fases de análisis de ciclo de vida para el TFG según norma EN 15978:2011..... | 12 |
| Cuadro 2. Diferencias entre metodología común y metodología BIM..... | 18 |
| Cuadro 3. Equivalencias de CO _{2eq} entre diferentes GEI | 31 |
| Cuadro 4. Fases del LCA según EN 15978:2011 | 35 |
| Cuadro 5. Factores de emisión para concreto con un f'c = 170 kg/cm ² | 38 |
| Cuadro 6. Factores de emisión para concreto con un f'c = 210 kg/cm ² | 38 |
| Cuadro 7. Factores de emisión para concreto con un f'c = 325 kg/cm ² | 39 |
| Cuadro 8. Factores de emisión para bloques de mampostería de diferentes tamaños | 39 |

| | |
|---|----|
| Cuadro 9. Factores de emisión para viguetas pretensadas | 40 |
| Cuadro 10. Factores de emisión presentados en Zúñiga Sandí (2018) | 41 |
| Cuadro 11. Factores de emisión según las distintas referencias..... | 42 |
| Cuadro 12. Factores de emisión por kWh para Costa Rica y Reino Unido | 44 |
| Cuadro 13. Base de datos de factores de emisión utilizada en este TFG | 46 |
| Cuadro 14. Definición de los Tipos de Información para modelos BIM | 49 |
| Cuadro 15. Interacción entre LOD y factores de emisión | 50 |
| Cuadro 16. Formulario para estándares de clasificación y unidades de medición | 53 |
| Cuadro 17. Base de datos de CO _{2eq} según unidad de medición | 54 |
| Cuadro 18. Parámetros creados para la incorporación de datos de CO _{2eq} a modelos BIM | 54 |
| Cuadro 19. Coordinación de estándares para subestructura | 66 |
| Cuadro 20. Coordinación de estándares para esqueleto y piel | 67 |
| Cuadro 21. Coordinación de estándares para interiores y acabados..... | 67 |
| Cuadro 22. Factores de emisión para materiales según su método de cuantificación | 68 |
| Cuadro 23. Base de datos de factores de emisión de materiales a incorporar en modelos BIM | 69 |
| Cuadro 24. Resumen de emisiones de carbono por tipo de material | 79 |
| Cuadro 25. Resumen de emisiones de carbono por tipo de elemento funcional | 80 |

Capítulo 1. Introducción

El efecto invernadero es un fenómeno natural que ocurre en la Tierra por medio del cual la temperatura del planeta se mantiene estable. El proceso es similar al que se da en un invernadero utilizado para el cultivo de plantas, pero a escala planetaria y su cubierta es en conjunto la capa de ozono y algunos gases que se mantienen en la atmósfera. Entre ellos, llamados gases de efecto invernadero (GEI), el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano, el óxido de nitrógeno y el ozono (Benavides Ballesteros & León Aristizabal, 2007). Este efecto se ha venido intensificando debido a los GEI emitidos por actividades humanas (Benavides Ballesteros & León Aristizabal, 2007). Estas actividades generan cambios en la concentración atmosférica de los GEI y aerosoles, en la radiación solar y en el uso de suelo, problemas que afectan la absorción, dispersión y emisión de la radiación dentro de la atmósfera y en la superficie de la tierra. Debido al aumento de los GEI, se han generado resultados negativos como por ejemplo el cambio climático; este consiste en la alteración de las condiciones climáticas predominantes debido a actividades humanas y se manifiesta en un aumento de la temperatura global. Esto a su vez genera un aumento en el nivel del mar; cambios en los regímenes, frecuencias e intensidades de precipitación, es decir, climas extremos e impactos en la agricultura, recursos hídricos, ecosistemas, la salud humana, entre otros (Benavides Ballesteros & León Aristizabal, 2007).

Por otra parte, la industria de la construcción es un agente emisor muy importante de gases de efecto invernadero debido a que produce un 39% de las emisiones de dióxido de carbono generadas mundialmente (United Nations Environment Programme, 2019). De ellas, un 18% se deben al proceso de diseño, manufactura de materiales y procesos constructivos (Department for Business Innovation & Skills, 2010), es decir, en total 7% de las emisiones globales son producto de procesos constructivos y asociados. La construcción ha sido, desde la antigüedad, un motor para el desarrollo de la humanidad y por ende deberá tener un cambio cultural radical para lograr ajustarse a los estándares que exige el planeta Tierra.

Costa Rica, como un aporte para mitigar el cambio climático, tiene como meta ser carbono neutral en el año 2085 (Gobierno de Costa Rica, 2017) y para ello debe reducir paulatinamente sus emisiones de gases y cambiar procesos de generación de energía, transportes de bienes y personas, construcción, entre otros; hasta llegar al equilibrio. Además, la nación se ha

promocionado mundialmente como un país verde por sus áreas protegidas, el gran impulso de la reforestación, el ecoturismo y la generación de energía eléctrica que proviene de fuentes renovables, sin embargo, en esa declaración subyace una cruda realidad. Según Alpizar, Madrigal & Salas (2018), el país no es tan “verde” como se promociona especialmente por:

- Transporte público: responsable del 80% de los GEI del país
- Aguas residuales: Solo el 14.43% de ellas reciben un tratamiento adecuado
- Residuos sólidos: el 30% de ellos no son tratados y el 20% son dejados a cielo abierto

Por otro lado, el sector de la construcción en el 2019 aportó el 4.0% del producto interno bruto del país y es fuente de empleo para más de 140 000 personas en Costa Rica, lo que equivale aproximadamente a un 5% del total de empleos formales en el país (Cámara Costarricense de la Construcción, 2020). En ese mismo año, el Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA) tramitó solicitudes para permisos de construcción de obras que suman un total 7 689 659 metros cuadrados y el 37.39% de ellos correspondió a viviendas unifamiliares, siendo entonces el rubro más importante en el sector de la construcción costarricense (Cámara Costarricense de la Construcción, 2020). Por esa razón la huella de carbono generada a por la construcción de viviendas en Costa Rica es y será un tema importante en los próximos años.

Existen distintas metodologías e indicadores para medir el impacto ambiental de los proyectos de construcción. Por ejemplo, la huella de carbono de un producto es un indicador que mide indirectamente el impacto de este sobre el planeta. Si se piensa una edificación como un producto, se pueden tomar las mejores decisiones analizando este indicador, pero para ello es necesario tener herramientas generalizadas que permitan contabilizarlo desde la etapa de la concepción del proyecto; con el fin de diseñar edificaciones más sostenibles.

El modelado de información para la construcción (BIM, por sus siglas en inglés: *Building Information Modeling*) es una metodología de trabajo basada en modelos tridimensionales que guardan información útil para el desarrollo de proyectos. Esta les da a los profesionales del sector de la construcción herramientas que mejoran la eficiencia en la planificación, el diseño, la construcción, operación y mantenimiento de edificaciones e infraestructura. Entre sus beneficios, se pueden realizar diseños preliminares más rápidamente lo cual a su vez permite iterar y comparar diferentes opciones de modelos que permite escoger la mejor opción basada en los objetivos del proyecto.

La reducción o compensación de gases de efecto invernadero disminuye el impacto ambiental de un proyecto, siendo consecuente con las políticas nacionales y con valores que identifican a Costa Rica mundialmente. Es por ello que esta investigación se centró en el desarrollo de una metodología, basada en estándares internacionales, para incorporar automáticamente la huella de carbono dentro del modelado de información para la construcción (BIM, por sus siglas en inglés: *Building Information Modeling*). Lo anterior con el propósito de utilizar información ya presente en modelos BIM que permita buscar diseños más eficientes y sostenibles.

1.1. Importancia

El análisis de la huella de carbono de la construcción es un proceso tedioso y lento ya que primero se debe buscar los factores de emisión de cada material utilizado y la mayoría del tiempo esta información es escasa para Costa Rica. Después corresponde contabilizar los materiales para luego hacer la estimación total del edificio, si en algún momento el diseño de la construcción cambia, es necesario volver a realizar todo el proceso nuevamente. Por lo tanto, el producto principal de este TFG fue generar un protocolo para la incorporación automática de la información de huella de carbono como un atributo en los elementos del modelo BIM de una vivienda en condominio. Esto con el fin de agilizar este proceso y utilizar la información que se va generando a partir de la metodología BIM.

La metodología se comprobó con una vivienda unifamiliar en condominio horizontal ya que, según estadística de la Cámara Costarricense de la Construcción, este es uno de los sectores más importantes de la construcción en el país (Cámara Costarricense de la Construcción, 2020). Además, al analizar la emisión de CO₂ de una casa en condominio se puede obtener la huella de carbono generada al construir todas las casas de ese tipo en un proyecto y si se utiliza este dato para luego hacer mejoras en la sostenibilidad del diseño, el impacto positivo será aún mayor. Por otro lado, la mayoría de las investigaciones y aplicaciones realizadas para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero han sido en la etapa operación de los edificios, en la eficiencia energética y en optimización de recursos hídricos y solares.

Además, con la incorporación de la información de la huella de carbono dentro del modelo y metodología BIM, se visibiliza la importancia de cuidar este aspecto para todos los participantes que afectan el proyecto. Desde el equipo de diseño, el propietario, la empresa constructora y hasta los subcontratistas. De la misma manera, con la metodología planteada en este

documento se pueden hacer comparaciones de huella de carbono cambiando los métodos constructivos, diseños y materiales e iterar estos diseños con el fin de optimizar ambientalmente las edificaciones. También se pueden realizar líneas de tiempo con el CO₂ que va aportando la etapa de construcción, incluso antes de que se mueva la primera piedra, en la etapa de diseño. Estos gráficos podrán ser utilizados para compararlos con un registro en obra emisiones que le permitan a los interesados realizar ajustes para alcanzar la meta de emisiones de carbono propuestas.

Los resultados y la metodología planteada podrían ser útiles para aquellas personas o empresas que deseen certificar sus procesos y edificaciones en buenas prácticas ambientales o certificaciones de sostenibilidad nacionales e internacionales como *Excellence in Design for Greater Efficiencies* (EDGE), *Leadership in Energy & Environmental Design* (LEED), *Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology* (BREEAM), entre otros. Con todos los beneficios, además de los ambientales, que esto podría conllevar.

Se destaca que en febrero 2020, el Ministerio de Planificación y Política Económica (MIDEPLAN) presentó la Estrategia Nacional BIM Costa Rica, cuyo objetivo principal es implementar la metodología BIM paulatinamente en procesos de licitación promovidos por el Gobierno Central del 2020 al 2024. Este hecho sienta las bases de una futura implementación BIM exponencial en el sector construcción del país, por ello y en pro del interés país de sostenibilidad, es vital poder utilizar todos estos datos que están al alcance en modelos BIM para tener proyectos con menor impacto ambiental.

Por último, se espera que, con la facilidad y rapidez con la que se podrá calcular la huella de carbono, se promuevan iniciativas para el etiquetado ambiental de los materiales de construcción ya que el mercado empezará a demandar esta información. Adicionalmente, se espera promover estudios de impacto ambiental y certificaciones de sostenibilidad que añadan la huella de carbono dentro de sus parámetros. Por ejemplo, se podrá calcular un indicador de las toneladas de dióxido de carbono emitidas por área de construcción, que podrá ser usado como referencia para edificaciones similares. Con este indicador se le dará más importancia al impacto de las emisiones en las edificaciones y se incentivará a la población en general en buscar diseños más sostenibles sin importar el arraigo cultural que existe con algún determinado sistema constructivo.

1.2. Antecedentes teóricos y prácticos del problema

En el ámbito internacional, se viene discutiendo el tema de degradación ambiental desde 1972 con la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano (también conocida con Conferencia de Estocolmo). Se muestra en la Figura 1 un resumen de los principales acuerdos internacionales en cuanto al medio ambiente.



Figura 1. Línea de tiempo de los tratados internacionales sobre el medio ambiente.

Adaptado de: (Cioruta, Luran, & Coman, 2018)

Como se observa, los acuerdos internacionales han ido evolucionando con el objetivo de contrarrestar las afectaciones en el medio ambiente que los patrones actuales de la vida humana están causando. Además, buscan crear consciencia para cambiar los patrones de consumo a unos más sostenibles. De la misma manera, se nota un gran interés en cuanto a reducir y mitigar el cambio climático y para ello, se ha estado trabajando en acuerdos internacionales para la reducción de emisiones de GEI como se indica en el Acuerdo de París 2015.

En Costa Rica, en el 2007 el expresidente Oscar Arias Sánchez dio a conocer la iniciativa para contrarrestar el cambio climático en Costa Rica por medio de la Carbono-Neutralidad. Esta iniciativa se consolidó en el 2012 por parte de la expresidenta Laura Chinchilla Miranda, mediante el acuerdo No. 36-2012-MINAET. El Programa País Carbono Neutralidad 1.0 (PPCN 1.0) fue creado como un mecanismo voluntario para el reporte de inventarios de gases de efecto invernadero (GEI) y la demostración de carbono neutralidad en organizaciones: la meta era llegar a ser Carbono-Neutral para el 2021 (Mora, 2017).

Sin embargo, el inventario utilizado para la proyección de la fecha meta de este primer plan era muy simple y enfocado en las acciones de las empresas públicas y privadas para reducir la huella de carbono, no se tomó la totalidad de emisiones del país (Avendaño, 2017). Por otro lado, el 2014 fue el año de mayor importación de vehículos en el país, un aumento atípico según las estimaciones del PPCN 1.0 por lo que la meta cada vez se ha ido alejando más (Avendaño, 2017). En adición a ello, Avendaño (2017) expone que los problemas estructurales del país, como el déficit fiscal, generaron que el país se quedara sin dinero para invertir lo suficiente en políticas de carbono neutralidad, entre ellas: explotar nuevas fuentes energéticas y de transporte que permitan reducir las emisiones. Por ello, en el 2017 el gobierno de Costa Rica lanzó el Programa País Carbono Neutralidad 2.0.

Este plan tiene una visión de más largo plazo con tres hitos importantes, uno al 2030; otro al 2050; y, finalmente, otro al 2100, tomando como base el Acuerdo París 2015 (Gobierno de Costa Rica, 2017). En el 2030, el país dará cuentas de su avance a través de la Contribución Nacionalmente Determinada (CND) según el Acuerdo de París 2015; en el 2050 el país se propone a reducir al 50% las emisiones que se publicaron Inventario Nacional de gases de efecto invernadero y absorción de carbono (2012); y para el 2100 el país ya debe ser carbono neutral, sin embargo se pone como meta el año 2085 para alcanzarlo (Avendaño, 2017).

Con el mismo objetivo de lograr la carbono-neutralidad, en el 2012, el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) por medio del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y la Oficina Costarricense de Implementación Conjunta (OCIC), puso a disposición un inventario de los gases de efecto invernadero dividido en cuatro sectores:

- Sector Energía
- Sector Procesos Industriales y Uso de Productos (IPPU)
- Sector Agricultura, Forestal y otros usos de la tierra (AFOLU)
- Sector Residuos

El IMN incluye los siguientes gases: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), monóxido de carbono (CO), óxido nitroso (N₂O), óxidos de nitrógeno (NO_x) y otros hidrocarburos volátiles diferentes del metano (NMVOC, por sus siglas en inglés). Además, se evalúa la emisión de dióxido de azufre (SO₂), partículas de hidrofluorocarburos (HFC), perftuorocarbonos (PFC) y

hexafluoruro de azufre (SF₆) (Chacón et al., 2012). Este inventario sentó las bases del PPCN 1.0 y posteriormente del PPCN 2.0.

Un subproducto de este inventario es una base de datos con los factores de emisión de gases de efecto invernadero para los cuatro sectores anteriormente expuestos y los factores de emisión de CO_{2eq} por parte de la generación energética en Costa Rica. No obstante, esta base de datos no incluye materiales de construcción.

Junto con los PPCN, se instauró la marca C-Neutral Costa Rica (ver Figura 2) que es un sello de carbono neutralidad reconocido por el gobierno y que se le da a las empresas que voluntariamente decidan obtenerlo. Para ello se utiliza la norma de INTECO (INTE B5:2016) llamada "Norma para demostrar la Carbono Neutralidad. Requisitos". Esta norma establece los requisitos que debe cumplir una organización para demostrar la Carbono Neutralidad, sin embargo, esta norma no aplica para la determinación de la carbono neutralidad de productos, como lo es el caso de una vivienda (INTECO, 2016).



Figura 2. Logotipo de C-Neutral Costa Rica

Fuente: (Gobierno de Costa Rica, 2017)

Para el cálculo de la huella de carbono de productos existe normativa nacional como la INTE/ISO 14067:2019 y en el ámbito internacional existen varios como la metodología de acceso público del *British Standards Institute* (PAS 2050:2011) llamada *Specification for the assessment of life cycle green house gas emissions of goods and services* y también la normativa del International Organization for Standardization (ISO 14067:2019), actualizada en el 2019, llamada *Carbon Footprint of Products - Requirements and guidelines for quantification*. Esta normativa a su vez alimenta al estándar del European Committee for Standardization que tiene su normativa (EN 15978:2011) llamado *Sustainability of construction works. Assessment*

of environmental performance of buildings. Calculation method que permite definir el alcance del cálculo de la huella de carbono de una obra. Esta normativa se se explica en el Capítulo 2 de este documento.

Con estos antecedentes, tanto nacionales como internacionales, se infiere la importancia de la contabilización de la huella de carbono de los proyectos de construcción para poder aportar en los cálculos de carbono neutralidad mundial.

En cuanto a la contabilización de la huella de carbono para proyectos de construcción, se han realizado numerosas investigaciones, tanto nacionales como internacionales. Por la naturaleza de este Trabajo Final de Graduación (TFG), los antecedentes se dividieron en dos principales corrientes y estas se diferencian por su utilización o no de la metodología BIM. Se empezará haciendo un resumen de los antecedentes que aportan la metodología de cálculo y los datos de huella de carbono para diferentes materiales.

En primer lugar, se puede citar el Trabajo Final de Graduación de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Costa Rica hecho por Badilla Arroyo, et al. (2015), titulado *Cálculo de huella de carbono para materiales de construcción en Costa Rica*. En el se presenta el procedimiento utilizado para el cálculo, datos de huella de carbono para distintos materiales y comparaciones de la huella de carbono nacional e internacional para ellos.

De la misma manera, el Trabajo Final de Graduación de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica realizado por Juan Pablo Castro, titulado *Huella de carbono para la construcción de una nueva delegación policial en León XIII* muestra una metodología de cálculo de huella de carbono por medio del presupuesto de materiales, la misma se utilizó en la presente investigación, pero usando BIM como herramienta de conteo. Esta investigación utiliza una base de datos genérica del Reino Unido (Castro Alpízar, 2012).

También, el Trabajo Final de Graduación que realizó José Daniel Caro Flórez, titulado *Cálculo de la huella de carbono emitida en Costa Rica al construir una casa típica de clase media en condominio horizontal en el Gran Área Metropolitana* es otro antecedente del tema. Su idea fue crear una vivienda en condominio típica para el GAM a partir de un estudio de los modelos de vivienda en 30 diferentes condominios horizontales en el GAM y a partir de ello, se hizo el cálculo de la huella de carbono en la etapa constructiva del proyecto. Sin embargo, el cálculo

incluye solamente el transporte de los materiales y su construcción, dejando de lado la extracción y fabricación de los materiales de construcción. En este TFG se utilizó el mismo diseño de vivienda expuesto por Caro (2019).

Existe un Trabajo Final de Graduación para Licenciatura en Ingeniería Ambiental del Instituto Tecnológico de Costa Rica realizado por Ana Lucía Sandí Zúñiga, titulado *Herramientas para la estimación de Huella de Carbono de proyectos constructivos*. Esta investigación resolvió el cálculo de la huella de carbono por medio de la programación de una hoja de cálculo en Microsoft Excel en donde el profesional encargado debe ir llenando esta hoja con la cantidad de cada uno de los materiales de la construcción (Sandí 2019). En el presente Trabajo Final de Graduación, se automatiza ese paso.

Por último, se puede incluir dentro de los antecedentes de este proyecto, la Tesis de Maestría en Arquitectura Sostenible del Ing. Pablo Daniel Mora Marín, su título es *A net-zero emission concept for a single-family house typology in Costa Rica*. El objetivo principal de esta investigación fue proponer un diseño arquitectónico para una vivienda unifamiliar que tuviese emisiones netas de carbono iguales a cero. Esto quiere decir que todo el carbono emitido durante el ciclo de vida de la vivienda tiene que ser contrarrestado por medio de la generación eléctrica en sitio, también por la eficiencia energética de los equipos y ventilación para así equilibrar las emisiones. En este TFG se utilizó la metodología de escogencia de bases de datos de factores de emisión presentadas por Mora Marín (2017) y también se compararon los resultados entre sí.

En relación con BIM, se enumeran las investigaciones que utilizan esta metodología para el cálculo de la huella de carbono. El primer acercamiento que se identificó fue un estudio realizado por la Universidad de Warwick (2015) llamado *Embodied Energy and Embodied Carbon of Low Income Houses in Thailand*. La investigación se basó en calcular la huella de carbono de diferentes diseños para viviendas de bajos recursos en Tailandia con el objetivo de encontrar el diseño más eficiente en cuanto a la huella de carbono. Para la modelación de las viviendas se utilizó la herramienta de Trimble Inc. llamada *SketchUp*, esta es parte del ecosistema BIM, pero es una de las herramientas más básicas disponibles.

Además, se encontraron varios artículos que calculan la huella de carbono de la etapa operativa de la edificación entre ellos *Building-information-modeling enabled life cycle assessment, a*

case study on carbon footprint accounting for a residential building in China de Yang, Hu, Wu, & Zhao (2018). Lo interesante de este caso es que demuestra que se puede utilizar la metodología BIM para crear una base de datos que permita calcular la huella de carbono de la operación de la edificación, en este caso, una residencia unifamiliar. Esta investigación es de gran utilidad ya que muestra diferentes procesos y herramientas que permiten manipular la base de datos creada con el modelo en 3D de la vivienda estipulada en la investigación.

Además, existe una investigación expuesta en el *25th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference* celebrado en 2018 en Copenhagen, Dinamarca. La investigación se titula *LCA and BIM: Integrated assessment and visualization of building elements' embodied impacts for design guidance in early stages* y fue realizada por Martin Röck, Alexander Hollberg, Guillaume Habert y Alexander Passer. Su aporte principal es el uso del ecosistema informático Autodesk Dynamo que facilita procesamiento de bases de datos por medio de automatización de tareas. De la misma manera, el presente TFG utilizó herramientas de Autodesk Dynamo para la manipulación de las bases de datos y la automatización del proceso de cálculo, en el Capítulo 2 se explica con más detalle.

En resumen, este TFG agrupa las bases de datos de factores de emisión para materiales comunes en la construcción de una vivienda disponibles en Costa Rica. Por otro lado, entrega un robusto manual para incorporar la huella de carbono como requerimiento en un proceso BIM y explica cómo automatizar el proceso, utilizando específicamente el software Autodesk Revit® y Autodesk® Dynamo®.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Proponer una metodología para la incorporación de la información relacionada con la huella de carbono en viviendas unifamiliares mediante la utilización del modelado de información para la construcción (BIM) que permite facilitar su cálculo.

1.3.2. Objetivos específicos

- Definir factores de emisión de carbono equivalente para cada material de construcción utilizado en una vivienda a partir de investigaciones previas.
- Crear una lista de herramientas que permitan la extracción de bases de datos del modelado de información para la construcción (BIM) a fin de utilizarlas en el cálculo de huella de carbono.
- Establecer un diseño de una vivienda unifamiliar en condominio horizontal para la creación del modelo en el software Autodesk Revit®.
- Crear el modelo 3D de la vivienda escogida en Autodesk Revit® incluyendo datos de huella de carbono.
- Elaborar una guía del procedimiento utilizado para incorporar la huella de carbono dentro de un modelo en el software Autodesk® Revit® utilizando el software Autodesk® Dynamo®.

1.4. Alcance

La investigación se enfocó en el cálculo de la huella de carbono parcial (por materiales) de una vivienda unifamiliar ubicada en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica, por medio de la incorporación de los valores de CO_{2eq} a un modelo BIM realizado en el software Autodesk® Revit® 2019. Para el análisis, se utilizó la vivienda en condominio presentada en el TFG de Caro (2019), esta vivienda es representativa de las casas construidas, ofrecidas o tramitadas durante el 2014 y el 2017 en condominios residenciales en el Gran Área Metropolitana en Costa Rica (Caro, 2019). La vivienda utiliza principalmente un sistema de mampostería confinada y tiene 101 m² de construcción divididos en 2 pisos, 3 habitaciones, 2.5 baños, sala, comedor, cocina y cochera. Su planta arquitectónica puede encontrarse en el Anexo C.

Como lo indica la norma ISO 14040:2006, es necesario determinar tanto la unidad funcional del análisis como el alcance. La unidad funcional se definió como emisiones de CO_{2eq} por metro cuadrado de construcción por año de vida útil de la vivienda. En este caso el metro cuadrado de construcción se define como el área interior de la vivienda y deja de lado el parqueo, balcones y terrazas. De la misma manera, la vida útil de la vivienda se define en 60 años según el Órgano de Normalización Técnica (2015).

Para delimitar su alcance se tomó el estándar europeo EN 15978:2011, este estándar especifica el método de cálculo, basado en el Análisis de Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés) de la huella ambiental de construcciones. Este estándar divide el ciclo de vida de una edificación en diferentes fases; en este caso se delimita el cálculo de huella de carbono embebido en la vivienda para la fase de materiales (A1-A3) solamente ya que Castro Alpizar (2012) y Mora Marín (2017) concluyen que las emisiones debido a la manufactura de los materiales equivalen a más del 95% de las emisiones generadas por el proceso constructivo.

Es decir, se incluye la extracción de la materia prima utilizada en la creación de los materiales, el traslado de ésta hasta las fábricas de manufactura y el proceso de manufactura de los materiales. Se sale del alcance de este proyecto la huella de carbono debido al transporte de los materiales hasta la construcción (A4) y el proceso constructivo (A5) ya que el objetivo principal de este TFG fue proponer una metodología para la incorporación de los datos en un modelo BIM. En el Cuadro 1 se muestran en verde las fases consideradas en el LCA para este TFG.

Cuadro 1. Fases de análisis de ciclo de vida para el TFG según norma EN 15978:2011

| Fase de materiales | | | Fase de construcción | | Fase de uso | | | | | | | | Final de la vida útil | | | |
|--------------------------|------------|-------------|--------------------------|----------------------|------------------------|---------------|--------------|-----------|--------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------|-------------|--|
| A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | C1 | C2 | C3 | C4 | |
| Extracción materia prima | Transporte | Manufactura | Transporte de materiales | Proceso constructivo | Uso de la construcción | Mantenimiento | Reparaciones | Reemplazo | Remodelación | Uso de energía operacional | Uso de agua operacional | Deconstrucción, demolición | Transporte | Procesamiento de residuos | Disposición | |

Adaptado de: (CEN, 2011)

El cálculo del CO_{2eq} embebido en las fases A4 y A5 depende de la ubicación del proyecto, de la logística de transporte de los materiales y de la estrategia de ejecución de la obra; características propias de cada proyecto por lo que se debe hacer un análisis más profundo que permita desarrollar una metodología genérica para utilizar datos de los modelos BIM para el cálculo de estas fases. Por ende, el CO_{2eq} embebido en estas fases no está dentro del alcance del presente TFG.

Los materiales de construcción de la vivienda que se incluyeron en el LCA fueron los materiales que más aportan en la huella de carbono generalmente según Röck et al. (2018). Se enlistan a continuación los materiales considerados:

- Obra Gris:
 - Acero de refuerzo
 - Bloques de mampostería: 15x20x40
 - Bloques de poliestireno expandido para entrepiso
 - Canoas HG
 - Concretos: 170 kg/cm², 210 kg/cm² y 325 kg/cm²
 - Cubierta de techo (HG #26)
 - Láminas de gypsum
 - Lastre de compactación
 - Mortero de pega de bloques
 - Tubos de hierro negro para cerchas de techo
 - Viguetas de concreto pretensadas para entrepiso
- Acabados:
 - Cerámica genérica
 - Mortero para pega de cerámica
 - Mortero de repello
 - Marcos de madera para puertas
 - Marcos de aluminio para ventanas
 - Puertas: internas y externas
 - Pintura: interior y exterior
 - Repello para paredes
 - Vidrio para ventanas

1.5. Limitaciones

Si bien se realizó una exhaustiva búsqueda de datos de huella de carbono para materiales de construcción, una de las principales limitantes de esta investigación es que estos valores se validaron utilizando referencias de otros estudios. Para contrarrestar esta incertidumbre, se compararon los valores de cada una de las investigaciones y se hizo una escogencia para cada material basados en el alcance del LCA de cada referencia con el objetivo que todos los datos tengan las mismas fases de análisis (de la cuna a la puerta).

Además, la información sobre algunos factores de emisión no existen para Costa Rica por lo que se tuvo que recurrir a bases de datos internacionales para la obtención de estos datos con la consecuencia de la incertidumbre de que los resultados reales, con la información propia del país, sean más altos o más bajos. A manera de mitigación, se compararon los factores de emisión de la generación de energía eléctrica de los países de donde se obtuvo la información contra los de Costa Rica, esta información se puede utilizar como indicador para concluir sobre las posibles diferencias que existirían entre los factores nacionales y los internacionales.

Por otro lado, la metodología BIM no se limita a la utilización de un software específico, no obstante, en esta investigación se utilizó el software Autodesk® Revit® 2019 y Autodesk® Dynamo®, ya que se tienen las licencias estudiantiles necesarias para realizar el alcance total de esta investigación.

Asimismo, el modelo BIM desarrollado no incluye algunos elementos de acabados ni elementos electromecánicos ni tampoco cálculos de huella de carbono en la fase operativa de la edificación por lo que los resultados de esta investigación no se pueden extrapolar a un índice de la huella de carbono total por metro cuadrado de construcción.

Los resultados de esta investigación solo podrán ser utilizados como guía metodológica para la incorporación de información de CO_{2eq}, u otro tipo de huella ambiental, en modelos BIM y su utilización para el cálculo por medio del conteo de los materiales.

1.6. Metodología

La metodología seguida para desarrollar el TFG se muestra en la Figura 3.

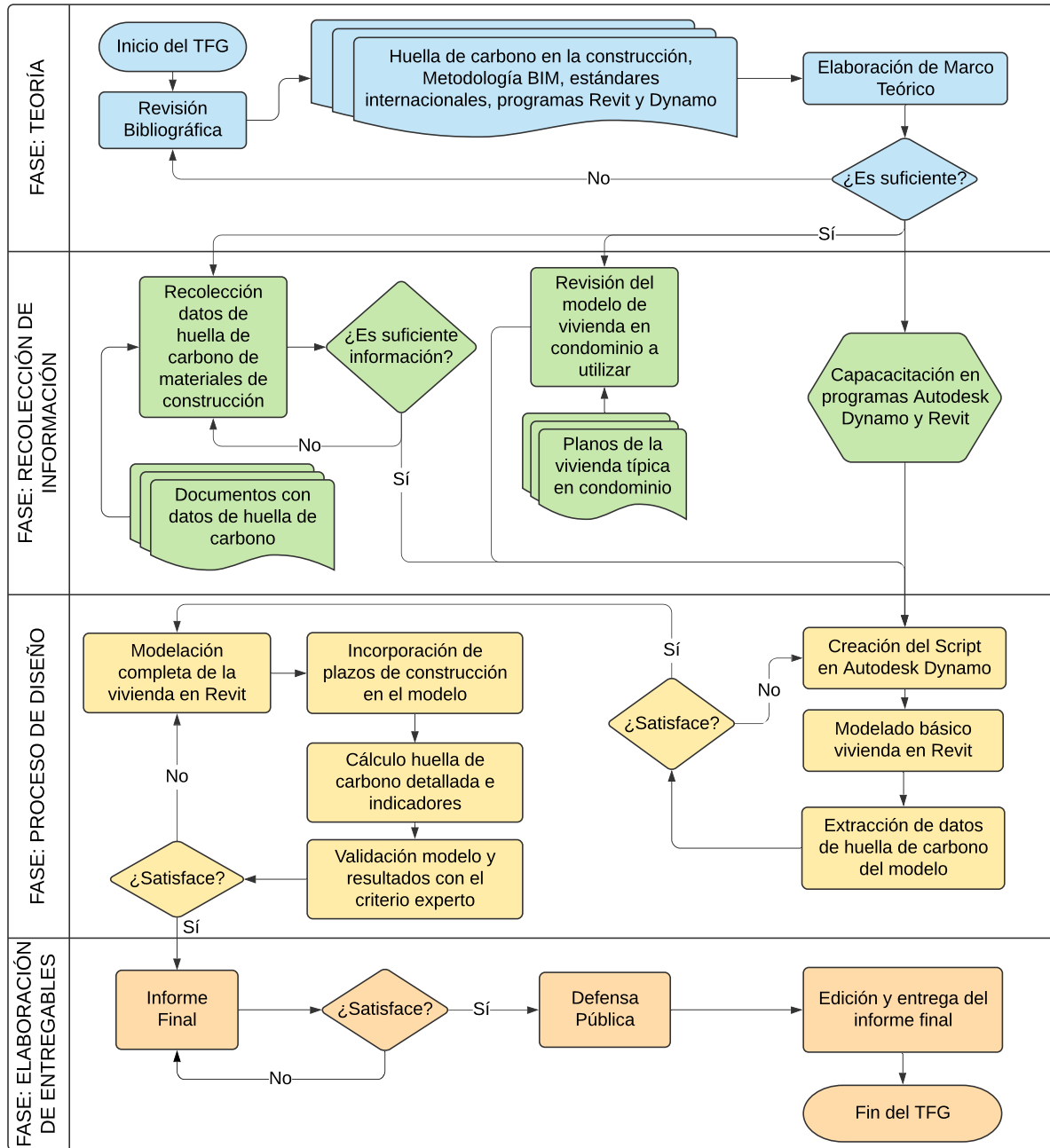


Figura 3. Esquema de la metodología del Trabajo Final de Graduación

El proyecto se divide en cuatro grandes fases, la primera fase es la teórica, se sigue después con la fase de recopilación de información, la fase del proceso de diseño es la tercera y por último se tiene la fase de elaboración de entregables.

La fase teórica inició haciendo una búsqueda de la información necesaria para la elaboración del TFG. Se buscaron documentos que contenían definiciones de la huella de carbono en la construcción, metodología BIM y sus estándares de trabajo colaborativo, estándares internacionales para la delimitación de la huella de carbono, procedimientos de carbono neutralidad en el país, capacitaciones sobre Autodesk® Dynamo®, entre otros. Además, se elaboró el marco teórico incluyendo los diferentes estándares de colaboración BIM y formatos utilizados en la parametrización de la base de datos y del modelo, entre ellos: ISO 19650:2018, Uniformat, Omniclass y EN 15978:2011.

La segunda fase tuvo tres procesos, el primero de ellos fue realizar una revisión de los planos constructivos proporcionados por Caro (2019) *Cálculo de la huella de carbono emitida en Costa Rica al construir una casa típica de clase media en condominio horizontal en el Gran Área Metropolitana* con el objetivo de conocer las características de los materiales con los que se hizo la base de datos de factores de huella de carbono. En segundo lugar, realizó el análisis de todos los datos compilados de huella de carbono en procesos y materiales de construcción, estos siguieron las metodologías explicadas en el Capítulo 2 y además fueron validadas haciendo comparaciones entre referencias mediante la delimitación del LCA de cada referencia. Posteriormente, se validaron con el Comité Asesor con el fin de crear una base de datos propia que sería después incorporada en el modelo BIM de la vivienda. Por último, se realizó un proceso de capacitación en el uso de las herramientas de software. Para ello se utilizaron diferentes cursos en línea sobre el modelado en Autodesk Revit® y algunos seminarios de Autodesk® University para la programación del Autodesk® Dynamo®.

En la siguiente fase se aplicó toda la información obtenida de las fases anteriores para crear el modelo BIM de la vivienda e incorporar los datos de emisión de carbono. Se creó primero el algoritmo de Autodesk® Dynamo® con el que se incorporaron los datos de CO_{2eq} a los materiales del modelo BIM mediante su clasificación por medio de la Tabla 23 de Omniclass.

Luego se creó un modelo básico en Revit® con solamente algunos elementos, entre ellos las cimentaciones. Se hizo este pequeño modelo con la finalidad de realizar pruebas del script de

programación. Posterior a la depuración del programa, se desarrollaron y comprobaron los demás algoritmos que son explicados en el Capítulo 3. Seguidamente, se crearon los modelos BIM de la vivienda incluyendo toda la nomenclatura e información recolectada de las fases anteriores.

Posteriormente, se exportaron los datos de interés (huella de carbono por elemento constructivo, plazos, huella de carbono total, entre otros) del modelo por medio de los algoritmos desarrollados. Extraída la información del modelo, se elaboraron diferentes visualizaciones de huella de carbono, clasificándolas según elemento funcional, materialidad y considerando el cronograma de ejecución de la obra.

La fase de elaboración de entregables se trabajó durante todo el plazo del TFG. En ella se creó una guía con todos los procedimientos necesarios para la incorporación y visualización de información de huella de carbono en modelos BIM, estos procedimientos son basados en estándares internacionales que facilitan el trabajo colaborativo que permite adoptar BIM.

Por último, se realizó un análisis de fortalezas y debilidades de la metodología creada con la finalidad de enumerar cada una de las conclusiones de este TFG y entender cuáles son los puntos clave que permiten el uso de la metodología propuesta. Además, se destacaron las áreas a profundizar en investigaciones futuras.

Capítulo 2. Marco teórico

Para el entendimiento de este proyecto, es necesario explicar conceptos de la metodología BIM, sus estándares de gestión de la información, el software que se utilizó y los estándares de clasificación internacionales que existen para proyectos de construcción. Además, se explican conceptos ambientales como: huella ecológica, huella de carbono, los diferentes estándares metodológicos para su cálculo y las distintas bases de datos de factores de emisión utilizadas en este TFG.

2.1. Metodología BIM y sus herramientas

La **metodología BIM** es un conjunto de procesos, tecnologías y estándares que permiten diseñar, construir y operar una edificación o infraestructura de forma colaborativa en un espacio virtual. Es decir, por una parte, las tecnologías permiten generar y gestionar información mediante modelos a lo largo del ciclo de vida de un proyecto. Por otra parte, las metodologías, basadas en estándares, permiten compartir esta información de manera estructurada entre todos los actores involucrados, fomentando el trabajo colaborativo e interdisciplinario, agregando así, valor a los procesos de la industria (Plan BIM, 2019).

Esta investigación se centrará en la etapa de diseño, por ende, en el Cuadro 2 se recalcan algunas de las diferencias entre la metodología de diseño común y BIM.

