

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



Trabajo de Integración Curricular

Tema: Medición de la huella de carbono de una estructura de hormigón armado y una estructura metálica durante su proceso de construcción

AUTOR:

Melany Micaela Barros Guayaquil

QUITO DM, SEPTIEMBRE DE 2023

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios por brindarme salud y vida y de esta forma el poder culminar esta gran etapa de mi vida.

De igual forma, a mis padres, Gissela y Giovanni quienes fueron mi inspiración y apoyo día a día en cada una de mis etapas de la vida, este no es solo un logro mío sino nuestro porque nunca lo hubiera logrado sin su apoyo.

A mi hermano Juan Fernando, mis abuelitos, primos y tíos quienes siempre me brindaron alguna palabra de apoyo o consejo durante este camino.

Finalmente, agradezco a cada uno de mis profesores por todo el conocimiento en los diversos campos de mi carrera y a mis amigos que fueron ese acompañamiento en cada día de la universidad.

Dedicatoria

Este trabajo de integración curricular es dedicado con mucho amor y agradecimiento a cada una de las personas que fueron parte de mi camino y que han estado para mi en todo momento.

A mis padres, quienes han sido mi guía e inspiración en cada paso de mi vida. Gracias por educarme con grandes valores y por siempre enseñarme a ser perseverante. Sin ustedes nada de esto hubiera sido posible.

A mi tío Darío, te mando un gran abrazo al cielo y gracias por siempre ser la alegría de la casa. Este logro es con mucho cariño para ti.

A todos ellos, les dedico este trabajo como muestra de amor y gratitud hacia ustedes.

Tabla de contenido

Agradecimientos	2
Dedicatoria	3
1. Capítulo I: Introducción	8
1.1. Justificación	9
1.2. Planteamiento del problema	10
1.3. Objetivos	10
1.4. Alcance	11
2. Capítulo II: Fundamentación teórica	11
2.1. Huella de carbono en la industria de la construcción	11
2.1.1. Huella de carbono	12
2.1.2. Gases de efecto invernadero (GEI)	14
2.2. Contaminación en el sector de la construcción	16
2.2.1. Efectos en el medio ambiente	17
2.2.2. Sostenibilidad en la construcción	18
2.3. Estructura de hormigón armado	19
2.3.1. Materiales	20
2.4.2. Proceso constructivo de la edificación de hormigón armado	22
2.4. Estructura metálica	23
2.4.1. Materiales	23
2.4.2. Proceso constructivo de la edificación de estructura metálica	24
3. Cuantificación de emisiones de GEI	25
3.1. Protocolo de gases de efecto invernadero	25
3.2. Metodologías ISO 14000	26

3.2.1.	Norma ISO 14064	26
3.2.2.	Norma ISO 14067	27
3.3.	Identificar las fuentes de emisiones de GEI.....	27
3.4.	Cantidades de obra para ambas edificaciones durante su proceso de construcción.....	28
3.4.1.	Cantidades de obra para la edificación de hormigón armado	28
3.4.2.	Cantidades de obra para la edificación de estructura metálica	30
4.	Análisis de Resultados.....	31
4.1.	Cuantificación de la huella de carbono mediante los factores de conversión	33
4.1.1.	Estructura de hormigón armado	33
4.1.2.	Estructura metálica	34
4.2.	Presentación de los resultados	36
5.	Conclusiones y Recomendaciones.....	41
5.1.	Conclusiones	41
5.2.	Recomendaciones	43
6.	Bibliografía	44

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1 - Huella de Carbono (López. J, 2023)	13
Ilustración 2 - Cálculo de huella de carbono (Frohmann, 2013).....	14
Ilustración 3 - Gases de efecto invernadero.....	15
Ilustración 4 - Sistemas de construcción sostenibles.....	19
Ilustración 5 - Producción del cemento	21
Ilustración 6 - Resumen de actividades que inciden en la producción de CO ₂ - huella de carbono (edificación de hormigón armado).....	37
Ilustración 7 - Porcentajes por cada etapa del proceso constructivo - hormigón armado	38
Ilustración 8 - Resumen de actividades que inciden en la producción de CO ₂ - huella de carbono (estructura metálica)	38
Ilustración 9 - Porcentajes por cada etapa del proceso constructivo - estructura metálica	39
Ilustración 10 - Comparación de la huella de carbono entre una estructura de hormigón armado y una estructura metálica	41

Índice de tablas

Tabla 1 - perspectiva química del cemento	21
Tabla 2 - Cantidades de obra durante el proceso de construcción – preparación del sitio, de una estructura de hormigón armado	28
Tabla 3 - Cantidades de obra durante el proceso de construcción - estructura gris, de una edificación de hormigón armado	30
Tabla 4 - Cantidades de obra durante el proceso de construcción – preparación del sitio, de una estructura metálica.....	30
Tabla 5 - Tabla 3 - Cantidades de obra durante el proceso de construcción - estructura, de una edificación de estructura metálica	31
Tabla 6 - Factores de emisión de kg Co2 eq durante el proceso de construcción de ambos sistemas estructurales	32
Tabla 7 - Resumen de la cuantificación de huella de carbono (kg CO2) durante el proceso constructivo de la edificación de hormigón armado.....	34
Tabla 8 - Resumen de la cuantificación de huella de carbono (kg CO2) durante el proceso constructivo de la estructura metálica	35

1. Capítulo I: Introducción

La construcción de edificios y estructuras es una parte fundamental de la actividad humana, pero también es una de las principales fuentes de impacto ambiental en el planeta. En este contexto, la medición de la huella de carbono de una estructura de hormigón armado y una estructura metálica es de suma importancia, ya que nos permite tomar decisiones más informadas sobre la elección de materiales y métodos de construcción que sean más sostenibles con el medio ambiente.

Para llevar a cabo esta cuantificación, se utilizará la huella de carbono, que es una medida que cuantifica la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos durante el proceso de construcción de la obra. Además, para obtener los resultados nos referiremos a la Norma ISO 14067 y al Protocolo de Gases de Efecto Invernadero (GHG) que establecen los factores de conversión que son esenciales para obtener los datos por cada actividad en unidades de Toneladas CO₂e o Kilogramos CO₂e. A continuación, se especificarán ambos sistemas estructurales en estudio y cómo la elección entre una estructura de hormigón armado y una estructura metálica puede tener un impacto significativo en la huella de carbono asociada a un proyecto de construcción.

- **Hormigón Armado:** El hormigón es un material ampliamente utilizado en la construcción de edificios y estructuras debido a su durabilidad y resistencia. Sin embargo, su producción implica la extracción de grandes cantidades de materias primas, como cemento, arena y grava, que generan emisiones significativas de dióxido de carbono (CO₂). Además, el proceso de fabricación del cemento es intensivo en energía, lo que contribuye aún más a su huella de carbono en la fase inicial del ciclo de vida del producto. Sin embargo, una vez construida, una estructura de hormigón puede tener una larga vida útil y requerir menos mantenimiento, lo que puede reducir su impacto a lo largo del tiempo desde la etapa de construcción hasta la fase final del mismo.

- **Estructura Metálica:** Las estructuras metálicas, a menudo tienen una menor huella de carbono en la fase de inicio del proyecto debido a la eficiencia de la fabricación de acero y otros metales. Sin embargo, su mantenimiento y protección contra la corrosión pueden requerir un uso continuo de energía y materiales a lo largo del tiempo desde la etapa de construcción. Además, la extracción y producción de metales también generan emisiones de CO₂, aunque en menor medida en comparación con el cemento.

La elección entre una estructura de hormigón armado y una estructura metálica debe basarse en una evaluación completa de la huella ecológica, teniendo en cuenta factores como la durabilidad, el mantenimiento, el transporte de materiales y la eficiencia energética. Finalmente, la comparación del impacto ambiental entre ambas estructuras es esencial para progresar y obtener una construcción más sostenible y contribuir a la mitigación del cambio climático para futuros proyectos.

1.1. Justificación

La huella de carbono representa la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos a la atmósfera los cuales se derivan de las actividades de producción o consumo de bienes y servicios (Espíndola & Valderrama, 2011). De esta forma, en el ámbito de la Ingeniería Civil nos vamos a enfocar en el proceso de construcción de una edificación ya que es el que mayor huella de carbono produce durante todo el ciclo de vida de la obra civil. Por esta razón se va a cuantificar la huella ambiental de la emisión de gases de efecto invernadero provocados de forma directa e indirecta durante esta etapa.

En vista de ello con la información obtenida será posible definir qué sistema estructural tiene una mayor huella de carbono y por lo tanto cual tiene un mayor impacto ambiental. Esto es importante estudiar por la preocupación del cambio climático y la conservación de recursos naturales es creciente, por ello se deben aplicar medidas sostenibles en el ámbito de la

construcción y poder cumplir con las regulaciones ambientales requeridas en el Ecuador y de forma global.

