

Metodología para estimar emisiones de GEI y consumo de agua en obras civiles del sector oil & gas en Colombia

Methodology for estimating GHG emissions and water consumption in civil engineering projects in the oil & gas sector in Colombia

YESID ALBERTO BELTRÁN-PÉREZ¹ - CAMILO ANDRÉS PERDOMO-HORTA² - NANCY TORRES-CASTELLANOS³

1. Magíster en Ingeniería Civil. Universidad escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
yecid.beltran-p@mail.escuelaing.edu.co, <https://orcid.org/0009-0006-7544-5866>

2. PhD. Ing. Civil. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
camilo.perdomo-h@escuelaing.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-1413-888X>

3. PhD. Ingeniera Civil. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
nancy.torres@escuelaing.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-3293-5444>

Recibido: 02/11/2025 Aceptado: 15/11/2025

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista
<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

En este artículo se presenta una metodología estandarizada para estimar las emisiones de CO₂ y el consumo de agua en proyectos de construcción del sector oil & gas en Colombia. La propuesta integra directrices del IPCC y el Protocolo de Kioto, incorporando principios de sostenibilidad y economía circular. A partir de la definición de actividades constructivas, medios de transporte y factores internacionales de emisión y consumo hídrico, se cuantifican en forma trazable las variables ambientales. La metodología se consolida en una herramienta práctica de cálculo en hojas de Excel, aplicada a un caso de estudio de diseño de contrapozo. Los resultados evidencian reducciones de hasta 19 % en emisiones de CO₂ y optimización del consumo hídrico mediante alternativas sostenibles, demostrando que la inclusión de criterios ambientales en etapas de diseño mejora la toma de decisiones en obras civiles del sector.

Palabras claves: gases de efecto invernadero (GEI), IPCC, Protocolo de Kioto, huella hídrica.

Abstract

This paper presents a standardized methodology for estimating CO₂ emissions and water consumption in Oil & Gas construction projects in Colombia. The approach integrates IPCC and Kyoto Protocol guidelines, combining sustainability and circular economy principles. Based on the definition of construction activities, transportation routes, and internationally recognized emission and water consumption factors, environmental variables are quantified in a traceable manner. The methodology is implemented through a practical spreadsheet tool and applied to a counterwell design case study. Results indicate a reduction of up to 19 % in CO₂ emissions and better water use when sustainable options are used. This emphasizes the need to include environmental factors early in the design process to enhance decision-making in construction projects.

Keywords: greenhouse gases (GHG), IPCC, Kyoto, Protocol, water footprint.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático constituye uno de los principales desafíos ambientales y socioeconómicos actuales, con efectos directos sobre la calidad del aire, el suelo y la disponibilidad hídrica, lo que impacta la sostenibilidad de los sistemas productivos (IPCC, 2019). La mitigación de estos impactos exige estrategias basadas en eficiencia energética e infraestructuras verde y azul, en las que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente el dióxido de carbono (CO_2), representan el factor más determinante del calentamiento global (Ingei, 2025).

El sector de la construcción es responsable de una parte significativa de las emisiones globales y del consumo de agua dulce, equivalentes a 14.144 MtCO_2 en 2024, con incrementos del 5 % entre 2020 y 2024 (PNUMA; GlobalABC, 2025). Las industrias de acero y concreto aportan el 10 % y 8 %, respectivamente (World Steel Association, 2025). En Colombia, el sector de la construcción emitió 100,90 MtCO_2 en 2023, que representan entre el 7 y 9 % de las emisiones nacionales, distribuidas en materiales (60 %), operación (30 %) y transporte (10 %) (CCCS et al., 2022). Particularmente, en el segmento de oil & gas (O&G) existe una limitada disponibilidad de información sistematizada, lo que restringe la capacidad de las empresas para reportar y gestionar sus impactos ambientales de manera trazable. Contribuye con el 5 % de las emisiones del sector energético, mostrando una tendencia creciente asociada al desarrollo de infraestructura para exploración y transporte (ACP, 2004).

Ante esta brecha, en el presente artículo se propone una metodología práctica y verificable para estimar las emisiones de GEI y el consumo hídrico en obras civiles del sector O&G en Colombia. La propuesta integra directrices internacionales (IPCC, Protocolo de Kioto) y fuentes nacionales, consolidándose en una herramienta de cálculo que facilita la cuantificación y comparación de alternativas constructivas.