Cuadro 2. Diferencias entre metodología común y metodología BIM

| Metodología común | Metodología BIM |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Falta de retroalimentación a todas las partes durante el proceso de diseño• Cada etapa del proyecto la realizan de manera individual• Conjunto de planos que no están relacionados entre si | <ul style="list-style-type: none">• Retroalimentación continua en todas las etapas del proyecto• Todos los actores de un proyecto trabajan en conjunto• Integración de todos los elementos dentro de un mismo modelo virtual |

Se muestra a continuación un esquema que ejemplifica la eficiencia comunicativa de la metodología BIM, siendo el modelo de información el centro de la comunicación.

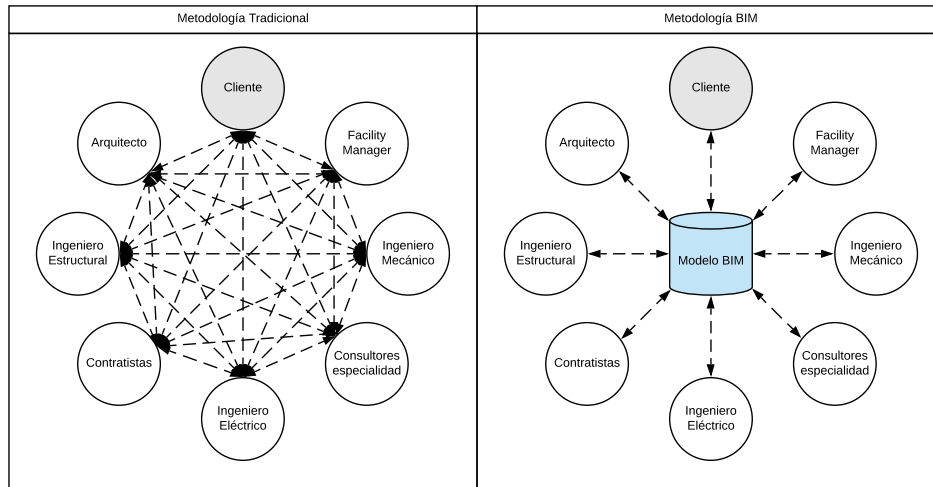


Figura 4. Comparación del organigrama de comunicación usando o no BIM
 Adaptado de: (BIM Forum Costa Rica, 2018)

2.1.1. Estándares BIM

Según ISO, un estándar es un documento establecido por consenso y aprobado por un organismo reconocido, que proporciona, para uso común y repetido, reglas, instrucciones o características para las actividades garantizando un nivel óptimo de orden en un contexto dado. En el ámbito de BIM, existe normativa tanto general como específica como se muestra en la Figura 5.

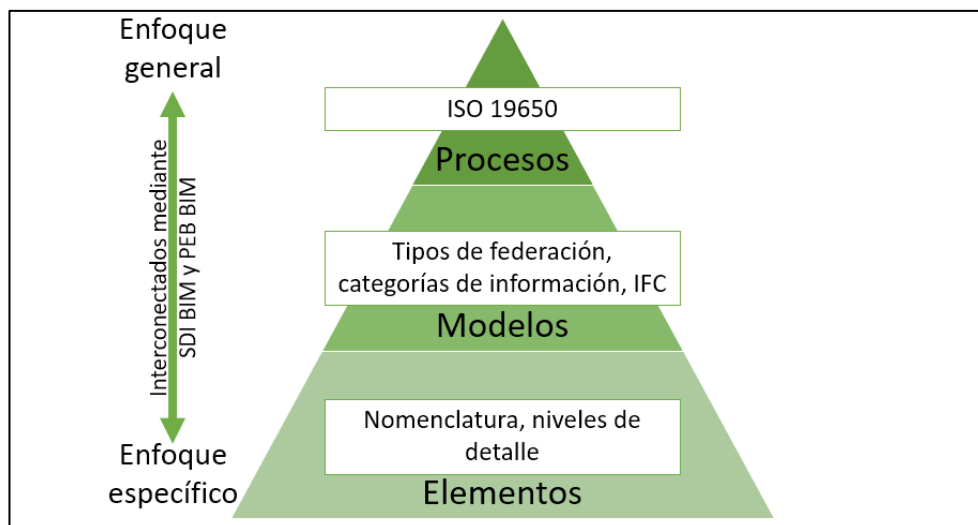


Figura 5. Tipos de estándares BIM

Desde una perspectiva global, la serie **ISO 19650** es un conjunto de normas internacionales que definen el marco, los principios, y los requisitos, para la adquisición, uso y gestión de la información en proyectos y activos, por medio del uso de la metodología BIM. Esta norma se compone de:

- ISO 19650-1 establece los conceptos y principios recomendados para los procesos de desarrollo y gestión de la información a lo largo del ciclo de vida de cualquier activo de construcción.
- ISO 19650-2 define los procesos de desarrollo y gestión de la información durante la fase de desarrollo.

Esta normativa permite elaborar documentos de referencia para que los encargados de los modelos BIM puedan trabajar colaborativamente desarrollando la información necesaria de acuerdo con los objetivos de utilización de la metodología. Para ello, existen dos principales documentos: el SDI BIM y el PEB. Una **Solicitud de Información BIM** o **SDI BIM** (se conoce también como EIR por sus siglas en inglés) es el documento que define las necesidades del propietario para cada etapa del proceso constructivo en materia de la información geométrica y no geométrica de los modelos. Para ello, es clave que existan objetivos claros definidos para su utilización. La SDI BIM debe indicar claramente el objetivo general y los objetivos específicos de la utilización de BIM en el proyecto; los Entregables y Usos BIM solicitados en la SDI BIM deben concordar con estos objetivos. Por ello, la Solicitud de Información BIM debe definir Usos BIM se requieren, estos pueden referenciarse mediante Kreider & Messner (2013) enumerados en la Figura 6.

Conjuntamente, existe una directa relación entre la cantidad de usos solicitados y los tipos de información que pueden contener los modelos, su relación se puede estipular por medio de una matriz que indique cuáles tipos de información se requieren para cada uso BIM. Plan BIM (2019) define quince Tipos de información y cada uno está relacionado con el Nivel de Desarrollo (LOD, por sus siglas en inglés) recomendado que permite obtener dicha información en los modelos BIM.

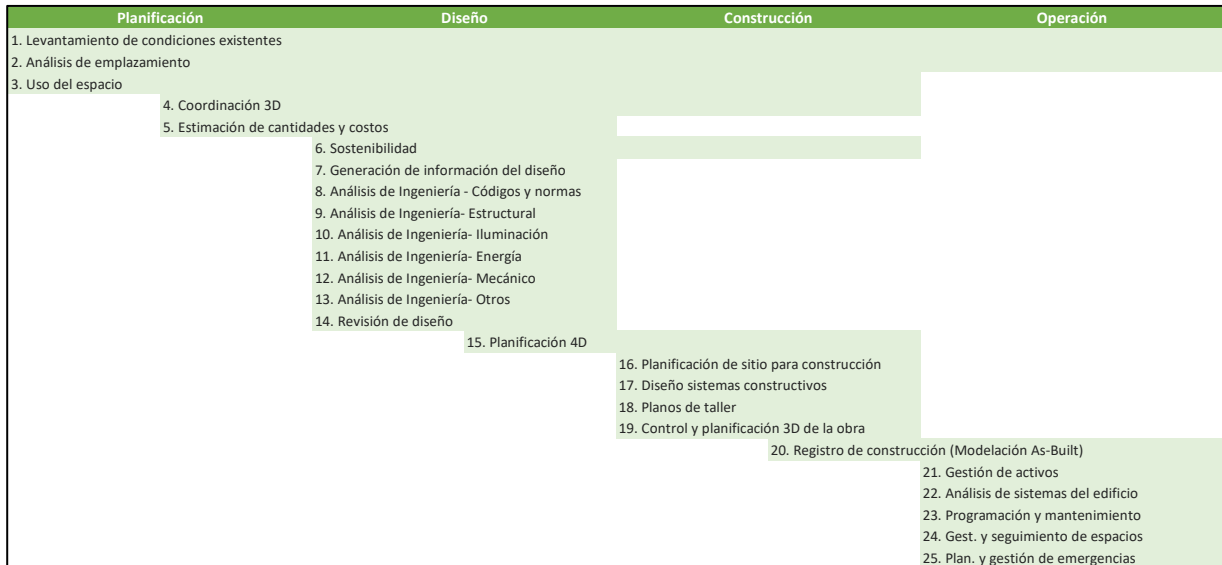


Figura 6. Usos BIM típicos
Adaptado de: (Kreider & Messner, 2013)

Por otro lado, el **Plan de Ejecución BIM** o **PEB** es un documento en el que se resumen las estrategias, procesos, recursos, técnicas, herramientas y sistemas, que son aplicados para asegurar el cumplimiento de los requisitos BIM solicitados por un propietario (resumidos en el SDI BIM) para una fase o fases concretas del ciclo de vida de un proyecto. Este documento tiene como objetivo proveer de un marco de funcionamiento que permite a los distintos agentes del proyecto desarrollar los procesos BIM eficientemente (Plan BIM, 2019).

Este también determina los roles y responsabilidades de cada agente, el alcance de la información que tiene que ser compartida, los procesos de trabajo necesarios, así como el software y hardware necesario. Tomando en cuenta el presente TFG, dentro de un PEB debe incluirse este proceso de incorporación con el objetivo de que todos los actores involucrados sepan cómo incluir la huella de carbono dentro de sus modelos.

Dentro del enfoque más específico de estándares, se puede hablar del **Nivel de Desarrollo** de los elementos del modelo que es la cantidad de información (tanto geométrica como no geométrica) que tienen (ACG of America, 2019). En las primeras etapas del diseño se empiezan con modelos con un menor LOD y mientras se va desarrollando el proyecto se le va agregando más resolución a este (ver Figura 7), se enumeran de la siguiente manera:

- **Información general inicial (LOD 100):** Información inicial, que puede ser estimativa acerca del área, volumen, localización y orientación de los elementos.
- **Información básica aproximada (LOD 200):** Se define geoméricamente su tamaño y forma aproximados, se utiliza para definir mejor el costo, peso de la estructura, entre otros.
- **Información detallada (LOD 300):** Se definen de forma precisa características gráficas como tamaño, forma, y/o ubicación.
- **Información detallada y coordinada (LOD 350):** Se le adicionan todas las conexiones que permiten interactuar con otros sistemas, así se hace un análisis de conflictos entre capas del modelo y coordinación de la etapa constructiva.
- **Información detallada de fabricación (LOD 400):** Detalle suficiente para producir dibujos y planos de taller, y fabricar/installar el elemento en su totalidad. En el modelo se muestra la forma de instalar el elemento, con todos los accesorios y piezas requeridos.
- **Información detallada de operación (LOD 500):** Se muestra un modelo exactamente igual a lo construido en la realidad, es decir, es el modelo "as built" de la edificación y se le añade información útil para su operación.

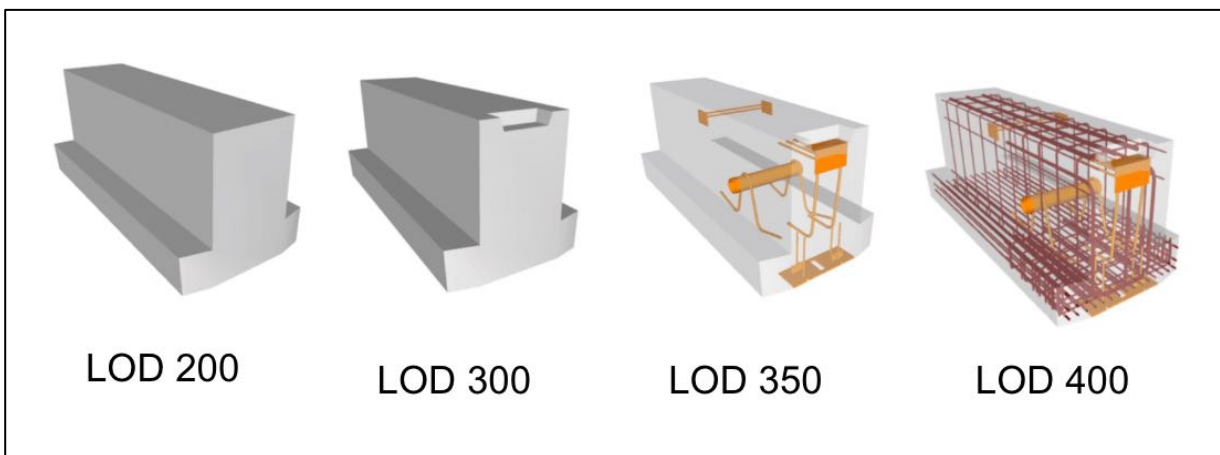


Figura 7. Ejemplo Niveles de Desarrollo en BIM

Fuente: (ACG of America, 2019)

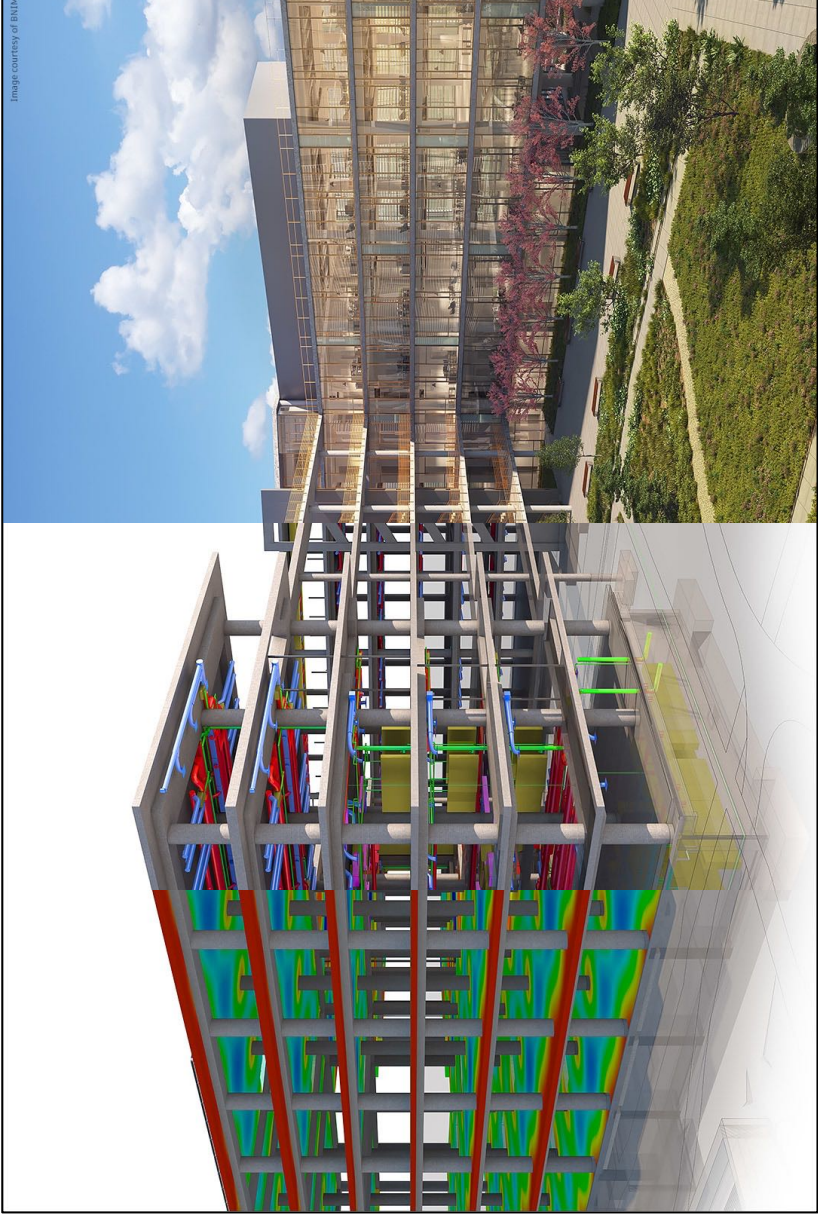
Siguiendo con los estándares de enfoque mucho más específicos, para detalles de nomenclatura de elementos, parámetros y materiales BIM se puede utilizar el estándar **eCOB®** (Estándar de Creación de Objetivos BIM), creado por el Instituto de Tecnología de la Construcción en Catalunya (2018). Entre lo que define, es útil enumerar las siguientes dos nomenclaturas utilizadas en el presente TFG:

- **Nombre de los materiales BIM:** el nombre de los materiales se puede definir como [CodigoOrden]_[NombreMaterialBIM]_[FormaMaterial]_[(ProductoMaterial)]*, en donde:
 - CodigoOrden: Se usa para ordenar los materiales dentro de una biblioteca de la plataforma de modelado
 - NombreMaterialBIM: Nombre del material
 - FormaMaterial: Formato físico que adopta el material BIM colocado en obra
 - ProductoMaterial*: Nombre del producto comercial del material (opcional)
- **Nombre de parámetros:** El nombre de las propiedades debe ser único, se seguirá el criterio "CamelCase" y para las propiedades que incluyan alguna unidad de medida, esta se incluirá en su nombre sin super/subíndices separadas del nombre por "_". Por ejemplo, MasaAceroRefuerzo_(kg).

2.1.2. Herramientas BIM

El software que se utilizó como instrumento en la investigación fue Autodesk® Revit® y Autodesk® Dynamo®, ambos son herramientas BIM. **Autodesk® Revit®** es una herramienta BIM creada para Microsoft® Windows®, esta permite diseñar y modelar edificaciones a arquitectos, ingenieros estructurales, eléctricos, mecánicos, entre otros. En el programa se crea el modelo BIM y en él se guardan todas las características que el modelador incluya de cada elemento.

El software permite realizar trabajo colaborativo y coordinar diseños entre diferentes disciplinas, con el objetivo de tener modelos finales virtuales que podrán ser utilizados para la construcción, uso, mantenimiento y eventualmente la demolición de las edificaciones. En la siguiente figura se muestra el modelo con el análisis de elemento finito de la estructura, los sistemas estructurales y electromecánicos y los diseños arquitectónicos.



**Figura 8. Funcionalidad multidisciplinaria de Autodesk® Revit®
Adaptado de: (Autodesk, 2010)**

Según Autodesk (2010), los elementos en un modelo de Revit® están constituidos por los siguientes tipos:

- Elementos de modelo:
 - Anfitriones: Son elementos los elementos principales, normalmente construidos in situ
 - Componentes del modelo: Son los demás tipos de elementos
- Elementos de referencia: Ayudan definir el contexto del proyecto
- Elementos específicos de vista: Elementos que aparecen sólo en las vistas en que se encuentran. Son útiles para describir o documentar un modelo

En la siguiente figura se muestra la jerarquía de los elementos y algunos ejemplos de cada uno.

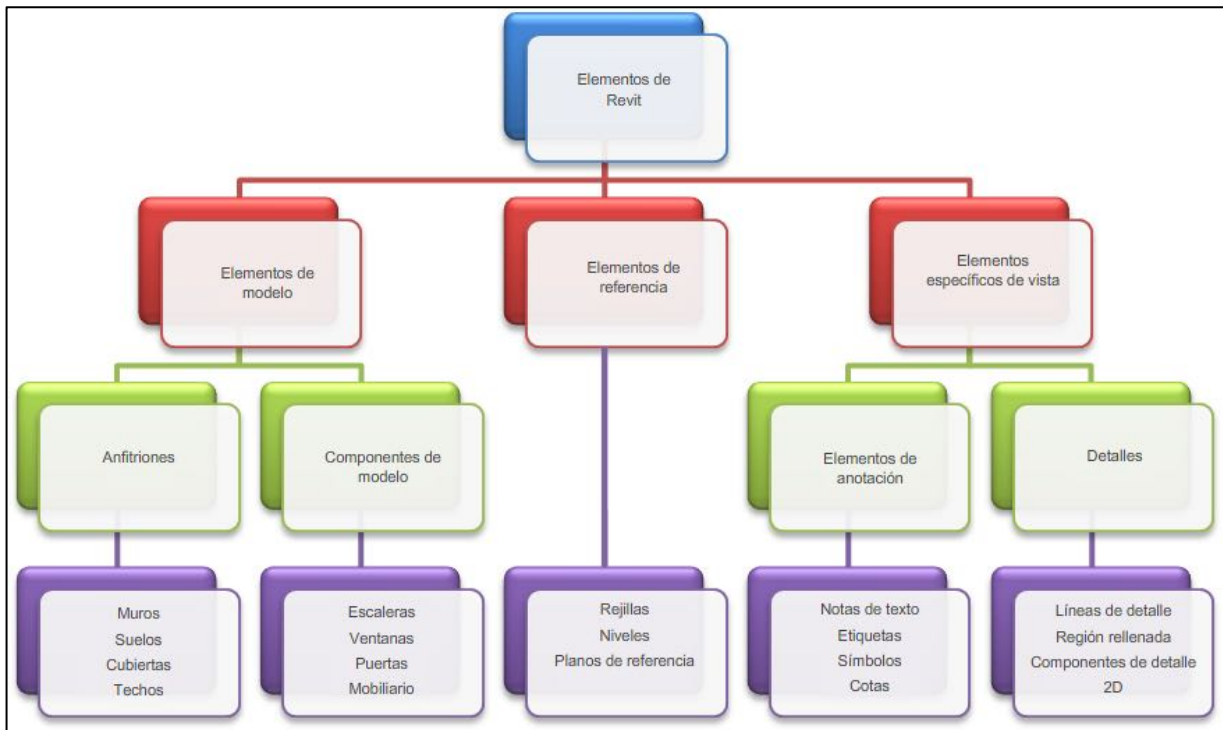


Figura 9. Jerarquía de elementos de Revit®.

Fuente: (Autodesk, 2010)

Además, cada elemento de Revit® se puede clasificar por categoría, familia y tipo. Una categoría es un grupo de elementos que se utilizan para modelar tipo específico de componente de una construcción (Autodesk, 2010). Por ejemplo, las categorías de muros y vigas están dentro de los elementos de modelo.

Las familias son clases o tipos de elementos en una categoría, ellas agrupan elementos con un conjunto de características iguales (Autodesk, 2010). Los distintos elementos de una familia pueden tener diferentes valores en algunas o todas sus propiedades, pero tienen el mismo conjunto de propiedades (sus nombres y significados). Por ejemplo, pueden existir diferentes tamaños de columnas rectangulares, pero todas son parte de la familia de las columnas rectangulares que a su vez es parte de la categoría de columnas.

A continuación, se presenta un ejemplo de la clasificación de los elementos para la categoría de Pilares cuyas familias son los pilares redondos y los pilares rectangulares.

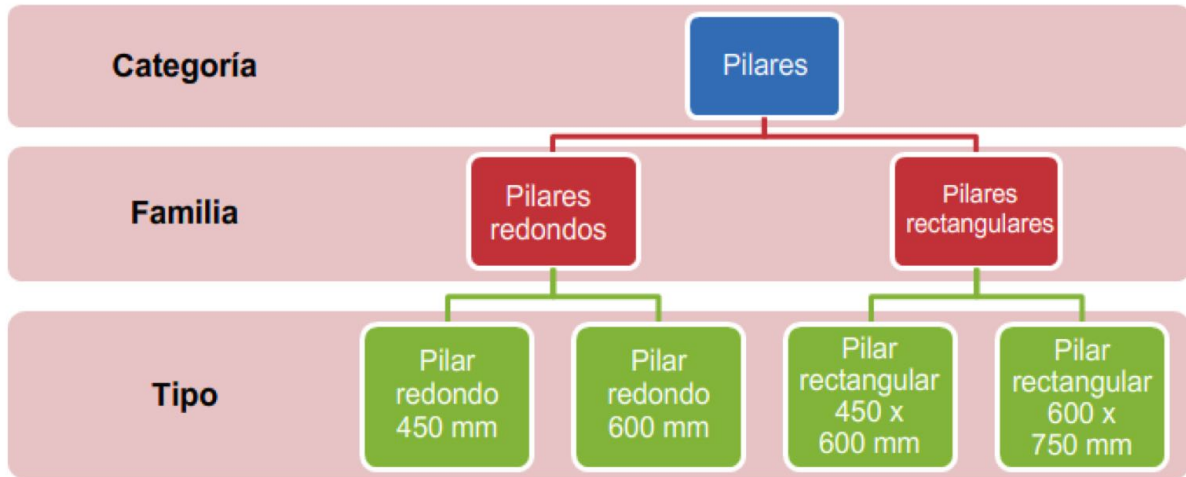


Figura 10. Ejemplo de la clasificación de los elementos Revit®

Fuente: (Autodesk, 2010)

El software permite asignar características o parámetros a cada uno de los elementos o materiales que conforman el modelo BIM, en este caso se asignó un parámetro de factor de emisión unitario a cada material de los elementos y otro para la huella de carbono de cada elemento. Esta funcionalidad permite luego crear tablas de planificación que presentan la información extraída de las propiedades de los elementos de un proyecto (ver Figura 11).

| Tabla de planificación de habitaciones | | | | | | |
|--|------------|------------|-----------|-------------------|---------------------|---------------------|
| Número | Área | Volumen | Ocupación | Acabados | | |
| | | | | Acabado del suelo | Acabado del muro | Acabado del techo |
| 5 | 115.37 SF | 1673 CF | Shared | Ceramic Tile | White Painted | Acoustic Tile 2'x2' |
| 27 | 1988.39 SF | 28833 CF | Shared | Ceramic Tile | White Painted | Acoustic Tile 2'x2' |
| Circulación : 2 | | 2103.76 SF | | | | |
| 10 | 436.32 SF | 6327 CF | Office | Ceramic Tile | Light Blue Painted | Acoustic Tile 2'x2' |
| 13 | 313.14 SF | 4541 CF | Office | Ceramic Tile | Light Blue Painted | Acoustic Tile 2'x2' |
| 14 | 358.36 SF | 5196 CF | Office | Ceramic Tile | Light Blue Painted | Acoustic Tile 2'x2' |
| 15 | 350.66 SF | 5085 CF | Office | Ceramic Tile | Light Blue Painted | Acoustic Tile 2'x2' |
| 17 | 235.44 SF | 3414 CF | Office | Ceramic Tile | Light Blue Painted | Acoustic Tile 2'x2' |
| 18 | 235.44 SF | 3414 CF | Office | Ceramic Tile | Light Blue Painted | Acoustic Tile 2'x2' |
| 21 | 265.59 SF | 3851 CF | Office | Ceramic Tile | Light Green Painted | Acoustic Tile 2'x2' |
| 22 | 235.44 SF | 3414 CF | Office | Ceramic Tile | Light Green Painted | Acoustic Tile 2'x2' |
| 25 | 268.48 SF | 3893 CF | Office | Ceramic Tile | Light Green Painted | Acoustic Tile 2'x2' |
| 26 | 262.69 SF | 3809 CF | Office | Ceramic Tile | Light Green Painted | Acoustic Tile 2'x2' |
| Oficina : 10 | | 2961.54 SF | | | | |

Figura 11. Ejemplo de las tablas de planificación en Revit®

Fuente: (Autodesk, 2010)

Las tablas de planificación pueden ser utilizadas como hojas de cálculo también, por medio de la configuración de fórmulas matemáticas que utilicen las diferentes columnas de las tablas de planificación. En este caso, se utilizaron las tablas de planificación solamente para validar el cálculo automático de la huella de carbono de cada elemento una vez que la información estuviese en las propiedades de los materiales.

Por otro lado, Dynamo es un lenguaje de programación visual de código abierto. **Autodesk® Dynamo®** es una extensión para Revit® que permite crear flujos de trabajo automatizados por medio de este lenguaje. Se usa principalmente para dos tareas:

- Crear geometrías de edificios mediante relaciones paramétricas entre los diferentes elementos.
- Permitir la comunicación entre una base de datos externa y el modelo BIM.

Cada vez que se crea un proyecto nuevo en Revit®, una base de datos asociada al modelo es creada. Para un usuario común, el acceso a esta base de datos, sin el uso de una herramienta de programación, es difícil (Nezamaldin, 2019). Para ello es necesario usar la **Interfaz de Programación de Aplicaciones** (API) que es lo que ocurre por debajo de todas las aplicaciones, programas de internet y diferentes tipos de softwares que intercambian información entre sí (Nezamaldin, 2019). Sin embargo, la programación utilizando esta interfaz requiere un poco más de conocimiento en lenguajes de programación, por lo que Dynamo funciona como un mediador entre el API y el usuario, haciendo más fácil el acceso a esta información. En la Figura 12 se muestra la manera en que trabaja Autodesk® Dynamo® y cómo interactúa con la base de datos del modelo BIM.

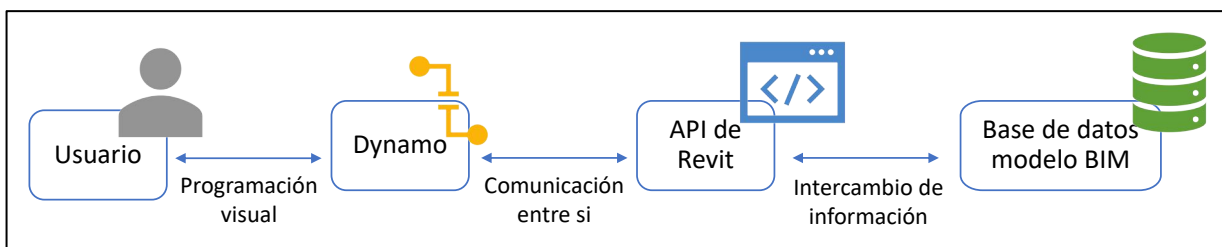


Figura 12. Esquema de trabajo de Autodesk® Dynamo®

Dynamo utiliza lenguaje de programación visual, comúnmente llamado "*Drag and Drop*", por medio de cajas o nodos que son funciones, es decir, cada uno de estos nodos hace una tarea específica. Generalmente, estas tienen valores de entrada y valores de salida. Cada entrada y

salida de las funciones es conectada a otra función que le da la información necesaria para que esta realice su trabajo. Cuando todas estas funciones están conectadas, se forma una especie de gráfico. En la Figura 13 se muestra un ejemplo aritmético básico realizado por medio de la programación visual y la programación normal ejecutado en otro lenguaje de programación.

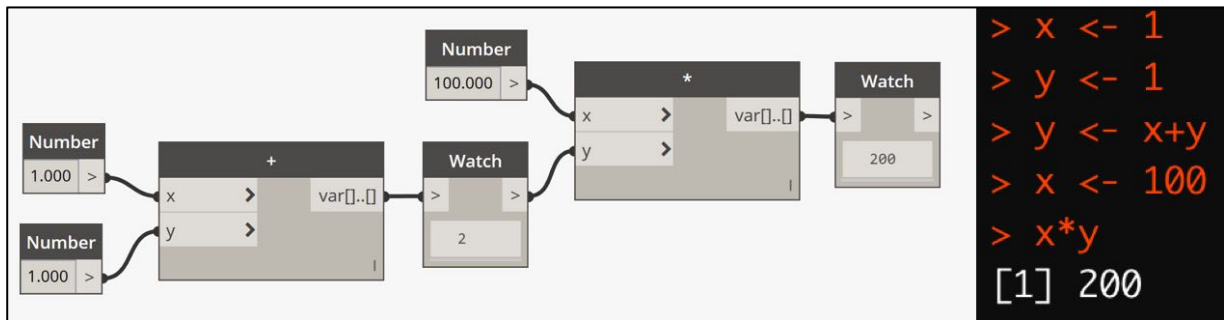


Figura 13. Esquema de una programación básica en Autodesk Dynamo

En el caso de este TFG, Dynamo fue la herramienta utilizada para la incorporación de los factores de emisión de manera automática a los materiales del modelo BIM, el cálculo de la huella de carbono de cada elemento del modelo y la exportación de dicha información a una hoja de cálculo de Microsoft Excel®.

2.2. Estándares de clasificación para proyectos de construcción

Con el objetivo de facilitar el uso de la información dentro los proyectos de construcción y de propiciar el trabajo colaborativo, es necesaria la estandarización de la información para que los diferentes actores de la cadena de producción del sector construcción puedan comunicarse con facilidad. Para ello, se optó por utilizar las especificaciones de clasificación del Instituto de Especificaciones de la Construcción (CSI, por sus siglas en inglés). Este es uno de los referentes de sistemas de clasificación más utilizados en América y el mundo.

El CSI fue fundado Estados Unidos en el año 1948 con el objetivo de mejorar la comunicación en el gremio de la construcción mediante el desarrollo de formatos de codificación y estándares para las tareas relacionadas a este gremio (Construction Specifications Institute, 2019). En cuanto a la codificación de la construcción existen varios estándares en función del objetivo para el cual fueron creados, entre ellos Unifomat y Omniclass, se explican a continuación.

Unifomat es un estándar basado en las partes físicas de una construcción llamadas elementos funcionales (The Construction Specifications Institute, 2010). Este formato es de

utilidad en presupuestos, planificación y definición del alcance de las obras. Además, es útil para la comparación de diferentes diseños de una misma construcción ya que las partes físicas del edificio son las mismas independientemente del sistema constructivo utilizado. Unifomat clasifica las partes de las construcciones en 8 niveles principales:

- **A:** Subestructura
- **B:** Esqueleto y cascarón
- **C:** Interiores
- **D:** Servicios
- **E:** Equipamiento y mobiliario
- **F:** Construcciones especiales
- **G:** Trabajo de sitio
- **Z:** Gastos generales

El enfoque de Unifomat también es útil para la clasificación de elementos en un modelo BIM, es por ello que Autodesk Revit® lo incluye dentro de sus clasificaciones de elementos de modelo. El TFG utilizó esta clasificación con el objetivo de presentar los datos finales de la huella de carbono de la vivienda por elemento funcional.

Por último, **OmniClass** es un sistema de clasificación extenso y completo que puede ser utilizado para toda la información y durante todas las etapas de vida del proyecto (The Construction Specifications Institute, 2019). Este consiste en 15 tablas de clasificación y cada una representa diferentes facetas de los proyectos de construcción:

- **Tabla 11 – Entidades de la construcción por función:** Indica la funcionalidad del proyecto a construir.
- **Tabla 12 – Entidades de la construcción por forma:** Indica la forma de la infraestructura a construir.
- **Tabla 13 – Habitaciones de la construcción por función:** Indica la funcionalidad de cada habitación del proyecto.
- **Tabla 14 – Habitaciones de la construcción por forma:** Indica la forma física de las habitaciones.
- **Tabla 21 – Elementos constructivos:** Clasifica los elementos de la construcción por familia, de la misma manera que lo hace UniFormat.

- **Tabla 22 – Procesos de trabajo:** Clasifica la información de la construcción de la misma manera que MasterFormat.
- **Tabla 23 – Productos de la construcción:** Son los productos o materiales que conforman cada uno de los elementos funcionales de la construcción.
- **Tabla 31 – Fases de la construcción:** Incluye todas las fases por las que puede pasar un proyecto de construcción, desde la conceptualización del proyecto hasta el cierre o demolición de este.
- **Tabla 32 – Servicios:** Clasifica todos los servicios que podrían ser utilizados en el proyecto de construcción, por ejemplo: comunicación, diseño, documentación, entre otros.
- **Tabla 33 – Disciplinas:** Clasifica todas las disciplinas involucradas en el proyecto.
- **Tabla 34 – Roles organizacionales:** Esta tabla clasifica las personas involucradas en el proyecto según su rol.
- **Tabla 35 – Herramientas:** Incluye herramientas de software para diseño y administración, así como herramientas físicas para la construcción.
- **Tabla 36 – Información:** Es útil para el manejo y almacenamiento de la información de la organización y los proyectos.
- **Tabla 41 – Materiales:** Clasifica materiales puros que luego serán utilizados en la construcción.
- **Tabla 49 – Propiedades:** Clasifica las características de los elementos constructivos.

Se decidió utilizar la Tabla 23 de OmniClass para la codificación de la base de datos de huella de carbono para los materiales de construcción con el objetivo de que esta base de datos y el modelo BIM se comuniquen de manera correcta. Además, este sistema de clasificación permitió analizar los datos extraídos de los modelos BIM.

2.3. Huella de carbono

La **Huella Ecológica** es el área de territorio ecológicamente productivo (cultivos, pastos, bosques o ecosistemas acuáticos) necesaria para producir los recursos utilizados y para asimilar los residuos producidos por una población dada con un modo de vida específico de forma indefinida (Schneider & Samaniego, 2009). Esta permite visualizar el alcance y tipo de demanda que la humanidad impone en los sistemas naturales, por ejemplo, en Costa Rica la huella ecológica es 11% mayor que la biocapacidad del país (Programa Estado de la Nación, 2013).

Por otro lado, la **Huella de Carbono** es la medida del impacto de todos los gases de efecto invernadero (GEI) producidas por las actividades del ser humano en el medio ambiente (Schneider & Samaniego, 2009). Para obtener este dato es necesario transformar cada uno de los GEI a un compuesto estándar, en este caso el dióxido de carbono equivalente (CO_{2eq}) y después calcular la cantidad de materia de CO_{2eq} producida en un periodo determinado, usualmente se reportan en toneladas o kilogramos. Se pueden realizar cálculos de huella de carbono para organizaciones y para productos, en esta investigación interesa el cálculo de productos. Para ello, se analizan todas las emisiones de GEI realizadas durante el periodo de ciclo de vida, estipulado dentro del alcance del cálculo.

El dióxido de carbono equivalente (CO_{2eq}) es una unidad ficticia, utilizada para poder sumar y comparar los diferentes GEI ya que cada uno de ellos posee un potencial de calentamiento global distinto (Castro Alpizar, 2012). Los gases de efecto invernadero distintos del dióxido de carbono son convertidos multiplicando la masa del gas en cuestión por su potencial de calentamiento global (GWP) que es la es una medida relativa de cuánto calor puede ser atrapado por un determinado gas de efecto invernadero, en comparación con un gas de referencia, el GWP puede ser calculado para periodos de 20, 100 o 500 años, siendo 100 años el valor más frecuente. A continuación, se muestran los principales GEI y sus equivalencias en dióxido de carbono equivalente.

Cuadro 3. Equivalencias de CO_{2eq} entre diferentes GEI

| Gases de efecto invernadero (GEI) | Equivalencias en CO_{2eq} |
|--|---|
| Dióxido de carbono (CO_2) | 1 |
| Metano (CH_4) | 21 |
| Óxido nitroso (N_2O) | 310 |
| Hidrofluorocarburos (HFC) | 740 |
| Perfluorocarburos (PFC) | 1300 |
| Hexafluoruro de azufre (SF_6) | 23900 |

Fuente: (Castro Alpizar, 2012)

Para contabilizar la cantidad de carbono equivalente emitido a la atmósfera, se puede realizar un **Análisis de Ciclo de Vida** (LCA, por sus siglas en inglés) que es una técnica para valorar el impacto ambiental que tiene un determinado producto; desde el impacto por la extracción de la materia prima hasta el desecho de los productos. Para estos análisis, existen diferentes estándares y especificaciones, se explica la normativa ISO 14067:2013, ISO:14040:2006, ISO:14044:2006 y la PAS 2050:2011 las cuales son específicas para el cálculo de huella de

carbono de productos, estos estándares son los utilizados para los materiales de construcción y la norma EN 15978:2011, específica para el cálculo de la huella de carbono de edificaciones.