1.2. Planteamiento del problema

La industria de la construcción es responsable del 40% de las emisiones de dióxido de carbono asociada con la energía y los procesos, este elevado porcentaje se origina principalmente por las actividades realizadas en obra, el transporte y la producción de materiales de construcción. Por lo tanto, el medir la huella de carbono en edificaciones de hormigón armado y estructuras metálicas es fundamental para asegurarnos que los recursos empleados en dicha construcción darán al proyecto la sostenibilidad a largo plazo. De esta manera, será posible identificar el impacto que estas producen al medio ambiente y proveer de soluciones para contribuir significativamente a la mitigación del cambio climático. Cabe mencionar que la cuantificación de la huella de carbono se realizará en dos fases del proceso de construcción es decir en la preparación del sitio y en el desarrollo de la estructura inicial de la edificación de hormigón armado y la estructura metálica.

1.3. Objetivos

Objetivo general

Medir la huella de carbono de una estructura de hormigón armado y una estructura metálica durante su proceso de construcción.

Objetivos específicos

- Identificar las fuentes principales de emisiones de GEI durante el proceso de construcción de ambas obras y definir las diferencias significativas entre ellas.

- Determinar las medidas de mitigación más efectivas para reducir las emisiones de carbono en cada tipo de construcción.
- Proporcionar recomendaciones específicas para la reducción de la huella de carbono de proyectos futuros de construcción de hormigón armado y de estructura metálica, incluyendo la adopción de prácticas de construcción más sostenibles.

1.4. Alcance

Este trabajo de integración curricular tiene como objetivo medir la huella de carbono de una estructura de hormigón armado y una estructura metálica durante su proceso de construcción, pero dentro de este nos vamos a enfocar en la fase de preparación del sitio y en el desarrollo de la superestructura. De esta forma, se podrá evidenciar cuál de los dos sistemas estructurales genera una mayor cantidad de huella ecológica y a su vez el nivel de impacto ambiental que esta genera hacia el medio ambiente.

Para lograr esta cuantificación de la huella de carbono se empleará el Protocolo de gases de efecto invernadero y el método de la Norma ISO 14067. El Protocolo provee de una base de datos donde se mencionan una serie de factores de conversión de cada una de las actividades realizadas durante el proceso de construcción de varias obras civiles estudiadas en países industrializados. Además, con la información obtenida en el estudio será posible establecer ciertas soluciones para emplear métodos de construcción más sostenibles en proyectos a futuro.

2. Capítulo II: Fundamentación teórica

2.1. Huella de carbono en la industria de la construcción

A nivel mundial el sector de la construcción es una de las industrias más importantes y una de las más contaminantes, se estima que en un 40% de la contaminación es generada por

actividades directas o indirectas de obras civiles. La industria de la construcción requiere de la extracción y fabricación de grandes cantidades de materiales, esto se convierte a la vez en consumo de energía y en emisiones contaminantes de la atmósfera. Cada material de construcción debe ser extraído, procesado y transportado a su lugar de uso, por lo que se considera que los materiales tienen energía y dióxido de carbono incorporado (Hammond & Jones, 2008).

En el ámbito de la construcción la huella de carbono se consume en las diferentes fases de construcción tales como: extracción de materiales, ya sea áridos extraídos de sus minas, consumiendo combustible fósil en sus maquinarias y procesos de refinado, el transporte hasta su destino, y posterior a ello la puesta en obra. Cabe recalcar que todo este proceso define la huella ecológica y la contaminación que llegaría a producir a corto y largo plazo (Naranjo, 2019).

Debemos tener una visión sostenible en donde nosotros y especialmente futuras generaciones tengamos la oportunidad de tener una vida digna, por ello, se espera que los próximos proyectos de ingeniería tengan un bajo consumo energético, un diseño basado en la economía circular construyendo sin desperdicios con tecnologías inteligentes y usando un mínimo de materiales para lograr máxima solidez. Cumpliendo con esta visión será posible reducir la huella ambiental de un edificio en un 70 por ciento, pero para llegar a ello debemos actuar ahora e identificar que mecanismos podemos aplicar para tener un entorno más sustentable y sostenible con la tecnología actual.

2.1.1. Huella de carbono

En los años noventa, William Rees y Mathis Wackernagel de la Universidad de British Columbia definieron el concepto de la huella ecológica, la cual es una herramienta contable que estima los requerimientos en términos de recursos relacionados con la tierra y el agua, y la asimilación de los residuos para satisfacer las necesidades de una determinada población, entidad, región o país, expresadas en áreas productivas globales (Schneider & Samaniego,

2010). De esta forma, el concepto se creó con la intención de servir como una herramienta de planificación en donde se evalúa la sostenibilidad ecológica al estimar cuanto consume la humanidad más allá de la capacidad de la biosfera de regenerarse.



Ilustración 1 - Huella de Carbono (López, J, 2023)

El término huella de carbono o carbon footprint comienza a inicios de la década de los 2000 mediante una campaña publicitaria realizada por la petrolera British Petroleum y con esto se crea la calculadora ambiental en el año 2004 con el objetivo de evaluar la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos de forma directa e indirecta a la atmósfera como consecuencia de las actividades humanas. Simultáneamente, el cálculo de la huella ecológica se basa en estándares internacionales como el GHG Protocol y la fórmula para obtener este impacto se obtiene multiplicando el dato de consumo de dicha actividad por su factor de emisión que se da en función del tipo de combustible empleado (Línea verde, 2023).

Para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) hay que tomar en cuenta dos tipos de emisión: la directa que está asociada a las fuentes controladas por la organización y las indirectas que son controladas por otra organización, estos dos grupos se reúnen y se denominan alcances (Mellado & Carrasco, 2021). El cálculo de la huella de carbono sigue los principios del Protocolo de emisiones de gases de efecto invernadero o las Normas ISO 14064, 14067 que se refieren a emisiones de GEI. De esta forma, para efectuar la

cuantificación nos referiremos a los factores de conversión que son la tasa media de emisiones de una determinada fuente por unidad de actividad.

$$E = Na * fe$$

E : Emisión
fe : Factor de emisión
Na : Nivel de actividad de la fuente estimada

Ilustración 2 - Cálculo de huella de carbono (Frohmann, 2013)

2.1.2. Gases de efecto invernadero (GEI)

Los registros históricos nos confirman que el clima ha tenido algunas variaciones a gran escala, pero este se observa con un mayor cambio en la última década. Llamamos calentamiento global a las consecuencias que generan la liberación de ciertos gases a la atmósfera, pero este cambio está provocando una serie de cambios en los patrones meteorológicos de la Tierra a largo plazo (National Geographic, 2023).

Por lo que se refiere a las actividades humanas, el uso y la producción de energía por medio de recursos fósiles, han ocasionado el aumento en la atmósfera de los gases de efecto invernadero (GEI) los cuales tienen la capacidad de absorber y reemitir radiación, devolviéndola a la superficie terrestre. De esta forma, en el marco de las Naciones Unidas, el protocolo de Kioto (Naciones Unidas, 1998) establece los límites para los seis GEI:

- El dióxido de carbono, conocido como CO₂, constituye el principal responsable de aproximadamente el 70% de los gases de efecto invernadero. Su origen se encuentra en la combustión de fuentes de energía como petróleo, gas natural y carbón, además de procesos industriales como la producción de cemento y el transporte.

- El metano (CH_4), contribuye con alrededor del 20% de los gases de efecto invernadero. Este gas se genera a partir de actividades como la quema de biomasa, la descomposición de desechos orgánicos y la cría de ganado.



Ilustración 3 - Gases de efecto invernadero

- El óxido nitroso (N_2O), es responsable de aproximadamente el 7% de los gases de efecto invernadero y se origina a partir de procesos industriales y la quema de biomasa.
- Los hidrofluorocarbonos (HFC), que representan el 1% de los gases de efecto invernadero, son utilizados en sistemas de climatización, aislantes y aerosoles. No se encuentran en la naturaleza y son productos desarrollados por el ser humano con fines industriales.
- Los perfluorocarbonos (PFC), también responsables de alrededor del 1% de los gases de efecto invernadero, se emplean en sistemas de climatización y extintores de incendios. Al igual que los HFC, no tienen un origen natural.
- El hexafluoruro de azufre (SF_6) contribuye con aproximadamente el 1% de los gases de efecto invernadero y se utiliza en el aislamiento de líneas de alta tensión, la producción de aluminio y componentes electrónicos. No es de origen natural sino por actividades humanas.

El vapor de agua, aunque no está incluido en el protocolo de Kioto, es el gas de efecto invernadero más potente debido a su capacidad para retener el calor emanado por la superficie terrestre. Su presencia en la atmósfera aumenta como resultado del calentamiento global.

2.2. Contaminación en el sector de la construcción

Cualquier iniciativa orientada a elevar la calidad de vida conlleva tanto efectos beneficiosos como desfavorables. Por esta razón el sector de la construcción es uno de los mayores explotadores de recursos.