El objetivo principal es proporcionar un marco metodológico estandarizado que permita incorporar criterios ambientales en las etapas de diseño y planeación de proyectos civiles del sector O&G, así como contribuir al cumplimiento de compromisos internacionales y a la toma de decisiones sostenibles.

Es importante precisar que los cálculos hechos en esta investigación se enfocan en dos variables técnicas específicas:

- **Emisiones de CO_2 .** Expresadas en toneladas de dióxido de carbono equivalente, derivadas de la combustión de combustibles fósiles, la producción de materiales y la operación de equipos. Estos cálculos se basan en factores de emisión reconocidos internacionalmente (IPCC, UPME, entre otros) y constituyen un insumo esencial para dar cumplimiento a compromisos internacionales como el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París.
- **Consumo de agua.** Expresado en metros cúbicos, asociado al uso directo de agua en procesos constructivos como mezclado de concreto, perforación, limpieza y transporte. La estimación se fundamenta en datos reportados por sistemas nacionales como el Sistema de Información del Recurso Hídrico (SIRH) y en bibliografía técnica especializada incluida en el presente documento.

Teniendo en cuenta este contexto, se propone una metodología práctica para estimar emisiones de GEI y consumo hídrico en obras civiles del sector oil & gas, integrable en reportes estandarizados y alineada con compromisos internacionales de mitigación. En este orden de ideas, se busca cerrar la brecha existente en la estimación integrada de emisiones de GEI y consumo hídrico en el sector oil & gas en Colombia, mediante el desarrollo de una metodología trazable, replicable y aplicable a procesos reales de diseño y construcción. A diferencia de enfoques tradicionales, esta propuesta permite la evaluación simultánea de variables ambientales claves, facilitando la toma de decisiones sostenibles desde etapas tempranas del proyecto.

REVISIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA (ESTADO DEL ARTE)

El sector de la construcción consume aproximadamente el 30 % del agua dulce global (PNUMA; GlobalABC, 2025). No obstante, en investigaciones con enfoques más restringidos se reportan valores cercanos al 16 % (León Flórez y Ruiz Báez, 2022), lo que refleja la variabilidad metodológica y la necesidad de estandarizar métricas de consumo hídrico. En este sentido, la construcción sostenible emerge como una alternativa eficaz, capaz de reducir hasta en un 50 % el consumo de agua y en un 35 % las emisiones de dióxido de carbono (León Flórez y Ruiz Báez, 2022).

Esta reducción se consigue por medio de la implementación de sistemas de reutilización de aguas lluvias y grises para actividades no domésticas, así como mediante el uso de tecnologías eficientes en edificaciones.

En varios proyectos internacionales se ha demostrado la viabilidad técnica y económica de estas prácticas, aun cuando en Colombia su adopción todavía es limitada. El Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS) reporta que cerca del 45 % de las edificaciones nuevas incluyen sistemas de ahorro de agua, pero la integración de energías alternativas continúa siendo marginal (CCCS et al., 2022). En el sector de hidrocarburos, certificaciones como LEED y CASA Colombia ofrecen marcos de referencia para la eficiencia hídrica y energética, mientras que la economía circular aporta lineamientos para la gestión de residuos y el tratamiento de aguas residuales.

En el sector de hidrocarburos (O&G), estas estrategias se pueden adaptar a instalaciones industriales mediante certificaciones como LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) y CASA Colombia, que promueven la eficiencia tanto hídrica como energética y la trazabilidad ambiental. Además, la economía circular ofrece un marco para la gestión de residuos de construcción y demolición (RCD), e incluye el tratamiento de agua residual, lo cual resulta especialmente relevante en proyectos de infraestructura industrial (Sarasti y Yáñez, 2019).

Por otro lado, en la Guía CAR para el cálculo de huella de carbono municipal se propone una metodología basada en el IPCC (2006) y el Global Protocol for Community Scale Greenhouse Gas Emission Inventories (GPC, 2014), que permite estimar emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por sector. Esta herramienta ayuda a clasificar las emisiones en alcances 1, 2 y 3, considerando fuentes como combustibles fósiles, electricidad, procesos industriales, refrigerantes y lubricantes. Para el sector O&G, esta guía resulta útil en la planificación y operación de plantas, al permitir estimaciones detalladas de emisiones por transporte, residuos y consumo energético (Fong et al., 2014).