La **ISO 14067:2013** incluye los principios, requisitos y lineamientos para la cuantificación y comunicación de la huella de carbono de productos, de manera completa o parcial. Esta se basa en los estándares ISO:14040 e ISO:14044. La **ISO 14040:2006** describe los principios y el marco de referencia para el LCA, incluyendo el alcance, limitaciones, procesos y fases del LCA. Esta norma también indica que el LCA se debe realizar para una unidad funcional y esta unidad debe ser definida dentro del alcance. Además, que el LCA es una técnica iterativa; es decir, las fases individuales de un LCA utilizan resultados de las otras fases. Se muestra a continuación las etapas de un LCA.

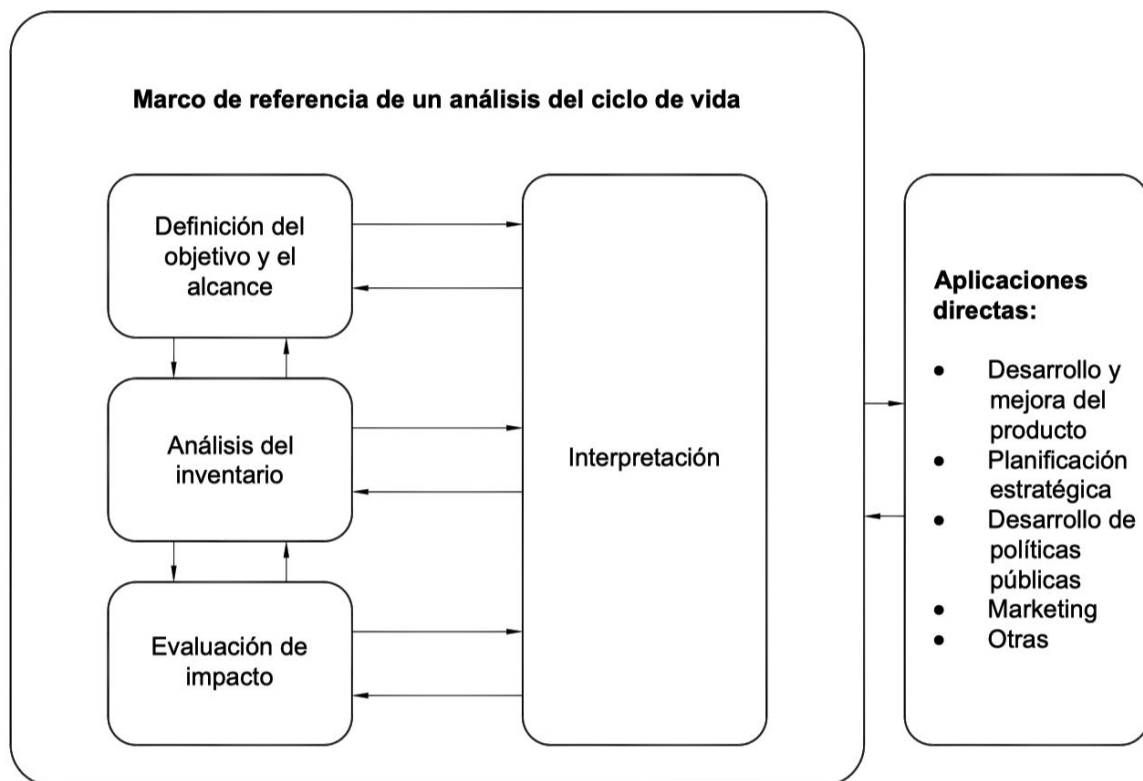


Figura 14. Fases de un LCA

Fuente: ISO 14040:2006

De la misma manera, la normativa indica que un LCA modela el ciclo de vida de un producto por medio de un sistema y este sistema tiene sus límites o alcances (International Organization for Standardization, 2006). Estos sistemas se subdividen en un conjunto de procesos unitarios y estos procesos se vinculan entre sí mediante flujos de productos intermedios o de residuos

para tratamiento (International Organization for Standardization, 2006). Esta división facilita la identificación de entradas y salidas de cada subsistema. Se muestra a continuación un ejemplo de un sistema de productos.

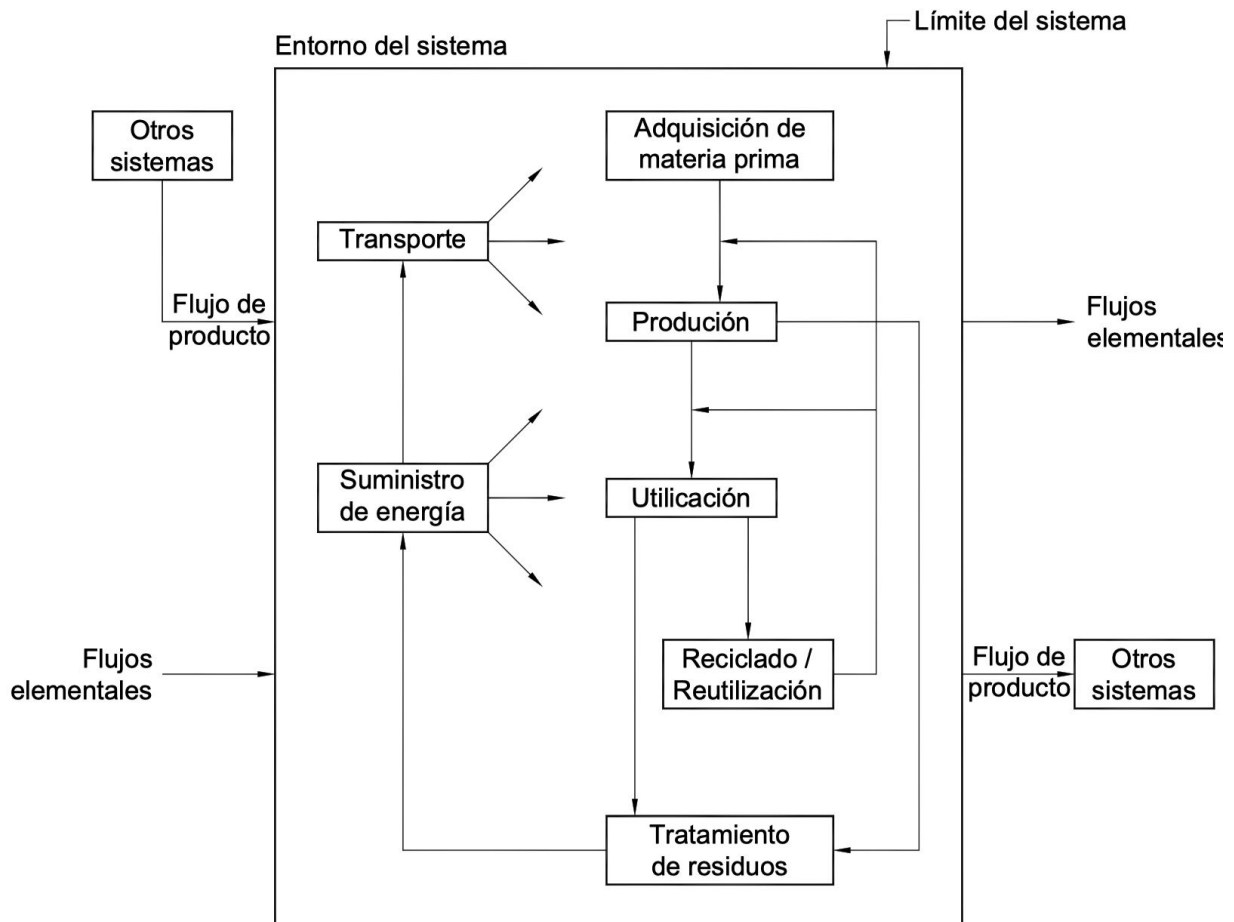


Figura 15. Ejemplo de un sistema de productos

Fuente: ISO 14040:2006

Por otro lado, la **ISO 14044:2006** es una herramienta ambiental utilizada para evaluar los productos, envases y procesos identificando los diferentes impactos ambientales, durante toda su vida, entre un producto nuevo y otros que ya existen en el mercado (International Organization for Standardization, 2006). También sirve para comparar diferentes procesos de fabricación del mismo producto, en términos de utilización de recursos y emisiones.

Asimismo, la normativa **PAS 2050:2011** fue desarrollada por el British Standards Institution con el objetivo de diseñar un método consistente para el cálculo de las emisiones de GEI generadas por productos o servicios y que incluyen sus cadenas de suministros (British

Standards Institution, 2011). Entre sus definiciones, se indica también una unidad funcional que es la unidad de producto con la cual se van a calcular y comunicar las emisiones GEI, con el objetivo simplificar la utilización de estos valores.

Esta normativa establece dos alcances:

- **De la cuna a la tumba:** En el se incluye la extracción de materias primas, el transporte, el procesado de manufactura, el uso y la gestión final. Otras actividades intermedias se incluyen cuando son relevantes.
- **De la cuna a la puerta:** El alcance finaliza a la salida del proceso de manufactura en donde el producto se utiliza por el consumidor o se utiliza como insumo para otro proceso de manufactura.

También existe declaraciones, obligatorias o voluntarias, dependiendo del país donde se comercialice el producto; estas se denominan **Declaración Ambiental del Producto** (EPD por sus siglas en inglés). Una EPD es un documento creado por un ente independiente al que manufactura el producto con el objetivo de comunicar transparentemente la información de los impactos ambientales en el ciclo de vida de éste (The International EPD System, 2019). Estas incluyen los datos técnicos del material, las certificaciones que tiene, los materiales usados en la fabricación, el proceso de manufactura, las consecuencias ambientales y para la salud en los procesos de manufactura, las unidades funcionales, las fases de LCA consideradas, las bases de datos utilizadas, los GEI embebidos en cada unidad, entre otros. Desafortunadamente, en Costa Rica no existe este tipo de declaraciones para la mayoría de los productos. El único producto que tiene esta declaración es el cemento de la empresa Holcim de Costa Rica S.A. quien contrató a INTECO para el cálculo y la declaración (INTECO, 2016).

Otro estándar es el **EN 15978:2011**, creado por el Comité Europeo de Normalización, este da reglas generales para el cálculo y la delimitación del LCA para construcciones; especialmente en la definición del alcance. Este utiliza una estructura modular para las diferentes etapas de la construcción. Se presenta el Cuadro 4 en donde se enumeran las fases del LCA según esta normativa.

Cuadro 4. Fases del LCA según EN 15978:2011

| | Fase de materiales | | | Fase de construcción | | Fase de uso | | | | | | | Final de la vida útil | | | |
|------------------------------|---|------------|-------------|--|----------------------|-----------------------------|--|--------------|-----------|--------------|-----------------------------|---|----------------------------|------------|---------------------------|-------------|
| | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | B7 | C1 | C2 | C3 | C4 |
| FASES | Extracción materia prima | Transporte | Manufactura | Transporte de materiales | Proceso constructivo | Uso de la construcción | Mantenimiento | Reparaciones | Reemplazo | Remodelación | Uso de energía operacional | Uso de agua operacional | Deconstrucción, demolición | Transporte | Procesamiento de residuos | Disposición |
| INFORMACIÓN NECESARIA | Información de cada producto utilizado en la construcción | | | Información depende de logística y ubicación | | Simulaciones con escenarios | Información de cada producto utilizado | | | | Simulaciones con escenarios | Información de cada producto utilizado y también simulaciones | | | | |

Adaptado de: (Energy-Efficient Building European Initiative, 2011)

Para la fase de materiales (A1 a A3), la información sobre los productos o materiales se crea utilizando estándares como los anteriormente explicados, con un alcance de la cuna a la puerta. Luego corresponde hacer un cálculo de los GEI emitidos por el transporte de estos materiales hasta el sitio de construcción (A4). Para el proceso constructivo (A5), la información se debe medir en campo o mediante simulaciones y estimaciones ya que esta depende de la logística de la ejecución de la obra.

Para las etapas de operación (B1, B6 y B7), la información se puede obtener por medio de simulaciones energéticas e hídricas del proyecto en funcionamiento (Energy-Efficient Building European Initiative, 2011). Por último, el mantenimiento, las reparaciones, remodelaciones y demoliciones (B2, B3, B4, B5, C1, C2, C3 y C4) utilizan una combinación entre información de cada producto y simulaciones con diferentes escenarios; estas dependen de cada proyecto por lo que no se explica a detalle esta fase.

2.3.1. Factores de emisión de carbono

Todos los estándares que se explicaron anteriormente tienen básicamente el mismo principio, este se muestra en la siguiente ecuación.

$$Huella\ de\ Carbono = \sum_{i=0}^n A_i * FE_i * GWP \quad [1]$$

En donde A_i representa los datos (pesos, áreas, volúmenes, horas y otros) de las actividades, FE_i el factor de emisión de cada actividad que es la masa del contaminante dividido por una unidad de peso, volumen, distancia o duración de la actividad y por el potencial de calentamiento global (GWP). Por ello es necesario encontrar los factores de huella de carbono para diferentes materiales.

El criterio de selección utilizado en esta investigación fue propuesto por Mora Marín (2017) en su tesis de maestría en Arquitectura Sostenible. El autor indica que en Costa Rica no existen bases de datos genéricas sobre el LCA de materiales de construcción y que el uso de herramientas como SimaPro o Gabi, que son bases de datos internacionales, no es tan accesible en el país. Por esa razón se decidió utilizar información que estuviera al acceso de todos los interesados.

La información de estos materiales se obtuvo de tres principales fuentes; una de ellas presenta valores para el país, mientras las otras tienen información genérica internacional. Si se dividen por el país de publicación, se encontraron tres nacionales; dos de ellas de la Universidad de Costa Rica y una del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Sin embargo, sólo en una de ellas se hizo el cálculo para obtener los valores nacionales, las otras dos utilizan bases de datos genéricas internacionales.

La búsqueda de los valores para cada material comenzó con el registro de los materiales presentes en la obra a modelar, según el alcance anteriormente definido. Luego se estudiaron las bases de datos disponibles, dándole prioridad a la nacional y por último se hizo un análisis comparativo para la creación del compendio utilizado en este TFG.

En primer lugar, se puede citar la investigación realizada por Badilla Arroyo, et al. (2015), titulada "*Cálculo de huella de carbono para materiales de construcción en Costa Rica*". Los autores de esta utilizaron el estándar PAS 2050:2011, con un alcance de la cuna a la puerta. La información se recabó por medio de dos fuentes:

- **Fuentes Primarias:** es información específica a la actividad investigada, recolectada internamente en las organizaciones para aquellos procesos pertenecientes a la fabricación de un material específico.

- **Fuentes Secundarias:** son datos aproximados sobre actividades generales, provenientes de fuentes relacionadas, mas no específicas del proceso. Se utilizaron cuando no se pudo asegurar una fuente primaria.

El proceso de cálculo de esta investigación se inició con el mapeo de todos los procesos asociados a la manufactura de las unidades funcionales estudiadas y luego se desglosaron las cantidades asociadas a cada etapa de la manufactura (Badilla Arroyo, et al., 2015). Los materiales estudiados en esta investigación fueron: acero, aluminio, baldosas de concreto, bloques de concreto, columna prefabricadas de concreto, fibrocemento, madera de construcción, madera laminada y vidrio. Además, se presentan todos los cálculos para cada unidad funcional con el objetivo de que el usuario tenga la posibilidad de estudiar cada producto de forma individual. De esta forma, se dispone a través de las secciones, los resultados obtenidos según las distintas categorías de proveniencia de las emisiones. Se presentan a continuación las unidades funcionales de esta investigación.

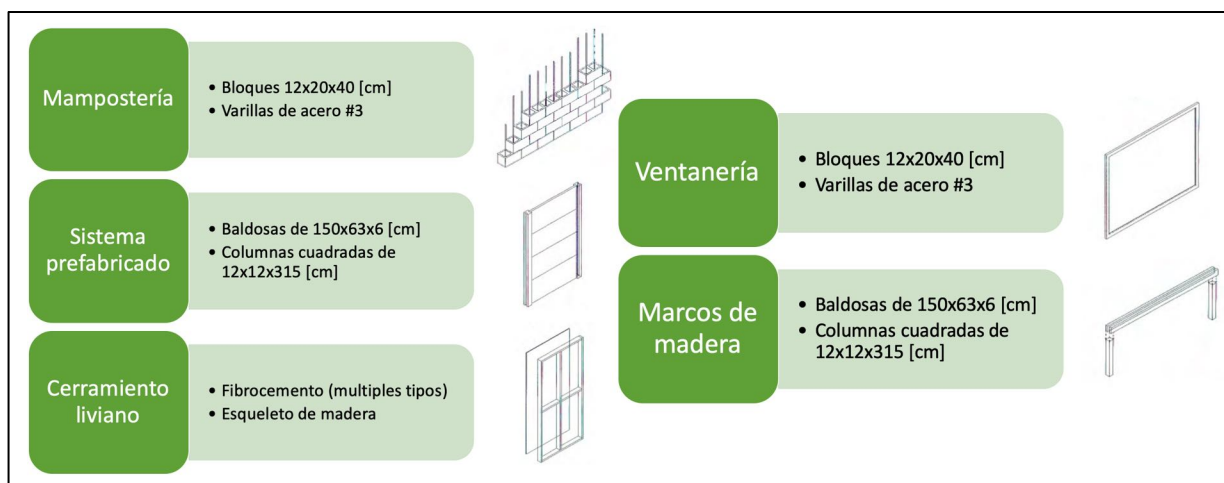


Figura 16. Unidades funcionales de base de datos nacional

Adaptado de: (Badilla Arroyo, et al., 2015)

Como las unidades funcionales de esta investigación son diferentes a las unidades que se contabilizarán por medio del modelo en Revit®, se decidió desagregar la información de los materiales para compatibilizar los elementos y poder utilizarla. Para ello se utilizaron los cuadros que resumen cada una de las emisiones por proceso y material, con el objetivo de aislar los materiales. A continuación, se muestran los factores de huella de carbono desagregados para el concreto de 170 kg/cm², concreto de 210 kg/cm², concreto de 325

kg/cm², bloques de mampostería y viguetas pretensadas (se tomaron como si fueran columnas prefabricadas debido a sus similitudes).

Badilla Arroyo, et al. (2015) calculó la huella de carbono para un concreto con $f'c=210$ kg/cm², no obstante, la obra utilizada en este TFG contiene elementos de concreto con $f'c = 170$ kg/cm² y $f'c = 325$ kg/cm². Para ajustar el factor del concreto según la resistencia, se utilizaron los cuadros de la relación agua/cemento del ACI 211 con el objetivo de aumentar la resistencia. Se encontró que el cemento disminuye un 8% en para la resistencia menor y aumenta un 28% para la resistencia mayor, con esta información se ajustaron los factores de los procesos que incluían el cemento.

Cuadro 5. Factores de emisión para concreto con un $f'c = 170$ kg/cm²

| Proceso | Material | Factor [kgCO_{2eq}/kg producto] |
|---|--------------------------|--|
| Materias primas | Agregado grueso | 0.00069 |
| | Agregado fino | 0.00121 |
| | Cemento | 0.12300 |
| Transporte nacional | Piedra Quinta | 0.00032 |
| | Agregado fino | 0.00238 |
| | Cemento | 0.00091 |
| Fabricación del producto | Agregado grueso | 0.00010 |
| | Agregado fino | 0.00003 |
| | Cemento | 0.00007 |
| | Agua | 0.00001 |
| | Preparación de la mezcla | 0.00007 |
| | Combustible Diesel | 0.00312 |
| | Energía eléctrica | 0.00446 |
| Total [kgCO_{2eq}/kg producto] | | 0.13637 |

Cuadro 6. Factores de emisión para concreto con un $f'c = 210$ kg/cm²

| Proceso | Material | Factor [kgCO_{2eq}/kg producto] |
|---|--------------------------|--|
| Materias primas | Agregado grueso | 0.00069 |
| | Agregado fino | 0.00121 |
| | Cemento | 0.13418 |
| Transporte nacional | Agregado grueso | 0.00032 |
| | Agregado fino | 0.00238 |
| | Cemento | 0.00099 |
| Fabricación del producto | Agregado grueso | 0.00010 |
| | Agregado fino | 0.00003 |
| | Cemento | 0.00007 |
| | Agua | 0.00001 |
| | Preparación de la mezcla | 0.00007 |
| | Combustible Diesel | 0.00312 |
| | Energía eléctrica | 0.00446 |
| Total [kgCO_{2eq}/kg producto] | | 0.14763 |

Adaptado de: (Badilla Arroyo, et al., 2015)

Cuadro 7. Factores de emisión para concreto con un f'c = 325 kg/cm2

| Proceso | Material | Factor [kgCO_{2eq}/kg producto] |
|---|--------------------------|--|
| Materias primas | Agregado grueso | 0.00069 |
| | Agregado fino | 0.00121 |
| | Cemento | 0.17163 |
| Transporte nacional | Piedra Quinta | 0.00032 |
| | Agregado fino | 0.00238 |
| | Cemento | 0.00127 |
| Fabricación del producto | Agregado grueso | 0.00010 |
| | Agregado fino | 0.00003 |
| | Cemento | 0.00010 |
| | Agua | 0.00001 |
| | Preparación de la mezcla | 0.00007 |
| | Combustible Diesel | 0.00312 |
| | Energía eléctrica | 0.00446 |
| Total [kgCO_{2eq}/kg producto] | | 0.18538 |

Cuadro 8. Factores de emisión para bloques de mampostería de diferentes tamaños

| Proceso | Material | Factor [kgCO_{2eq}/kg producto] |
|---|--------------------------|--|
| Materias primas | Agregado grueso | 0.00022 |
| | Agregado fino | 0.00240 |
| | Cemento | 0.04960 |
| Transporte nacional | Agregado grueso | 0.00136 |
| | Agregado fino | 0.01148 |
| | Cemento | 0.00038 |
| Fabricación del producto | Agregado grueso | 0.00002 |
| | Agregado fino | 0.00004 |
| | Cemento | 0.00003 |
| | Agua | 0.00000 |
| | Transporte agregados | 0.00021 |
| | Preparación de la mezcla | 0.00006 |
| | Formación de bloques | 0.00012 |
| | Curado | 0.00061 |
| | Desenfofrado | 0.00005 |
| | Reacomodo de moldes | 0.00004 |
| | Combustible Diesel | 0.00045 |
| Energía eléctrica | 0.00091 | |
| Total [kgCO_{2eq}/kg producto] | | 0.06798 |

Adaptado de: (Badilla Arroyo, et al., 2015)

Cuadro 9. Factores de emisión para viguetas pretensadas

| Proceso | Material | Factor [kgCO_{2eq}/kg producto] |
|---|---------------------------------|--|
| Materias primas | Agregado grueso | 0.00072 |
| | Agregado fino | 0.00109 |
| | Cemento | 0.19013 |
| | Acero | 0.02489 |
| | PVC | 0.00062 |
| Transporte internacional | Aditivo 1 | 0.00005 |
| | Aditivo 2 | 0.00003 |
| | Acero | 0.00195 |
| | PVC | 0.00002 |
| Transporte nacional | Agregado grueso | 0.00439 |
| | Agregado fino | 0.00446 |
| | Cemento | 0.00146 |
| | Aditivo 1 | 0.00006 |
| Fabricación del producto | Agregado grueso (banda y criba) | 0.00001 |
| | Agregado fino (banda y criba) | 0.00002 |
| | Cemento | 0.00010 |
| | Agua (bombeo desde pozo) | 0.00001 |
| | Acero (corte y soldadura) | 0.00017 |
| | Preparación de la mezcla | 0.00011 |
| | Formación de viguetas | 0.00006 |
| | Curado y almacenamiento | 0.00002 |
| | Búnker | 0.04196 |
| | Combustible Diesel | 0.00312 |
| Energía eléctrica | 0.00446 | |
| TOTAL [kgCO_{2eq}/kg producto] | | 0.2799 |

Adaptado de: (Badilla Arroyo, et al., 2015)

Por otro lado, la investigación realizada por Zúñiga Sandi (2018), titulada *Herramientas para la estimación de Huella de Carbono de proyectos constructivos*, presenta algunos valores de CO_{2eq} para materiales de construcción. Esta información fue recabada por medio del software SimaPro.

SimaPro es una herramienta de pago utilizada para realizar LCA de productos. El software tiene una extensiva base de datos sobre procesos y materias primas que permite realizar cálculo de una manera sencilla. Para ello es necesario definir el alcance, los límites del sistema y los procesos para cada una de las unidades funcionales, los valores de cada proceso son proporcionados por el software.

Estos valores tienen un alcance de la cuna a la puerta, el mismo considerado por Badilla Arroyo, et al. (2015). No obstante, estos valores son genéricos y calculados por procesos industriales internacionales, por lo que no hay certeza que los resultados utilizando estos valores sean

correctos para Costa Rica. Se muestra a continuación los valores utilizado por Zúñiga Sandí (2018).

Cuadro 10. Factores de emisión presentados en Zúñiga Sandí (2018)

| Categoría | Material | Factor [kgCO2e/kg producto] |
|------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| Minerales | Material granular: grava, etc. | 0.0050 |
| | Arena | 0.0050 |
| | Cemento Portland | 0.8300 |
| | Concreto de diferentes resistencias | 0.1300 |
| | Bloques de mampostería | 0.0980 |
| Metales | Aluminio | 8.1600 |
| | Láminas de hierro negro | 1.9100 |
| | Varilla de acero de diferente número | 1.7700 |
| Cerámicas | Inodoros, lavatorios, entre otros | 1.4800 |
| | Porcelanato | 0.6500 |
| Plástico | Plástico general | 1.9400 |
| | PVC | 2.4100 |
| Vidrio | Ventanas de vidrio | 0.8500 |
| Pinturas | Pintura para exteriores | 3.5600 |
| Madera | Artículos de madera | 0.4600 |

Adaptado de: (Zúñiga Sandí, 2018)

Asimismo, el TFG presentado por Castro Alpízar (2012) resume el cálculo de huella de carbono generada debido a la construcción de una delegación policial en el distrito de León XII. El autor utilizó los factores de emisión de la Agencia del Medio Ambiente del Reino Unido recabados en el 2007. Dichos factores son un compendio de nueve referencias de diferentes entes del Reino Unido y todos ellos tienen un alcance de la cuna a la puerta, según la normativa PAS 2050:2011. El *Inventory of Carbon and Energy* realizado en la Universidad de Bath por Geoff Hammond y Craig Jones es una de las referencias utilizadas por dicho compendio.

Hammond y Jones (2011) realizaron una extensiva recopilación de las emisiones de huella de carbono emitidas por la manufactura de diferentes materiales; entre ellos: concretos, agregados, diferentes metales, variedad de acabados, materiales de aislamiento y otros. Los límites del sistema con el que se realizó la base de datos también son de la cuna a la puerta. Para cada material se recabó información por medio de las empresas que lo manufacturan y se hizo un análisis estadístico para obtener los valores promedio de cada uno. Además, para algunos materiales se calcularon diferentes factores de huella de carbono dependiendo de las características; por ejemplo, para el concreto se calcularon diferentes factores dependiendo de su resistencia, para las alfombras se hicieron cálculos según la composición y el peso de cada

una, entre otros. Los datos extraídos de esta referencia se mostrarán en la siguiente sección donde se presenta el análisis comparativo realizado.

2.3.2. Análisis de datos de huella de carbono recolectados

Con los datos recabados de las diferentes investigaciones se elaboró el Cuadro 11, el cual presenta los valores de cada material presente en la obra; también se muestran comentarios para que el lector pueda encontrar los mismos valores en las referencias. Seguidamente, se analizará cada uno de los materiales con el fin de escoger un factor de huella de carbono equivalente entre los disponibles.

Cuadro 11. Factores de emisión según las distintas referencias

| Material | Factor de emisión [kgCO ₂ eq/kg] | | | Comentarios |
|---------------------------------------|---|----------------|----------------|--|
| | Referencia [1] | Referencia [2] | Referencia [3] | |
| Lastre para compactación | - | 0.0050 | 0.0052 | [1]: No se encontró información |
| Concreto f'c=170 kg/cm ² | 0.1364 | - | - | [1]: Se supuso un 8% menos de cemento que concreto de 170kg/cm ² |
| Concreto f'c=210 kg/cm ² | 0.1476 | 0.1300 | 0.1070 | [1]: Se utilizaron los valores desagregados de baldosas de concreto |
| Concreto f'c=325 kg/cm ² | 0.1854 | - | 0.1200 | [1]: Se supuso un 26% más de cemento que concreto de 210 kg/cm ² |
| Sello de concreto pobre | - | - | 0.0760 | [1] y [2]: No se encontró información |
| Minerales | | | | |
| Mampostería (distintos tamaños) | 0.0680 | 0.0980 | 0.1070 | - |
| Viguetas pretensadas | 0.2799 | - | 0.2420 | [1]: Se obtienen diciendo que es igual a una columna pretensada [3]: Precast concrete |
| Fibrocemento | 0.9190 | - | 1.0900 | - |
| Repello para mampostería | - | - | 0.1820 | [3]: Mortar 1:4 |
| Repello para fibrocemento | - | - | 0.1300 | [3]: Plaster for gypsum |
| Poliestireno | | | | |
| Entrepiso poliestireno | - | - | 3.2900 | [1] y [2]: No se encontró información |
| Metales | | | | |
| Varillas de acero (distintos tamaños) | 2.3010 | 1.7700 | 1.4000 | [1]: No incluye material reciclado [3]: Bar and rod UK average recycled content |
| Tubos acero RT | - | 1.9100 | 1.3800 | [2]: Se supone laminas hierro negro [3]: Coil (sheet) UK average recycled content |
| Láminas HG #26 | - | - | 1.5400 | [3]: Coil (sheet) galvanized UK average recycled content |
| Canoa HG | - | - | 1.5400 | [3]: Coil (sheet) galvanized UK average recycled content |
| Bajantes HG | - | - | 1.5400 | [3]: Coil (sheet) galvanized UK average recycled content |
| Marcos de aluminio para ventanería | 11.1950 | 8.1600 | 12.8000 | [1] y [3]: Rolled virgin aluminium |
| Vidrio | | | | |
| Vidrio para ventanería 6mm | 1.2630 | 0.8500 | 0.9100 | - |
| Madera | | | | |
| Madera para puertas | -1.5700 | 0.4600 | 0.3100 | [1]: Madera sólida [2] y [3]: General timber |
| Madera para marcos | -1.5700 | 0.4600 | 0.3100 | [1]: Madera sólida [2] y [3]: General timber |
| Acabados | | | | |
| Cerámica genérica | - | 0.6500 | 0.7000 | - |
| Pintura genérica | - | 3.5600 | 2.9100 | [2]: Solo tiene información de pintura para exteriores |
| Plásticos | | | | |
| Marcos de PVC para ventanería | - | 2.4100 | 3.1000 | [2] y [3]: General PVC |

Fuente: [1] (Badilla Arroyo, et al., 2015) – [2] (Zúñiga Sandi, 2018) – [3] (Hammond & Jones, 2011)

En cuanto al lastre de compactación, no se encontró información nacional por lo que fue necesario recurrir a las bases de datos internacionales. Como se muestra en el Cuadro 11, ambas referencias tienen un factor similar, se decide utilizar la de Hammond y Jones (2011) porque esta es de acceso libre.

Con respecto al concreto, como se explicó anteriormente, para la información nacional se obtuvo un factor de emisión para las diferentes resistencias, comparándolo con el de la referencia. Si se comparan estos valores con los de las referencias internacionales se observa

también un incremento de la huella de carbono a medida que se incrementa la resistencia del material; es decir, el incremento en Hammond y Jones (2011) entre los dos tipos de concreto fue del 12% mientras que el cálculo nacional fue de 11.5% por lo que se concluye que el ajuste realizado es correcto. Los valores entre la Badilla et al. (2015) y las bases de datos de SimaPro son similares, no obstante, el valor de Hammond y Jones (2011) es un 37% menor. Esta diferencia se puede explicar por varios factores, entre ellos la optimización de procesos que puede tener la manufactura de Reino Unido y la forma en que se realiza el diseño de mezcla en ambos países.

Luego se hizo la comparación para los bloques de mampostería. En este caso se observa que la información de SimaPro y de Hammond y Jones (2011) son aproximadamente iguales mientras que la información costarricense es un 57% menor. Los procesos para la manufactura de los bloques de mampostería se han estandarizado en la mayoría de los países por lo que la fabricación de ellos, en países con un desarrollo tecnológico similar, debería ser semejante (Badilla Arroyo, et al., 2015). Sin embargo, las matrices energéticas de Reino Unido y de Costa Rica son muy diferentes, según el Department for Business, Energy & Industrial Strategy (2018), más de la mitad de la energía del Reino Unido es producida mediante la quema de combustibles fósiles mientras que Costa Rica solo produce un 0.38% del total mediante estos métodos (Grupo ICE, 2015). Se muestra a continuación un resumen de la matriz eléctrica de cada país.

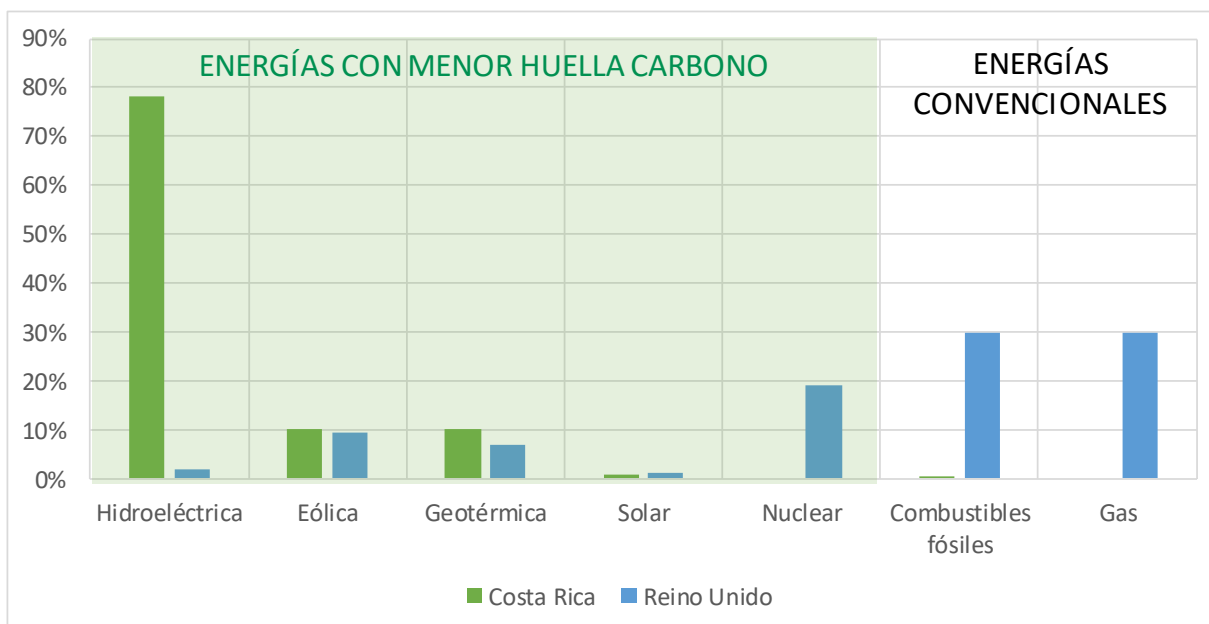


Figura 17. Matriz eléctrica en Costa Rica y en Reino Unido

Fuente: (Grupo ICE, 2015) - (Department for Business, Energy & Industrial Strategy, 2018)

Debido a la conformación de las matrices energéticas de cada país, los factores de carbono equivalente por kilowatt-hora difieren considerablemente. Se muestra a continuación el factor histórico de huella de carbono para cada país del año 2015 al año 2019, esta información se obtuvo del Instituto Meteorológico Nacional para Costa Rica y del Department of Energy and Climate Change para Reino Unido.

Cuadro 12. Factores de emisión por kWh para Costa Rica y Reino Unido

| Año | Factor [kgCO _{2eq} /kWh] | |
|------|-----------------------------------|-------------|
| | Costa Rica | Reino Unido |
| 2015 | 0.0381 | 0.4622 |
| 2016 | 0.0557 | 0.4121 |
| 2017 | 0.0754 | 0.3516 |
| 2018 | 0.0395 | 0.2831 |
| 2019 | - | 0.2556 |

Adaptado de: (Instituto Meteorológico Nacional, 2019) – (Department of Energy and Climate Change, 2019)

Entonces se concluye que los factores de huella de carbono para los bloques de mampostería varían entre países debido sus diferencias en las matrices energéticas. Se decide utilizar el valor costarricense para que el cálculo sea más apegado a la realidad del TFG.

Para el caso de las viguetas prefabricadas, se observa que el valor nacional es un tanto mayor al internacional. Esta situación puede ser explicada por dos razones principales; en primer lugar, los aditivos necesarios para la fabricación del concreto deben ser importados por lo que su transporte suma en el cálculo (Badilla Arroyo, et al., 2015). En segundo lugar, se da una relación proporcional con el concreto ya que este es la materia prima principal para la fabricación de las viguetas, por lo que es esperable que el factor nacional sea mayor.

El fibrocemento presenta una leve diferencia, el factor de Reino Unido es un 18% mayor al del valor nacional. Ambos factores fueron calculados utilizando el alcance de la cuna a la puerta por lo que esta diferencia puede ser explicada por la matriz energética cada país, la mayor utilización de cemento en las láminas de Reino Unido y también porque las distancias que tienen que recorrer las materias primas para la fabricación son menores en Costa Rica (Badilla Arroyo, et al., 2015).

Para las varillas de acero, los valores difieren un 39%, siendo el factor nacional el mayor. Según Badilla et al. (2015), solo un 4% de las emisiones por la producción de este material son realizadas en territorio nacional por lo que esta situación aumenta la incertidumbre de cálculo. El otro 96% de las emisiones se realizan fuera del territorio nacional y para obtener estos valores se utilizó un factor de emisión internacional sin que necesariamente se apeguen a la realidad del producto importado a territorio costarricense (Badilla Arroyo, et al., 2015). Independientemente de esta incertidumbre se decide utilizar el valor nacional.

En cuanto al aluminio, los valores de la base de datos SimaPro son mucho menores que los de la Hammond y Jones (2011) y los de Badilla et al. (2015), por lo que se decide descartar esta información. Los otros dos valores presentan un análisis de cuna a puerta y su diferencia es de un 14% siendo el valor de la referencia internacional más alto. Según Ciacci, et al. (2014), el proceso de la fundición de aluminio suma más del 80% de la huella de carbono de este material y para ello es necesario una gran cantidad de energía por lo tanto el origen de esta energía es un factor determinante en cuanto a la huella de carbono del aluminio. Se concluye entonces que la variación entre el valor nacional y el valor internacional es debido a la matriz energética de cada país. Una alternativa para disminuir considerablemente la huella de carbono de este material es la utilización de aluminio reciclado; sin embargo, para efectos de este TFG no se tomó en cuenta la utilización de éste ya que no existe información nacional sobre el tema. En este caso, se utilizó el valor nacional para conservar la uniformidad de la información.