De acuerdo con el World Watch Institute, el sector actualmente utiliza el 40% del suministro global de piedras sin procesar, grava y arena, así como el 25% de la madera virgen en el mundo cada año. Podemos optar por ignorar este problema, pero en última instancia, podríamos encontrarnos con un agotamiento de recursos naturales esenciales en un futuro cercano. Algunas empresas pertenecientes a los países industrializados están comenzando a adaptarse gradualmente, empleando tecnologías modernas como las impresoras 3D o la producción de textiles biodegradables para reducir su consumo de materiales. Sin embargo, es posible que el cambio no se materialice de manera inmediata, ya que la industria de la construcción sigue siendo una de las menos digitalizadas en la actualidad (ARCHDESK, 2021).

En la construcción encontramos diversas causas de contaminación, entre las principales son:

- La contaminación por polvo que es la más dominante, los vientos transportan las partículas y viaja a sitios cercanos a la obra o incluso permanecen en la ciudad. Entre los materiales que generan estas impurezas son la tierra, residuos de madera, cemento, entre otros.

- Las emisiones por máquinas de construcción que son específicamente emitidas por vehículos pesados que funcionan a diésel. Por ejemplo, grúas, excavadoras, mixers, etc. Estos vehículos generan una gran cantidad de CO₂, SO₂ y CO al aire.
- La contaminación del agua es decir tirar los residuos tóxicos de la obra de construcción en ríos o mares y estos materiales pueden ser el cemento, pintura, pegamento, entre otros componentes.

En lo que se refiere a Ecuador, hay un escaso control ambiental en la construcción; si bien, existe la Ley de Gestión Ambiental y a pesar de las sanciones económicas para los contratistas, se pueden evidenciar escombros, restos de materiales y residuos mal manejados en distintos sectores del país lo cual provoca un efecto negativo medioambiental (El Mercurio, 2021).

2.2.1. Efectos en el medio ambiente

Las emisiones globales de CO₂ (dióxido de carbono) provienen principalmente de combustibles fósiles y de la industria, que en el año 2019 tuvo un récord de 36.7 Gigatoneladas. En consecuencia, de esto el cambio climático provocado por las actividades humanas han afectado notablemente a los ecosistemas que brindan un sustento de vida. Algunos de los fenómenos que se están observando con mayor énfasis alrededor del mundo son: el deshielo del Ártico y el aumento del nivel del mar, acidificación del mar y cambios hidrológicos (Red Española, 2020).

Como se expresó anteriormente la actividad humana es el principal factor en el cambio climático, pero si ya nos referimos a industrias, el sector de la construcción brinda un desarrollo económico a la sociedad, pero este no es tan amigable con el medio ambiente. Según el Green Building Council del Reino Unido, la industria de la construcción utiliza

anualmente más de 400 millones de toneladas de materiales, gran parte de los cuales causan un impacto negativo en el entorno natural (Macias, 2019).

No hay solo que enfocarse en las dificultades sino es indispensable proveer de soluciones y en el transcurso de los años se han establecido marcos y acuerdos globales como los Objetivos de Desarrollo Sostenible, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y el Acuerdo de París; que han guiado a la sociedad con ideas concretas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y limitar el calentamiento global con el paso de los años.

En términos generales, existen dos estrategias cuando se hable de edificaciones: las de mitigación que van encaminadas a la reducción de los gases de efecto invernadero (GEI) y las medidas de adaptación que buscan reducir la vulnerabilidad y ciertos riesgos causados por el cambio climático, es decir fortalecer la resiliencia de los sistemas estructurales (Fernandez, Yurivilca, & Minoja, 2019).

2.2.2. Sostenibilidad en la construcción

El desarrollo sostenible satisface las necesidades actuales sin comprometer a las de futuras generaciones, es decir, es fundamental mantener y preservar el ecosistema. Es por esta razón, que existe un equilibrio entre el avance económico, el medio ambiente y el bienestar social. De esta forma, la construcción sostenible tiene un compromiso con nuestro entorno ya que se inclina al uso eficiente de la energía, recursos, agua y materiales para mitigar el impacto ambiental.

Según la Constitución de la República del Ecuador (2008), en la Sección VI, Hábitat y Vivienda menciona que las personas tienen derecho a un hábitat seguro y saludable y a una vivienda digna. En base a esto se ha elaborado y aprobado leyes y acuerdos que satisfacen la sostenibilidad en el país. Por ejemplo, el Código Orgánico del Ambiente en el Título VI hace referencia a la producción y consumo sustentable en los artículos 243, 244 y 245 en donde se

menciona medidas preventivas (tecnologías limpias), obligaciones para una producción más limpia y de consumo sustentable y la reducción de la huella ecológica (Ministerio del Ambiente, 2017).



Ilustración 4 - Sistemas de construcción sostenibles

Además, el sector de la construcción específicamente los edificios, consumen alrededor del 40% de los recursos naturales, aumentan a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y la contaminación, con mayor impacto durante su proceso constructivo que en otras fases del ciclo de vida (Miñan, 2012). Cabe mencionar que, dentro del ciclo de vida de las edificaciones, el reciclaje y la reutilización de los residuos de la construcción son estrategias para alcanzar a una sostenibilidad. Por ello, ya no se debe denominar como residuos sino como un recurso que se empleará en otras situaciones o en algunos proyectos de manera específica.

2.3. Estructura de hormigón armado

El hormigón es un material polifásico que se emplea mayormente en las construcciones alrededor del mundo. Está compuesto por cemento, agua, arena y grava. Las principales propiedades del hormigón son la trabajabilidad (facilidad de mezcla de los elementos - homogeneidad), cohesividad, resistencia (resistencia la compresión a los 28 días) y durabilidad. Cabe mencionar que el hormigón por sí solo únicamente absorbe esfuerzos a

compresión por lo cual se coloca el acero que soporta esfuerzos de tracción y a esto se denomina el hormigón armado y se emplea en sistemas estructurales tales como losas, columnas, vigas, muros y cimentaciones los cuales son elementos principales de una edificación.

Más llanamente el hormigón armado está compuesto generalmente por barras corrugadas de acero que se introducen en el hormigón y debido a la adherencia entre estos dos elementos el acero resiste tracción y el hormigón compresión. Ya refiriéndonos al diseño y construcción en hormigón armado debemos realizarlo en base al American Concrete Institute (ACI) porque este incluye normas, estándares y recomendaciones técnicas que debemos seguir para diseñar sistemas estructurales óptimos y eficientes.

2.3.1. Materiales

- **Cemento:** El cemento es el material que se usa principalmente en la mezcla del hormigón, representa del 10 al 20% del peso del mismo. Este material se produce por un proceso químico a partir de la piedra caliza y arcilla.

Este material está compuesto por los siguientes óxidos (BECOSAN, 2020):

Componente	Representatividad
Sílice (SiO ₂)	19 al 25% de la composición de cemento.
Alúmina (Al ₂ O ₃)	3.5 a 8% de la composición de cemento.
Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	2.5 a 4.5% de la composición de cemento.
Cal (CaO)	Componente predominante entre el 62 y 65% de cemento.
Yeso (SO ₃)	Representa un 1.5 a 4.5% de cemento

Magnesia (MgO)	0.5 a 5% de la mezcla.
Álcalis (Na ₂ O, K ₂ O)	0.2 a 1.2% del total.

Tabla 1 - perspectiva química del cemento

El proceso estándar de la fabricación del cemento se puede resumir en tres pasos principales: el primero es la extracción, trituración, corrección, dosificación y molienda de la materia prima. El segundo, que es la producción del Clinker y por ultimo el enfriamiento y almacenamiento de los Clinkers.

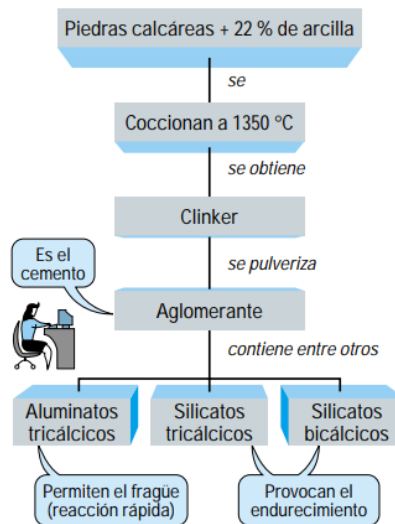


Ilustración 5 - Producción del cemento

A pesar de ser un material muy eficiente dentro de la construcción, no lo es con el medio ambiente ya que se incrementa la cantidad de partículas suspendidas en el aire y afectan a la atmósfera terrestre. Además, durante la producción del cemento se emiten contaminantes peligrosos tales como las dioxinas y furanos que al ser muy tóxicos pueden provocar enfermedades en los seres humanos y estos componentes se asientan en la superficie del suelo, lo cual lo contamina aún más.

- Agua: Es un componente importante para la elaboración del hormigón y morteros ya que permite que el cemento desarrolle su capacidad ligante y le da manejabilidad al hormigón. De igual forma, la calidad del agua debe ser óptima y por ello se usaba agua potable para la mezcla, pero ahora debido a los escasos de este recurso a nivel global, en algunos países se busca reemplazar esta con otros tipos de agua tales como el agua tratada o agua subterránea.