Complementariamente, en la Guía CIAT (2021) se establecen criterios para certificar reducciones de GEI en proyectos de hidrocarburos, y se definen tres tipos de intervención: recuperación de gas asociado, reducción de fugas físicas mediante tecnologías LDAR (*Leak*

Detection and Repair) avanzadas y mejora de eficiencia en sistemas de quema de gas (teas).

En la metodología se incluyen fórmulas para cuantificar reducciones en niveles 2 y 3, criterios de adicionalidad, línea base y monitoreo riguroso mediante técnicas como cromatografía, sensores y bolsas calibradas. Este enfoque es aplicable a proyectos de infraestructura que involucren compresión, transporte y tratamiento de gas, en los que la trazabilidad y verificación de resultados son fundamentales (CIAT, 2021).

Finalmente, el Acuerdo de París establece un marco internacional para enfrentar el cambio climático, promoviendo metas de mitigación, adaptación, financiamiento y transparencia. Colombia, como país firmante, se compromete a reducir el 20 % de sus emisiones proyectadas al año 2030, con posibilidad de alcanzar el 30 % mediante cooperación internacional. La implementación nacional exige que los planes de desarrollo territorial e infraestructura incorporen criterios climáticos, sobre todo en sectores vulnerables como el energético e industrial.

La escasez hídrica derivada del cambio climático afecta directamente la operación de hidroeléctricas y procesos industriales, entre estos los del sector O&G, lo que refuerza la necesidad de adoptar medidas como la gestión de metano en yacimientos, captura y almacenamiento de carbono, sustitución de carbón por biomasa y eficiencia energética en procesos industriales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020).

El estado del arte revisado aporta metodologías y referentes normativos que se implementaron en la investigación, particularmente en la integración de prácticas de construcción sostenible y guías de cálculo de huella de carbono e hídrica. Estos insumos fueron útiles para estructurar matrices verificables y para garantizar la trazabilidad de los resultados en proyectos industriales del sector O&G.

En la revisión se evidencian avances significativos en metodologías de cálculo de huella de carbono e hídrica, así como en prácticas de construcción sostenible; sin embargo, persisten vacíos relevantes:

- La falta de metodologías integradas que combinen simultáneamente emisiones de carbono y consumo de agua.
- La escasa adaptación de estudios internacionales al contexto colombiano.

- La limitada trazabilidad en sistemas de monitoreo aplicados al sector oil & gas.

Con este artículo se busca llenar dichos vacíos mediante el desarrollo de una herramienta práctica y verificable que permita estimar en conjunto las emisiones de GEI y el consumo hídrico en obras civiles del sector O&G en Colombia, contribuyendo a la toma de decisiones sostenibles y al cumplimiento de compromisos internacionales.

En síntesis, la investigación no se nutre solamente del estado del arte, sino que lo supera al proponer soluciones técnicas contextualizadas y verificables para la sostenibilidad en el sector O&G colombiano.

METODOLOGÍA

La metodología propuesta se organiza en cuatro fases principales que permiten estimar de manera trazable las emisiones de GEI (alcance 3) y el consumo hídrico en proyectos civiles del sector oil & gas:

Estimación de GEI alcance 3 mediante factores de emisión para materiales, transporte y maquinaria

Se identifican las actividades constructivas relevantes (excavación, concreto, acero, transporte, maquinaria) y se cuantifican en términos de volumen, masa o unidades de obra.