Las bases de datos internacionales del vidrio presentan valores muy similares; no obstante, la referencia nacional es un 38% mayor. Según de Badilla et al. (2015), esta discrepancia se debe a que en Costa Rica se importa, principalmente de México, el vidrio ya manufacturado y en el país solo se hace el proceso de corte y acabados finales. Por esa razón, es necesario adicionar el transporte internacional marítimo dentro de la ecuación del cálculo y consecuentemente el valor se incrementa. Se decidió utilizar el valor costarricense para que el cálculo sea más apegado a la realidad del TFG.

Para el caso de repellos, bloques de poliestireno para entrepiso, tubos estructurales tipo RT, láminas de techo, cerámica, pintura y marcos para ventanería de PVC no se obtuvieron datos nacionales por lo que se tuvo que recurrir a las bases de datos internacionales. En el Cuadro 13 se muestran los materiales escogidos (en las bases de datos) para obtener los factores de huella de carbono de cada material. Se decidió utilizar los valores de la base de datos de Reino

Unido con el objetivo de mantener uniformidad en la información. Una vez seleccionados los factores para cada material, se procedió a realizar la codificación de los estos utilizando la Tabla 23 de OmniClass (2019), anteriormente explicada.

Cuadro 13. Base de datos de factores de emisión utilizada en este TFG

| Categoría | Omniclass (Tabla 23) | Nombre Material | Factor de emisión [kgCO_{2eq}/kg] |
|------------------|-----------------------------|---------------------------------------|--|
| | 23.11.13.11.17.13.00 | LastreCompactacion_Capa | 0.0052 |
| | 23.13.31.11.17.00.00 | Concreto_Fc170(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 0.1364 |
| | 23.13.31.11.21.00.00 | Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 0.1476 |
| | 23.13.31.11.32.00.00 | Concreto_Fc325(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 0.1854 |
| | 23.11.15.13.15.00.00 | ConcretoPobre_Capa | 0.0760 |
| | 23.13.21.11.11.15.00 | Mamposteria_15(cm)_Bloques | 0.0680 |
| Minerales | 23.13.35.19.17.15.00 | ConcretoPretensado_Viguetas | 0.2799 |
| | 23.13.41.11.17.13.00 | GypsumAlero_Lamina | 0.9190 |
| | 23.15.19.17.11.11.00 | GypsumCieloRaso_Lamina | 0.9190 |
| | 23.15.15.25.11.00.00 | MorteroRepelloPared_Capa | 0.1820 |
| | 23.15.15.25.13.00.00 | MasillaCieloRaso_Capa | 0.1300 |
| | 23.13.15.13.15.11.00 | MorteroPegaPiso_Capa | 0.1820 |
| | 23.13.15.13.15.13.00 | MorteroPegaParedes_Capa | 0.1820 |
| Poliestireno | 23.13.35.23.11.17.00 | PoliestirenoEntrepiso_Bloques | 3.2900 |
| | 23.13.31.21.11.11.00 | AcerosRefuerzo_Fy4200(kg/cm2)_Varilla | 2.3010 |
| | 23.13.35.19.13.19.00 | HierroNegro_Fy2350(kg/cm2)_Tubos | 1.3800 |
| Metales | 23.13.39.11.11.00.00 | ZincTecho_Lamina | 1.5400 |
| | 23.13.41.11.17.11.00 | ZincBotaguasTecho_Lamina | 1.5400 |
| | 23.13.41.33.01.00.00 | ZincCanoa_Extrusion | 1.5400 |
| | 23.17.13.13.00.00.00 | AluminioVentaneria_Marco | 11.1950 |
| Vidrio | 23.17.13.11.11.00.00 | VidrioVentaneria_6(mm)_Lamina | 1.2630 |
| Madera | 23.17.11.11.17.00.00 | MaderaPuerta_Elemento | 0.3100 |
| | 23.15.17.13.13.13.11 | CeramicaPisoGeneral_Azulejo | 0.7000 |
| | 23.15.17.13.13.13.13 | CeramicaPisoBano_Azulejo | 0.7000 |
| Acabados | 23.15.21.11.11.13.11 | PinturaExterior_Capa | 2.9100 |
| | 23.15.21.11.11.13.13 | PinturaInterior_Capa | 2.9100 |
| | 23.15.21.11.11.13.15 | PinturaCieloRaso_Capa | 2.9100 |

Fuente: (Badilla Arroyo, et al., 2015) – (Hammond & Jones, 2011)

Capítulo 3. Guía para incorporar información en modelos BIM

La metodología planteada en el presente TFG se basa en los procesos principales de gestión de la información planteados en la norma ISO 19650-1:2018 y en el Estándar BIM para proyectos públicos del Plan BIM Chile (2019). El objetivo principal es que se utilice información ya contenida en los modelos para este fin en específico. Su uso es válido tanto para etapas iniciales de diseño como para etapas avanzadas con diseños detallados, todo depende de los factores de emisión que se escojan. Se recomienda al lector utilizar cada una de las partes de esta guía según su criterio y el alcance del proyecto.

Uno de los principios de BIM es que la colaboración entre los participantes involucrados en proyectos de construcción es esencial para llevar a cabo su desarrollo de forma eficiente. Para ello, cada participante del proyecto debe generar la información que se incluirá en el modelo BIM tomando en cuenta los requerimientos de información del propietario durante el ciclo de vida del proyecto y los objetivos BIM.

Según la ISO 19650-2:2018, el desarrollo de un proceso BIM empieza desde la definición clara de la información que necesita el propietario del proyecto o el propietario del activo, así como de los métodos, procesos, plazos y protocolos de desarrollo y verificación de esta información. En primer lugar, la parte contratante debe establecer los requerimientos de intercambio de información para el que desarrollará el proyecto, la información de referencia y los recursos compartidos.

Se recomienda que la incorporación de datos de huella de carbono de un proyecto empiece desde la definición de los requerimientos del propietario. En esta fase el propietario (o la parte contratada en su representación) debe definir para qué utilizará el cálculo de huella de carbono del proyecto y su alcance. Luego, este requerimiento debe incluirse en la SDI BIM en donde se explica el alcance de la huella de carbono que el propietario anteriormente definió, así como algunos otros detalles que son descritos en la Sección 3.1. Posteriormente, la parte contratada (el que desarrolla el modelo BIM) elabora el PEB en donde se exponen los procesos utilizados para incorporar esta información en los modelos BIM, estos son detallados en la Sección 3.2.

La Figura 18 resume el proceso para desarrollar la información de la huella de carbono utilizando la metodología BIM.

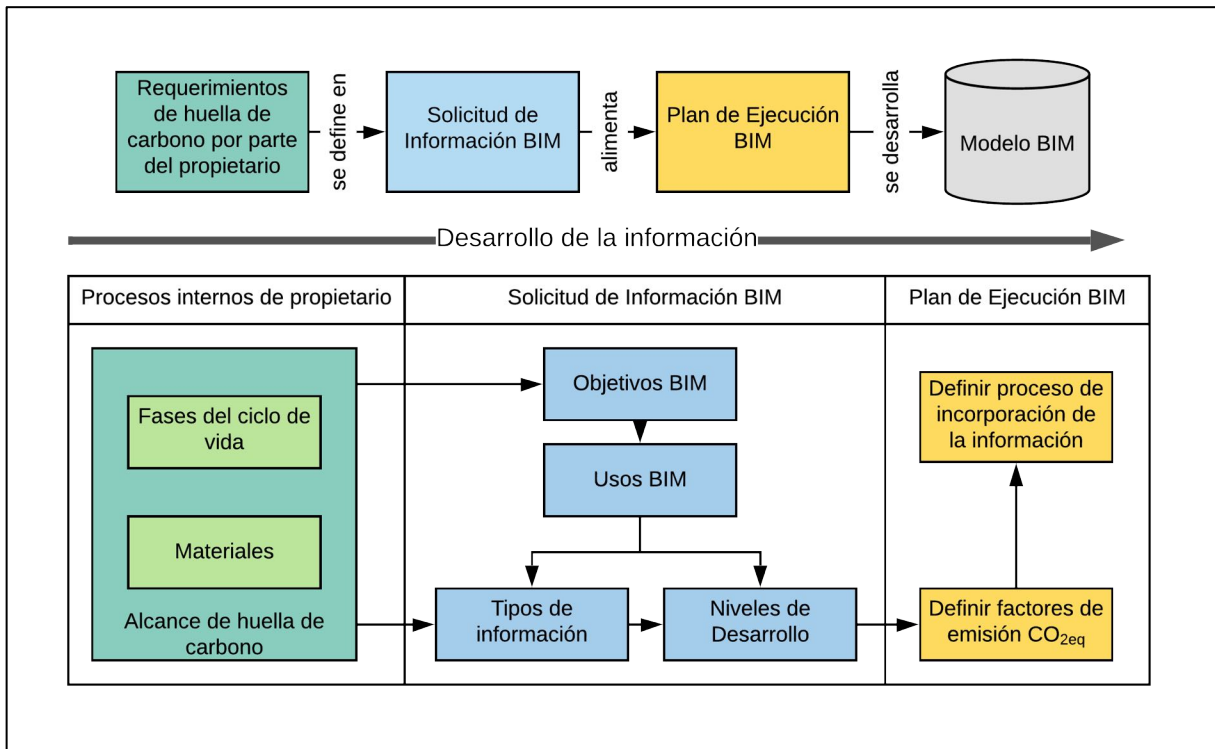


Figura 18. Proceso de desarrollo de datos de huella de carbono en modelos BIM

3.1. Solicitud de Información BIM (SDI BIM)

El Plan BIM (2019) indica que Solicitud del Información BIM puede enlistar los objetivos del uso de BIM, las categorías y niveles de información BIM, la información de referencia para el desarrollo de los modelos, los entregables requeridos, las estrategias de colaboración que requeridas por el propietario y la organización de los modelos (ej. estándares de clasificación).

En cuanto a la huella de carbono, en primer lugar, se debe incluir dentro de los Objetivos BIM que se requiere utilizar el modelo BIM para estimar la huella de carbono del proyecto. Este objetivo define la Evaluación de Sostenibilidad como un Uso BIM que se le dará a la información del modelo y este a su vez define los Tipos de Información necesarias para este objetivo. En el Cuadro 14 se muestran las categorías básicas necesarias para utilizar el modelo BIM para estimar la huella de carbono del proyecto.

Cuadro 14. Definición de los Tipos de Información para modelos BIM

| Tipos de Información | Definición |
|--|--|
| Propiedades físicas y geométricas | Información de las características y propiedades físicas de las entidades tales como áreas, volúmenes, longitudes, entre otros. |
| Requerimientos específicos de información para el fabricante y/o constructor | Información específica para la construcción, como el tipo de elemento (muro, pilar, puerta, etc.), su materialidad, nombre de sus componentes - en caso de existir-, identificación del producto, entre otros. |
| Sostenibilidad | Información sobre condiciones de sustentabilidad, como por ejemplo los factores de emisión. |
| Requerimientos de fases, secuencia de tiempo y calendarización | Información sobre calendarización de las partes de un proyecto, como, fases contempladas, orden de hitos del proyecto y orden de construcción, entre otros. |

Adaptado de: (Plan BIM, 2019)

Además, es necesario que el propietario especifique el alcance de su cálculo en dos dimensiones: las fases del ciclo de vida y los materiales. Para esto se utilizan los estándares explicados en el Capítulo 2, entre ellos: EN 15978:2011 que tienen que ver con las fases del proyecto que se contabilizan y PAS 2050:2011 que define el alcance de la huella de carbono de los materiales. De la misma manera, se debe definir explícitamente los materiales de construcción que se quieran considerar en el cálculo de la huella de carbono. Lo anterior debe incluirse en el documento SDI BIM como información de referencia para el desarrollo de los modelos.

Ahora bien, los Niveles de Desarrollo de cada elemento determinan la manera en que están agrupados los datos de huella de carbono. Teniendo en cuenta la ecuación [1], utilizada para calcular la huella de carbono de un elemento constructivo, la forma en que se cuantifica cada material debe ser compatible a la manera en que se hayan definido los valores de la huella de carbono. Por ejemplo, para calcular el CO_{2eq} de una pared de mampostería confinada, pueden existir al menos tres maneras de obtener el resultado:

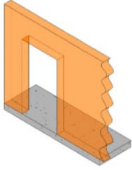
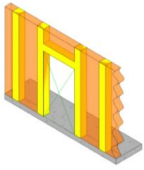
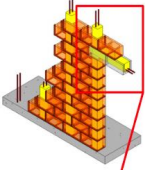
- **Cuantificando el volumen del elemento como un todo:** Para ello es necesario tener los datos de CO_{2eq} sumados ponderadamente por el peso de cada material (bloques, refuerzo, concreto de columnas y vigas que confinan la pared).
- **Cuantificando el volumen de mampostería y el volumen de concreto por separado:** Para ello es necesario tener los datos de CO_{2eq} agregados de manera que

permita obtener también la huella del acero de refuerzo contabilizando solamente el concreto.

- **Cuantificando cada material por separado:** Para ello es necesario tener modelado los elementos por separado.

Es decir, la unidad de los materiales definida en la huella debe ser la misma que la utilizada en el modelo para cuantificar. El Cuadro 15 resume los niveles de agrupación de datos de huella de carbono para cada LOD tomando como ejemplo la pared de mampostería anteriormente mencionada.

Cuadro 15. Interacción entre LOD y factores de emisión

| Nivel de desarrollo (LOD) | Unidad cuantificable en el modelo | Materiales a calcular CO _{2eq} | Nivel de agrupación de factores de huella de carbono | Factor [kgCO _{2eq} /kg] | |
|---|-----------------------------------|---|---|----------------------------------|-------|
|  | 300 Volumen de elemento | Bloques de mampostería | Mampostería + acero de refuerzo + concreto de relleno | 0.213 | |
| | | Acero de refuerzo | | | |
|  | 350 Volumen de mampostería | Bloques de mampostería | Mampostería | 0.088 | |
| | | Acero de refuerzo | Concreto reforzado con porcentaje de acero | 0.198 | |
| | Volumen de concreto | Concreto de relleno | | | |
| | Concreto de relleno | | | | |
|  | 400 | Cantidad de bloques de mampostería | Mampostería | 0.088 | |
| | | Longitud de acero | Acero de refuerzo | Acero de refuerzo | 1.4 |
| | | Volumen de concreto | Concreto de relleno | Concreto | 0.107 |

Adaptado por el autor de: (ACG of America, 2019) - (Hammond & Jones, 2011)

Por lo anterior, se destaca que la incorporación de huella de carbono es un proceso secundario para los proyectos, por lo que esto no debe ser utilizado para definir el LOD de los elementos del modelo BIM. Por el contrario, se recomienda trabajar con los Niveles de Desarrollo definidos en los otros Usos BIM y ajustar los factores de emisión para que estos se acoplen a la información (unidad de medida, elementos modelados, entre otros) que se pueda obtener del modelo BIM. No obstante, el LOD 300 es el mínimo recomendado para realizar una estimación acertada ya que para LOD menores, las estimaciones serán poco precisas. Se pueden realizar estimaciones con LOD menores, pero estas deben utilizarse solamente para procesos iterativos de diseño y no para hacer declaraciones finales de huella de carbono del proyecto.

3.2. Plan de Ejecución BIM (PEB)

Según Plan BIM (2019), el Plan de Ejecución BIM (PEB), es el documento que explica el proceso de desarrollo y creación de la información del proyecto, este incluye:

- Objetivos y Usos BIM (Esta información se referencia del SDI BIM)
- Empresas y personas participantes del proyecto con sus Roles BIM
- Entregables específicos y sus formatos en concordancia con el programa del proyecto
- Proceso de ejecución del modelado y gestión de información del proyecto
- Estándares por utilizar respecto de nomenclatura, clasificación, unidades de medidas, coordenadas, estructuración de los modelos (niveles definidos, volúmenes, entre otros)
- Estrategia y plataformas de colaboración, con sus responsables respectivos

Para este TFG, los esfuerzos se centraron en la elaboración del proceso de ejecución del modelado ya que esta es la sección que se diferencia de cualquier otro PEB si se quieren incorporar datos de huella de carbono en los modelos. Para ello, se tomó como referencia el formato de los mapas de proceso de la Guía de para la creación de un Plan de Ejecución BIM de Pennsylvania State University (2011).

Según Pennsylvania State University (2011), después de que los Usos BIM son identificados, es necesario planificar el proceso de incorporación de la información a los modelos BIM para cada Uso BIM. Para ello, se desarrollan diagramas de flujo que permiten al equipo entender y ejecutar el proceso efectivamente. De la misma manera, estos diagramas de flujo sirven para entender los intercambios de información, la infraestructura tecnológica y los requerimientos de conocimiento para alcanzar cada uno de los Objetivos BIM.

Específicamente, para incorporar la huella de carbono dentro de un modelo BIM existente o uno en desarrollo, es fundamental empatar las unidades de cuantificación del modelo con las unidades de los factores de CO_{2eq}, asegurando un cálculo coherente de la información. El proceso que se propone en este TFG es uno de los posibles caminos, pero pueden existir otras maneras para obtener el mismo resultado. Este se resume en la Figura 19 y posteriormente se explica cada uno de los pasos.

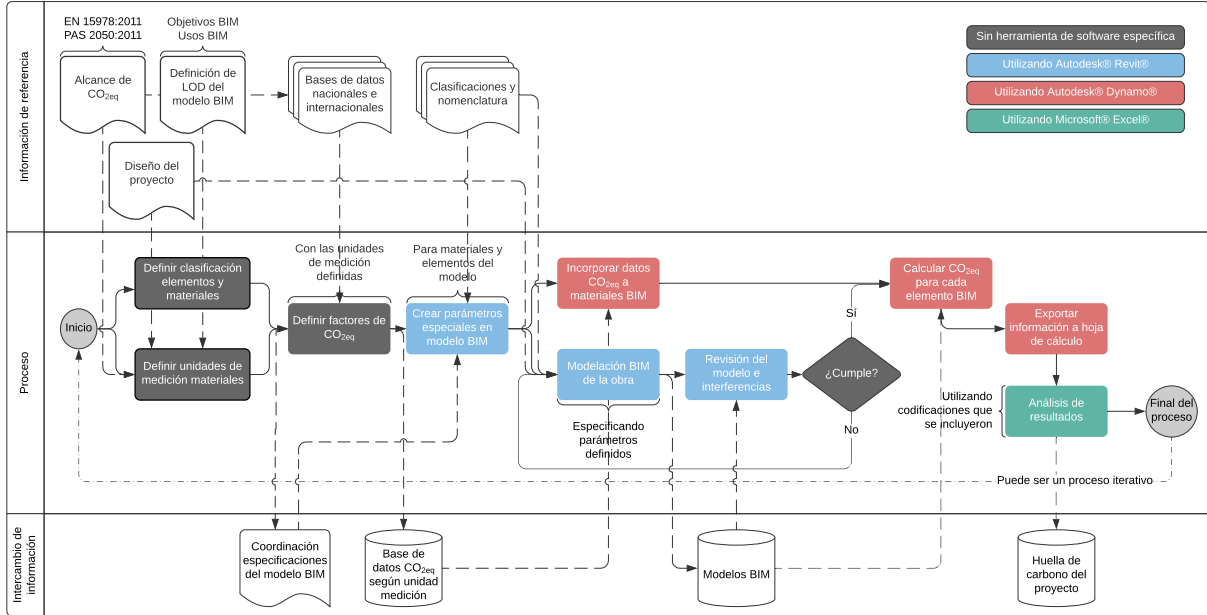


Figura 19. Flujo de trabajo de incorporación de datos huella de carbono en un modelo BIM

En resumen, el proceso inicia definiendo las unidades de medición de los materiales y la clasificación de éstos y de los elementos, con esto se crea el cuadro de coordinación de especificaciones explicado en la Sección 3.2.1. Posteriormente se definen los factores de emisión de CO_{2eq} convirtiendo cada uno a la unidad de medición del modelo. Luego se modela la edificación mediante Autodesk Revit® y paralelamente se incorporan los factores de emisión a los materiales mediante Autodesk® Dynamo®. A continuación, se calcula la huella de carbono de cada elemento y se exporta la información a una hoja de cálculo mediante Autodesk® Dynamo®. Por último, se analiza esta información utilizando Microsoft® Excel®. Los algoritmos se presentan en el Anexo B para que el lector pueda leerlos con mayor detalle. Cabe destacar que el proceso puede ser iterativo ya que se puede utilizar para optimizar diseños en términos de huella de carbono de los proyectos.

3.2.1. Definiciones iniciales

Como primer paso, es necesario revisar el LOD de cada elemento a partir de los Usos BIM definidos en el SDI BIM. Con lo anterior, se pueden establecer las unidades de medición de cada elemento que se quiera cuantificar, por ejemplo, se puede definir que las vigas se modelarán con un Nivel de Desarrollo de 300 y por ende, el concreto se cuantifica con el volumen del elemento. Paralelamente, se definen los estándares de clasificación tanto para los materiales como para los elementos de construcción (este paso puede obviarse si ya se ha

hecho anteriormente para otro Uso BIM). Por ejemplo, puede utilizarse MasterFormat o la Tabla 23 de Omniclass para los materiales y Uniformalt o la Tabla 21 de Omniclass.

Posteriormente, se completa el Cuadro 16 que permite la coordinación entre estándares de materiales, elementos y LOD. Este formulario fue desarrollado en este TFG y el mismo se basa en los anexos del *Level of Development (LOD) Specification Part I & Commentary for BIM* de The Associated General Contractors of America (2019). Esta estructura resume los elementos de construcción agrupados según su clasificación (en este caso Uniformalt), también muestra el LOD que se usará para modelarlos y la clasificación de cada material (en este caso Omniclass) que los forman. De la misma manera, para cada material se incluye cómo se van a medir y el nombre del parámetro en el modelo que será utilizado para este fin.

Cuadro 16. Formulario para estándares de clasificación y unidades de medición

| Clasificación elementos de construcción | | | | | Nivel de Desarrollo | Clasf. Materiales | | Información para cuantificación | | |
|---|----|----|-----|-----|---------------------|--------------------|-------------------------------------|---------------------------------|-----------------|------------------|
| Niveles Uniformalt | | | | | | Omniclass Tabla 23 | Materiales | unid. | Medición en BIM | Parámetro |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | | | | | |
| Nivel 1 de UNIFORMAT | | | | | | | | | | |
| Nivel 2 de UNIFORMAT | | | | | | | | | | |
| Nivel 3 de UNIFORMAT | | | | | | | | | | |
| Nivel 4 de UNIFORMAT | | | | | | | | | | |
| A | 10 | 10 | .10 | .10 | Según objetivos BIM | 23.XX.XX.XX.XX.XX | Materiales que componen al elemento | Ej. [m3] | ¿Cómo se mide? | Nombre parámetro |
| Nivel 1 de UNIFORMAT | | | | | | | | | | |
| Nivel 2 de UNIFORMAT | | | | | | | | | | |
| Nivel 3 de UNIFORMAT | | | | | | | | | | |
| Nivel 4 de UNIFORMAT | | | | | | | | | | |
| B | 10 | 10 | .10 | .10 | Según objetivos BIM | 23.XX.XX.XX.XX.XX | Materiales que componen al elemento | Ej. [m3] | ¿Cómo se mide? | Nombre parámetro |

Adaptado por el autor de: (ACG of America, 2019)

Como se mencionó anteriormente, es fundamental empatar las unidades del modelo con las unidades de los factores de CO_{2eq}, por lo que el siguiente paso es convertir los factores de emisión de las bases de datos a cada una de las unidades de medición de los materiales. Con esta información se elabora el Cuadro 17 (este es un ejemplo y puede variar para cada proyecto). Este agrupa la clasificación de los materiales, el nombre que será usado en el modelo BIM, el factor de emisión convertido y el nombre del parámetro que se utiliza para medir cada material. Esta base de datos será utilizada como información de entrada para el algoritmo posteriormente explicado.

Cuadro 17. Base de datos de CO_{2eq} según unidad de medición

| CodigoOmniclass23 | NombreMaterial | FactorEmision | Unidad | MetodoDeMedicion |
|----------------------|--|---------------|--|--|
| 23.11.13.11.17.13.00 | LastreCompactacion_Capa | 10.40 | [kgCO _{2eq} /m ³] | Volume |
| 23.13.31.11.17.00.00 | Concreto_Fc170(kg/cm ²)_MoldeadoInSitu | 300.01 | [kgCO _{2eq} /m ³] | VolumenConcretoRelleno_(m ³) |
| 23.13.31.11.21.00.00 | Concreto_Fc210(kg/cm ²)_MoldeadoInSitu | 324.79 | [kgCO _{2eq} /m ³] | Volume |
| 23.13.31.11.32.00.00 | Concreto_Fc325(kg/cm ²)_MoldeadoInSitu | 407.84 | [kgCO _{2eq} /m ³] | Volume |
| 23.11.15.13.15.00.00 | ConcretoPobre_Capa | 152.00 | [kgCO _{2eq} /m ³] | Volume |
| 23.13.21.11.11.15.00 | Mamposteria_15(cm)_Bloques | 11.73 | [kgCO _{2eq} /m ²] | Area |
| 23.13.35.19.17.15.00 | ConcretoPretensado_Viguetas | 598.12 | [kgCO _{2eq} /m ³] | Volume |
| 23.13.41.11.17.13.00 | GypsumAlero_Lamina | 2.75 | [kgCO _{2eq} /m] | Length |
| 23.15.19.17.11.11.00 | GypsumCieloRaso_Lamina | 6.32 | [kgCO _{2eq} /m ²] | Area |
| 23.15.15.25.11.00.00 | MorteroRepelloPared_Capa | 4.15 | [kgCO _{2eq} /m ²] | Area |
| 23.15.15.25.13.00.00 | MasillaCieloRaso_Capa | 0.30 | [kgCO _{2eq} /m ²] | Area |
| 23.13.15.13.15.11.00 | MorteroPegaPiso_Capa | 1.38 | [kgCO _{2eq} /m ²] | Area |
| 23.13.15.13.15.13.00 | MorteroPegaParedes_Capa | 1.73 | [kgCO _{2eq} /m ²] | Area |
| 23.13.35.23.11.17.00 | PoliestirenoEntrepiso_Bloques | 82.25 | [kgCO _{2eq} /m ³] | Volume |
| 23.13.31.21.11.11.00 | AcerosRefuerzo_Fy4200(kg/cm ²)_Varilla | 2.30 | [kgCO _{2eq} /kg] | MasaRefuerzoTotal_(kg) |
| 23.13.35.19.13.19.00 | HierroNegro_Fy2350(kg/cm ²)_Tubos | 10846.80 | [kgCO _{2eq} /m ³] | Volume |
| 23.13.39.11.11.00.00 | ZincTecho_Lamina | 6.78 | [kgCO _{2eq} /m ²] | Area |
| 23.13.41.11.17.11.00 | ZincBotaguasTecho_Lamina | 2.62 | [kgCO _{2eq} /m] | Length |
| 23.13.41.33.01.00.00 | ZincCanoa_Extrusion | 1.62 | [kgCO _{2eq} /m] | Length |
| 23.17.13.13.00.00.00 | AluminioVentaneria_Marco | 12.57 | [kgCO _{2eq} /m] | Perimeter |
| 23.17.13.11.11.00.00 | VidrioVentaneria_6(mm)_Lamina | 18.95 | [kgCO _{2eq} /m ²] | Area |
| 23.17.11.11.17.00.00 | MaderaPuerta_Elemento | 155.00 | [kgCO _{2eq} /m ³] | Volume |
| 23.15.17.13.13.13.11 | CeramicaPisoGeneral_Azulejo | 10.50 | [kgCO _{2eq} /m ²] | Area |
| 23.15.17.13.13.13.13 | CeramicaPisoBano_Azulejo | 9.10 | [kgCO _{2eq} /m ²] | Area |
| 23.15.21.11.11.13.11 | PinturaExterior_Capa | 0.47 | [kgCO _{2eq} /m ²] | Area |
| 23.15.21.11.11.13.13 | PinturaInterior_Capa | 0.47 | [kgCO _{2eq} /m ²] | Area |
| 23.15.21.11.11.13.15 | PinturaCieloRaso_Capa | 0.47 | [kgCO _{2eq} /m ²] | Area |

3.2.2. Creación de parámetros especiales

El cuadro de coordinación de estándares permite entender cuáles clasificaciones y parámetros deben crearse en software de modelado BIM para luego ser incorporados a medida que se va modelando. El Cuadro 18 indica los parámetros básicos necesarios para poder incorporar los datos de huella de carbono, sus nombres están acorde a la nomenclatura explicada en el Capítulo 2 y también se indica el ámbito de aplicación para que se puedan configurar bien los parámetros en el software de modelado (materiales o elementos). Estos parámetros se llenarán automáticamente con el algoritmo de incorporación que se explica en las secciones posteriores.

Cuadro 18. Parámetros creados para la incorporación de datos de CO_{2eq} a modelos BIM

| Nombre de parámetro | Formato datos | Unidades | Ámbito de aplicación | Definición |
|--|---------------|------------------------------|----------------------|---|
| MetodoDeMedicion | texto | n/a | Materiales | Unidad de medición de la partida de obra |
| CambioClimaticoUnitario_(kgCO _{2eq}) | número | kg CO _{2eq} / unid. | Materiales | Factor de CO _{2eq} según el método de cuantificación |
| CambioClimatico_(kgCO _{2eq}) | número | kg CO _{2eq} | Elementos | Huella de carbono total del elemento |

Para incorporar nuevos parámetros a los modelos generados a partir de Autodesk Revit® se ingresa a la pestaña *Gestionar* y luego se hace click en el ícono *Parámetros de proyecto*. Este proceso se muestra en la Figura 20.

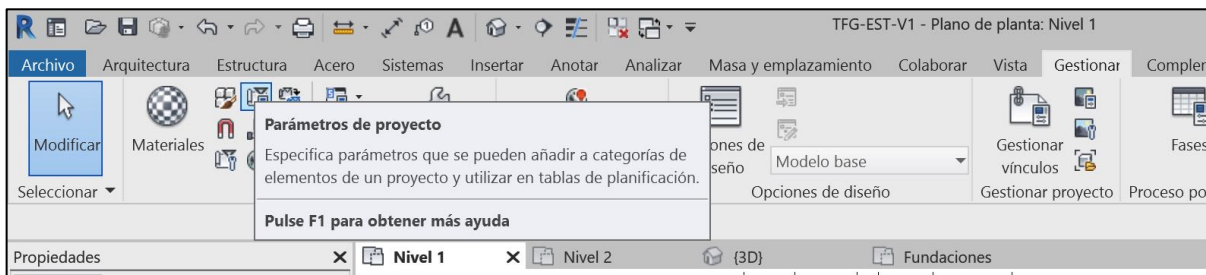


Figura 20. Incorporación de nuevos parámetros a modelos BIM en Autodesk Revit® - Parte A

Luego se hace click en el botón *Añadir* del cuadro de diálogo de los parámetros del proyecto. Una vez abiertas las *Propiedades de parámetro* se escogen las categorías a las que se les añadirá este nuevo parámetro y posteriormente se detallan las opciones del parámetro (nombre, disciplina, tipo de parámetros, entre otros). Este proceso se muestra en la Figura 21.

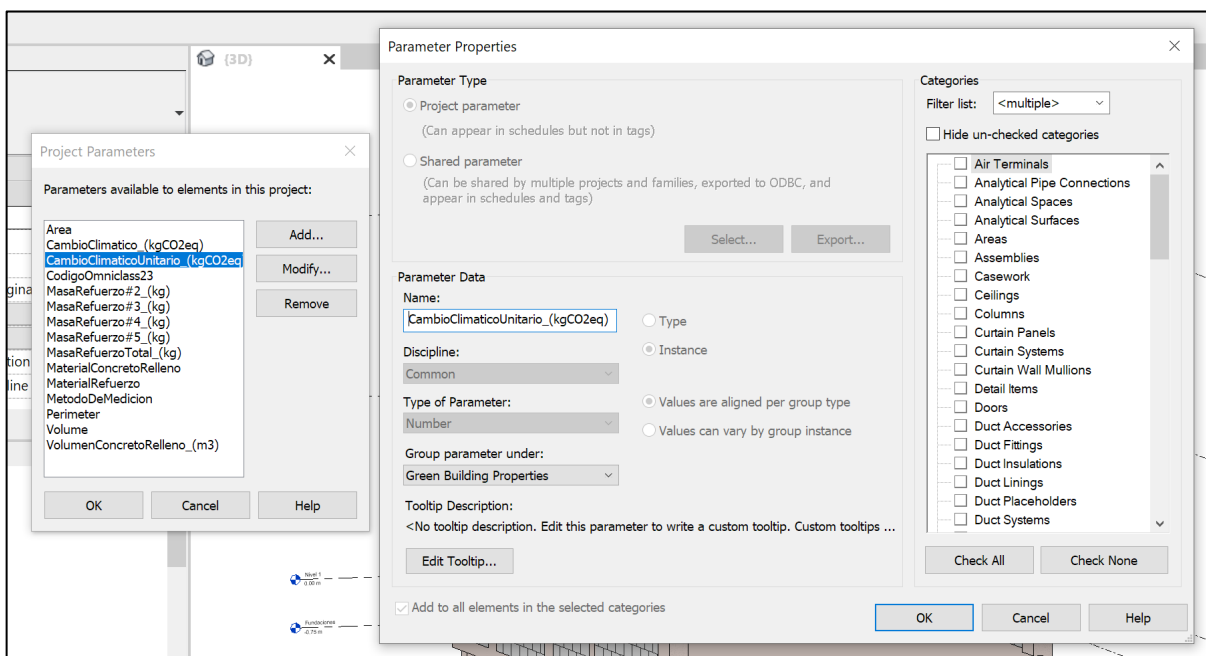


Figura 21. Incorporación de nuevos parámetros a modelos BIM en Autodesk Revit® - Parte B

3.2.3. Incorporación de la información a materiales BIM

Para poder incorporar los factores de emisión unitarios en los materiales del modelo BIM, primero se debe incluir la clasificación a cada uno de ellos. El estándar de clasificación se especifica en la casilla de *Keynote* de la base de datos de materiales, esto se muestra en color rojo en la Figura 22.

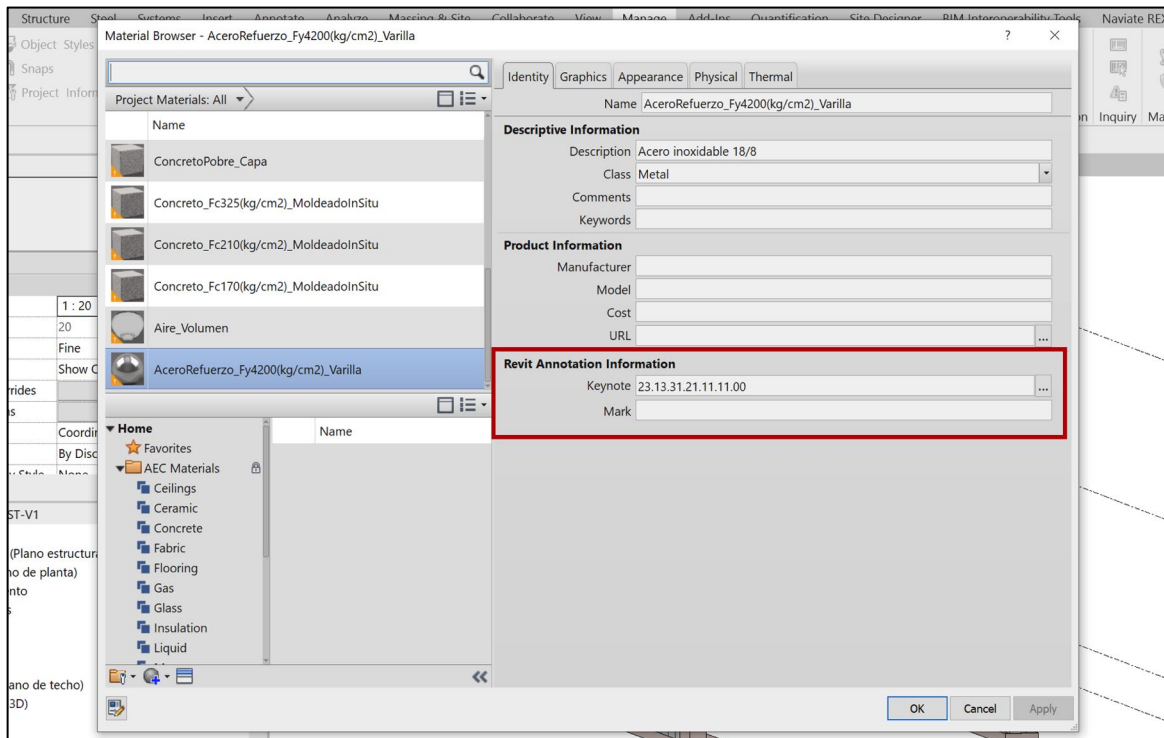


Figura 22. Incorporación de clasificación en materiales BIM

Posteriormente se ingresa a Autodesk® Dynamo® para correr el algoritmo que incorpora la información del Cuadro 17 a los parámetros especiales anteriormente creados. Para ello se hace click en la pestaña de *Manage* y luego en *Dynamo*, este proceso se muestra en la Figura 23.

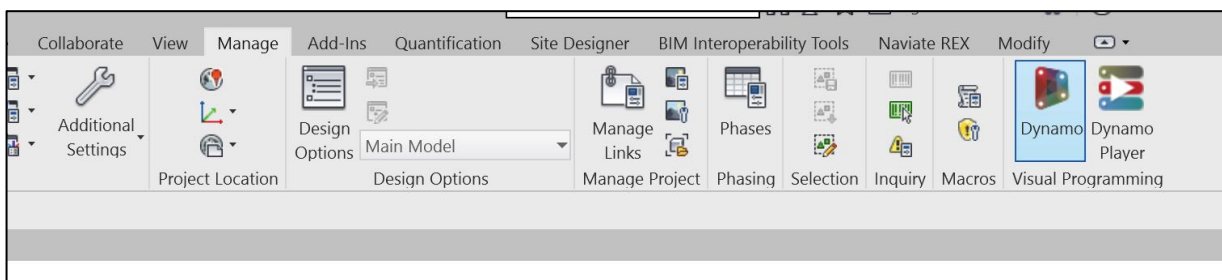


Figura 23. Ingresar a Dynamo desde Autodesk Revit®

Luego, se ejecuta el algoritmo de la Figura 24, este algoritmo se muestra y explica en el Anexo B.1. Este proceso asegura que, para cada material del modelo, exista la información necesaria para los pasos posteriores.