El agua desempeña un papel crucial en el hormigón, debido que, al relacionar su proporción con respecto a la cantidad de cemento en la mezcla (relación agua/cemento), es la que influye en la resistencia y durabilidad del material en condiciones normales.

- Grava: También denominado agregado grueso y se obtiene de la desintegración de la roca volcánica y por su tamaño se retiene en el tamiz número 4 en base a la Norma INEN 872 o la Norma ASTM C33. Los beneficios de este material es que mejora la eficiencia del uso del cemento porque su graduación reduce el número de espacios en la pasta.
- Arena: A la arena también se la conoce como agregado fino el cual es un árido natural que esta formado por un conjunto de fragmentos sueltos con un tamaño de 0.063 a 2 milímetros y su componente principal es la sílice. Este elemento queda retenido en el tamiz número 200 y pasa el 3/8". Simultáneamente, cumple con las normas ASTM, INEN y especificaciones MTOP.

2.4.2. Proceso constructivo de la edificación de hormigón armado

En el presente estudio nos vamos a enfocar en el proceso constructivo de una edificación de hormigón armado de cuatro pisos y dentro del mismo en dos principales sub fases que son la preparación del sitio y el desarrollo de la super estructura gris.

La preparación del sitio conlleva la limpieza del terreno, excavación y relleno, marcado y nivelación del terreno e instalación de cercas de seguridad. Por otro lado, la estructura y super estructura gris se refiere a la construcción de la estructura principal que incluye columnas, muros, losas y vigas, instalación de sistemas de refuerzo y levantamiento de paredes.

2.4. Estructura metálica

Se considera como estructura metálica a una estructura que se compone de al menos un 80% de metal, en este caso estudiaremos a edificaciones de acero. Simultáneamente, los factores que se aplican a las estructuras de hormigón armado se tienen en cuenta en las estructuras metálicas y por eso se espera que estas se diseñen para soportar tanto fuerzas verticales como horizontales. De esta forma, dentro de sus propiedades mecánicas encontramos que tienen una alta resistencia a la tracción y a la compresión. Cabe mencionar que esta está compuesta de vigas metálicas, viguetas y pilares metálicos (Quispe, s.f.).

Los tipos predominantes de conexiones en este tipo de sistema estructural es la soldadura y pernos. La primera es más frecuente en estructuras de acero y se ejecuta mediante el calor en cambio los pernos se emplean comúnmente en estructuras ligeras.

2.4.1. Materiales

- Acero estructural: El acero es una aleación de hierro y carbono, y además incorpora otros elementos como el fósforo, silicio, oxígeno y azufre, pero en cantidades muy pequeñas. Todos estos le dan características esenciales para que el acero tenga un buen comportamiento. Es importante señalar que el American Institute of Steel Construction (AISC) es el que se encarga en el diseño y construcción en este tipo de estructuras.

En el proceso de construcción del acero este se obtiene por ser laminado en caliente a grandes temperaturas en hornos, pero antes de esto el hierro crudo debe triturarse y clasificarse. Ya después de salir del horno se funde el hierro y este debe calentarse de nuevo para incluir otros componentes como el carbono y el manganeso.

- Hormigón: Este se emplea comúnmente en ciertas uniones como elemento de refuerzo y estabilización, la cimentación y las losas de piso.
- Elementos de sujeción y fijación: Los tornillos, pernos, soldadura y tuercas se emplean para unir las piezas de acero estructural u otros componentes necesarios para terminar con la edificación.
- Pintura y recubrimiento: El recubrimiento anticorrosivo se basa en la Norma ISO 12944-2. De esta forma, las estructuras de acero tienen una larga vida útil y esto se traduce a la necesidad de emplear un buen recubrimiento que tenga durabilidad prolongada, por ello, el diseño de este tipo de pintura se extiende más allá de los 15 años (Tianjin Jinhai Special Coatings & Decoration Co., Ltd., 2021).

2.4.2. Proceso constructivo de la edificación de estructura metálica

En el presente estudio nos vamos a enfocar en el proceso constructivo de una edificación en base a una estructura metálica de cuatro pisos y dentro del mismo en dos principales sub fases que son la preparación del sitio y desarrollo de la super estructura.

La preparación del sitio conlleva la limpieza del terreno, excavación y relleno, marcado y nivelación del terreno e instalación de cercas de seguridad. Por otro lado, la estructura se refiere a la fabricación de los componentes de la estructura de acero, transporte de estos componentes hacia la obra, montaje de la estructura que requiere de grúas u otro equipo pesado.

3. Cuantificación de emisiones de GEI

Para calcular la huella de carbono durante el proceso de construcción de ambas edificaciones nos referiremos a dos modelos que se encontraran en situaciones similares es decir misma área y altura del edificio para hacer una comparación más efectiva. Además, cada edificación tendrá una cubierta metálica tal y como se puede observar en el presupuesto de los mismos. De esta forma, se identificarán las cantidades de obra mediante la revisión de los APU's (Análisis de Precios Unitarios) de cada uno de los sistemas estructurales que son motivo de la investigación y se obtendrán los factores de conversión en unidades de kilogramo CO₂e o en Toneladas CO₂e de la base de datos de "Green House Protocol" y para obtener el total de emisiones se multiplicará la actividad por el factor de conversión tal y como lo establecen las metodologías que estudian la huella de carbono en unidades de gases de efecto invernadero (GEI).

3.1. Protocolo de gases de efecto invernadero

El Protocolo de gases de efecto invernadero (Protocolo GHG) es un estándar que es reconocido mundialmente para medir y gestionar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En 1990 surgió este protocolo en respuesta a la demanda de un marco coherente para la presentación de informes de gases de efecto invernadero. Cabe mencionar que este protocolo actúa como una guía desarrollada por el Instituto de Recursos Mundiales (WRI) y el Consejo Empresarial Mundial para Desarrollo Sostenible (WBCSD) para ayudar a las organizaciones a cuantificar las emisiones de GEI.

Por ejemplo, para calcular la huella de carbono de una organización el protocolo GHG toma en cuenta seis gases principales tales como CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PCF y SF₆. De esta forma, se clasifican los GEI en tres alcances principales y en este estudio nos vamos a enfocar en el alcance 1 y 2. El alcance 1 se refiere a emisiones directas de recursos controlados y propiedad de la empresa, es decir, son emisiones liberadas a la atmosfera como resultado de un

conjunto de actividades. Por otro lado, el alcance 2 habla sobre las emisiones indirectas que provienen de energía comprada por un proveedor de servicios públicos (Plan A, s.f.).

3.2. Metodologías ISO 14000

Las Normas ISO 14000 son normativas internacionales que hablan a cerca de la gestión ambiental de cada organización. El objetivo principal es de fomentar la estandarización de las formas de producir y prestar los servicios para proteger al medio ambiente y reducir cualquier impacto que resulte perjudicial por parte de las organizaciones. Cabe mencionar que esta Norma establece ciertas condiciones para un sistema de administración ambiental que permite a una organización elaborar e implantar una política que tenga en consideración los mandatos legales y otros requerimientos que la entidad suscriba, además de la información vinculada a aspectos ambientales relevantes (ISO, 2004).

Existen diversas familias ISO 14000 pero en este caso como vamos a cuantificar la huella de carbono durante el proceso de construcción de las dos edificaciones nos referiremos a ciertos estándares como la Norma ISO 14064, GHG Protocol y la Norma ISO 14069, pero la metodología específica para este cálculo es en base a la ISO 14067.

3.2.1. Norma ISO 14064

La Norma ISO 14064 establece pautas y criterios para cuantificar y verificar las emisiones en un registro de gases de efecto invernadero (GEI) tanto para una organización como para un proyecto. El cálculo de la huella de carbono puede aplicarse en diferentes elementos tales como, el producto, proyectos y organizaciones.

3.2.2. Norma ISO 14067

El tema ambiental es de gran importancia actualmente debido que el calentamiento global es un gran desafío para la humanidad y particularmente para la industria. De esta forma, la Norma ISO 14067:2018 es un estándar general de medición de la huella de carbono en productos, es decir evalúa todas las emisiones atmosféricas que se generan por una actividad antropogénica con el propósito de reducir los gases de efecto invernadero (GEI) (Global Standards, 2023).

El enfoque metodológico de la Norma ISO 14067 se apoya en el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), lo que facilita la identificación de cada una de las etapas que genera la mayor cantidad de emisiones del producto, al igual de información necesaria para actuar de forma eficiente e identificar posibles soluciones. Simultáneamente, la huella de carbono generada por cada fuente de emisión es el resultado del producto del dato de cada actividad multiplicado por un determinado factor de emisión.

3.3. Identificar las fuentes de emisiones de GEI

Las fuentes de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) son diversas y en el caso de estudio debemos observar cuales forman parte del proceso constructivo de los sistemas estructurales (hormigón armado y estructura metálica) específicamente en la preparación del sitio y la construcción de la estructura principal. En este caso podemos mencionar a:

- **Industria:** Emisiones de CO₂ en la producción de cemento y acero.
- **Residuos:** Emisiones de CO₂ y CH₄ debido a la acumulación de residuos de construcción.
- **Maquinaria:** Emisiones de CO₂ y otros GEI de los vehículos a motor como camiones.