Estimación de emisiones de GEI

Las emisiones de CO₂ equivalente calculadas con esta metodología corresponden a un alcance 3, que significa emisiones que se derivan de las emisiones indirectas, tanto las que se generan aguas arriba para que la empresa pueda llevar a cabo sus operaciones, a partir de la utilización y el reciclado de sus operaciones. Aun cuando son el resultado de las operaciones de la empresa, provienen de fuentes que no son de su propiedad ni están controladas por esta. En la mayoría de las ocasiones, sobre todo en el entorno industrial, el alcance 3 es donde se acumula gran parte de las emisiones (Greenhouse Gas Protocol, 2024). Las emisiones de GEI, para cada actividad determinada, se estiman utilizando la ecuación 1, mientras que las cantidades de CO₂ equivalente se calculan de acuerdo con la ecuación 2.

$$\text{Emisiones de GEI} = \text{Datos actividad} \times \text{Factor de emisión} \quad (1)$$

Donde:

- Datos de actividad = cantidad de material, volumen excavado o tiempo de operación.
- Factor de emisión = coeficiente de CO₂e por unidad de actividad (kg CO₂e/m³, kg CO₂e/kg, etc.).

$$\text{CO}_2\text{e} = \text{Emisiones GEI} \times \text{Potencial de calentamiento global} \quad (2)$$

Donde el potencial de calentamiento global se toma como 1,0 para CO₂.

En la ecuación 1, el término “Datos actividad” representa la cantidad de recursos, materiales o equipos invertidos en la ejecución de una actividad constructiva específica. En la ecuación 2, CO₂eq representa la cantidad de CO₂ equivalente producido por una actividad particular. El factor de emisión y el potencial de calentamiento global mostrados en las ecuaciones 1 y 2 se discuten más adelante.

Dado que la metodología propuesta en este artículo es de alcance 3, las emisiones de CO₂eq consideran emisiones producidas por los medios de transporte requeridos por las actividades y la maquinaria empleada. En esta investigación, el primer aspecto se consideró mediante la definición de diferentes rutas típicas de transporte de materiales, como concretos, aceros y los más comunes empleados en el sector O&G; el segundo aspecto se tomó en cuenta por medio de la consideración de un rendimiento para cada máquina requerida y sus emisiones equivalentes fueron los rendimientos por hora trabajada o los consumos de energía por hora laborada. Estos aspectos están considerados directamente en el factor de emisión contenido en la ecuación 1, como se muestra en la ecuación 3.

$$\text{Emisiones de GEI} = \text{Datos actividad} \times \text{Factor de emisión} + \text{Factor de emisión de maquinaria} \times \text{Rendimiento/h} \quad (3)$$

Estimación de consumo de agua

En cuanto al consumo de agua, que también se desagrega por actividades para los propósitos de esta investigación, se estima por medio de la ecuación 4.

$$\text{Consumo de agua} = \frac{\text{Cantidad de producto}}{\text{Factor de agua consumida}} \quad (4)$$

Donde:

- *Cantidad de producto* = volumen de concreto, perforación o limpieza.
- *Factor de agua consumida* = coeficiente en m³ por unidad de actividad.

En la ecuación 4, la cantidad de producto corresponde, esencialmente, a los datos de actividad en la ecuación 1, mientras que el factor de agua consumida se discute, también, más adelante en este artículo.

Integración en herramienta de cálculo

Los factores de emisión y consumo se incorporan en una hoja de cálculo que permite ingresar datos de obra y rutas de transporte. La herramienta genera automáticamente las estimaciones de CO₂eq y consumo hídrico, facilitando la comparación entre alternativas constructivas.

Posteriormente, se aplicó a un caso de estudio correspondiente a un contrapozo en construcción convencional, y se hizo una comparación entre dos opciones sostenibles (contrapozo metálico y concreto de bajas emisiones).

Factores de emisión por materiales

Los factores de emisión por materiales corresponden a unidades de masa, y se adoptaron de acuerdo con los coeficientes reportados por el IPCC (2019).

Factores de emisión por transporte

Los factores de emisión por transporte corresponden a los kg de CO₂eq/tkm por material transportado. Se definieron diferentes medios de transporte: transporte terrestre, marítimo, aéreo y férreo. Además, las rutas consideradas corresponden a rutas típicas que se implementan para el transporte de materiales en proyectos O&G en el país, y se consideraron transportes de materiales por vía aérea, como aceros y aditivos especiales. Las emisiones para cada medio de transporte se obtuvieron implementando coeficientes establecidos por el IPCC (2019) para los factores de emisión, y a partir de

distancias reales medidas con la ayuda de *software* como My Maps de Google, el cual genera archivos tipo .kmz con la longitud de cada tramo.