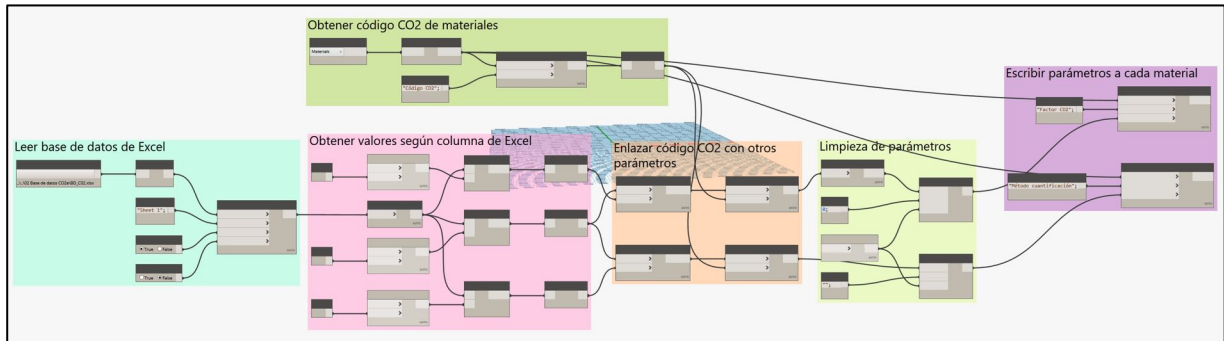


Figura 24. Algoritmo para incorporar información en materiales BIM

Este algoritmo, paralelamente lee la base de datos de Excel del Cuadro 17 y obtiene el código de clasificación de cada material. Luego, se asocia el código de clasificación con el factor de emisión y el método de medición para poder incorporar estos dos parámetros en cada material. El resultado de este algoritmo se muestra en la Figura 25.

| <Materiales sin parámetros> | | | | <Materiales con parámetros> | | | |
|---------------------------------------|----------------------|---|----------------------------|---------------------------------------|----------------------|---|----------------------------|
| A | B | C | D | A | B | C | D |
| Material: Name | Material: Keynote | Material: CambioClimaticoUnitario_(kgCO2eq) | Material: MetodoDeMedicion | Material: Name | Material: Keynote | Material: CambioClimaticoUnitario_(kgCO2eq) | Material: MetodoDeMedicion |
| Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 0 | | Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 494.186 | Volume |
| Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 0 | | Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 494.186 | Volume |
| Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 0 | | Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 494.186 | Volume |
| Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 0 | | Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 494.186 | Volume |
| Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 0 | | Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 494.186 | Volume |
| Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 0 | | Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 494.186 | Volume |
| Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 0 | | Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 494.186 | Volume |
| Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 0 | | Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 494.186 | Volume |
| Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 0 | | Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 494.186 | Volume |
| Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 0 | | Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 494.186 | Volume |
| Mamposteria_15(cm)_Bloques | 23.13.21.11.11.16.00 | 0 | | Mamposteria_15(cm)_Bloques | 23.13.21.11.11.16.00 | 11.72655 | Area |
| Mamposteria_15(cm)_Bloques | 23.13.21.11.11.16.00 | 0 | | Mamposteria_15(cm)_Bloques | 23.13.21.11.11.16.00 | 11.72655 | Area |
| Mamposteria_15(cm)_Bloques | 23.13.21.11.11.16.00 | 0 | | Mamposteria_15(cm)_Bloques | 23.13.21.11.11.16.00 | 11.72655 | Area |
| Mamposteria_15(cm)_Bloques | 23.13.21.11.11.16.00 | 0 | | Mamposteria_15(cm)_Bloques | 23.13.21.11.11.16.00 | 11.72655 | Area |
| Mamposteria_15(cm)_Bloques | 23.13.21.11.11.16.00 | 0 | | Mamposteria_15(cm)_Bloques | 23.13.21.11.11.16.00 | 11.72655 | Area |
| Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 0 | | Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 494.186 | Volume |
| Mamposteria_15(cm)_Bloques | 23.13.21.11.11.16.00 | 0 | | Mamposteria_15(cm)_Bloques | 23.13.21.11.11.16.00 | 11.72655 | Area |
| Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 0 | | Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 494.186 | Volume |
| Mamposteria_15(cm)_Bloques | 23.13.21.11.11.16.00 | 0 | | Mamposteria_15(cm)_Bloques | 23.13.21.11.11.16.00 | 11.72655 | Area |
| Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 0 | | Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 23.13.31.11.21.00.00 | 494.186 | Volume |
| Mamposteria_15(cm)_Bloques | 23.13.21.11.11.16.00 | 0 | | Mamposteria_15(cm)_Bloques | 23.13.21.11.11.16.00 | 11.72655 | Area |

Figura 25. Parámetros sin llenar y parámetros llenados después del algoritmo

3.2.4. Modelado BIM

Teniendo la información necesaria en cada material, se procede a modelar la edificación como se haría comúnmente, se destaca la importancia de clasificar cada elemento modelado según el estándar elegido y también asociar correctamente los materiales que componen cada

elemento. Como se comentó anteriormente, el sistema de clasificación utilizado fue Uniformat; en la Figura 26 se muestran los pasos para definirlo en cada elemento. Primero se selecciona el elemento a clasificar, luego en la barra de propiedades se hace selección *Editar Tipo* y por último en el cuadro de diálogo se escoge el *Assembly Code* (en este caso Uniformat).

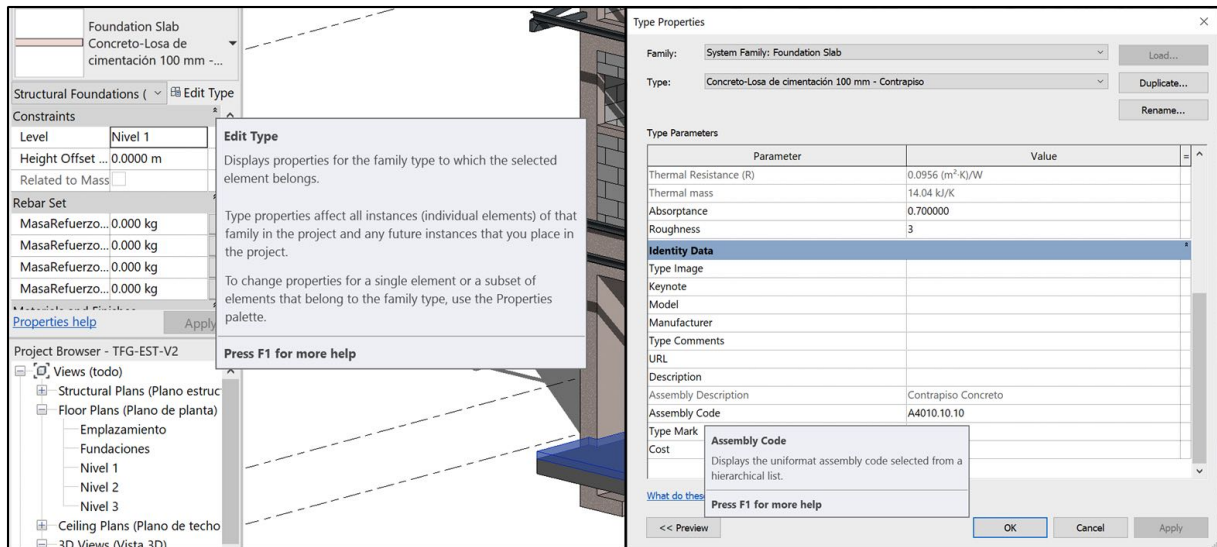


Figura 26. Pasos para definir la clasificación Uniformat en los elementos del modelo

Luego, dependiendo de fase en que se desarrolle este cálculo, se procede a realizar la revisión y coordinación de los modelos del proyecto. En fases iniciales este proceso no es necesario porque primero optimizan los diseños mediante el análisis de huella de carbono, pero luego, para saber la huella de carbono real del proyecto, sí es necesario este proceso. Para ello se debe unir la información de los modelos generados por los diversos actores del proyecto. Plan BIM (2019) indica que se debe seleccionar una de las siguientes estrategias de consolidación, esta debe ser conocida y utilizada a lo largo de todo el desarrollo del proyecto:

- **Modelo BIM federado:** Modelo creado a partir de información contenida en archivos separados. Esta información puede provenir de distintos actores.
- **Modelo BIM integrado:** Modelo compuesto por la información de las distintas disciplinas del proyecto, contenida en una única base de datos.

Una vez unificada la información en un solo modelo, se procede a hacer el análisis y corrección de interferencias para que, en los próximos pasos, los valores de medición sean los correctos.

3.2.5. Cálculo de huella de carbono de elementos BIM

Después de la coordinación entre modelos, se puede calcular la huella de carbono para cada elemento mediante Autodesk® Dynamo®. Para ello, primero se recomienda hacer algunos cálculos preliminares que permitan estimar los parámetros que serán utilizados en el próximo cálculo, este paso depende de lo que se incorporó en el cuadro de coordinación. Por ejemplo, para hacer la estimación del marco de las ventanas, se puede utilizar el perímetro de estos elementos, pero este parámetro no existe explícitamente por lo que hay que crearlo.

Luego de que se tienen todos los parámetros, se puede pasar a estimar la huella de carbono de cada elemento. El algoritmo creado se muestra en la Figura 27 (ver Anexo B.2. para mayor detalle). En primer lugar, se enlistan todas las categorías a cuantificar (definidas según el alcance, por ejemplo: vigas, columnas, paredes, entre otros) y se obtienen todos los elementos de cada una de las categorías. En seguida, el algoritmo lee los parámetros de los materiales definidos en el Cuadro 18; el parámetro *MetodoDeMedicion* tiene el nombre de la variable que será utilizada en para cuantificar por lo que automáticamente se obtiene este valor para cada elemento. Luego se multiplica ese valor con *CambioClimaticoUnitario_(kgCo2eq)* para obtener la huella de carbono total por elemento. Este valor se guarda automáticamente en el parámetro *CambioClimatico_(kgCo2eq)* de los elementos.

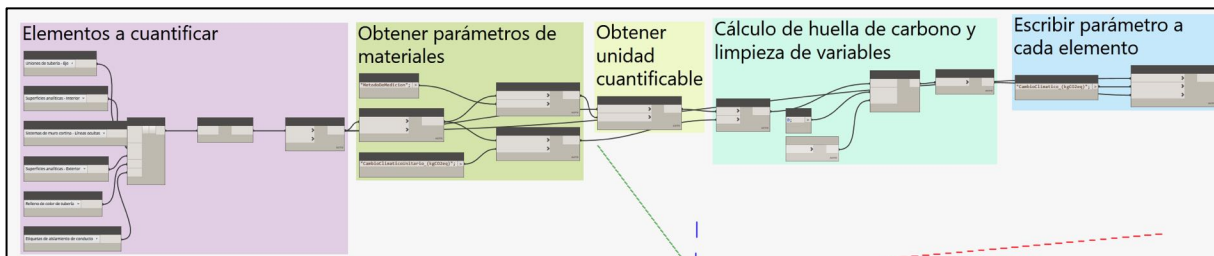


Figura 27. Algoritmo para estimar la huella de carbono de los elementos – Parte B

Una opción para calcular la huella de carbono de los elementos es mediante la creación de *Tablas de Planificación* en Autodesk Revit® y para luego exportar estas tablas a Excel. Sin embargo, se decidió incorporar estos datos propiamente en los elementos ya que, en términos de interoperabilidad, es más sencillo poder exportar información en formato IFC si esta se encuentra almacenada de esta manera.

3.2.6. Extracción de la información del modelo BIM

Por último, con la información ya incorporada a los elementos, se crea otro algoritmo en Autodesk® Dynamo® que permite exportar todos estos datos a una hoja de Excel. Este se muestra en la Figura 28 (ver Anexo B.4. para mayor detalle) y, para ello, se enlistan todas las categorías de elementos a exportar y se leen estos parámetros:

- Clasificación Unifomat (*Assembly Code*)
- Nombre del tipo de elemento (*Family and Type*)
- Huella de carbono por elemento (*CambioClimatico_(kgCO2eq)*)
- Nombre de los materiales que conforman el elemento (*Material Name*)
- Factor de emisión de los materiales que conforman el elemento (*CambioClimaticoUnitario_(kgCO2eq)*)
- Metodo y unidad de medición de los materiales que conforman el elemento (*MetodoDeMedicion*)

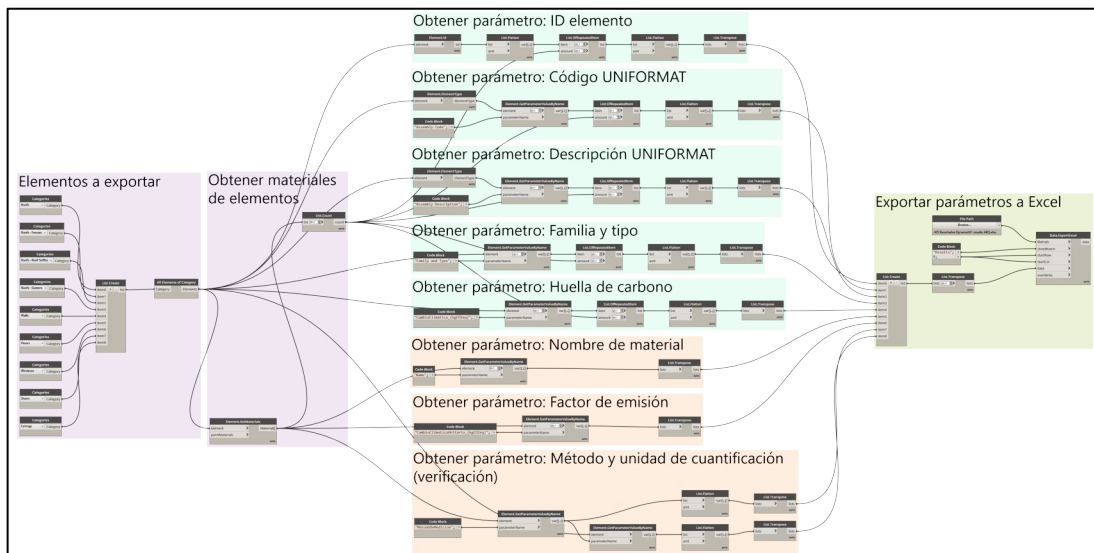


Figura 28. Algoritmo para exportar información de elementos a hoja de cálculo

Luego de la extracción, es recomendable hacer una limpieza de la base de datos para que esta pueda dividirse por tipo de material y, a su vez, por tipo de elementos. Para ello se puede utilizar Microsoft Excel® u otra herramienta que permita manipular bases de datos.

3.2.7. Análisis de resultados extraídos de los modelos BIM

Por último, la información extraída de los modelos BIM puede ser visualizada por algún software que permita manipular datos. Esta tiene formato de *Tidy Data*, término acotado por Hadley Wickham en 2014. Los principios de *Tidy Data* proveen una estructura estandar para organizar bases de datos que permite facilitar el análisis de esta información. Estos son (se muestran visualmente en la Figura 29):

1. Cada parámetro tiene su propia columna.
2. Cada observación (en este caso elemento) tiene su propia fila.
3. Cada valor tiene su propia celda.

| ID elemento | Clasificación | Tipo de | Huella de Carbono | Materiales que lo conforman |
|-------------|---------------|----------|-------------------|------------------------------------|
| 35234 | B10101010 | Columnas | 165.9607842 | AcerosRefuerzo_Fy4200kg/m2_Vanilla |
| 35234 | B10101010 | Columnas | 165.9607842 | AcerosRefuerzo_Fy4200kg/m2_Vanilla |
| 35454 | B10101010 | Columnas | 205.560979 | AcerosRefuerzo_Fy4200kg/m2_Vanilla |
| 35454 | B10101010 | Columnas | 205.560979 | AcerosRefuerzo_Fy4200kg/m2_Vanilla |
| 35778 | B10101010 | Columnas | 182.777784 | AcerosRefuerzo_Fy4200kg/m2_Vanilla |
| 35842 | B10101010 | Columnas | 182.777784 | AcerosRefuerzo_Fy4200kg/m2_Vanilla |
| 35842 | B10101010 | Columnas | 182.777784 | AcerosRefuerzo_Fy4200kg/m2_Vanilla |
| 35842 | B10101010 | Columnas | 182.777784 | AcerosRefuerzo_Fy4200kg/m2_Vanilla |

Parámetros

| ID elemento | Clasificación | Tipo de | Huella de Carbono | Materiales que lo conforman |
|-------------|---------------|----------|-------------------|------------------------------------|
| 35234 | B10101010 | Columnas | 165.9607842 | AcerosRefuerzo_Fy4200kg/m2_Vanilla |
| 35454 | B10101010 | Columnas | 205.560979 | AcerosRefuerzo_Fy4200kg/m2_Vanilla |
| 35778 | B10101010 | Columnas | 182.777784 | AcerosRefuerzo_Fy4200kg/m2_Vanilla |
| 35842 | B10101010 | Columnas | 182.777784 | AcerosRefuerzo_Fy4200kg/m2_Vanilla |

Elementos / Materiales

| ID elemento | Clasificación | Tipo de | Huella de Carbono | Materiales que lo conforman |
|-------------|---------------|----------|-------------------|------------------------------------|
| 35234 | B10101010 | Columnas | 165.9607842 | AcerosRefuerzo_Fy4200kg/m2_Vanilla |
| 35454 | B10101010 | Columnas | 205.560979 | AcerosRefuerzo_Fy4200kg/m2_Vanilla |
| 35778 | B10101010 | Columnas | 182.777784 | AcerosRefuerzo_Fy4200kg/m2_Vanilla |
| 35842 | B10101010 | Columnas | 182.777784 | AcerosRefuerzo_Fy4200kg/m2_Vanilla |

Valores

Figura 29. Principios de Tidy Data aplicados a bases de datos BIM

Adaptado de: (Wickham & Grolemund, 2017)

En el presente TFG se decidió utilizar Microsoft Excel® como herramienta de análisis por su uso generalizado en la mayoría de las profesionales del sector. La información extraída se puede analizar de tres maneras:

- **Por tipo de material:** con ello se logra entender cuáles materiales son los que aportan más a la huella de carbono del proyecto. Este análisis puede ser para identificar cambios globales en los materiales que se utilizan en el proyecto, por ejemplo: sustituir el uso de bloques de mampostería comunes por bloques de mampostería ecológicos (con algún nivel de plástico reciclado).
- **Por elemento funcional:** con ello se logra observar cuáles componentes del proyecto son los que tienen más huella de carbono. Esta información puede ser muy útil si se quisieran realizar "ingenierías de valor ecológicas" que no solo busquen optimizar costos si no también el impacto ambiental. Sabiendo dónde está la mayor proporción de huella de carbono del proyecto, los diseñadores podrían enfocar sus esfuerzos a reducirla mediante el análisis de ese componente en específico.

- **Por cronograma:** a la clasificación de elementos se le puede añadir un cronograma de obra y con ello se puede elaborar una curva "S" de la huella de carbono planificada (curva verde en la Figura 30). A partir de esta curva base, se pueden hacer mediciones periódicas a medida que se construye la obra para ir analizando cómo se van emitiendo GEI a la atmósfera (curva roja en Figura 30). Estas mediciones pueden ser útiles si se decide mitigarlas a medida que se van dando, para ello, es necesario que el alcance inicial de la huella de carbono también incluya los trabajos de construcción del proyecto (A4-A5, según EN 15978:2011). A medida de mitigar las emisiones, se puede variar la materialidad de los elementos que se construirán o comprarán en etapas posteriores o añadir la plantación de árboles dentro del alcance del proyecto.

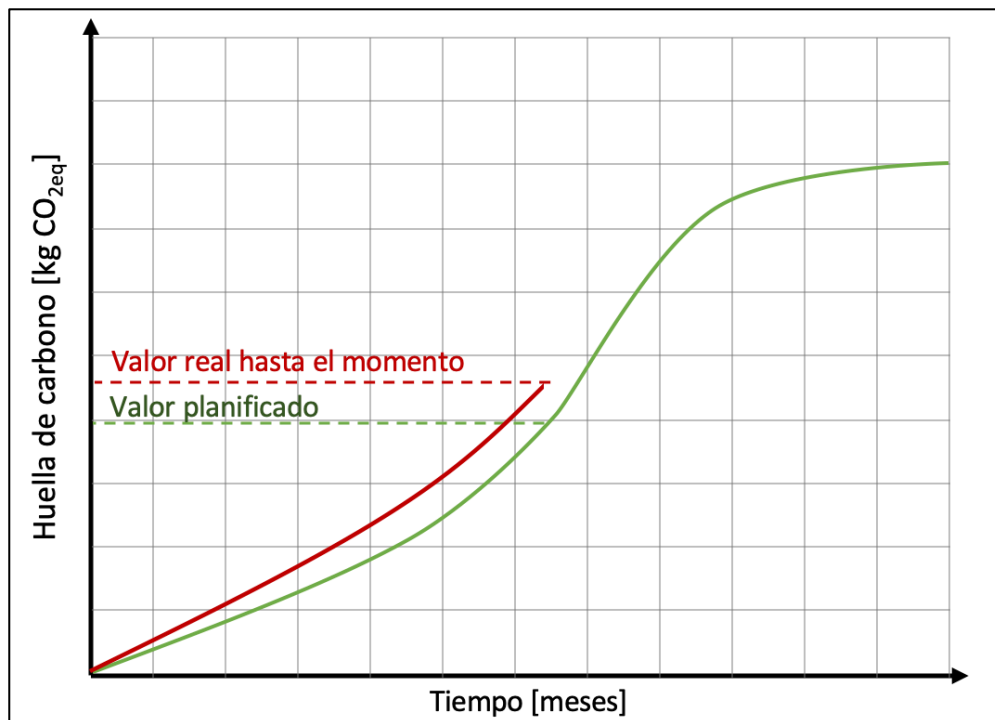


Figura 30. Curva "S" modificada para huella de carbono de un proyecto

Capítulo 4. Ejemplo de aplicación y sus resultados

Con el fin de ejemplificar la metodología desarrollada, se decidió modelar una vivienda unifamiliar de 101 m² (según el alcance que explicado en la Sección 1.4) presentada en el TFG de Caro (2019). Esta vivienda es representativa de las casas construidas, ofrecidas o tramitadas entre el 2014 y el 2017 en condominios residenciales en el Gran Área Metropolitana en Costa Rica (Caro, 2019). En el Anexo C se muestran los planos arquitectónicos de la vivienda.

En este capítulo se presentan las definiciones iniciales que se establecieron para poder incorporar la información a los modelos y luego se presenta el paso a paso del cálculo de la huella de carbono del proyecto por medio del flujo de trabajo y los algoritmos explicados el Capítulo 3. Por último, se presenta un análisis de resultados para la vivienda escogida.

4.1. Definiciones iniciales

Estas definiciones iniciales tienen que ver con la información referencial utilizada para incorporar la huella de carbono al modelo BIM, entre ellas el alcance de la huella de carbono, los usos BIM del modelo, los LOD de los elementos y los estándares de clasificación (tanto para materiales como para elementos funcionales).

4.1.1. Alcance de huella de carbono del proyecto

Como lo indica la norma ISO 14040:2006, es necesario determinar tanto la unidad funcional del análisis como el alcance. La unidad funcional se definió como emisiones de CO_{2eq} por metro cuadrado de construcción por año de vida útil de la vivienda. En este caso el metro cuadrado de construcción se define como el área interior de la vivienda y deja de lado el parqueo, balcones y terrazas. De la misma manera, la vida útil de la vivienda se define en 60 años. Como se explicó en el alcance del presente TFG (ver Sección 1.3.1), se utilizó el estándar europeo EN 15978:2011 para delimitar la huella de carbono parcial del proyecto. En el alcance de este proyecto se incluye la extracción de la materia prima utilizada en la creación de los materiales, el traslado de esta hasta las fábricas de manufactura y el proceso de manufactura de los materiales. Se sale del alcance de este proyecto la huella de carbono debido al transporte de los materiales hasta la construcción (A4) y el proceso constructivo (A5).

Los materiales que se incluyeron se enlistan en el alcance del presente TFG y son los que más aportan en la huella de carbono generalmente según Röck et al. (2018).

4.1.2. Objetivos BIM

Los modelos BIM utilizados en el modelo se realizaron exclusivamente para ejemplificar el uso de la metodología creada por lo que el objetivo general BIM es automatizar el cálculo la huella de carbono de la vivienda unifamiliar anteriormente mencionada.

De la misma manera, los objetivos BIM específicos son los siguientes:

- Determinar la cantidad de materiales de la obra
- Calcular la huella de carbono del proyecto según el alcance anteriormente definido
- Analizar la distribución de la huella de carbono del proyecto mediante la información previamente calculada

4.1.3. Usos BIM

Teniendo en cuenta los objetivos anteriormente definidos, se determinó que para hacer el cálculo automático de la huella de carbono del proyecto son necesarios los siguientes Usos BIM (enumerados según Figura 6):

04. Coordinación 3D: En este caso solamente se realiza para que la cuantificación de materiales sea la correcta.

05. Estimación de cantidades: Se utiliza BIM para asistir en la generación de cantidades precisas que luego serán utilizadas para el cálculo de la huella de carbono.

06. Sostenibilidad: A través del Modelo BIM se evaluará un componente de la sostenibilidad del proyecto (huella de carbono).

15. Planificación 4D: Se utiliza para agregar la programación de obra en el modelo 3D (3D + Dimensión de tiempo). Con esta información podremos obtener la Curva "S" modificada para huella de carbono de un proyecto.

4.1.4. Tipos de información requeridos

Luego de definir los Usos BIM, se pueden definir los tipos de información necesarias para cumplir los objetivos anteriormente establecidos. Se enlistan los Tipos de Información requeridos:

- **Propiedades físicas y geométricas:** La geometría de los elementos.
- **Especificaciones técnicas:** Información específica para la construcción, como el tipo de elemento (muro, pilar, puerta, etc.) y su materialidad. En esta información se incluyen los sistemas de clasificación usados.
- **Sostenibilidad:** Información sobre los factores de emisión tanto en elementos como en materiales.
- **Calendarización de obra:** Información sobre la duración y la hoja de ruta de las partes del proyecto.

4.1.5. Nivel de desarrollo necesario

Como el objetivo del modelo BIM en este TFG fue realizar el cálculo de la huella de carbono del proyecto, se decidió el nivel de desarrollo con base en este objetivo principal. No obstante, se recomienda que esta escogencia se realice tomando en cuenta los Usos BIM y los Tipos de Información necesarias y que a partir de ellos se ajusten los factores de emisión de los materiales.

En este caso, el nivel de detalle mínimo utilizado para todo el proyecto fue LOD 300 ya que este nivel brinda información detallada del tamaño y forma de los elementos, datos esenciales para un cálculo preciso. Sin embargo, el modelado de las paredes, tanto internas como externas, se realizó en un LOD 350 para lograr cuantificar el concreto de los elementos que confinan las paredes de mampostería. En la siguiente figura se muestra gráficamente por qué se tomó esta decisión.

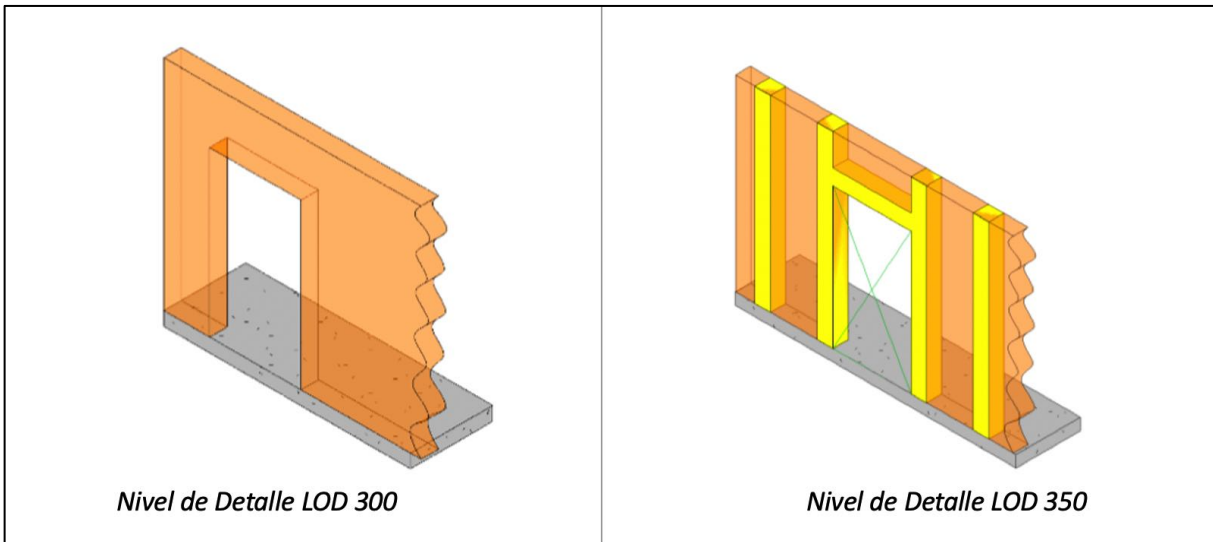


Figura 31. Diferencia entre LOD 300 y LOD 350
 Adaptado de por el autor: (ACG of America, 2019)

4.1.6. Coordinación de estándares de clasificación y unidades de medición

Posteriormente, se completó el formulario que permite la coordinación entre estándares de materiales, elementos y niveles de detalle. Esta estructura resume los elementos de construcción agrupados según su clasificación Unifomat, también muestra el LOD que se usará para modelarlos y la clasificación Omniclass de cada material que los conforma. De la misma manera, para cada material se incluye cómo se van a medir y el nombre del parámetro en el modelo que será utilizado para este fin. En el Cuadro 19 se muestra la coordinación de estándares para la subestructura (nivel A de Unifomat), en el Cuadro 20 se muestra la información para el esqueleto y piel (nivel B de Unifomat) y en el Cuadro 21 se muestra la información para interiores y acabados (nivel C de Unifomat).

Cuadro 19. Coordinación de estándares para subestructura

| Clasificación elementos de construcción | | | | | Nivel de Detalle | Clasf. Materiales | | Información para cuantificación | | |
|---|----|-----|-----|---|------------------------------|--------------------|----------------------|--|-------------------------|------------------------|
| Niveles Unifomat | | | | | | Omniclass Tabla 23 | Materiales | unid. | Medición en BIM | Parámetro |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Elementos | | | | | |
| Subestructura | | | | | | | | | | |
| Fundaciones | | | | | | | | | | |
| Fundaciones estándar | | | | | | | | | | |
| 10 | 10 | .10 | .10 | | Placa corrida de la vivienda | 300 | 23.13.31.11.21.00.00 | Concreto Fc210(kg/cm ²)_MoldeadoInSitu | [m3] elemento | Volume |
| | | | | | | | 23.13.31.21.11.11.00 | AceroRefuerzo_Fy4200(kg/cm ²)_Varilla | [kg] parámetro especial | MasaRefuerzoTotal (kg) |
| Losa de contrapiso | | | | | | | | | | |
| Contrapiso estándar | | | | | | | | | | |
| 40 | 10 | .10 | .10 | | Placa de contrapiso | 300 | 23.13.31.11.21.00.00 | Concreto Fc210(kg/cm ²)_MoldeadoInSitu | [m3] elemento | Volume |
| | | | | | Contrapiso de la vivienda | 300 | 23.13.31.11.21.00.00 | Concreto Fc210(kg/cm ²)_MoldeadoInSitu | [m3] elemento | Volume |
| Actividades relacionadas a la subestructura | | | | | | | | | | |
| Relleno y compactación | | | | | | | | | | |
| 90 | 10 | .10 | .10 | | Relleno para contrapiso | 300 | 23.11.13.11.17.13.00 | LastreCompactacion_Capa | [m3] elemento | Volume |

Cuadro 20. Coordinación de estándares para esqueleto y piel

| Clasificación elementos de construcción | | | | | Nivel de Detalle | Clasf. Materiales | | Información para cuantificación | | |
|---|-----|------------------------------|---|-----|----------------------|---------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------------|-----------|
| Niveles Uniformat | | | | | | Omniclass Tabla 23 | Materiales | unid. | Medición en BIM | Parámetro |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Elementos | | | | | |
| Esqueleto y piel | | | | | | | | | | |
| Superestructura | | | | | | | | | | |
| Pisos | | | | | | | | | | |
| Estructura soportante de pisos | | | | | | | | | | |
| 10 | .10 | Columnas | | 300 | 23.13.31.11.21.00.00 | Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | [m3] elemento | Volume | | |
| | | | | | 23.13.31.21.11.11.00 | AceroRefuerzo_Fy4200(kg/cm2)_Varilla | [kg] parámetro especial | MasaRefuerzoTotal_(kg) | | |
| | | Vigas | | 300 | 23.13.31.11.21.00.00 | Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | [m3] elemento | Volume | | |
| | | | | | 23.13.31.21.11.11.00 | AceroRefuerzo_Fy4200(kg/cm2)_Varilla | [kg] parámetro especial | MasaRefuerzoTotal_(kg) | | |
| 10 | .30 | Viguetas pretensadas | | 300 | 23.13.35.19.17.15.00 | ConcretoPretensado_Viguetas | [m3] elemento | Volume | | |
| | | Bloques de relleno | | 300 | 23.13.35.23.11.17.00 | PoliestirenoEntrepiso_Bloques | [m3] elemento | Volume | | |
| Entrepiso | | | | | | | | | | |
| 10 | .20 | Losa | | 300 | 23.13.31.11.32.00.00 | Concreto_Fc325(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | [m3] elemento | Volume | | |
| | | | | | 23.13.31.21.11.11.00 | AceroRefuerzo_Fy4200(kg/cm2)_Varilla | [kg] parámetro especial | MasaRefuerzoTotal_(kg) | | |
| Techo | | | | | | | | | | |
| Estructura soportante de techo | | | | | | | | | | |
| 20 | .10 | Cerchas | | 300 | 23.13.35.19.13.19.00 | HierroNegro_Fy2350(kg/cm2)_Tubo | [m3] elemento | Volume | | |
| | | Clavadores | | 300 | 23.13.35.19.13.19.00 | HierroNegro_Fy2350(kg/cm2)_Tubo | [m3] elemento | Volume | | |
| Escaleras | | | | | | | | | | |
| Estructura soportante de escaleras | | | | | | | | | | |
| 80 | .10 | Escaleras de la vivienda | | 300 | 23.13.31.11.21.00.00 | Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | [m3] elemento | Volume | | |
| | | | | | 23.13.31.21.11.11.00 | AceroRefuerzo_Fy4200(kg/cm2)_Varilla | [kg] parámetro especial | MasaRefuerzoTotal_(kg) | | |
| Cerramiento vertical | | | | | | | | | | |
| Paredes exteriores | | | | | | | | | | |
| Estructura de paredes exteriores | | | | | | | | | | |
| 10 | .10 | Paredes de la vivienda | | 350 | 23.13.21.11.11.15.00 | Mamposteria_15(cm)_Bloques | [m2] elemento | Area | | |
| | | | | | 23.13.31.11.17.00.00 | Concreto_Fc170(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | [m3] parámetro especial | VolumenConcretoRelleno_(m3) | | |
| | | | | | 23.13.31.21.11.11.00 | AceroRefuerzo_Fy4200(kg/cm2)_Varilla | [kg] parámetro especial | MasaRefuerzoTotal_(kg) | | |
| Recubrimiento y pintura | | | | | | | | | | |
| 20 | .10 | Acabado paredes exteriores | | 300 | 23.15.15.25.11.00.00 | MorteroRepelloPared_Capa | [m2] elemento | Area | | |
| | | | | | 23.15.21.11.11.13.11 | PinturaExterior_Capa | [m2] elemento | Area | | |
| Ventaneria exterior | | | | | | | | | | |
| Ventaneria exterior operable | | | | | | | | | | |
| 20 | .10 | Ventaneria de la vivienda | | 300 | 23.17.13.13.00.00.00 | AluminioVentaneria_Marco | [m] parámetro especial | Perimeter_(Marco) | | |
| | | | | | 23.17.13.11.11.00.00 | VidrioVentaneria_6(mm)_Lamina | [m2] elemento | Area | | |
| Puertas exteriores | | | | | | | | | | |
| Puertas exteriores de entrada | | | | | | | | | | |
| 50 | .10 | Puertas exteriores de madera | | 300 | 23.17.11.11.17.00.00 | MaderaPuerta_Elemento | [m3] parámetro especial | Volume_(Marco+Puerta) | | |
| | | | | | | | | | | |
| Cerramiento horizontal | | | | | | | | | | |
| Techo | | | | | | | | | | |
| Cubierta de techo | | | | | | | | | | |
| 30 | .10 | Cubierta de la vivienda | | 300 | 23.13.39.11.11.00.00 | ZincTecho_Lamina | [m2] elemento | Area | | |
| | | | | | | | | | | |

Cuadro 21. Coordinación de estándares para interiores y acabados

| Clasificación elementos de construcción | | | | | Nivel de Detalle | Clasf. Materiales | | Información para cuantificación | | |
|---|-----|--------------------------------|---|-----|----------------------|---------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------------|-----------|
| Niveles Uniformat | | | | | | Omniclass Tabla 23 | Materiales | unid. | Medición en BIM | Parámetro |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Elementos | | | | | |
| Interiores y acabados | | | | | | | | | | |
| Divisiones | | | | | | | | | | |
| Paredes interiores | | | | | | | | | | |
| Paredes interiores fijas | | | | | | | | | | |
| 10 | .10 | Paredes interiores mampostería | | 350 | 23.13.21.11.11.15.00 | Mamposteria_15(cm)_Bloques | [m2] elemento | Area | | |
| | | | | | 23.13.31.11.17.00.00 | Concreto_Fc170(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | [m3] parámetro especial | VolumenConcretoRelleno_(m3) | | |
| | | | | | 23.13.31.21.11.11.00 | AceroRefuerzo_Fy4200(kg/cm2)_Varilla | [kg] parámetro especial | MasaRefuerzoTotal_(kg) | | |
| Puertas interiores | | | | | | | | | | |
| Puertas interiores de entrada | | | | | | | | | | |
| 30 | .20 | Puertas interiores de madera | | 300 | 23.17.11.11.11.00.00 | MaderaPuerta_Elemento | [m3] parámetro especial | Volume_(Marco+Puerta) | | |
| | | | | | | | | | | |
| Cielo raso suspendido | | | | | | | | | | |
| Cielo raso suspendido de gypsum | | | | | | | | | | |
| 70 | .20 | Cielo raso | | 200 | 23.15.19.17.11.11.00 | GypsumCieloRaso_Lamina | [m2] elemento | Area | | |
| | | | | | | | | | | |
| Acabados | | | | | | | | | | |
| Acabados para paredes | | | | | | | | | | |
| Recubrimiento y pintura para paredes | | | | | | | | | | |
| 10 | .70 | Acabado paredes interiores | | 300 | 23.15.15.25.11.00.00 | MorteroRepelloPared_Capa | [m2] elemento | Area | | |
| | | | | | 23.15.21.11.11.13.11 | PinturaExterior_Capa | [m2] elemento | Area | | |
| Acabados para pisos | | | | | | | | | | |
| Recubrimiento cerámico para pisos | | | | | | | | | | |
| 20 | .20 | Para pisos en general | | 300 | 23.13.15.13.15.11.00 | MorteroPegaPiso_Capa | [m2] elemento | Area | | |
| | | | | | 23.15.17.13.13.13.11 | CeramicaPisoGeneral_Azulejo | [m2] elemento | Area | | |
| | | Para pisos de baño | | 300 | 23.13.15.13.15.11.00 | MorteroPegaPiso_Capa | [m2] elemento | Area | | |
| | | | | | 23.15.17.13.13.13.13 | CeramicaPisoBano_Azulejo | [m2] elemento | Area | | |
| Acabados para cielo rasos | | | | | | | | | | |
| Recubrimiento y pintura para cielo raso | | | | | | | | | | |
| 50 | .10 | Acabados cielo rasos | | 300 | 23.15.15.25.13.00.00 | MasillaCieloRaso_Capa | [m2] elemento | Area | | |
| | | | | | 23.15.21.11.11.13.15 | PinturaCieloRaso_Capa | [m2] elemento | Area | | |

Definiendo esta información, especialmente las unidades del modelo a cuantificar, se puede pasar a la siguiente etapa. En ella se convertirán los factores de emisión para los materiales que se utilizarán en la fase de modelado.