- Uso de tierra y cambios de uso de tierra: Cambios en la cobertura de la tierra, excavaciones y deforestación.

3.4. CANTIDADES DE OBRA PARA AMBAS EDIFICACIONES DURANTE SU PROCESO DE CONSTRUCCIÓN

3.4.1. CANTIDADES DE OBRA PARA LA EDIFICACIÓN DE HORMIGÓN ARMADO

Preparación del sitio

Rubro	Unidad	Cantidad
Obras preliminares – cerramiento provisional h=2.40m (tabla de monte)	m	26
Limpieza y desbroce del terreno	m ²	416
Replanteo y nivelación con estación total	m ²	416
Desalojo del material en volqueta	m ³	12.5

Tabla 2 - Cantidades de obra durante el proceso de construcción – preparación del sitio, de una estructura de hormigón armado

Estructura gris

Rubro	Unidad	Cantidad
Hormigón premezclado para vigas y columnas ($f'c= 240$ kg/cm ²)	m ³	86.39
Hormigón simple para gradas ($f'c= 210$ kg/cm ²)	m ³	12.68
Acero de refuerzo ($f_y= 4200$ kg/cm ²)	Kg	25353.61
Losa alivianada de hormigón simple ($f'c= 240$ kg/cm ²), e=0.20m	m ²	834.25
Encofrado de tabla contrachapada para vigas	m ²	94.38
Encofrado de tabla contrachapada para columnas	m ²	250.31
Encofrado de madera para losa	m ²	1040.19
Encofrado para gradas ($f'c= 210$ kg/cm ²)	m ²	44.12
Mampostería para bloque de 20cm	m ²	539.43
Cubierta metálica	kg	7654,32
Mampostería para bloque de 15cm	m ²	413.24
Enlucido vertical liso interior	m ²	1643.67
Enlucido de vigas	m ²	458.32
Enlucido de piso de losa	m ²	732.43

Tabla 3 - Cantidades de obra durante el proceso de construcción - estructura gris, de una edificación de hormigón armado

3.4.2. Cantidades de obra para la edificación de estructura metálica

Preparación del sitio

Rubro	Unidad	Cantidad
Obras preliminares – cerramiento provisional h=2.40m (tabla de monte)	M	26
Limpieza y desbroce del terreno	m2	416
Replanteo y nivelación con estación total	m2	416
Desalojo del material en volqueta	m3	12.5

Tabla 4 - Cantidades de obra durante el proceso de construcción – preparación del sitio, de una estructura metálica

Estructura

Rubro	Unidad	Cantidad
Hormigón simple para pedestales ($f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$)	m3	4.67
Hormigón simple escaleras, ($f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$), no inc. Encofrado	m3	5.81

Hormigón simple columnas, (f'c= 210 kg/cm ²), no inc. Encofrado	m ³	8.71
Acero de refuerzo (fy= 4200 kg/cm ²). Colocado en obra	kg	1476.32
Acero estructural A36 (Incluye placas base)	kg	60421.32
Placa colaborante 1x4 e=0.65mm. Hormigón 12cm	m ²	1028.35
Mampostería para bloque de 20cm	m ²	539.43
Mampostería para bloque de 15cm	m ²	413.24
Cubierta metálica	kg	7654.32
Enlucido vertical liso interior	m ²	1643.67
Enlucido de vigas	m ²	458.32
Enlucido de piso de losa	m ²	732.43

Tabla 5 - Tabla 3 - Cantidades de obra durante el proceso de construcción - estructura, de una edificación de estructura metálica

4. Análisis de Resultados

Los factores de emisión que se van a emplear en esta cuantificación son obtenidos a partir de algunas fuentes certificadas sobre inventarios ambientales y estas se refieren al Protocolo de Gases de Efecto Invernadero (GHG). Cabe mencionar que este Protocolo se desarrolló por países industrializados refiriéndose a su base de datos sobre la incidencia ambiental de los diferentes campos de la industria en donde se generan los GEI. De esta forma, para medir la huella de carbono vamos a utilizar dichos factores en base a las actividades del proceso constructivo de cada sistema estructural.

A continuación, se va a proporcionar la tabla de factores de emisión para proceder a hacer los cálculos específicos de las emisiones de gases de efecto invernadero durante el proceso de construcción de una estructura de hormigón armado y una estructura metálica (Erazo & Pardo, 2022):

Material / Actividad	Factor de emisión – etapa de construcción (Kg CO2 eq)
Tabla de monte	0.51
Limpieza y desbroce del terreno	4.78
Replanteo y nivelación con la estación total	0.03
Desalojo de material (a una distancia máxima de 10km)	68.43
Hormigón premezclado ($f'c= 240 \text{ kg/cm}^2$)	21.93
Hormigón simple para losas ($f'c= 240 \text{ kg/cm}^2$)	24.82
Hormigón simple ($f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$)	18.74
Acero de refuerzo de barras corrugadas. $f_y= 4200 \text{ kg/cm}^2$	0.05
Tabla contrachapada	0.60
Bloque 20x20x40 cm	2.28
Bloque 15x20x40 cm	1.96
Enlucido interior – cemento	0.46
Enlucido vigas – cemento	0.24
Enlucido losa – cemento	0.85
Acero estructural A36	0.64
Placa colaborante 1x4 e=0.65mm. H= 12cm	0.65
Estructura metálica para cubierta	4.12

Tabla 6 - Factores de emisión de kg Co2 eq durante el proceso de construcción de ambos sistemas estructurales

4.1. Cuantificación de la huella de carbono mediante los factores de conversión

4.1.1. Estructura de hormigón armado

	Rubro	Unidad	Cantidad	kg CO2 eq	kg CO2 total
Preparación del sitio	Obras preliminares – cerramiento provisional h=2.40m (tabla de monte)	m	26	0,51	13,26
	Limpieza y desbroce del terreno	m2	416	4,78	1988,48
	Replanteo y nivelación con estación total	m2	416	0,03	12,48
	Desalojo del material en volqueta	m3	12,5	68,43	855,375
Estructura gris	Hormigón premezclado para vigas y columnas ($f'c= 240 \text{ kg/cm}^2$)	m3	86,39	21,93	1894,5327
	Hormigón simple para gradas ($f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$)	m3	12,68	18,74	237,6232
	Acero de refuerzo ($f_y= 4200 \text{ kg/cm}^2$)	kg	25353,61	0,05	1267,6805
	Losa alivianada de hormigón simple ($f'c= 240 \text{ kg/cm}^2$), $e=0.20\text{m}$	m2	834,25	24,82	20706,085
	Encofrado de tabla contrachapada para vigas	m2	94,38	0,6	56,628
	Encofrado de tabla contrachapada para columnas	m2	250,31	0,6	150,186
	Encofrado de madera para losa	m2	1040,19	0,6	624,114
	Encofrado para gradas ($f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$)	m2	44,12	0,6	26,472
Mampostería para bloque de 20cm	m2	539,43	2,28	1229,9004	

	Mampostería para bloque de 15cm	m2	413,24	1,96	809,9504
	Cubierta metálica	kg	7654,32	4,12	31535,7984
	Enlucido vertical liso interior	m2	1643,67	0,46	756,0882
	Enlucido de vigas	m2	458,32	0,24	109,9968
	Enlucido de piso de losa	m2	732,43	0,85	622,5655

Total=	62897,2161 kg CO2
--------	-------------------

Tabla 7 - Resumen de la cuantificación de huella de carbono (kg CO2) durante el proceso constructivo de la edificación de hormigón armado

4.1.2. Estructura metálica

	Rubro	Unidad	Cantidad	kg CO2 eq	kg CO2 total
Preparación del sitio	Obras preliminares – cerramiento provisional h=2.40m (tabla de monte)	M	26	0,51	13,26
	Limpieza y desbroce del terreno	m2	416	4,78	1988,48
	Replanteo y nivelación con estación total	m2	416	0,03	12,48
	Desalojo del material en volqueta	m3	12,5	68,43	855,375
Estructura	Hormigón simple para pedestales (f'c= 240 kg/cm2)	m3	4,67	21,93	102,4131
	Hormigón simple escaleras, (f'c= 210 kg/cm2), no inc. Encofrado	m3	5,81	18,74	108,8794

Hormigón simple columnas, ($f'c= 210$ kg/cm ²), no inc. Encofrado	m ³	8,71	18,74	163,2254
Acero de refuerzo ($f_y= 4200$ kg/cm ²). Colocado en obra	kg	1476,32	0,05	73,816
Acero estructural A36 (Incluye placas base)	kg	60421,32	0,64	38669,6448
Placa colaborante 1x4 e=0.65mm. Hormigón 12cm	m ²	1028,35	0,65	668,4275
Mampostería para bloque de 20cm	m ²	539,43	2,28	1229,9004
Mampostería para bloque de 15cm	m ²	413,24	1,96	809,9504
Cubierta metálica	kg	7654,32	4,12	31535,7984
Enlucido vertical liso interior	m ²	1643,67	0,46	756,0882
Enlucido de vigas	m ²	458,32	0,24	109,9968
Enlucido de piso de losa	m ²	732,43	0,85	622,5655

Total=	77720,3009 kg CO ₂
--------	-------------------------------

Tabla 8 - Resumen de la cuantificación de huella de carbono (kg CO₂) durante el proceso constructivo de la estructura metálica

4.2. Presentación de los resultados

Estructura de hormigón armado

Después de los cálculos respectivos para determinar la cantidad de emisiones de CO₂ (huella de carbono) durante el proceso constructivo enfocándonos en dos procesos como la preparación del sitio y la estructura gris de la edificación de una estructura de hormigón armado de 4 pisos de altura se obtuvo un total de 62897,22 kg CO₂ donde se puede observar una mayor incidencia en dos actividades pertenecientes al desarrollo de la estructura tales como la cubierta metálica (31535,80 kg CO₂) y la losa alivianada de hormigón simple (20706,09 kg CO₂).