Factores de emisión por maquinaria

Para aquellas actividades que requieren que alguna maquinaria esté presente para su fabricación o ejecución, se consideraron factores de emisión por maquinaria que corresponden a los rendimientos por hora de cada maquinaria y equipo. Estos valores se estiman a partir de factores de emisión establecidos por el IPCC (2019) y los rendimientos de la máquina específica, adoptados según lo reportado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España (Miteco, 2024) (por ejemplo, bulldózer potencia mínima 120 hp – Factor de emisión 1,97 m³/CO₂eq y rendimiento de 62,42 m³/h, lo que da un factor de emisión de 0,12 t/CO₂eq por los 62,42 m³/h), y tienen en cuenta una emisión equivalente unitaria que depende de condiciones de operación, tipo de terreno o actividad que se va a realizar. Con la actividad definida (por ejemplo, cantidad de un material), se pueden estimar las emisiones producidas por su ejecución con el rendimiento de la(s) máquina(s) necesitada(s) y su factor de emisión propio. Los rendimientos de las máquinas y los factores de emisión propios de ellas se obtuvieron de fuentes como el IPCC (2019) y Miteco (2024).

Potencial de calentamiento global

El potencial de calentamiento global corresponde a un indicador comparativo que mide cuánto contribuye un gas de efecto invernadero al calentamiento de la atmósfera en relación con el dióxido de carbono (CO₂), durante un periodo de tiempo determinado.

Estos gases se abordan especialmente en emisiones de alcance 2, por lo que para esta fase del proyecto de investigación no se incluyeron en los cálculos, y el potencial de calentamiento global en la ecuación 2 se tomó con un valor de 1,0 en todos los casos.

Factores de consumo de agua

Los factores de consumo de agua representan el gasto promedio de unidad de volumen (m³). Con una actividad definida, se le puede asociar un factor de consumo de

agua específico, determinando así su consumo total. Para los propósitos de esta investigación, se obtuvieron los factores de consumo de agua (Mora González, 2023). A continuación, se detallan los criterios asociados a los factores de emisión de consumo de agua.

Criterios de selección de factores de emisión y consumo hídrico

Los factores de emisión y consumo de agua se seleccionaron con base en los siguientes criterios:

- **Reconocimiento internacional.** Se priorizaron factores provenientes de organismos como el IPCC (2019) y Miteco (2024), y los que se han podido consultar (Mora González, 2023).
- **Pertinencia sectorial.** Se seleccionaron factores aplicables al sector de la construcción y al contexto de proyectos oil & gas.
- **Consistencia metodológica.** Se emplearon factores compatibles en unidades y estructura para su integración en el modelo.
- **Adaptabilidad al contexto colombiano.** En ausencia de factores locales, se utilizaron valores internacionales ajustados mediante supuestos operativos.

Estos criterios garantizan la comparabilidad de los resultados y la coherencia metodológica del estudio.

Implementación de la metodología

Como se mencionó anteriormente, el objetivo principal de esta investigación es la estimación de las cantidades de CO₂eq y consumo de agua en obras de ingeniería civil del sector O&G en Colombia; en consecuencia, se seleccionaron las actividades típicas en que se consideró que se puede desagregar un proyecto típico del sector, y resultaron 87 en total. Estas abarcan materiales como concretos, aceros, suelos de mejoramiento, aditivos y misceláneos (por ejemplo, cables y conectores).

La descripción detallada de cada una de las actividades con sus factores de emisión en la fuente, factores de emisión por transporte, factores de emisión por maquinaria y factores de consumo de agua, se puede encontrar en Beltrán Pérez (2025).

Herramienta de cálculo

Con el propósito de facilitar la estimación de emisiones de CO₂ equivalente y consumo de agua en proyectos civiles del sector oil & gas, la metodología se implementó en una herramienta práctica desarrollada en hojas de cálculo de Excel. La herramienta permite ingresar de manera sencilla las cantidades de obra y las rutas de transporte definidas para cada proyecto. Con base en estos datos, calcula automáticamente las emisiones y el consumo hídrico, integrando los factores previamente establecidos para materiales, transporte y maquinaria.