4.1.7. Definición de factores de emisión para Modelos BIM

Teniendo en cuenta el alcance de la huella de carbono, los materiales a cuantificar y las unidades de cada uno, se definen los factores de emisión (con las unidades correctas) que se incorporaron en el modelo BIM del ejemplo. Para ello se utilizaron las densidades de materiales de construcción de Manresa (2014) y algunas fichas técnicas de productos para hacer la conversión de los factores de huella de carbono [kgCO_{2eq}/kg producto] a su respectiva unidad.

Se muestra a continuación la ecuación utilizada para la conversión y el Cuadro que resume los factores de emisión de cada material.

$$Factor\ Emisión = \left[\frac{kgCO_{2eq}}{kg_{producto}} \right] * \left[\frac{kg_{producto}}{unidad_{cuantificación}} \right] \quad [2]$$

Cuadro 22. Factores de emisión para materiales según su método de cuantificación

| Omniclass Tabla 23 | Nombre Material | Factor de emisión [kgCO _{2eq} /kg] | Factor de conversión | Factor CO _{2eq} en unidades de medición | Referencia |
|----------------------|---------------------------------------|---|----------------------|--|----------------|
| 23.11.13.11.17.13.00 | LastreCompactacion_Capa | 0.0052 | 2000.00 | 10.40 [kgCO _{2eq} / m3] | [1] |
| 23.13.31.11.17.00.00 | Concreto_Fc170(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 0.1364 | 2200.00 | 300.01 [kgCO _{2eq} / m3] | Dato común |
| 23.13.31.11.21.00.00 | Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 0.1476 | 2200.00 | 324.79 [kgCO _{2eq} / m3] | Dato común |
| 23.13.31.11.32.00.00 | Concreto_Fc325(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 0.1854 | 2200.00 | 407.84 [kgCO _{2eq} / m3] | Dato común |
| 23.11.15.13.15.00.00 | ConcretoPobre_Capa | 0.0760 | 2000.00 | 152.00 [kgCO _{2eq} / m3] | Dato común |
| 23.13.21.11.11.15.00 | Mamposteria_15(cm)_Bloques | 0.0680 | 172.50 | 11.73 [kgCO _{2eq} / m2] | [2] |
| 23.13.35.19.17.15.00 | ConcretoPretensado_Viguetas | 0.2799 | 2136.84 | 598.12 [kgCO _{2eq} / m3] | [3] |
| 23.13.41.11.17.13.00 | GypsumAlero_Lamina | 0.9190 | 2.75 | 2.75 [kgCO _{2eq} / m] | [4] |
| 23.15.19.17.11.11.00 | GypsumCieloRaso_Lamina | 0.9190 | 6.88 | 6.32 [kgCO _{2eq} / m2] | [4] |
| 23.15.15.25.11.00.00 | MorteroRepelloPared_Capa | 0.1820 | 22.80 | 4.15 [kgCO _{2eq} / m2] | 1.2 cm espesor |
| 23.15.15.25.13.00.00 | MasillaCieloRaso_Capa | 0.1300 | 2.28 | 0.30 [kgCO _{2eq} / m2] | 1.5 cm espesor |
| 23.13.15.13.15.11.00 | MorteroPegaPiso_Capa | 0.1820 | 7.60 | 1.38 [kgCO _{2eq} / m2] | 4 mm espesor |
| 23.13.15.13.15.13.00 | MorteroPegaParedes_Capa | 0.1820 | 9.50 | 1.73 [kgCO _{2eq} / m2] | 5 mm espesor |
| 23.13.35.23.11.17.00 | PoliestirenoEntrepiso_Bloques | 3.2900 | 25.00 | 82.25 [kgCO _{2eq} / m3] | Dato común |
| 23.13.31.21.11.11.00 | AceroRefuerzo_Fy4200(kg/cm2)_Varilla | 2.3010 | 1.00 | 2.30 [kgCO _{2eq} / kg] | Dato común |
| 23.13.35.19.13.19.00 | HierroNegro_Fy2350(kg/cm2)_Tubos | 1.3800 | 7860.00 | 10846.80 [kgCO _{2eq} / m3] | Dato común |
| 23.13.39.11.11.00.00 | ZincTecho_Lamina | 1.5400 | 4.40 | 6.78 [kgCO _{2eq} / m2] | [5] |
| 23.13.41.11.17.11.00 | ZincBotaguasTecho_Lamina | 1.5400 | 1.70 | 2.62 [kgCO _{2eq} / m] | 3.4 mm espesor |
| 23.13.41.33.01.00.00 | ZincCanoa_Extrusion | 1.5400 | 1.05 | 1.62 [kgCO _{2eq} / m] | 3.4 mm espesor |
| 23.17.13.13.00.00.00 | AluminioVentaneria_Marco | 11.1950 | 1.12 | 12.57 [kgCO _{2eq} / m] | [6] |
| 23.17.13.11.11.00.00 | VidrioVentaneria_6(mm)_Lamina | 1.2630 | 15.00 | 18.95 [kgCO _{2eq} / m2] | [1] |
| 23.17.11.11.17.00.00 | MaderaPuerta_Elemento | 0.3100 | 500.00 | 155.00 [kgCO _{2eq} / m3] | [1] |
| 23.15.17.13.13.13.11 | CeramicaPisoGeneral_Azulejo | 0.7000 | 15.00 | 10.50 [kgCO _{2eq} / m2] | [1] |
| 23.15.17.13.13.13.13 | CeramicaPisoBano_Azulejo | 0.7000 | 13.00 | 9.10 [kgCO _{2eq} / m2] | [1] |
| 23.15.21.11.11.13.11 | PinturaExterior_Capa | 2.9100 | 0.16 | 0.47 [kgCO _{2eq} / m2] | [1] |
| 23.15.21.11.11.13.13 | PinturaInterior_Capa | 2.9100 | 0.16 | 0.47 [kgCO _{2eq} / m2] | [1] |
| 23.15.21.11.11.13.15 | PinturaCieloRaso_Capa | 2.9100 | 0.16 | 0.47 [kgCO _{2eq} / m2] | [1] |

Fuente: [1] (Manresa, 2014) – [2] (Productos de Concreto, 2018) – [3] (Productos de Concreto, 2017) – [4] (Knauf, 2019) [5] (Macopa, 2019) – [6] (Extralum, 2020)

Con estas conversiones de unidades, se elaboró la base de datos que se incorporó a los modelos BIM. Para ello, se depuró el Cuadro 22 para dejar solamente la información útil y se añadieron los valores del nombre del parámetro utilizado en la cuantificación anteriormente definido en los cuadros de coordinación de estándares (ver Cuadro 19, Cuadro 20 y Cuadro 21). Se muestra a continuación la base de datos final.

Cuadro 23. Base de datos de factores de emisión de materiales a incorporar en modelos BIM

| CodigoOmniclass23 | NombreMaterial | FactorEmision | Unidad | MetodoDeMedicion |
|----------------------|---------------------------------------|---------------|---------------|-----------------------------|
| 23.11.13.11.17.13.00 | LastreCompactacion_Capa | 10.40 | [kgCO2eq /m3] | Volume |
| 23.13.31.11.17.00.00 | Concreto_Fc170(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 300.01 | [kgCO2eq /m3] | VolumenConcretoRelleno_(m3) |
| 23.13.31.11.21.00.00 | Concreto_Fc210(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 324.79 | [kgCO2eq /m3] | Volume |
| 23.13.31.11.32.00.00 | Concreto_Fc325(kg/cm2)_MoldeadoInSitu | 407.84 | [kgCO2eq /m3] | Volume |
| 23.11.15.13.15.00.00 | ConcretoPobre_Capa | 152.00 | [kgCO2eq /m3] | Volume |
| 23.13.21.11.11.15.00 | Mamposteria_15(cm)_Bloques | 11.73 | [kgCO2eq /m2] | Area |
| 23.13.35.19.17.15.00 | ConcretoPretensado_Viguetas | 598.12 | [kgCO2eq /m3] | Volume |
| 23.13.41.11.17.13.00 | GypsumAlero_Lamina | 2.75 | [kgCO2eq /m] | Length |
| 23.15.19.17.11.11.00 | GypsumCieloRaso_Lamina | 6.32 | [kgCO2eq /m2] | Area |
| 23.15.15.25.11.00.00 | MorteroRepelloPared_Capa | 4.15 | [kgCO2eq /m2] | Area |
| 23.15.15.25.13.00.00 | MasillaCieloRaso_Capa | 0.30 | [kgCO2eq /m2] | Area |
| 23.13.15.13.15.11.00 | MorteroPegaPiso_Capa | 1.38 | [kgCO2eq /m2] | Area |
| 23.13.15.13.15.13.00 | MorteroPegaParedes_Capa | 1.73 | [kgCO2eq /m2] | Area |
| 23.13.35.23.11.17.00 | PoliestirenoEntrepiso_Bloques | 82.25 | [kgCO2eq /m3] | Volume |
| 23.13.31.21.11.11.00 | AcereroFuerzo_Fy4200(kg/cm2)_Varilla | 2.30 | [kgCO2eq /kg] | MasaRefuerzoTotal_(kg) |
| 23.13.35.19.13.19.00 | HierroNegro_Fy2350(kg/cm2)_Tubos | 10846.80 | [kgCO2eq /m3] | Volume |
| 23.13.39.11.11.00.00 | ZincTecho_Lamina | 6.78 | [kgCO2eq /m2] | Area |
| 23.13.41.11.17.11.00 | ZincBotaguasTecho_Lamina | 2.62 | [kgCO2eq /m] | Length |
| 23.13.41.33.01.00.00 | ZincCanoa_Extrusion | 1.62 | [kgCO2eq /m] | Length |
| 23.17.13.13.00.00.00 | AluminioVentaneria_Marco | 12.57 | [kgCO2eq /m] | Perimeter |
| 23.17.13.11.11.00.00 | VidrioVentaneria_6(mm)_Lamina | 18.95 | [kgCO2eq /m2] | Area |
| 23.17.11.11.17.00.00 | MaderaPuerta_Elemento | 155.00 | [kgCO2eq /m3] | Volume |
| 23.15.17.13.13.13.11 | CeramicaPisoGeneral_Azulejo | 10.50 | [kgCO2eq /m2] | Area |
| 23.15.17.13.13.13.13 | CeramicaPisoBano_Azulejo | 9.10 | [kgCO2eq /m2] | Area |
| 23.15.21.11.11.13.11 | PinturaExterior_Capa | 0.47 | [kgCO2eq /m2] | Area |
| 23.15.21.11.11.13.13 | PinturaInterior_Capa | 0.47 | [kgCO2eq /m2] | Area |
| 23.15.21.11.11.13.15 | PinturaCieloRaso_Capa | 0.47 | [kgCO2eq /m2] | Area |

4.2. Modelo BIM de vivienda unifamiliar

Antes de empezar el modelado de la vivienda, se elaboró y configuró la base de datos de los materiales en Autodesk Revit®. Para ello se definió el nombre de los materiales mediante la nomenclatura anteriormente especificada. Además, se definió también el sistema de clasificación mediante la Tabla 23 de Omniclass. Toda esta información se encuentra en el proceso de coordinación de clasificaciones (ver Sección 4.1.6).

Por otro lado, a diferencia de lo que permite un proceso BIM (desarrollar planos de construcción a partir de los modelos), se modeló la vivienda con ayuda de planos de construcción finales. Con estos insumos y según recomendaciones del uso de la metodología BIM, se decidió segmentar el proyecto en dos modelos. La segmentación de modelos es una práctica recomendada ya que permite que varias disciplinas (arquitectura, estructural, sistemas electromecánicos, entre otros) trabajen de manera simultánea y colaborativa y sus modelos serán coordinados posteriormente para tener el modelo final (Chonkan L., 2016). Además, dividir modelos permite mejorar la trabajabilidad del software de modelado (por el poder de computación que se requiere para ejecutar modelos más complejos).

Por estas razones, se dividió el proyecto en un **Modelo BIM Estructural** (ver Figura 32) que agrupa todos los elementos que de alguna u otra manera soportan las cargas de la vivienda (obra gris), entre ellos las fundaciones, columnas, paredes estructurales, contrapiso, vigas, entrepiso y estructura soportante de techo.

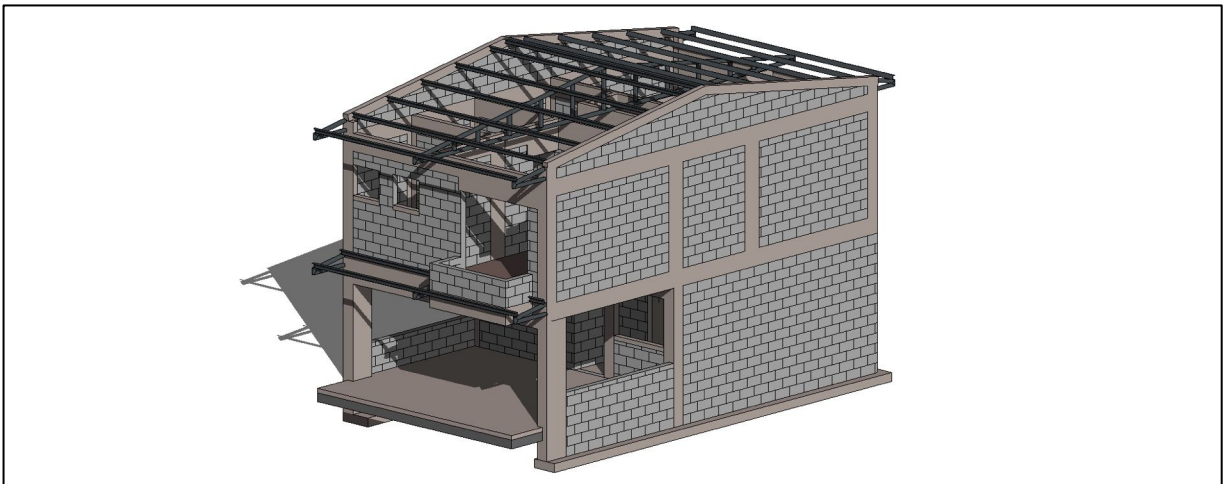


Figura 32. Vista general del Modelo BIM Estructural del proyecto seleccionado

En la Figura 33 se muestran los detalles de un corte del modelo, entre ellos la modelación de las viguetas prefabricadas del entrepiso, el detalle de las cerchas de techo y el detalle de la modelación de las fundaciones.

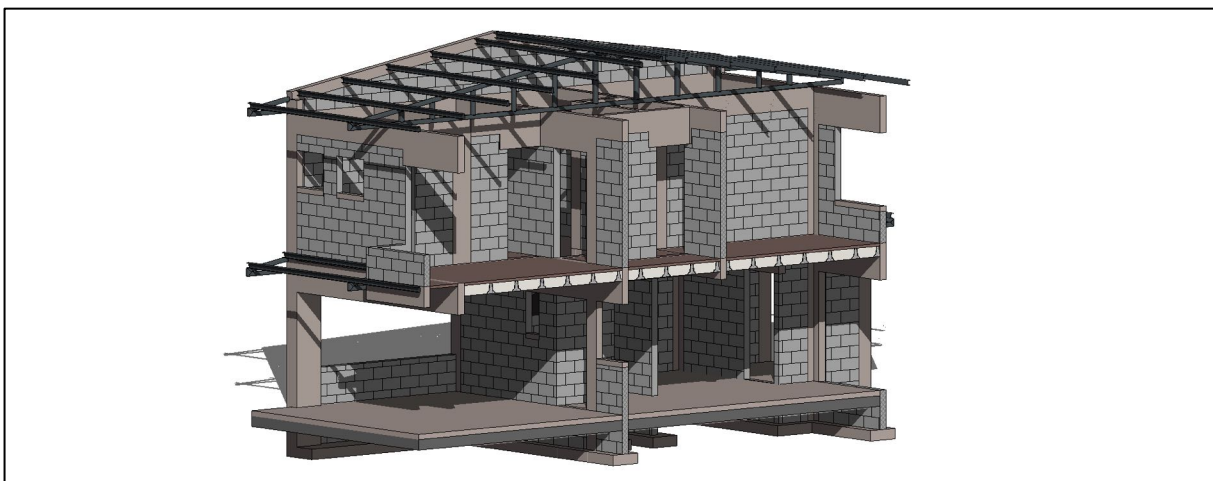


Figura 33. Vista en corte de detalles Modelo BIM Estructural del proyecto seleccionado

Por otro lado, el **Modelo BIM Arquitectónico** (ver Figura 34) incluye los acabados de piso y paredes (internas y externas), el cielo raso, la ventanería, las puertas y la cubierta de techo; todos elementos que se construyen una vez terminada la obra gris del proyecto.



Figura 34. Vista general del Modelo BIM Arquitectónico del proyecto seleccionado

En la Figura 35 se muestra un corte del modelo arquitectónico en donde se quiere mostrar que en realidad este es un cascarón: es decir, es vacío por dentro. El modelado se realizó de esta manera para que la cuantificación de los materiales fuese la correcta y también para que a la hora de crear el Modelo BIM Federado, los espacios empataran.

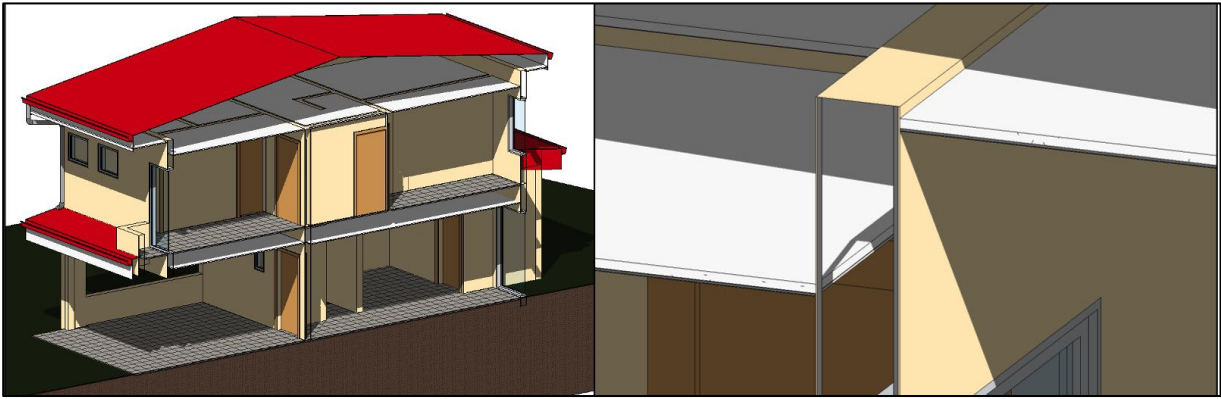


Figura 35. Vista en corte de detalles Modelo BIM Arquitectónico del proyecto seleccionado

Debido a que el modelado se realizó a partir de planos finales y que el autor elaboró ambos modelos, el proceso de coordinación y federación del modelo (revisión y detección de interferencias) fue simple. Sin embargo, es vital recalcar que para que los modelos BIM estimen precisamente las cantidades, se debe hacer una buena coordinación y detección de interferencias. El resultado final del **Modelo BIM Federado** se muestra en la Figura 36, que detalla un corte con los dos modelos interactuando entre sí.

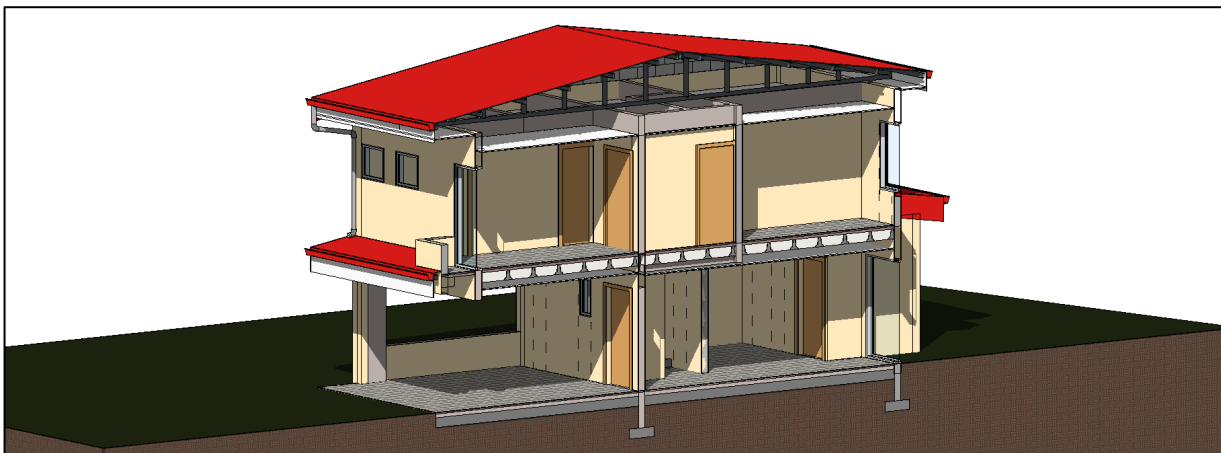


Figura 36. Vista en corte de Modelo BIM Federado del proyecto seleccionado

Aún después de esta coordinación, para cuantificar los materiales y su huella de carbono se trabajaron los modelos BIM en forma separa por la trabajabilidad del software. Se recalca sobre

el detallado de las capas que componen los elementos. Por ejemplo, las paredes se componen de: bloques de mampostería, mortero de repello, pasta para paredes y pintura, todos estos detalles se modelaron para poder obtener la unidad cuantificable de ellos. Otro ejemplo se puede ver en el entrepiso del modelo; en este caso se modelaron las viguetas pretensadas, los bloques de poliestireno de relleno, la losa de 5 cm de concreto por encima de las viguetas, el mortero de pega de la cerámica y por último la cerámica. Todos estos detalles se pueden observar en la Figura 37.

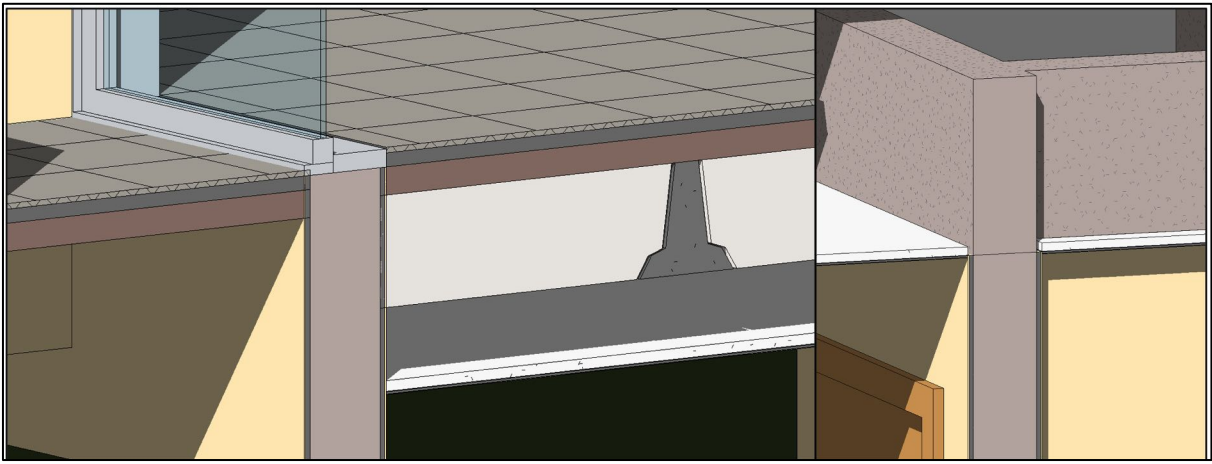


Figura 37. Detalles de modelación de las diferentes capas que componen los elementos

De la misma manera, para lograr dividir los resultados de la huella de carbono al momento del análisis, es necesario que cada elemento sea clasificado (ver sección 3.2.4).

En este ejemplo de aplicación, se decidió no modelar la armadura de los elementos de concreto reforzado. Esta decisión se tomó con base en que usualmente este nivel de detalle se utiliza solamente si uno de los objetivos de BIM es poder crear planos constructivos a partir de modelos BIM. Por ende y como los objetivos BIM de este TFG son diferentes, se decidió cuantificar la armadura total de la obra por un parámetro especial llamado *MasaRefuerzoTotal_(kg)*.

Este parámetro a su vez es la suma de: *MasaRefuerzo#2_(kg)*, *MasaRefuerzo#3_(kg)*, *MasaRefuerzo#4_(kg)* y *MasaRefuerzo#5_(kg)*, según las especificaciones constructivas de cada elemento. A medida que se iban modelando los elementos de concreto reforzado y las paredes de mampostería, se usaron los planos constructivos para cuantificar e incluir esta información. Se hizo lo mismo con el volumen de concreto de relleno, para ello se alimentó un

parámetro personalizado llamado *VolumenConcretoRelleno_(m3)*. Además, se definió el parámetro *MaterialRefuerzo* que permite establecer el parámetro del material de refuerzo (en este caso *AceroRefuerzo_Fy4200(kg/cm2)_Varilla* según lo establecido en el Cuadro 22). Para el concreto de relleno se definió el parámetro *MaterialConcretoRelleno* que permitió establecer su materialidad.

Posterior al modelado del proyecto, se siguió con la etapa del cálculo automatizado de la huella de carbono de los elementos. En este proceso se utilizó toda la información que se incluyó en durante la fase de modelado y su resultado es un modelo BIM con información precisa de la huella de carbono de cada elemento.

4.2.1. Cálculo de huella de carbono de elementos BIM

Después incluir toda la información preliminar en los modelos, se pudo calcular la huella de carbono para cada elemento mediante Autodesk® Dynamo®. Para ello, primero se hicieron algunos cálculos preliminares que permitieron obtener correctamente las unidades de medición que se iban a multiplicar con los factores de emisión de cada material. Por ejemplo, para *Ventanas* dado que por defecto no existen los parámetros *Área* y *Perímetro* valores utilizados para calcular la huella de carbono de las ventanas, se decidió crear un algoritmo que los determinara automáticamente para posteriores cálculos (ver Figura 38). Asimismo, en los elementos *Escaleras* no existe el parámetro de volumen por lo que se decidió estimarlo automáticamente (Figura 39). De la misma manera, para los elementos *Puertas* se determinó su volumen automáticamente mediante el algoritmo de la Figura 40.

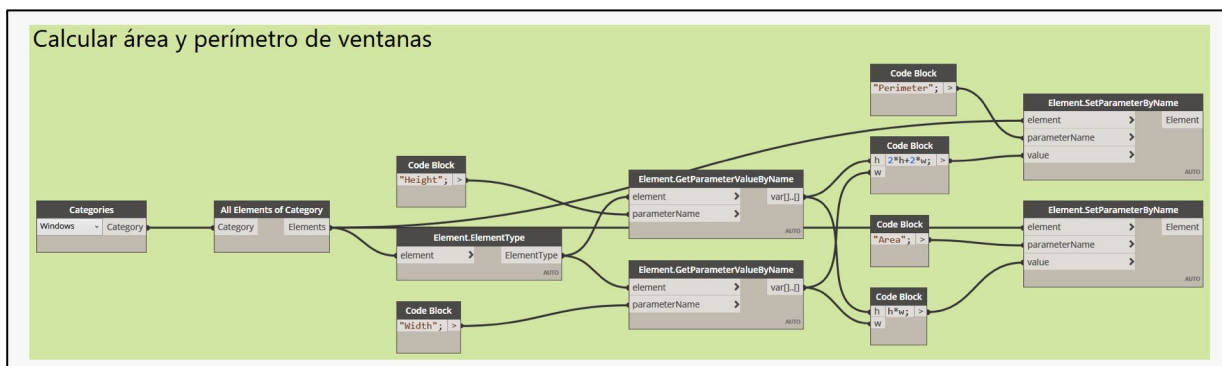


Figura 38. Algoritmo para estimar los parámetros de Ventanas utilizados en cálculos posteriores

Calcular volumen de escaleras

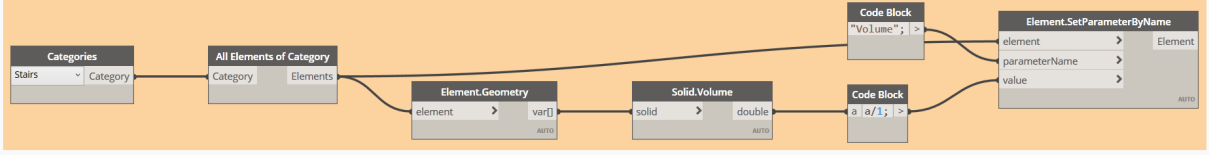


Figura 39. Algoritmo para estimar los parámetros de Escaleras utilizados en cálculos posteriores

Cálculo volumen puertas

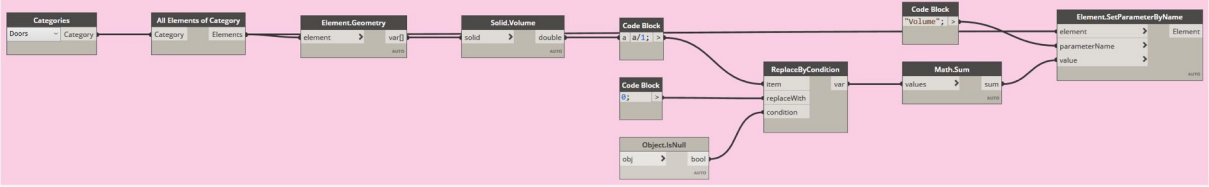


Figura 40. Algoritmo para estimar los parámetros de Puertas utilizados en cálculos posteriores

Luego de que se tienen todos los parámetros necesarios completados, se utilizó el algoritmo anteriormente explicado (ver Figura 27) para hacer el cálculo de la huella de carbono de los elementos. Cabe destacar cuando se utilizan parámetros especiales como *MasaRefuerzoTotal_(kg)* o *VolumenConcretoRelleno_(m3)*, es necesario realizar una segunda iteración del cálculo de huella de carbono ya que estos parámetros no son compatibles con el algoritmo principal. Para parámetros especiales, el algoritmo que se utilizó es el siguiente (ver anexo B.3. para más detalles).

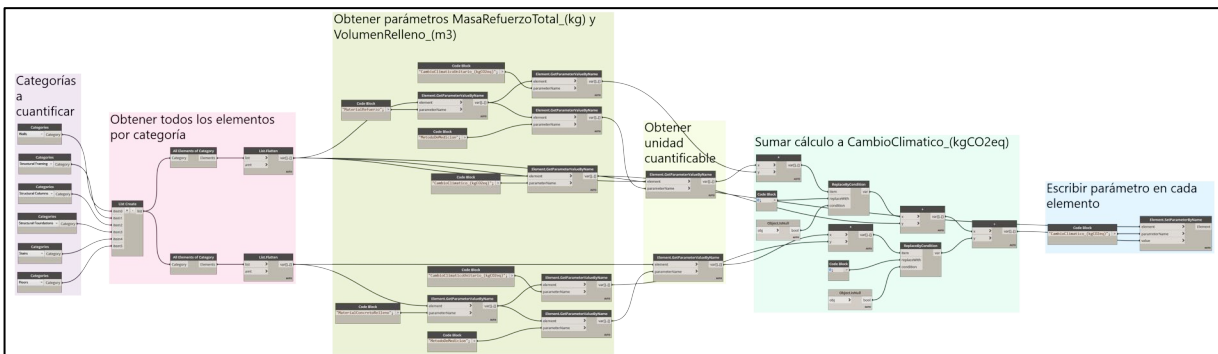


Figura 41. Algoritmo para el cálculo de huella de carbono utilizando parámetros especiales

La necesidad de usar este algoritmo se puede remediar de dos maneras: si se modelan los elementos que contienen estos materiales o si se utilizan factores de emisión que incorporen estos materiales dentro de su cálculo, como por ejemplo concreto reforzado con densidad de 100 kg de acero por m³ de concreto.

Se enfatiza en que el resultado de este cálculo es solamente por las fases de fabricación de materiales (A1-A3 según EN 15978:2011). Sin embargo, los algoritmos explicados permiten incluir la huella de carbono de las fases A4 y A5 (proceso de construcción) mediante la inclusión de parámetros especiales que especifiquen los factores de emisión unitarios por el uso de maquinaria o por la mano de obra. Por ejemplo, si se tuviesen factores de emisión por Hora-Hombre y se asociase el rendimiento de los obreros a los elementos del modelo se puede hacer el cálculo.

Al finalizar este proceso, se obtiene un modelo BIM rico en datos de CO_{2eq}. El beneficio de tener la información contenida en cada elemento es que cuando se trabaja colaborativamente mediante formatos de interoperabilidad (ej. IFC), los modelos exportados en este formato pueden incluir esta información. Esto es útil para que las partes interesadas puedan hacer uso de esta información para cualquier proceso de análisis o certificaciones de sostenibilidad. Se muestra a continuación el Modelo BIM Federado exportado en IFC con toda la información dentro de sus elementos (se resalta en verde la viga seleccionada y el cuadro rojo indica el parámetro CO_{2eq}).

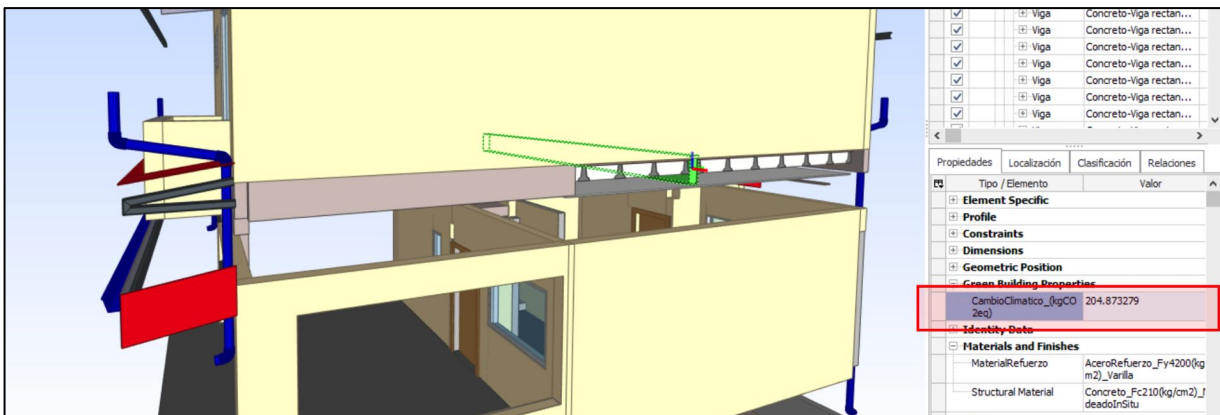


Figura 42. Modelo BIM Federado IFC con información de CO_{2eq}

4.3. Análisis de resultados

Luego de terminar el cálculo para cada elemento, se pueden exportar los datos del modelo BIM. Para este fin se usó el algoritmo de la Figura 28, el cuál exporta automáticamente los datos en formato de *Tidy Data*. Después de exportar la información, fue necesario realizar una pequeña limpieza de la base de datos para que esta permitiera dividir los datos según el nivel de Unifomat y según el tipo de material. Para la limpieza se utilizó Microsoft Excel® según se explicó en la Sección 3.2.7.

Dividir la información de esa manera es útil para analizar la información según la clasificación de elementos, los materiales o por medio de una *Curva S*. Para analizar los datos de esa última manera, se realizó una **Estructura de División de Trabajo** (EDT) desglosada según la clasificación Unifomat con el objetivo de enlazar la información que se obtuvo del modelo con el cronograma de obra.

En la Figura 43 se muestra el cronograma de la obra el cual incluye desde la limpieza del terreno (G – Sitio, según Unifomat) hasta acabados (C – Interiores). Aunque no se modeló ni se tienen datos de huella de carbono de la parte electromecánica (D – Servicios) ni de la parte de servicios generales (Z – General), igual se incluyó en el cronograma para poder tener un plazo de la obra certero. Se muestra a continuación el cronograma de la obra, el cual tiene un plazo estimado de 6 meses y 2 días.

En términos generales, la huella de carbono para este proyecto obtenida por esta metodología es de **30 107 kgCO_{2eq}**, si se convierte según la unidad funcional anteriormente establecida, las emisiones del proyecto son de **4.97 kgCO_{2eq}/m²/año**. Estos resultados son muy similares a los datos de Mora Marín (2017) cuyo caso base también fue de una vivienda en condominio con distribución similar, área de construcción de 101 m² y unidad funcional igual. En este caso el autor reportó 4.49 kgCO_{2eq}/m²/año.