Desde mi perspectiva la cubierta metálica generó mayores emisiones de CO₂ ya que conlleva el uso de maquinaria y herramientas necesarias para realizar el corte de los metales, la soldadura y la cantidad de acero para elaborar la estructura. Además, en la etapa de construcción esta actividad representa una mayor demanda y por ello su factor de emisión es mayor que en otras categorías dentro del ciclo de vida del producto.

En vista de ello las actividades mencionadas durante este proceso constructivo se estudiaron dentro del alcance 1 de la metodología ISO 14067 ya que eran propias de la organización y no obtuvimos ninguna actividad dentro del alcance 2.

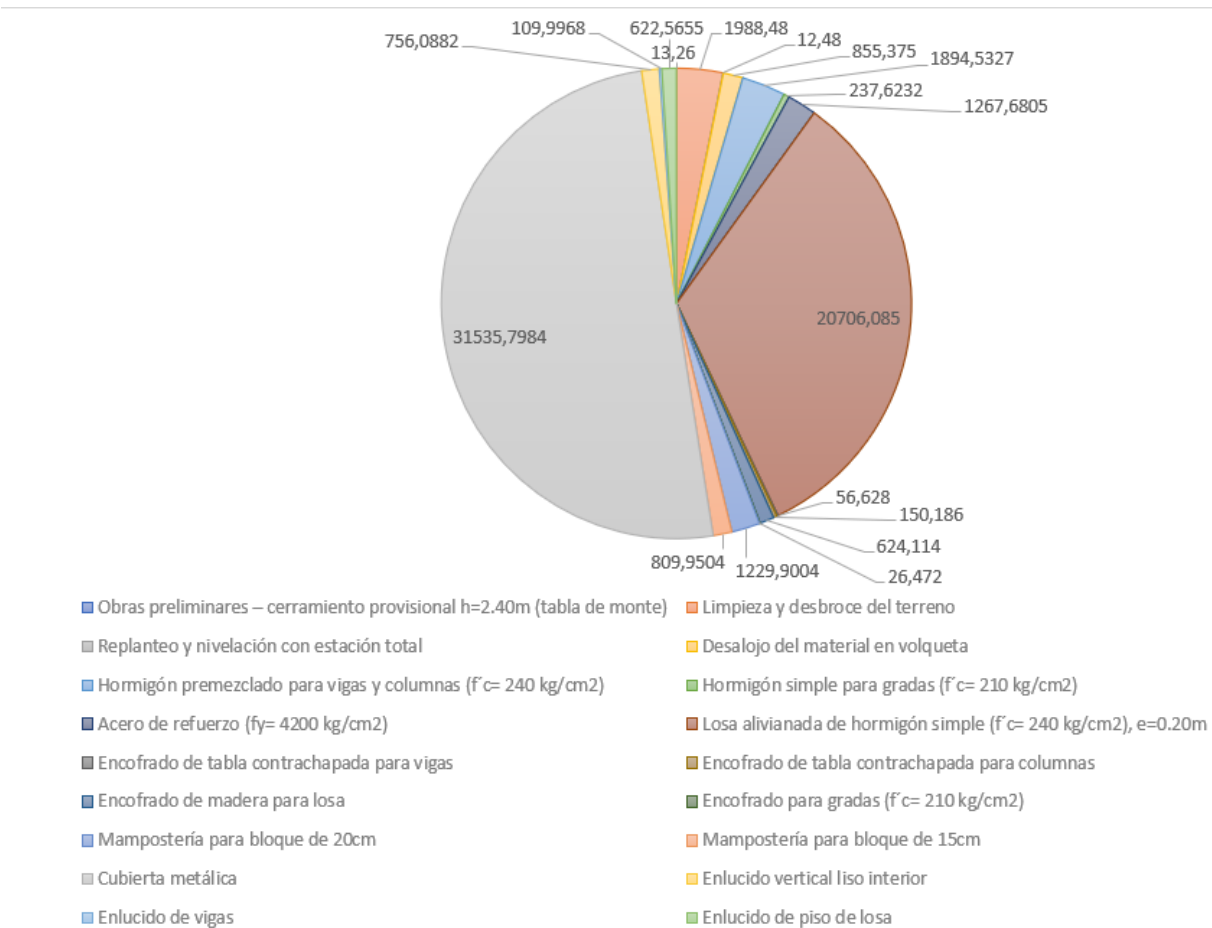


Ilustración 6 - Resumen de actividades que inciden en la producción de CO2 - huella de carbono (edificación de hormigón armado)

A simple vista la ejecución de la estructura gris provoca grandes emisiones de CO2 (95% - 60027,62 kg CO2) siendo este el gas predominante dentro del estudio y debemos enfocarnos en esta fase debido que podremos comparar junto con la elaboración de la estructura metálica y ver cual genera mayor cantidad de emisiones de GEI.

Estructura de hormigón armado

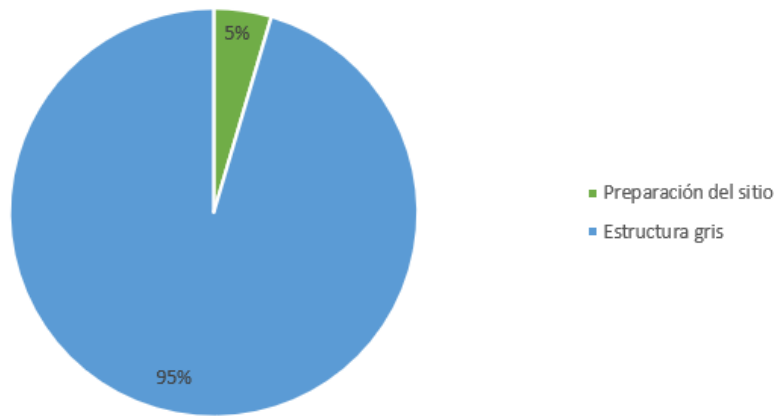


Ilustración 7 - Porcentajes por cada etapa del proceso constructivo - hormigón armado

Estructura metálica

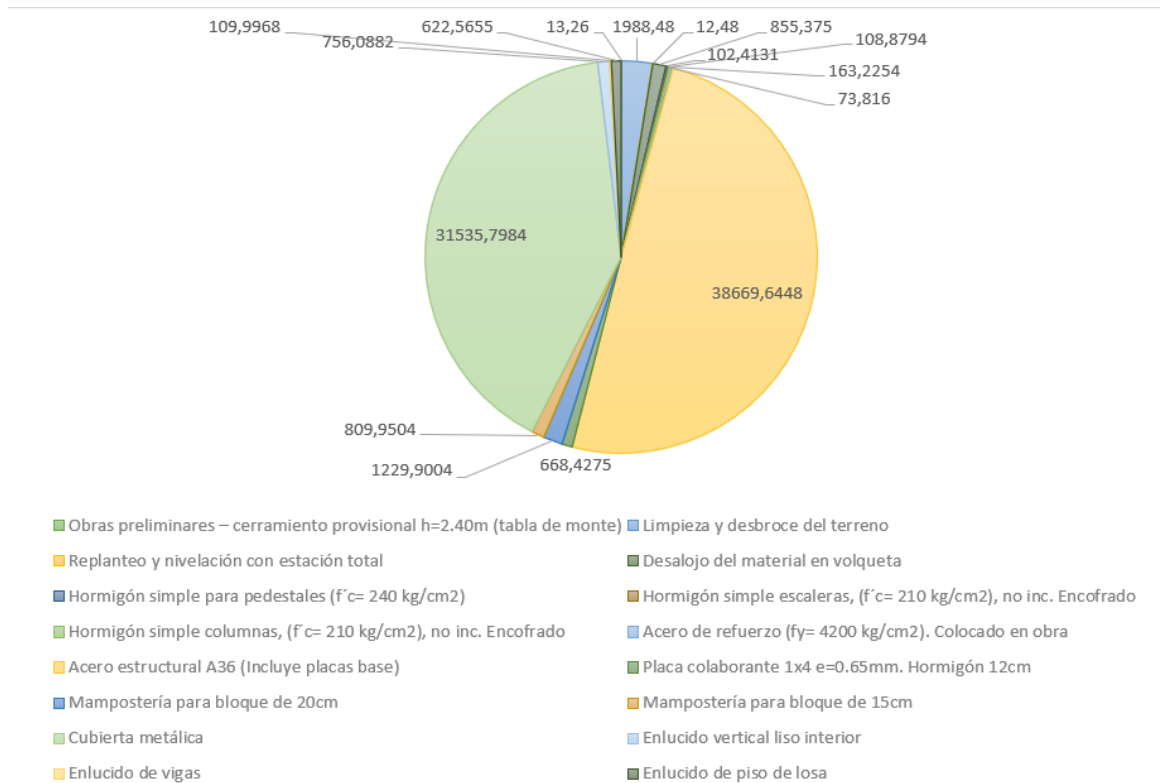


Ilustración 8 - Resumen de actividades que inciden en la producción de CO2 - huella de carbono (estructura metálica)

A partir de los cálculos realizados para medir las emisiones de CO₂ mediante la huella de carbono durante el proceso constructivo enfocándonos en dos procesos como la preparación del sitio y la estructura de la edificación metálica de 4 pisos de altura se obtuvo un total de 77720,30 kg CO₂ donde existe un mayor impacto en dos actividades pertenecientes al desarrollo de la estructura tales como el uso de acero estructural A36 (38669,64 kg CO₂) y la cubierta metálica (31535,80 kg CO₂).

Como era de esperar el uso de acero A36 para elaborar el sistema estructural es la actividad predominante que produce emisiones de CO₂ porque el acero es el elemento que más se empleó para construir esta estructura principalmente usado en vigas, columnas y otros mecanismos de diseño presentados en los planos. Además, para unir a estos elementos se usa una soldadura específica lo cual genera partículas en el aire y contribuye a la contaminación por las emisiones del mismo.

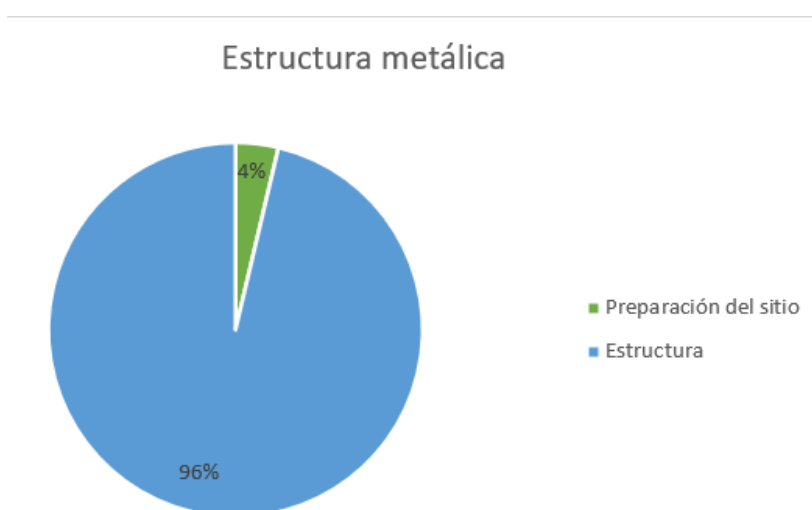


Ilustración 9 - Porcentajes por cada etapa del proceso constructivo - estructura metálica

Como se puede observar la ejecución de la estructura metálica provoca grandes emisiones de CO₂ (96% - 74850,71 kg CO₂) siendo este el gas predominante dentro del estudio y debemos enfocarnos en esta fase debido que podremos comparar junto con la elaboración de la estructura de hormigón armado y ver cual genera mayor cantidad de emisiones de GEI.

Comparación

La contaminación durante el proceso constructivo de una estructura de hormigón armado y una estructura metálica dependen de diversos factores como las condiciones de la zona, regulaciones ambientales y las prácticas de construcción. En este caso de estudio se evidenció que la estructura metálica es la que mayor huella de carbono produce durante el proceso de construcción (77720,30 kg CO₂) en cambio la estructura de hormigón armado emite (62897,22 kg CO₂). Desde mi perspectiva, se obtuvieron estos resultados ya que para poder ensamblar y unir los elementos de la estructura de acero se lo realiza en campo lo cual genera mayor producción durante la etapa que se está evaluando y el factor de emisión que se emplea en el acero estructural A36 es considerable.

Es importante reducir la huella de carbono para futuras obras civiles y esto se debe tomar en cuenta desde el inicio del ciclo de vida del producto hasta su uso en aplicaciones diversas para que tenga un desarrollo más eficiente y amigable con el medio ambiente. Verbigracia, algunas estrategias para minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero es desde el uso de materiales más sostenibles y la implementación de tecnologías limpias en la construcción del sistema estructural. Para que este pueda ser un material sostenible se puede tomar en cuenta el reciclaje del acero esto quiere decir que se puede fundir y volver a utilizar sin perder sus propiedades físicas, es decir puede reducir la demanda de materia prima y de esta forma reducir sus emisiones durante su producción.

Finalmente, para ambas estructuras es importante tener desde la etapa inicial un diseño eficiente en donde podamos tener estructuras más sostenibles que ayuden a mitigar el impacto ambiental en el cual los materiales a emplear no comprometan a la seguridad o durabilidad del sistema estructural. Por ello, estas medidas son esenciales para enfrentar los desafíos ambientales y climáticos en la industria de la construcción.

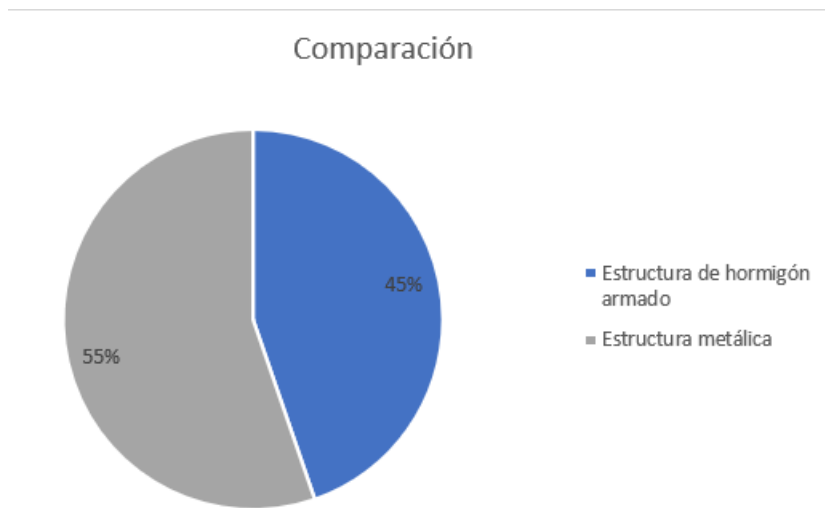


Ilustración 10 - Comparación de la huella de carbono entre una estructura de hormigón armado y una estructura metálica

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

Como resultado predominante dentro de este estudio se logró cuantificar la huella de carbono de ambos sistemas estructurales durante su proceso de construcción específicamente en la preparación del sitio y el desarrollo de la estructura y se tomó en cuenta estas operaciones ya que son las más importantes dentro de la ejecución del proyecto. Por consiguiente, al referirnos a la recopilación de datos realizada por el Protocolo de Gases de Efecto Invernadero se obtuvieron los factores de emisión respectivos para cada actividad y al multiplicar este valor por las cantidades de obra tenemos un total de kg CO₂ emitidos al ambiente.

El sistema estructural que genera mayor huella de carbono es la estructura metálica con un total de 77720,30 kg CO₂, en cambio, la edificación de hormigón armado produjo 62897,22 kg CO₂. La diferencia entre estos es de 14823,08 kg CO₂ y esto se debe a la cantidad y tipo de acero empleado en la obra metálica, a su vez, el ensamblaje y unión de las

vigas y columnas se las realiza en sitio lo cual aumenta su producción en la etapa de evaluación.

Se identificaron las diversas fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) durante el proceso constructivo de la edificación de hormigón armado y la estructura metálica. Como se mencionó anteriormente nos enfocamos en dos fases que fue la preparación del sitio y el desarrollo de la estructura. Dentro de este estudio las principales fuentes de emisión de GEI para la obra de hormigón armado fue el transporte de materiales tales como la mezcla de hormigón y varillas de acero (como los más importantes) hasta el lugar de construcción ya que los vehículos consumen combustibles fósiles y emiten CO₂ a la atmósfera. Además, la posible mala gestión de residuos de construcción ya finalizado el procedimiento de la realización de la estructura puede generar CH₄ y CO₂ en grandes cantidades en la zona de los vertederos.