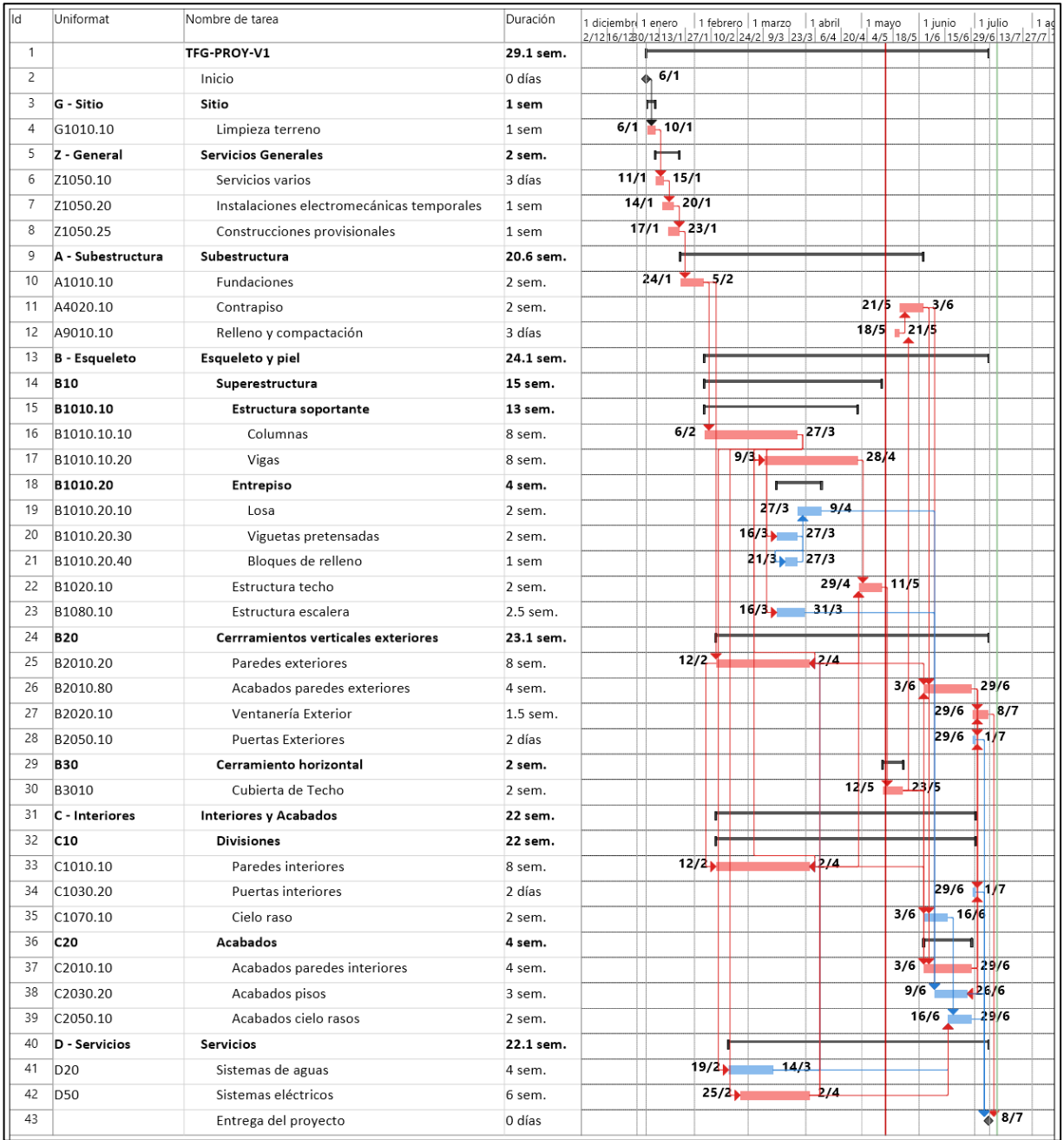


Figura 43. Cronograma de obra para vivienda

En el Cuadro 24 y Figura 44 se muestran los datos clasificados según el material de construcción.

Cuadro 24. Resumen de emisiones de carbono por tipo de material

| Materiales | Emisiones [kgCO₂eq] | Emisiones [%] |
|--|---------------------------------------|----------------------|
| Acero de refuerzo | 7536.43 | 25.0% |
| Aluminio para marcos de ventanas | 535.57 | 1.8% |
| Cerámica general | 1208.59 | 4.0% |
| Concreto de relleno f'c=170 kg/cm2 | 1639.24 | 5.4% |
| Concreto moldeado en sitio f'c=210 kg/cm2 | 9480.24 | 31.5% |
| Concreto moldeado en sitio f'c=325 kg/cm2 | 1040.88 | 3.5% |
| Concreto pretensado para viguetas | 930.49 | 3.1% |
| Gypsum para cielos rasos | 820.49 | 2.7% |
| Tubos estructurales de Hierro Negro | 1033.65 | 3.4% |
| Lastre de Compactación | 140.28 | 0.5% |
| Madera para marco y puertas | 146.36 | 0.5% |
| Bloques de Mampostería de 15 cm | 2403.20 | 8.0% |
| Pasta para cielo raso | 35.67 | 0.1% |
| Mortero de pega para piso | 160.03 | 0.5% |
| Repello de pared | 1071.00 | 3.6% |
| Pintura general | 260.39 | 0.9% |
| Bloques de poliestireno para entrepiso | 653.37 | 2.2% |
| Vidrio de ventanas | 314.49 | 1.0% |
| Canoa de Zinc | 35.19 | 0.1% |
| Zinc para techo | 661.85 | 2.2% |
| Total de emisiones [kgCO₂eq] | 30107.40 | 100.0% |

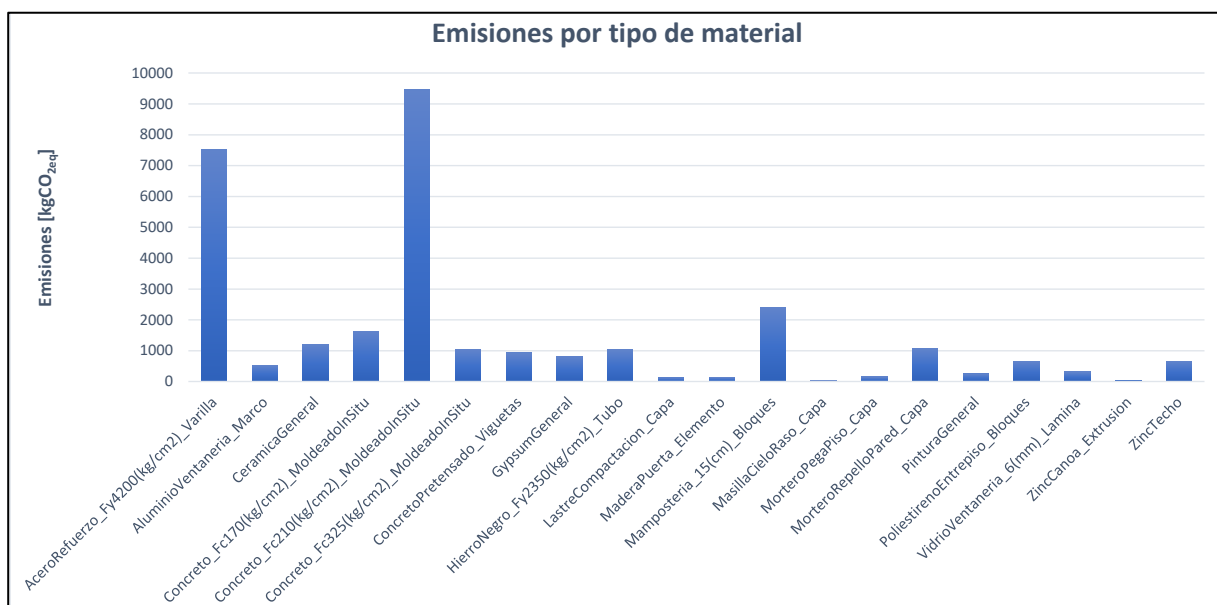


Figura 44. Emisiones de carbono equivalente por tipo de material

Si se analizan estos datos, se puede observar que en general el concreto (agrupando todas las resistencias) es el mayor emisor de carbono del proyecto, en segundo lugar, se observa el

acero de refuerzo (que también es parte del concreto reforzado) y en tercer lugar la mampostería. Esto es un buen indicador que permite a los diseñadores saber cuáles son las alternativas a materiales que se deben valorar primero para reducir la huella de carbono. Estas y otras recomendaciones se exponen en el Capítulo 5.

El Cuadro 25 resume las emisiones de carbono equivalente según el tipo de elemento en este caso por la clasificación Unifomat (en negrita los niveles que agrupan a los tipos debajo de ellos).

Cuadro 25. Resumen de emisiones de carbono por tipo de elemento funcional

| Elementos funcionales | Emisiones [kgCO₂eq] | Emisiones [%] |
|---|---------------------------------------|----------------------|
| A - Subestructura | 5207.85 | 17.3% |
| A1010.10 Fundaciones | 2876.92 | 9.6% |
| A4020.10 Contrapiso | 2190.65 | 7.3% |
| A9010.10 Relleno y compactación | 140.28 | 0.5% |
| B - Esqueleto y piel | 20531.07 | 68.2% |
| B10 - Superestructura | 14114.22 | 46.9% |
| B1010 - Estructura soportante | 12466.41 | 41.4% |
| B1010.10 Columnas | 9087.00 | 30.2% |
| B1010.20 Vigas | 3379.41 | 11.2% |
| B1020 - Entrepiso | 1033.65 | 3.4% |
| B1080 - Escalera | 614.16 | 2.0% |
| B20 - Cerramientos Verticales Exteriores | 5719.81 | 19.0% |
| B2010.20 Paredes Exteriores | 3901.01 | 13.0% |
| B2010.80 Acabados paredes exteriores | 951.40 | 3.2% |
| B2020.10 Ventanas | 850.05 | 2.8% |
| B2050.10 Puertas exteriores | 17.35 | 0.1% |
| B30 - Cerramiento horizontal | 697.04 | 2.3% |
| C - Interiores y Acabados | 4368.48 | 14.5% |
| C10 - Divisiones interiores | 2593.27 | 8.6% |
| C1010.10 Paredes interiores | 1634.70 | 5.4% |
| C1030.20 Puertas interiores | 129.00 | 0.4% |
| C1070.10 Cielo raso | 829.57 | 2.8% |
| C20 - Acabados | 1775.20 | 5.9% |
| C2010.70 Acabados paredes interiores | 323.07 | 1.1% |
| C2030.20 Acabados pisos | 1368.63 | 4.5% |
| C2050.10 Acabados cielo raso | 83.50 | 0.3% |
| Total de emisiones [kgCO₂eq] | 30107.40 | 100.0% |

En los datos obtenidos de esta división se puede observar que claramente la estructura soportante (B-1010, según Unifomat) es la que se lleva casi el 42% del total de la huella de carbono de este proyecto; en segundo lugar, se encuentran las paredes exteriores e interiores (en este proyecto hechos por bloques de mampostería) y en tercer lugar se tiene las fundaciones de la obra. Estos resultados se pueden corroborar comparando el peso que tiene el concreto y el acero de refuerzo (~ 57%) en el total de las emisiones. Ahora se observa el

gráfico resumen de las emisiones por tipo de elemento funcional, en verde se muestran los elementos asociados a la subestructura, en azul la superestructura y en naranja los acabados e interiores.

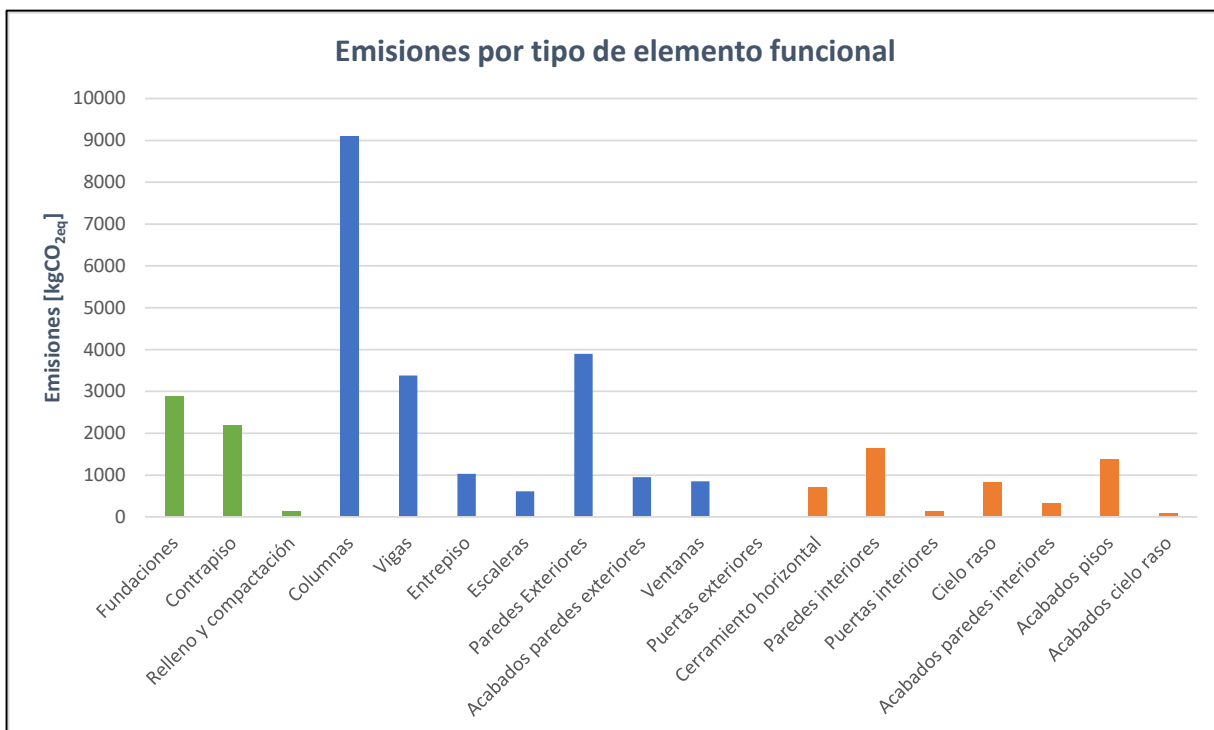


Figura 45. Emisiones de carbono equivalente por tipo de elemento funcional

Ahora se presentan y analizan los resultados al enlazar las emisiones de carbono de los elementos funcionales con su cronograma. Cabe destacar que solamente se realizó una validación del uso de BIM para lograrlo; sin embargo, como el alcance de la huella de carbono deja de lado el proceso constructivo (A4-A5) entonces no hay mayor utilidad en este caso. No obstante, si decide incluir esto dentro del LCA, a partir de esta curva base, se pueden hacer mediciones periódicas a medida que se construye la obra para ir analizando cómo se van emitiendo GEI a la atmósfera (curva roja en Figura 30). Estas mediciones pueden ser utilizadas para establecer medidas de contención de emisiones a medida que se va construyendo el proyecto, entre ellas, variar la materialidad de los elementos que se construirán o compararán en etapas posteriores o añadir la plantación de árboles dentro del alcance del proyecto.

Se muestra a continuación la *Curva de avance* generada con el software Microsoft Excel®.

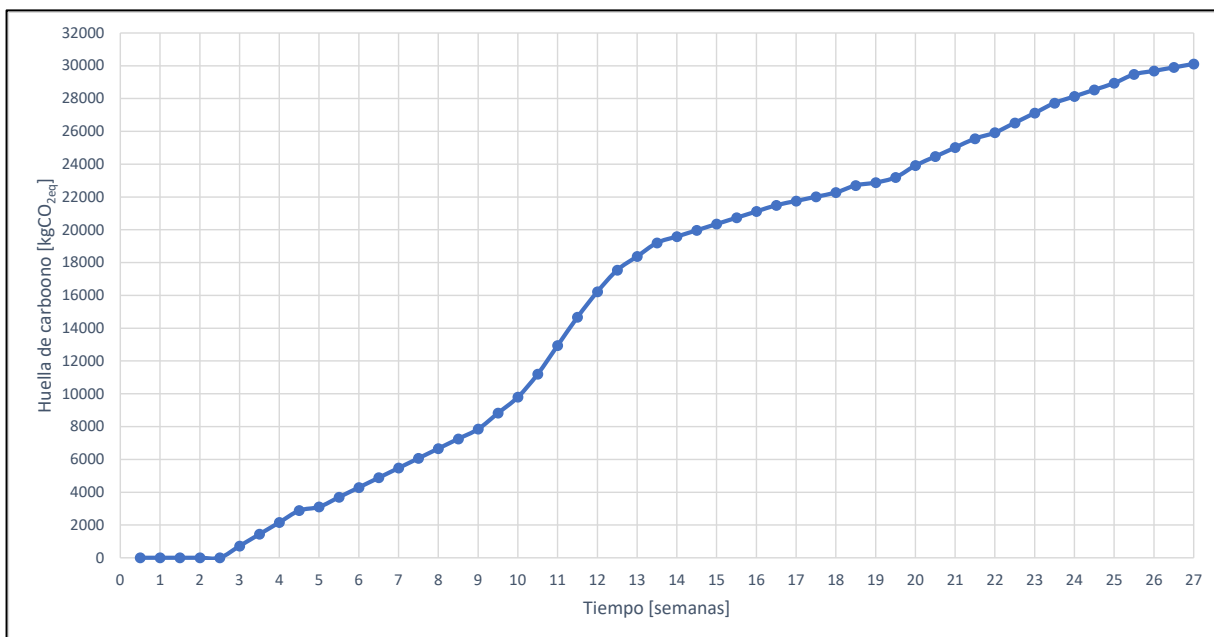


Figura 46. Curva S modificada de emisiones para el proyecto

Capítulo 5. Conclusiones y futuras investigaciones

5.1. Conclusiones

La presente investigación se ha dedicado en proponer una metodología para incorporar la información relacionada con la huella de carbono en modelos BIM con el objetivo de facilitar su cálculo. Para ello, a partir de estándares internacionales, se han desarrollado herramientas que permiten generalizar su uso aun cuando los lectores no utilicen los mismos sistemas de clasificación, niveles de desarrollo o factores de emisión. Esta metodología fue probada y depurada mediante el modelado de una vivienda unifamiliar típica de 101 m² y todo el flujo de trabajo ha sido explicado en el presente documento.

En primer lugar, se puede concluir sobre la importancia de generar más información relacionada a los factores de emisión de materiales de construcción para Costa Rica. Por medio del análisis de las distintas bases de datos, se observaron considerables diferencias entre la información nacional e internacional, principalmente en el concreto y acero. Se recomienda a los productores de materiales que desarrollen Declaraciones Ambientales del Producto de forma voluntaria, pero en apego a la ética que debe privar en todas las actividades humana. El alcance de estas declaraciones deber basarse en un análisis de *cuna a puerta* para que la información sea útil en proceso de cálculo de huella de carbono para proyectos de construcción.

De la misma manera se recomienda a los productores incluir información sobre el peso, volumen, rendimiento y otros, dentro de la ficha técnica de los productos. Esta información permite hacer las conversiones necesarias para tener factores de emisión acordes con las unidades del modelo. Además, los productores que ya desarrollaron o están desarrollando sus objetos BIM, pueden hacer uso de esta metodología para incorporar estos datos dentro de los parámetros de los objetos. Con ello se podría extraer la información referente a la huella de carbono también para estos objetos.

Por otro lado, se concluye que la utilización de BIM para el cálculo de la huella de carbono de los proyectos de construcción es útil ya que permite automatizar los procesos y tener resultados casi en tiempo real. El manual desarrollado en este TFG permite a los lectores utilizar datos ya existentes en los modelos BIM para analizar la huella de carbono de sus diseños.

Asimismo, referenciándose en la norma ISO 19650, se determina que los procesos de cálculo de huella de carbono mediante BIM deben iniciar con la concepción del proyecto. Adaptando lo estipulado en esta norma, se concluye que los requerimientos de información del propietario deben incluir la necesidad y el alcance del cálculo de huella de carbono que se quiera desarrollar a partir de modelos BIM. Con estas delimitaciones, se pueden buscar factores de materiales que empaten con alcance y con la unidad de medición de los modelos.

Se concluye que el Nivel de Desarrollo de los elementos es un factor determinante que delimita las unidades de medición y por ende los factores de emisión necesarios. Se destaca que utilizar modelos para realizar este cálculo no será el objetivo central de utilizar BIM; por ello se recomienda trabajar con los Niveles de Desarrollo definidos en los otros Usos BIM y ajustar los factores de emisión para que estos se acoplen a la información (unidad de medida, materiales modelados, entre otros) que pueda obtenerse del modelo BIM. Se recomienda utilizar un LOD 350 para las paredes y un LOD 300 en los demás elementos, esto permite un cálculo acertado.

Además, se concluye que utilizar estándares de clasificación, tanto para elementos (Unifomat) como para materiales (tabla 23 de Omniclass), es vital si se quiere utilizar BIM para estos procesos. Estos permiten automatizar cálculos y analizar resultados como se hizo en el presente TFG. Por ello, el cuadro de coordinación de clasificaciones desarrollado en esta investigación es la pieza fundamental de la conexión entre distintos datos. Este cuadro se puede acoplar diferentes estándares de clasificación, según las necesidades de los lectores.

El ejemplo de aplicación en una vivienda unifamiliar permitió establecer y depurar el flujo de trabajo planteado. En los resultados se observó que esta vivienda tiene una huella de carbono de 30.11 TonCO_{2eq}, si se convierte según la unidad funcional anteriormente establecida, las emisiones del proyecto son de 4.97 kgCO_{2eq}/m²/año. Otra conclusión importante es que cerca del 60% de estas emisiones se deben al uso de mampostería confinada como sistema constructivo. Por esta razón, se recomienda explorar sistemas constructivos diferentes, sin importar el arraigo cultural que exista.

Para reducir las emisiones del concreto se puede explorar el uso de cemento con bajas emisiones de carbono y el uso de agregados reciclados (Mora Marín, 2017). Por otro lado, se puede valorar disminuir el uso de repello en las paredes si se opta por una estética más industrial aplicando solamente un sellador a las paredes de mampostería (Mora Marín, 2017).

Siguiendo con la estética industrial, es recomendable optar por pisos de concreto expuesto cubriéndolos con una capa de sellador en vez de utilizar cerámica (Mora Marín, 2017).

En términos generales se recomienda hacer un dimensionamiento y detallado estructural más preciso que permita disminuir el tamaño de los elementos y a su vez su peso (Mora Marín, 2017). Para la estructura soportante (B1010, según Uniformat) se puede explorar el uso de madera estructural para reducir el impacto que tiene el confinamiento de concreto reforzado (Mora Marín, 2017). Por otro lado, para reducir las emisiones debidas a las paredes (C1010 y B2010, según Uniformat) y a su vez el peso de la estructura, se puede valorar el uso de paredes livianas con marcos estructurales de aluminio o madera (Mora Marín, 2017). Por último, también se recomienda explorar el uso de marcos madera para las ventanas y el uso de estructuras de acero para escaleras y balcones.

5.2. Futuras investigaciones

A partir de la metodología planteada y su validación con el ejemplo de aplicación, las futuras investigaciones que se pueden desarrollar se enumeran a continuación:

- Se recomienda generar una línea de proyectos de investigación que vayan paulatinamente construyendo una base de datos de factores de emisión para los productos y materiales de construcción del mercado costarricense. Esta base de datos debe incluir distintos factores de conversión para que la información sea útil en cálculos automatizados.
- Se recomienda investigar sobre la variación del cálculo de la huella de carbono para distintos niveles de desarrollo de los elementos BIM. Para ello, se pueden modelar algunos elementos típicos con los distintos niveles de desarrollo y analizar cuáles son las diferencias en el cálculo y cómo deberían agruparse los factores de emisión según su nivel de desarrollo.
- Se recomienda utilizar la metodología en un proyecto de mayor tamaño que permita validarla y depurarla como parte del principio de mejora continua.
- Se recomienda utilizar el mismo ejemplo de aplicación para incorporar los sistemas electromecánicos dentro del alcance de la huella de carbono. Este proceso permitirá verificar su uso en este tipo de elementos.

- Se recomienda extender el alcance de la huella de carbono de proyectos futuros para incorporar procesos constructivos dentro del cálculo de huella de carbono con modelos BIM. Esta información será muy útil para implementar la curva S modificada que se planteó en el presente TFG.
- Se recomienda desarrollar un proyecto de investigación que utilice BIM desde las primeras etapas de diseño, con el objetivo de que esta metodología se use para iterar y comparar distintas propuestas de diseño. Por ejemplo, comparar la huella de carbono de una edificación con un sistema de marcos estructurales de concreto vs la misma geometría con una estructura de acero.
- Se recomienda desarrollar una investigación basada en otros softwares de modelado como Archicad® o Vector Works® que utilice el mismo principio de conectar la información a través de los estándares de clasificación para incorporar datos de huella de carbono mediante otras herramientas BIM. Es vital que las casas matrices traspasen licencias estudiantiles a la academia para el desarrollo de estas investigaciones.

Referencias bibliográficas

- ACG of America. (2019). *LEVEL OF DEVELOPMENT (LOD) SPECIFICATION PART I & COMMENTARY FOR BIM*. Estados Unidos: BIM Forum.
- Alpizar, F., Madrigal, R., & Salas, A. (2018). *Retos Ambientales de Costa Rica*. San José: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Autodesk. (2010). *Manual de usuario: Revit Architecture 2011*. Autodesk, Inc.
- Autodesk. (2019, Mayo 5). *¿Qué es BIM?* Retrieved from Autodesk Web Site: <https://www.autodesk.com/solutions/bim>
- Avendaño, M. (2017, Noviembre). *La utopía de una Costa Rica carbono neutral en 2021*. Retrieved from El Financiero CR: Economía y Política: <https://www.elfinancierocr.com/economia-y-politica/la-utopia-de-una-costa-rica-carbono-neutral-en/IYM5MH2PNZCP7BOHSZ5NV7CAQM/story/>
- Badilla Arroyo, P., Elizondo Santiago, J. A., Fernandez Martinez, T., Mendez Trejos, J., Mora Solano, F., & Quesada Yamasaki, M. (2015). *Cálculo de huella de carbono para materiales de construcción en Costa Rica*. San Pedro de Montes de Oca: Universidad de Costa Rica.
- Benavides Ballesteros, H., & León Aristizabal, G. (2007). *INFORMACIÓN TÉCNICA SOBRE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO*. Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- BIM Forum Costa Rica. (2018). *Guía de Implementación BIM para las empresas*. San José: Cámara Costarricense de la Construcción.
- British Standards Institution. (2011). *Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*. Londres: BSI.
- Cámara Costarricense de la Construcción. (2018). *Análisis del Sector Construcción y la Economía*. San José: Cámara Costarricense de la Construcción.

- Cámara Costarricense de la Construcción. (2020). *Informe Económico del Sector Construcción: Febrero 2020*. San José: Dirección de Investigación y Desarrollo Técnico.
- Caro Flórez, J. (2019). *Cálculo de la huella de carbono emitida en Costa Rica al construir una casa típica de clase media en condominio horizontal en el Gran Área Metropolitana (ver plano en anexo 1)*. San Pedro de Montes de Oca: Universidad de Costa Rica.
- Castro Alpízar, J. (2012). *Huella de carbono para la construcción de una nueva delegación policial, en León XIII*. San José: Escuela de Ingeniería Civil: Universidad de Costa Rica.
- CEN. (2011). *ustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method*. Brussels: European Committee for Standardization.
- Chacón, A., Jiménez, G., Montenegro, J., Sasa, J., & Blanco, K. (2012). *Inventario nacional de gases de efecto invernadero y absorción de carbono*. San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional. Retrieved from PROGRAMA DE CAMBIO CLIMATICO: <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/cambio-climatico/inventario-de-gases-de-efecto-invernadero/>
- Chonkan L., L. (2016). *Modelado de Información de Edificios como Herramienta en la Programación de Obra y Mejoramiento de la Constructibilidad*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Ciacchi, L., Eckelman, M., Passarini, F., Chen, W.-Q., Vassura, I., & Morselli, L. (2014). Historical evolution of greenhouse gas emissions from aluminum production at a country level. *Journal of Cleaner Production*, 84, 540-549.
- Cioruta, B., Luran, A., & Coman, M. (2018). From Human-Environment Interaction to Environmental Informatics (II): the Sustainability evolution as requirement of Knowledge-based Society. *Hidraulica Magazine*, 1(2), 33-42.
- Construction Specifications Institute. (2019). *About Us: CSI*. Retrieved from CSI web page: <https://www.csiresources.org/institute/csi-history>

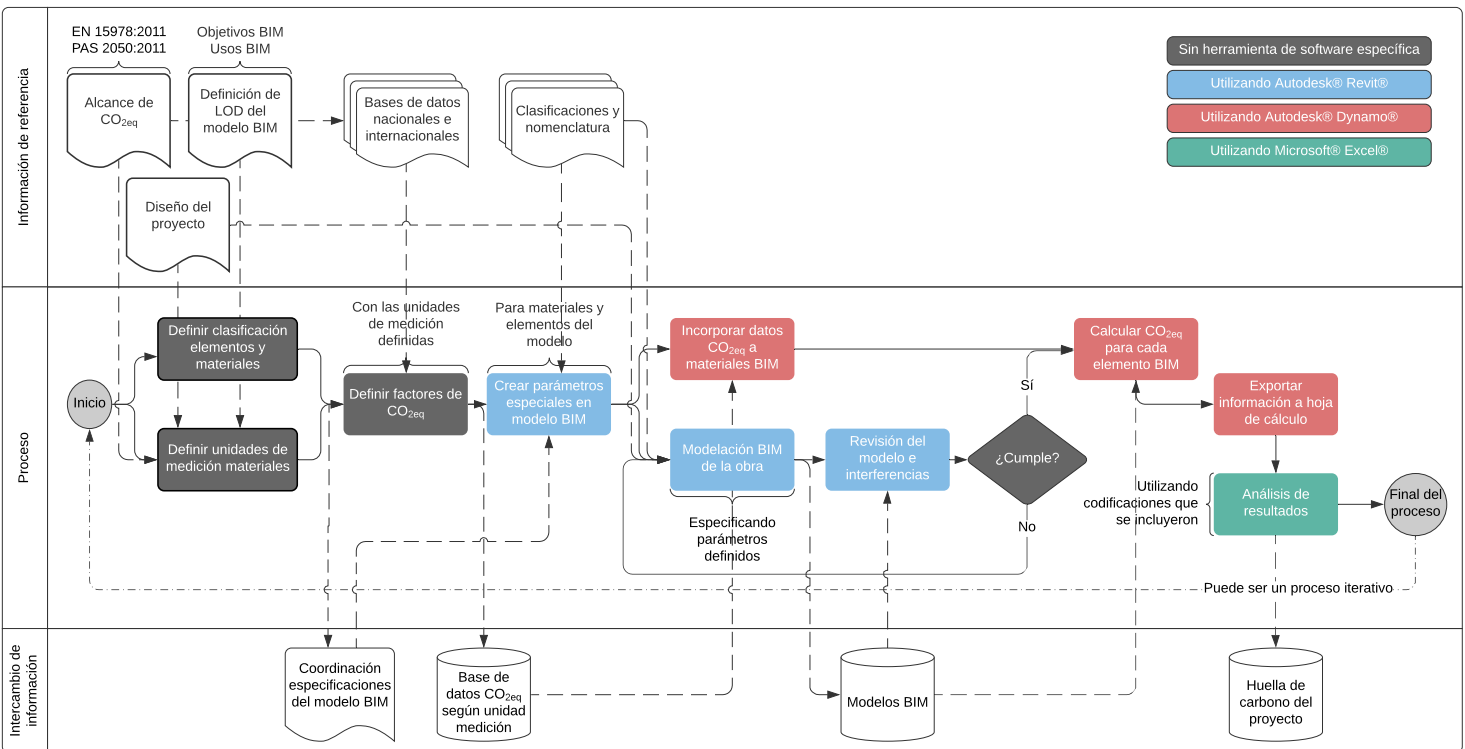
- Department for Business Innovation & Skills. (2010). *ESTIMATING THE AMOUNT OF CO2 EMISSIONS THAT THE CONSTRUCTION INDUSTRY CAN INFLUENCE*. Department for Business Innovation & Skills.
- Department for Business, Energy & Industrial Strategy. (2018). *UK ENERGY IN BRIEF 2018*. London: Government of United Kingdom.
- Department of Energy and Climate Change. (2019). *Government emission conversion factors for greenhouse gas company reporting*. Retrieved from Government of United Kingdom: <https://www.gov.uk/government/collections/government-conversion-factors-for-company-reporting>
- EDITECA. (5 de Mayo de 2019). *Dimensiones BIM: El alcance del programa*. Obtenido de EDITECA Web Site: <https://editeca.com/dimensiones-bim-alcance-del-programa/>
- Energy-Efficient Building European Initiative. (2011). *EeBGuide Guidance Document: Buildings*. Retrieved from https://www.eebguide.eu/eeblog/?page_id=704
- Extralum. (2020). *Catálogo de Extrusión*. San José: Extralum Costa Rica.
- Gobierno de Costa Rica. (2017, Setiembre 28). *País afina su camino a la carbono neutralidad con nuevo Programa País*. Retrieved from Presidencia de Costa Rica sitio web: <https://presidencia.go.cr/comunicados/2017/09/pais-afina-su-camino-a-la-carbono-neutralidad-con-nuevo-programa-pais/>
- Gonzalez Perez, C. (2015). *Building Information Modeling: Metodología, aplicaciones y ventajas*. Valencia: Escuela Técnica Superior de Ingeniería en Edificación.
- Grupo ICE. (2015). *Costa Rica: Matriz eléctrica - Un modelo sostenible, único en el mundo*. San José.
- Hammond, G., & Jones, C. (2011). *Inventory of Carbon and Energy: Version 2.0*. Bath: Sustainable Energy Research Team (SERT): Department of Mechanical Engineering: University of Bath.

- Instituto Meteorológico Nacional. (2019). *Factores de emisión de gases de efecto invernadero: Novena edición*. San José: IMN.
- INTECO. (2016). *Declaración de verificación: HUELLA DE CARBONO DE CEMENTO HOLCIM*. San José: INTECO.
- INTECO. (2016, Mayo). *INTE B5:2016*. Retrieved from Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica: <https://www.inteco.org/shop/product/inte-b5-norma-para-demostrar-la-carbono-neutralidad-requisitos-163>
- International Organization for Standardization. (2006). *Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia: ISO 14040:2006*. Estados Unidos: ISO.
- International Organization for Standardization. (2006). *Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Requisitos y directrices: ISO 14044:2006*. Estados Unidos: ISO.
- International Organization for Standardization. (2013). *Gases de efecto invernadero — Huella de carbono de productos — Requisitos y directrices para cuantificación: ISO 14067:2013*. Estados Unidos: ISO.
- International Organization for Standardization. (2018). *ISO 19650-2:2018: Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 2: Delivery phase of the assets*.
- ITeC. (2018). *Estándar de creación de objetos BIM*. Barcelona: Instituto de Tecnología de la Construcción de Catalunya.
- Knauf. (2019). *Ficha Técnica: Placa de Yeso Knauf*. Bogotá: Knauf de Colombia.
- Kreider, R., & Messner, J. (2013). *The Uses of BIM: Classifying and Selecting BIM Uses*. Pennsylvania: Penn State University.
- Macopa. (2019). *Ficha Técnica: Lámina Ondulada de Acero Galvanizado*. San José: Macopa.
- Manresa, A. P. (2014). *Desarrollo de una aplicación para el cálculo de la huella de carbono en proyectos de construcción*. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.

- Mora Marín, P. (2017). *A net-zero emission concept for a single-family house typology in Costa Rica*. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.
- Mora, L. (2017). *Programa País Carbono Neutralidad 2.0*. Retrieved from Ministerio de Ambiente y Energía: <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/cos178009anx.pdf>
- Mundo BIM. (5 de Mayo de 2019). *Niveles de desarrollo*. Obtenido de Mundo BIM Web Site: <https://mundobim.com/2017/03/level-of-development-lod-bim/>
- Nezamaldin, D. (2019). *Parametric design with Visual Programming in Dynamo with Revit*. Estocolmo: KTH Royal Institute of Technology.
- Órgano de Normailización Técnica. (2015). *Manual de Valores Base Unitarios por Tipología Constructiva*. San José: Ministerio de Hacienda de Costa Rica.
- Pennsylvania State University. (2011). *Project Execution Planning Guide*. Pennsylvania: The Computer Integrated Construction Research Program.
- Plan BIM. (2019). *Estandar BIM para Proyectos Públicos: Intercambio de Información entre Solicitante y Proveedores*. Santiago, Chile: CORFO.
- Productos de Concreto. (2017). *Ficha técnica: Entrepisos*. San José: Productos de Concreto.
- Productos de Concreto. (2018). *Ficha técnica: Bloques de concreto*. San José: Productos de Concreto.
- Programa Estado de la Nación. (2013). *Capítulo 4: Armonía con la Naturaleza*. San José: Gobierno de Costa Rica.
- Röck, M., Habert, G., Hollberg, A., & Passer, A. (2018). LCA and BIM: Integrated assessment and visualization of building elements' embodied impacts for design guidance in early stages. *Procedia CIRP*, 69, 218-223.
- Schneider, H., & Samaniego, J. (2009). *La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios*. Santiago: CEPAL.

- Solano Quesada, S. (2014). *METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DE HUELLA DE CARBONO PARA EDIFICACIONES EN EL CONTEXTO NACIONAL Y SU APLICACIÓN EN EL MÓDULO HABITACIONAL TRÓPIKA*. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- The Construction Specifications Institute. (2010). *UniFormat: A Uniform Classification of Construction Systems and Assemblies*. Alexandria: CSI.
- The Construction Specifications Institute. (2019). *OmniClass: Introduction and User's Guide*. CSI.
- The International EPD System. (2019). *What is an EPD?* Retrieved from EPD System: <https://www.environdec.com/What-is-an-EPD/>
- United Nations Environment Programme. (2019). *GLOBAL STATUS REPORT 2019: Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector*. United Nations Environment Programme.
- Warwick University. (2015). *Embodied Energy and Embodied Carbon of Low Income Houses in Thailand*. Warwick University.
- Wickham, H., & Grolemund, G. (2017). *R for Data Science*. Retrieved from <https://r4ds.had.co.nz/>
- Yang, X., Hu, M., Wu, J., & Zhao, B. (2018). *Building-information-modeling enabled life cycle assessment, a case study on carbon footprint accounting for a residential building in China*. China: Journal of Cleaner Production.
- Zúñiga Sandi, A. L. (2018). *Herramientas para la estimación de Huella de Carbono de proyectos constructivos*. Cartago: Tecnológico de Costa Rica.

A. Flujo de trabajo planteado



B. Algoritmos de Autodesk Dynamo® para automatización

B.1. Algoritmo para incorporar información a materiales BIM

Se muestra primero el algoritmo completo en la Figura 47, luego se va a explicar cada una de las secciones.

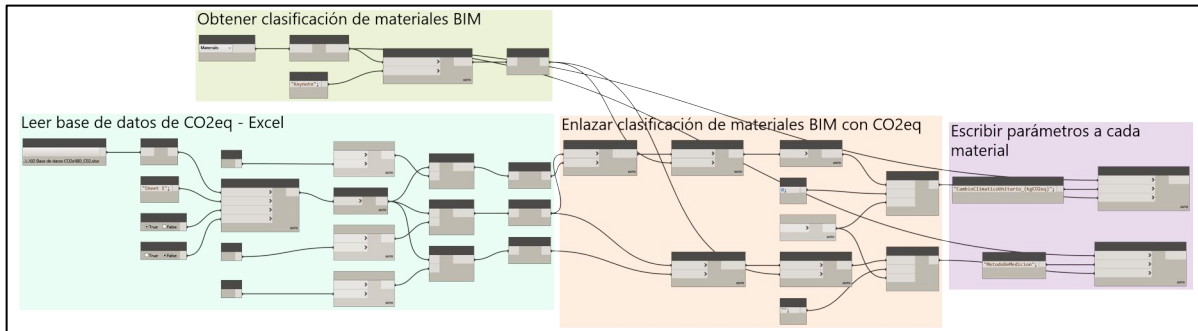


Figura 47. Algoritmo para incorporar información a materiales BIM – Total

La primera parte (mostrada en verde) permite obtener la clasificación de cada uno de los materiales BIM. De la misma manera, la sección mostrada en celeste permite leer la base de datos de factores de emisión unitarios desarrollada en Excel (esta se muestra en el Cuadro 22).