Simultáneamente, para desarrollar una estructura metálica existe el transporte de materiales hasta la ubicación de la obra civil y con ellos obtenemos emisiones de CO₂ debido a los vehículos usados durante esta etapa. De igual forma, para realizar las uniones de los elementos estructurales se usa soldadura el cual puede liberar gases y compuestos contaminantes como el dióxido de azufre (SO₂). En este caso también se tomo en cuenta que existe una posible mala gestión de residuos lo cual puede llevar a la descomposición de materiales y la liberación de metano al medio ambiente.

Por otro lado, el mitigar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) durante el proceso de construcción de ambas edificaciones es relevante ya que será posible aminorar el impacto ambiental del proyecto y posteriormente de varias obras civiles, no solo durante el proceso de construcción sino en todo el ciclo de vida del proyecto. Algunas estrategias para lograrlo es la optimización en el diseño específicamente en el uso de materiales y recursos. Además, se puede promover la reutilización de materiales de construcción y de esta forma reducir la elaboración de nuevos materiales y las emisiones de CO₂ que se dan en este proceso. Al mismo tiempo, se debe evitar una gran generación de desperdicios y es posible hacerlo si existe una adecuada logística en el lugar de construcción.

Finalmente, es indispensable emplear actividades de desarrollo sostenibles y por ello, algunas prácticas certificadas son en base al sistema LEED (Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental) que especifican la disminución de emisiones de CO₂.

5.2. Recomendaciones

La reducción de la huella de carbono tanto en una estructura de hormigón armado y una estructura metálica requiere de un enfoque holístico en cada una de las etapas del ciclo de vida del proyecto. Cabe mencionar que esto no solo beneficia al medio ambiente, sino que la empresa u organización puede obtener ahorros económicos y diseñar edificios de manera eficiente y sostenible. Algunas recomendaciones son:

- Evaluar cada una de las etapas del ciclo de vida de los sistemas de construcción y de sus materiales para identificar si es posible reducir las emisiones de CO₂ en alguna fase del proyecto.
- Se puede optar por materiales de construcción con una huella de carbono no tan considerable tales como el cemento con bajo contenido de carbono o el acero reciclado dependiendo de la estructura a ejecutar.
- Utilizar fuentes de energía renovable para llegar a una sostenibilidad ambiental. Por ejemplo, con el uso de paneles solares para el correcto funcionamiento de la red eléctrica del edificio (esto ya en la fase de operación del proyecto).
- El implementar sistemas de seguimiento y medición de la huella de carbono (en unidades de kg CO₂e o toneladas CO₂e) a lo largo del ciclo de vida del proyecto para evaluar el progreso y si es posible realizar un cambio, es decir, buscar medidas sostenibles sin interferir en la vida útil del mismo.

6. Bibliografía

- ARCHDESK. (04 de marzo de 2021). *Cómo afecta la construcción al medioambiente?*
Recuperado el 01 de octubre de 2023, de <https://archdesk.com/es/blog/como-afecta-la-construccion-al-medio-ambiente/>
- BECOSAN. (28 de enero de 2020). *Cemento, principal conglomerante de la construcción.*
Recuperado el 03 de octubre de 2023, de <https://www.becosan.com/es/que-es-el-cemento-en-la-construccion/>
- Colegio de Ingenieros Civiles. (01 de septiembre de 2022). Eficiencia ambiental: la huella de carbono en la industria de la construcción. *La voz*, pág. 1. Recuperado el 10 de septiembre de 2023, de <https://www.lavoz.com.ar/espacio-institucional/eficiencia-ambiental-la-huella-de-carbono-en-la-industria-de-la-construccion/>
- El Mercurio. (14 de noviembre de 2021). *Impacto ambiental en la construcción.* Recuperado el 02 de octubre de 2023, de <https://elmercurio.com.ec/2021/11/14/impacto-ambiental-de-la-construccion/>
- Erazo, R., & Pardo, V. (2022). análisis comparativo del ciclo de vida-huella de carbono de una edificación de hormigón armado frente a una edificación de estructura metálica. *Ingenio*, 20-37. Recuperado el 26 de octubre de 2023, de <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/INGENIO/article/view/4306/5314>
- Espíndola, C., & Valderrama, J. (02 de diciembre de 2011). *Huella de carbono.* Recuperado el 29 de septiembre de 2023, de Parte 1: conceptos, métodos de estimación y complejidades metodológicas: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v23n1/art17.pdf>
- Fernandez, L., Yurivilca, R., & Minoja, L. (11 de febrero de 2019). *Edificios vs cambio climático.* Recuperado el 02 de octubre de 2023, de <https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/edificios-vs-cambio-climatico-construyendo-adaptacion-y-mitigacion/>

- García, J., Quito, J., & Perdomo, J. (s.f.). *Análisis de la huella de carbono en la construcción y su impacto sobre el ambiente*. Recuperado el 10 de septiembre de 2023, de <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/db04e82c-180e-4775-9242-d50a6b56ff05/content>
- Global Standards. (2023). *ISO 14067:2018 GASES DE EFECTO INVERNADERO – HUELLA DE CARBONO DE PRODUCTOS – REQUISITOS Y DIRECTRICES PARA CUANTIFICACIÓN*. Recuperado el 23 de octubre de 2023, de <https://www.globalstd.com/cursos/iso-140672018-gases-de-efecto-invernadero-huella-de-carbono-de-productos-requisitos-y-directrices-para-cuantificacion/>
- ISO. (2004). *ISO 14001:2004*. Recuperado el 23 de octubre de 2023, de Sistemas de gestión ambiental - Requisitos con orientación para su uso: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14001:ed-2:v1:es>
- Línea verde. (19 de enero de 2023). *¿Qué es la huella de carbono?* Recuperado el 10 de septiembre de 2023, de <http://www.lineaverdeceutatrace.com/lv/noticiasDestacadas.asp?noticia=37675>
- Macias, O. (25 de marzo de 2019). *Como impacta la construcción al medio ambiente?* Recuperado el 02 de octubre de 2023, de <https://www.linkedin.com/pulse/como-impacta-la-construccion-al-medio-ambiente-omar-macias/?originalSubdomain=es>
- Mellado, N., & Carrasco, S. (2021). Huella de carbono en Latinoamérica como herramienta de medición de impacto ambiental en Instituciones Privadas. *Ciencia Latina*, 1-21. Recuperado el 01 de octubre de 2023, de [file:///C:/Users/Melany/Downloads/1050-Texto%20del%20art%C3%ADculo-4009-1-10-20211103%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Melany/Downloads/1050-Texto%20del%20art%C3%ADculo-4009-1-10-20211103%20(1).pdf)
- Ministerio del Ambiente. (12 de abril de 2017). *Código orgánico del ambiente*. Recuperado el 03 de octubre de 2023, de https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/01/CODIGO_ORGANICO_AMBIENTE.pdf

- Miñan, M. (2012). *Materiales sostenibles en la edificación*. Recuperado el 03 de octubre de 2023, de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/17708/TESI-Materiales%20sostenibles%20en%20la%20edificaci%C3%B3n.%20Residuos%20de%20C.pdf?sequence=1>
- Naranjo, E. (2019). *Tesis de grado*. Recuperado el 10 de septiembre de 2023, de Propuesta de disminución de huella de carbono para construcciones basadas en el edificio de ciencias básicas de las universidad técnica de Ambato: <file:///C:/Users/gguayaquil/Downloads/Tesis%20I.%20C.%201365%20-%20Naranjo%20Rea%20Esteban%20Pa%C3%BAI.cleaned.pdf>
- National Geographic. (30 de agosto de 2023). *¿Qué es el calentamiento global?* Recuperado el 10 de septiembre de 2023, de <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/que-es-el-calentamiento-global>
- Plan A. (s.f.). *What is the Greenhouse Gas (GHG) Protocol?* Recuperado el 24 de octubre de 2023, de <https://plana.earth/glossary/greenhouse-gas-ghg-protocol#what-is-the-difference-between-iso-14064-and-ghg-protocol>
- Quispe, I. (s.f.). *Que son las estructuras metálicas*. Recuperado el 03 de octubre de 2023, de <https://arcux.net/blog/que-son-las-estructuras-metalicas/>
- Red Española. (23 de diciembre de 2020). *Cuál es el estado actual del cambio climático en el mundo?* Recuperado el 02 de octubre de 2023, de <https://www.pactomundial.org/noticia/cual-es-el-estado-actual-del-cambio-climatico-en-el-mundo/#:~:text=En%20concreto%2C%20se%20estima%20que,comprendido%20entre%202020%20y%202024.>
- Schneider, H., & Samaniego, J. (marzo de 2010). *La huella de carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios*. Recuperado el 10 de septiembre de 2023, de <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/f3677647-3a1c-4326-8342-5e10bfa2fc40/content>

Tianjin Jinhai Special Coatings & Decoration Co., Ltd. (2021). *Recubrimiento de estructuras de acero*. Recuperado el 03 de octubre de 2023, de <https://es.paint-in-china.com/steel-structure-paint/>

Trespalacios, J., Blanquicett, C., & Carrillo, P. (octubre de 2018). *Gases y efecto invernadero*. Recuperado el 10 de septiembre de 2023, de <https://www.local2030.org/library/585/Gases-y-efecto-invernadero.pdf>