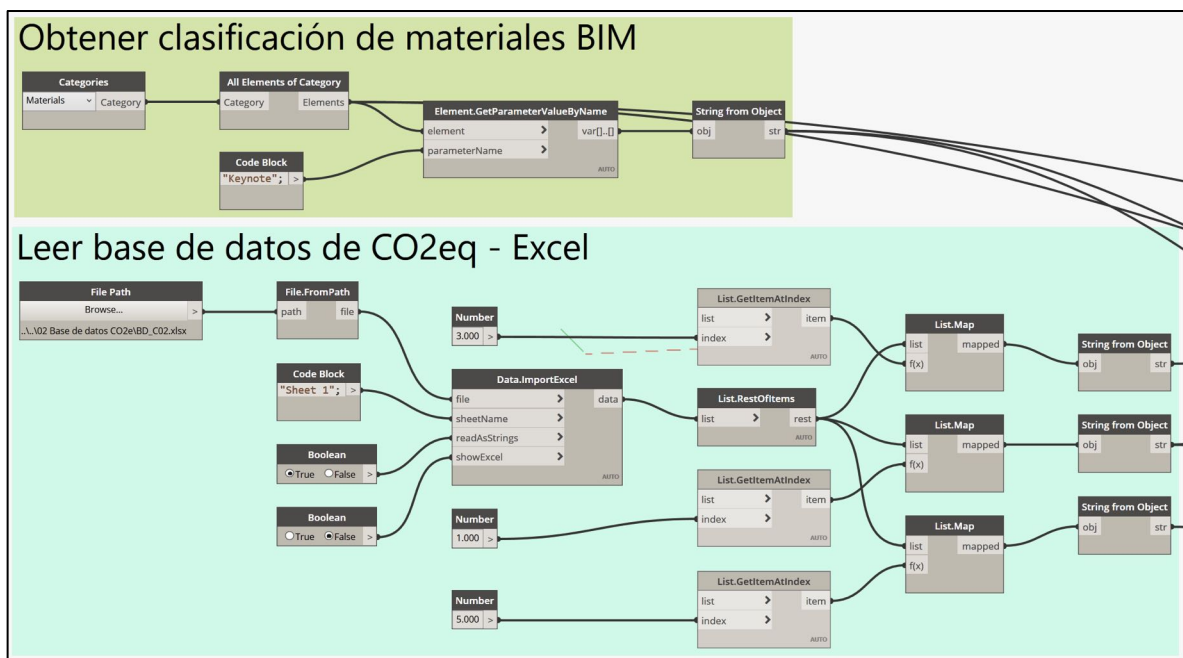


Figura 48. Algoritmo para incorporar información a materiales BIM – Parte A

Seguidamente, la parte mostrada en anaranjado permite enlazar la clasificación de materiales con los códigos que se incorporaron en la base de datos de Excel. Es importante recordar que al parámetro de *Keynote* de los materiales se le añadió esta clasificación.

La parte mostrada en morado permite escribir la información de la base de datos a los parámetros de los materiales, en este caso *CambioClimaticoUnitario_(kgCO2eq)* y *MetodoDeMedicion*.

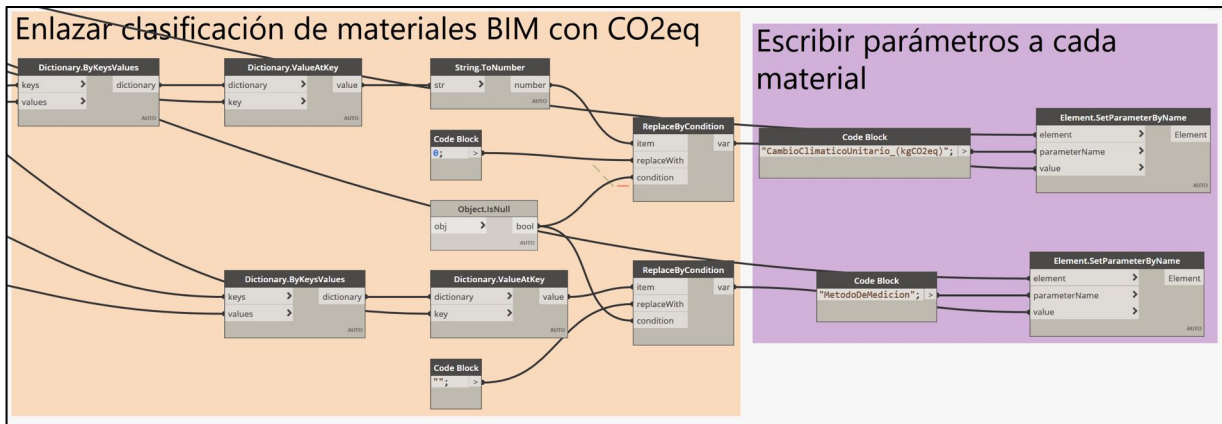


Figura 49. Algoritmo para incorporar información a materiales BIM – Parte B

B.2. Algoritmo para calcular huella de carbono de elementos

Se muestra primero el algoritmo completo en la Figura 50, luego se va a explicar cada una de las secciones.

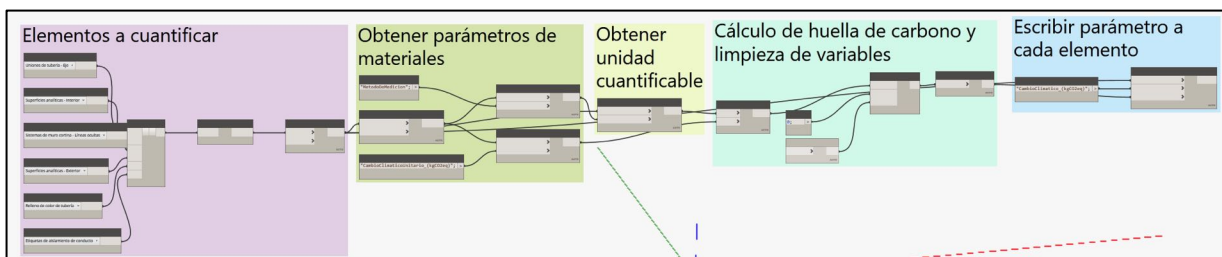


Figura 50. Algoritmo para calcular huella de carbono de elementos – Total

La primera parte (mostrada en morado) permite hacer una lista de todos los elementos del modelo a los que se les calculará su huella de carbono. Posteriormente, la sección mostrada en verde permite leer los parámetros contenidos dentro de los materiales que conforman estos elementos, entre ellos: *MetodoDeMedicion* y *CambioClimaticoUnitario_(kgCO2eq)*.

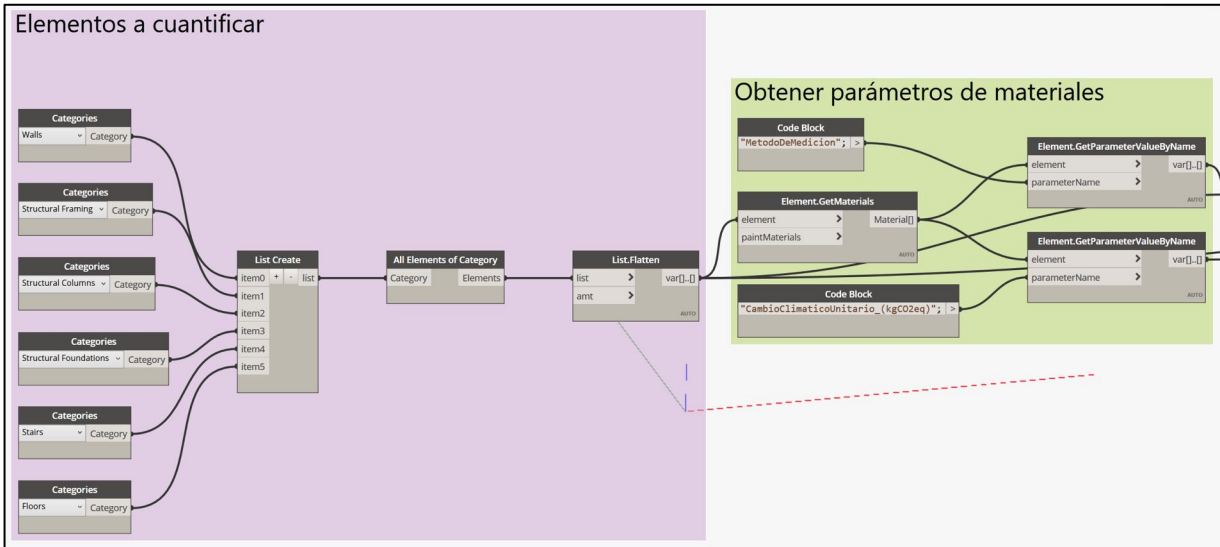


Figura 51. Algoritmo para calcular huella de carbono de elementos – Parte A

Recordando lo explicado en la sección 3.2.5, es importantísimo que el parámetro *MetodoDeMedicion* tenga el mismo nombre de la variable que será utilizada para cuantificar ya que la primera sección de la Figura 52 lee esa variable de los elementos. Posteriormente, se hace la multiplicación entre el valor de el método de medición y el parámetro *CambioClimaticoUnitario_(kgCO2eq)* para cada material, por último se hace una suma de huella de carbono de todas las multiplicaciones por elemento (si este tiene varios materiales) y se escribe este dato en el parámetro *CambioClimatico_(kgCO2eq)* de los elementos.

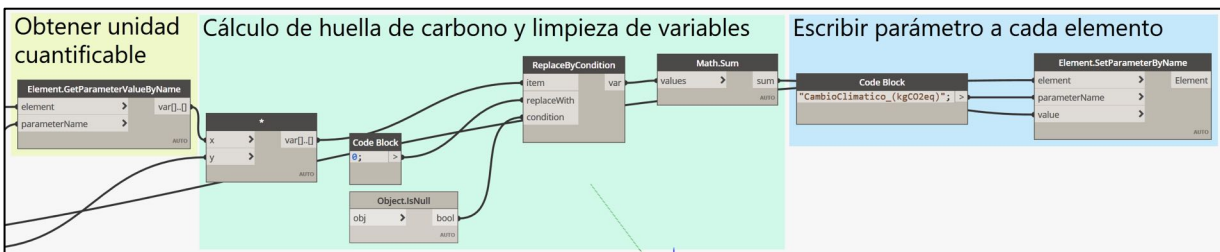


Figura 52. Algoritmo para calcular huella de carbono de elementos – Parte B

Terminando este paso, se tiene un modelo BIM rico en información de huella de carbono.

B.3. Algoritmo para parámetros especiales

Cuando se tienen parámetros especiales (personalizados) para cuantificar algún material, se puede utilizar el siguiente algoritmo. Este permite sumar la huella de carbono calculada a partir de este parámetro especial al cálculo de la sección anterior.

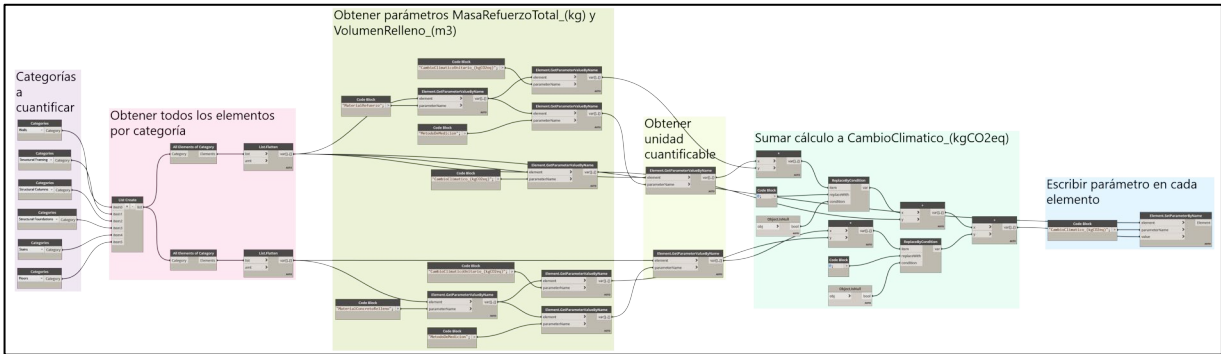


Figura 53. Algoritmo para parámetros especiales – Total

Al igual que en el proceso anterior, primero se hace una lista de todos los elementos del modelo a los que se les hará este cálculo,

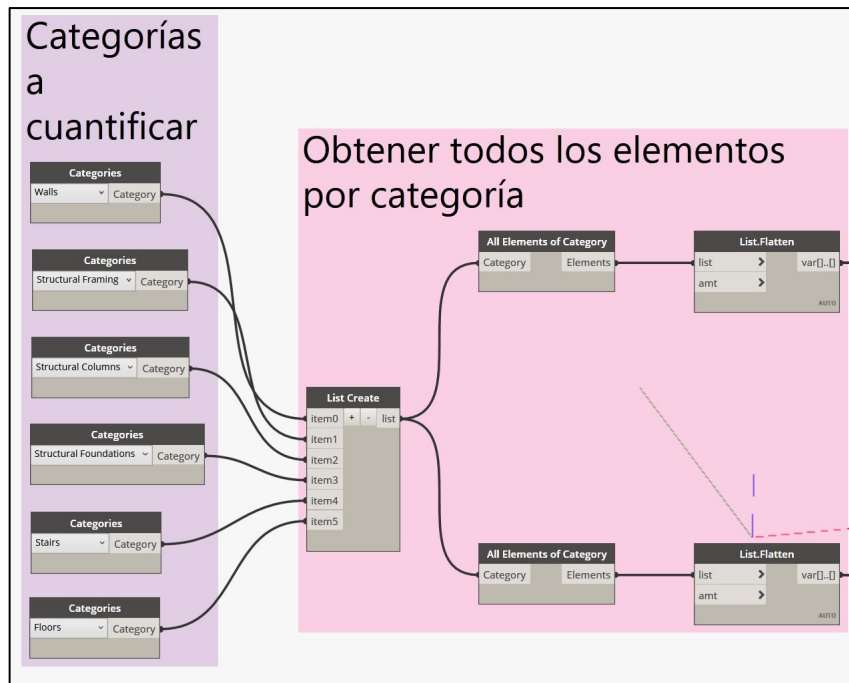


Figura 54. Algoritmo para parámetros especiales – Parte A

Luego se obtiene los parámetros especiales, en este caso *MaterialRefuerzo* y *MaterialConcretoRelleno* en donde se definieron los materiales de los parámetros especiales. A partir de esos materiales se obtiene la unidad de cuantificación anteriormente establecida.

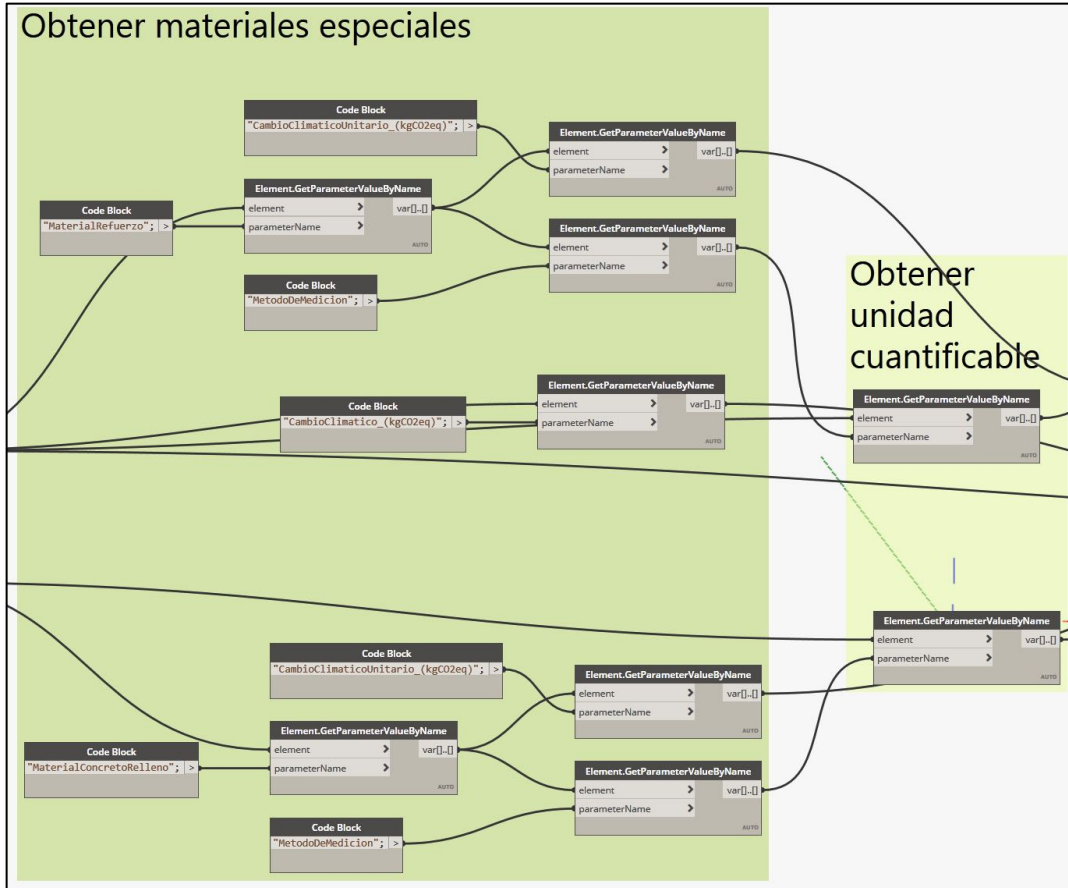


Figura 55. Algoritmo para parámetros especiales – Parte B

Por último se hace la suma del cálculo de la sección anterior con este nuevo cálculo y se escribe el valor en el parámetro *CambioClimatico_(kgCO2eq)*.

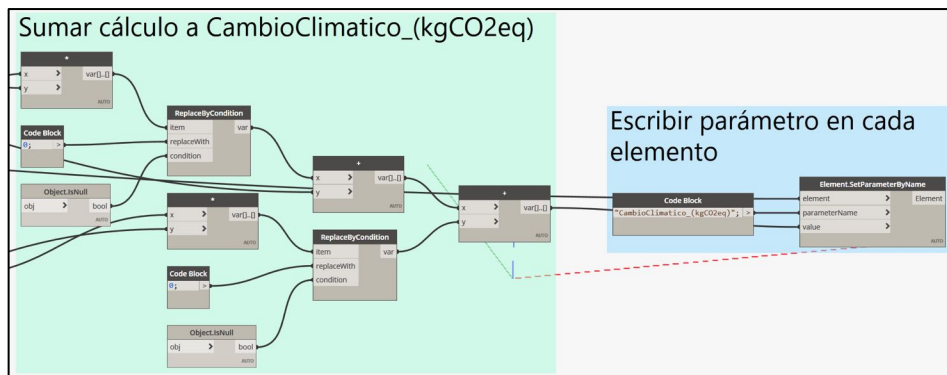


Figura 56. Algoritmo para parámetros especiales – Parte C

B.4. Algoritmo para exportar los datos de huella de carbono del modelo BIM

En seguida, se muestra el algoritmo que permite exportar toda la información generada automáticamente de los procesos anteriores. Cabe destacar que las secciones de este algoritmo pueden utilizarse por aparte si solamente se quisiera obtener la información de elementos o de materiales.

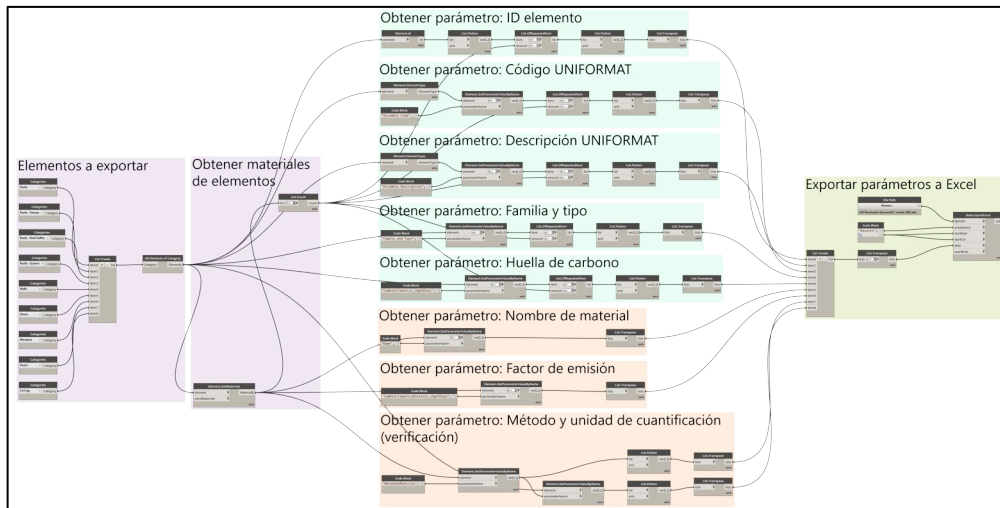


Figura 57. Algoritmo para exportar información de elementos a hoja de cálculo – Total

Luego se enlistan los elementos a exportar y se obtienen los materiales que conforman estos elementos.

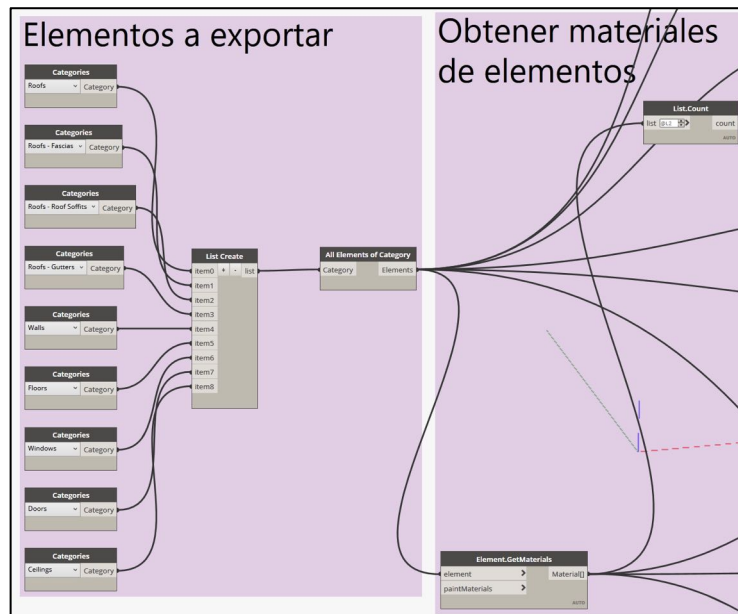


Figura 58. Algoritmo para exportar información de elementos a hoja de cálculo – Parte A

Seguidamente se obtienen los valores de los siguientes parámetros que pertenecen a los elementos anteriormente mencionados. Entre los más importantes: el ID del elemento, su utilidad es de verificación y para la limpieza de la base de datos exportada; el código Uniformat, que permite clasificar la información por elemento funcional y el dato de huella de carbono por cada elemento.

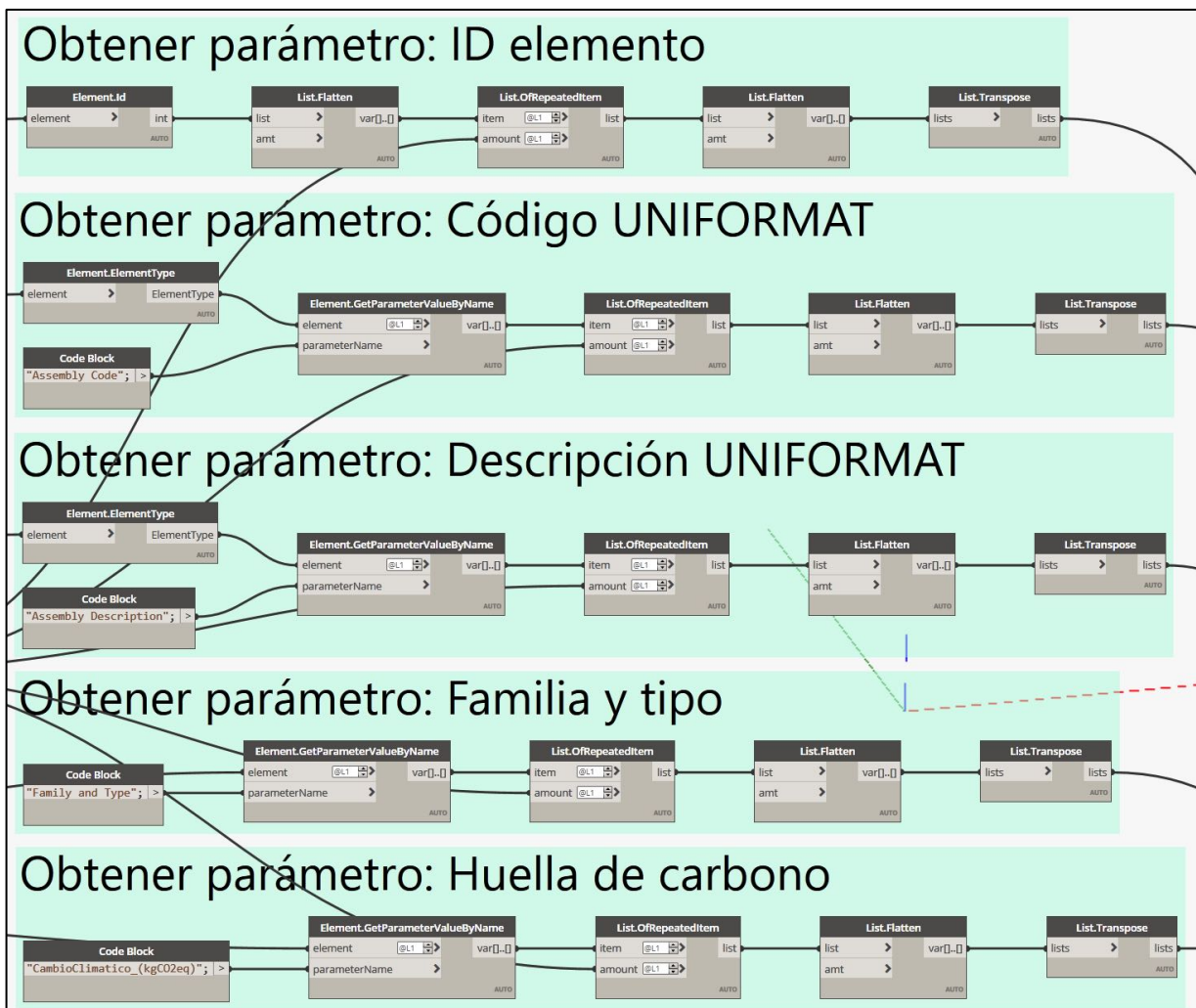


Figura 59. Algoritmo para exportar información de elementos a hoja de cálculo – Parte B

Paralelamente, se obtienen los valores de los parámetros de los materiales que conforman estos elementos.

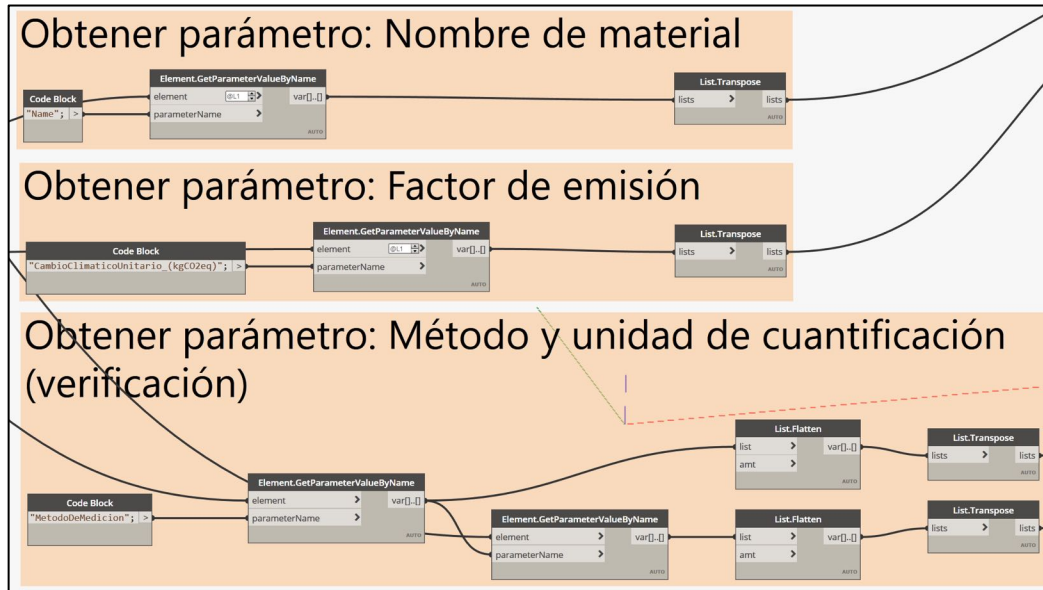


Figura 60. Algoritmo para exportar información de elementos a hoja de cálculo – Parte C

Por último, se crea una lista con todos estos valores y se exportan a un archivo de Excel.

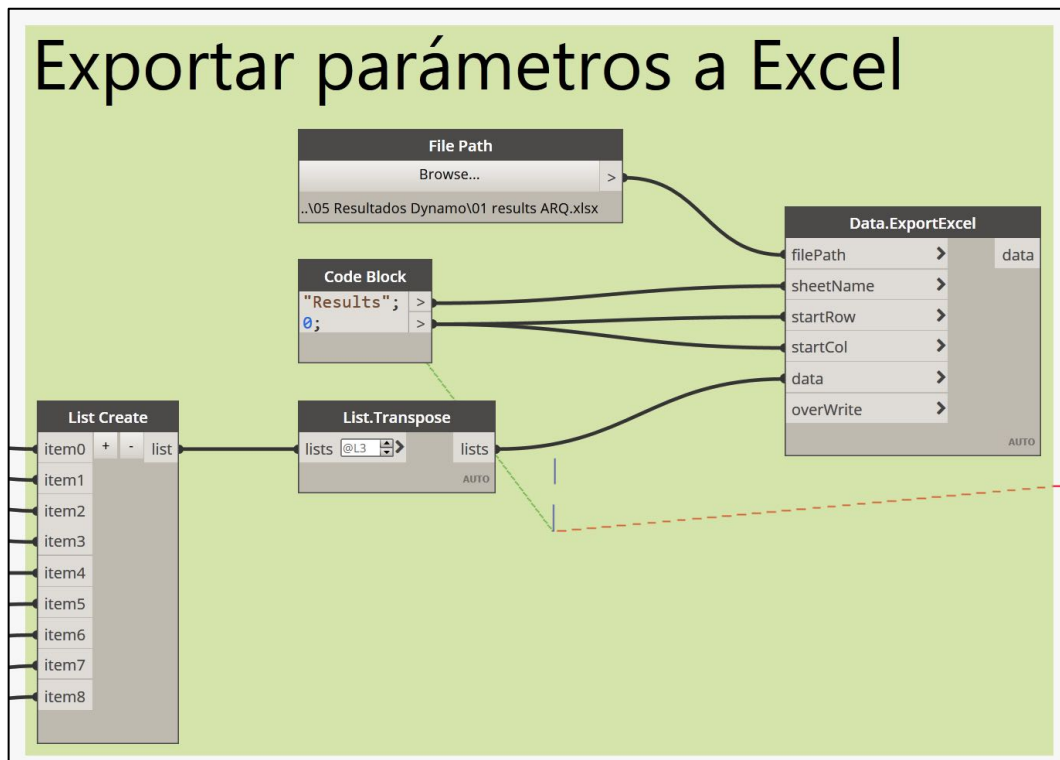


Figura 61. Algoritmo para exportar información de elementos a hoja de cálculo – Parte D

C. Planos arquitectónicos vivienda utilizada

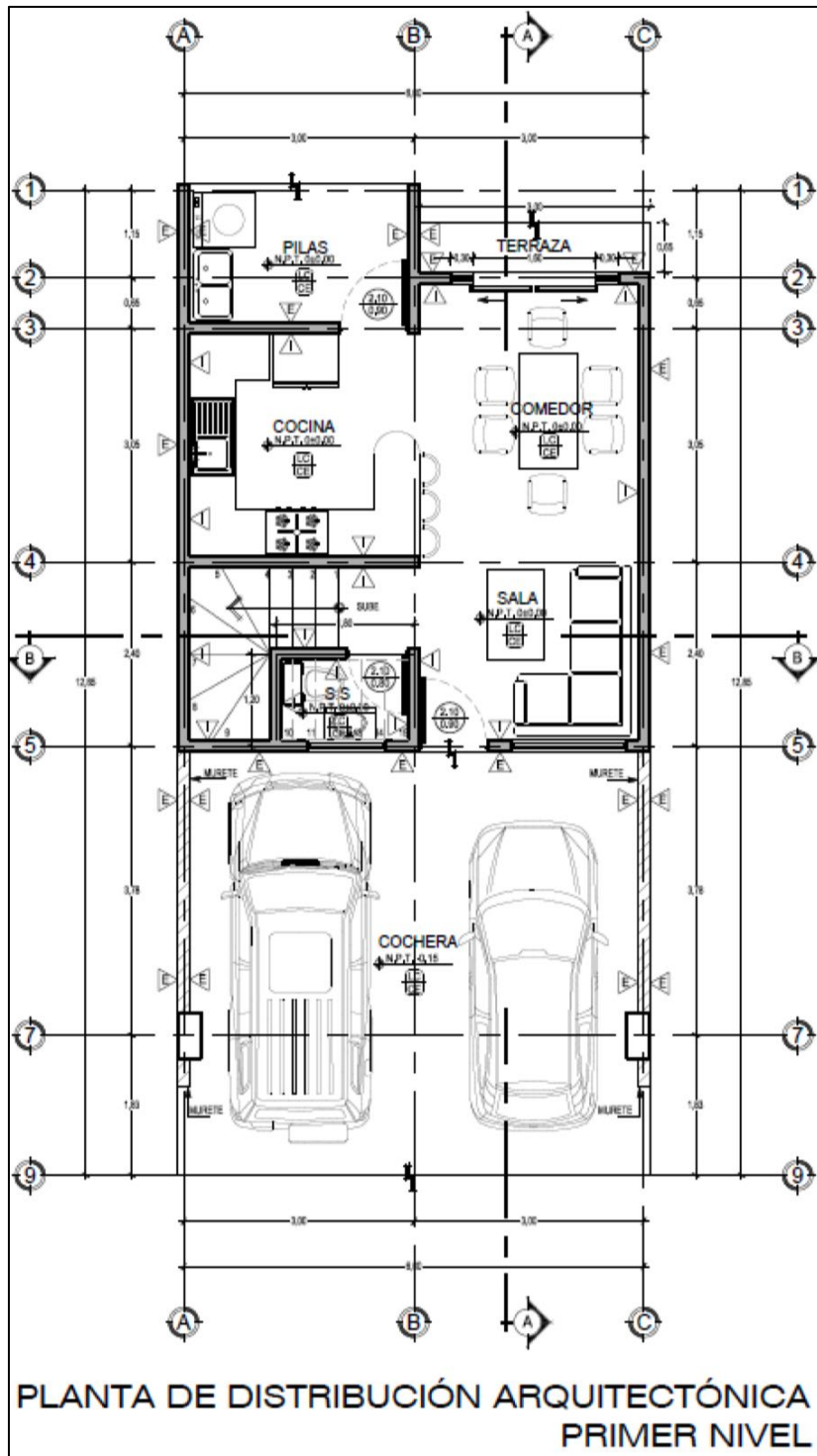


Figura 62. Plano arquitectónico de la vivienda utilizada: Primer Nivel

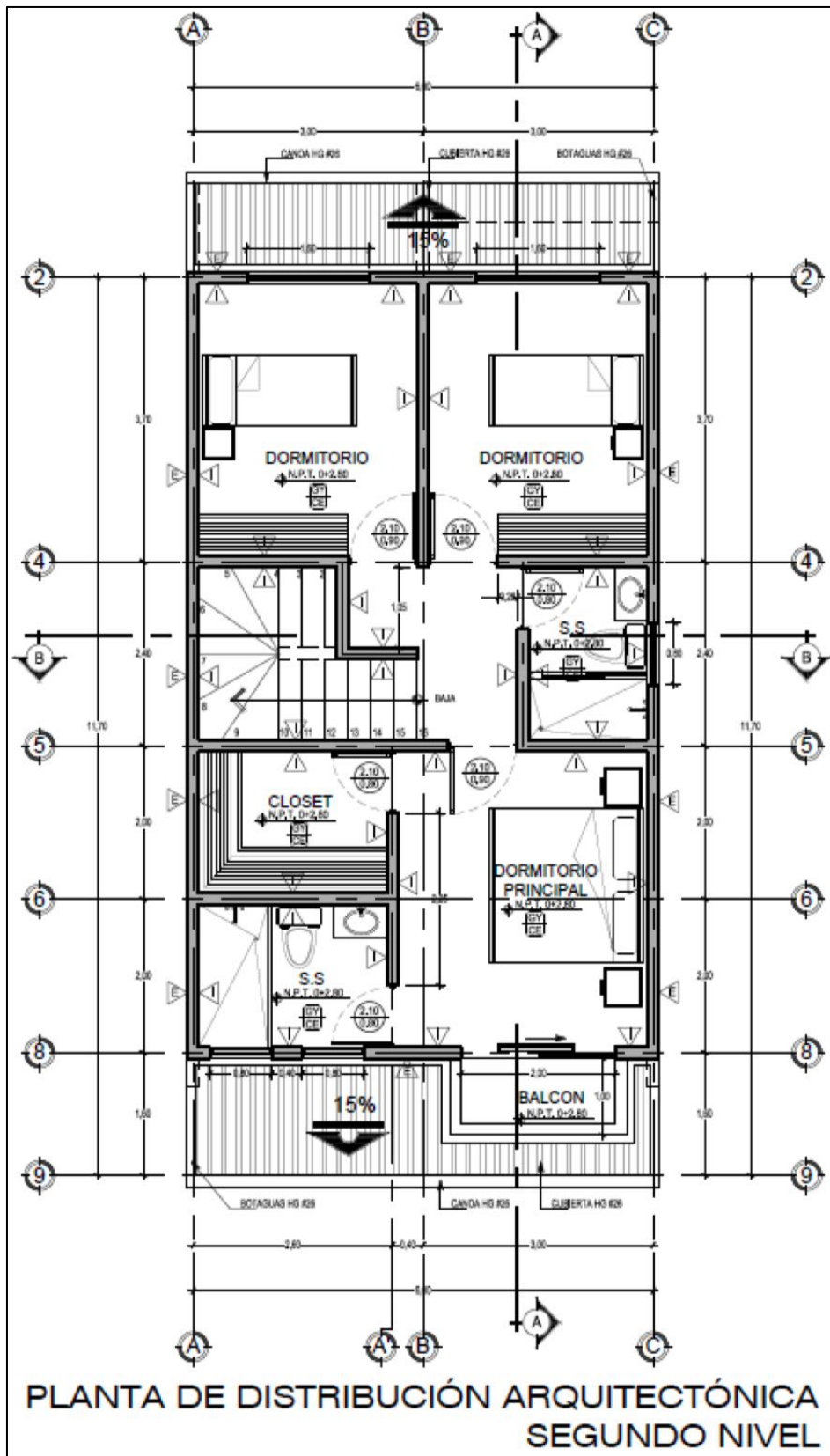


Figura 63. Plano arquitectónico de la vivienda utilizada: Segundo Nivel