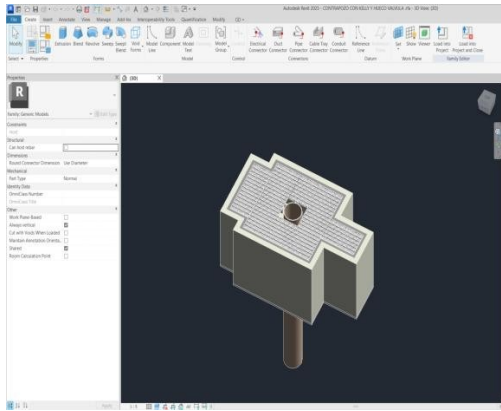
Su principal valor radica en la aplicabilidad directa en proyectos reales, ya que ofrece resultados transparentes y comparables entre alternativas constructivas. Esto convierte a la herramienta en un apoyo concreto para la planeación y el diseño, al permitir incorporar criterios ambientales en la toma de decisiones desde etapas tempranas.

En este artículo, la herramienta se aplica a un caso de estudio representativo, cuyos resultados se presentan y analizan en la siguiente sección.

CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio corresponde a un contrapozo (*cellar*), estructura típica en proyectos de perforación del sector oil & gas. Se trata de una excavación revestida con acero o concreto, ubicada bajo el equipo de perforación, cuya función principal es alojar y proteger elementos críticos como el cabezal del pozo y los preventores de reventones (BOP). Esta obra constituye un componente esencial para la seguridad y operación inicial de los pozos petroleros. A renglón seguido, se presenta la geometría general del contrapozo convencional en concreto (figura 1 y tabla 1).

Figura 1.
Contrapozo
convencional en
concreto.
Fuente: Elaboración propia.



- Cantidad de material: 6,39 m³
- Factor de emisión en fuente: $(0,138 \times 2813,92) = 387,92 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3$
- Distancia de transporte: 752 km (Bogotá-Putumayo)
- Factor de transporte: 0,11626 kg CO₂e/t·km (transporte terrestre)

Las emisiones se calculan así:

Emisiones en fuente:

$$6,39 \text{ m}^3 \times 387,92 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3 + 752 \text{ km} \times 0,11626 = 2566,24 \text{ kg CO}_2\text{e}$$

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Se presenta a continuación un ejemplo simplificado de trazabilidad del cálculo para una actividad específica del caso de estudio, con el propósito de garantizar la claridad y reproducibilidad de la metodología

Las actividades y rutas de transporte para el caso de estudio se implementaron en la herramienta de cálculo propuesta, en tanto que las actividades contempladas y sus correspondientes cantidades de obra se pueden ver más adelante (tabla 1), al igual que las rutas de transporte (figura 2).

Ejemplo de trazabilidad del cálculo

Para la actividad “concreto clase D (210 kg/cm²)”, se tienen los siguientes datos (tomados de las tablas 1, 2 y 4):

Finalmente, la suma de los componentes permite obtener el valor total de emisiones para la actividad. Este procedimiento se repite para cada una de las actividades incluidas en la herramienta, garantizando trazabilidad completa desde los datos de entrada hasta los resultados finales.

Los factores de emisión y los factores de consumo de agua correspondientes a las actividades descritas en la tabla 1 (consignados en la herramienta generada) se muestran a continuación (tablas 2 y 3). Con esta información (tablas 1 a 3), es posible implementar las ecuaciones 1, 3 y 4 para cada una de las actividades consideradas para el contrapozo del caso de estudio; los resultados de estos cálculos se presentan más adelante (tabla 4).

Tabla 1
Cantidad de materiales para contrapozo

Contrapozo en concreto convencional			
Material	Unidad de medida	Cantidad	Peso (kg)
Excavación mecánica en material común (incluye transporte a una distancia ≤ a 1 km)	m ³	56,08	1700.00
Concreto clase D (210 kg/cm ² o 3000 psi)	m ³	6.39	2813.92
Concreto clase H (105 kg/cm ² o 1500 psi)	m ³	0,29	2645,00
Junta de construcción con cinta PVC 15	m	11,60	0,80
Acero fy: 60.000 psi (4200 kg/cm ²)	kg	31,82	1,00
Malla electrosoldada fy: 60.000 psi (4200 kg/cm ²)	kg	355,13	1,00
Suministro e instalación de estructura metálica	kg	507,83	1,00
Junta impermeabilizada	m	11,60	0,80
Suministro e instalación de tubo conductor de ø12" a ø20" (incluye suministro y transporte)	m	6,00	1,00

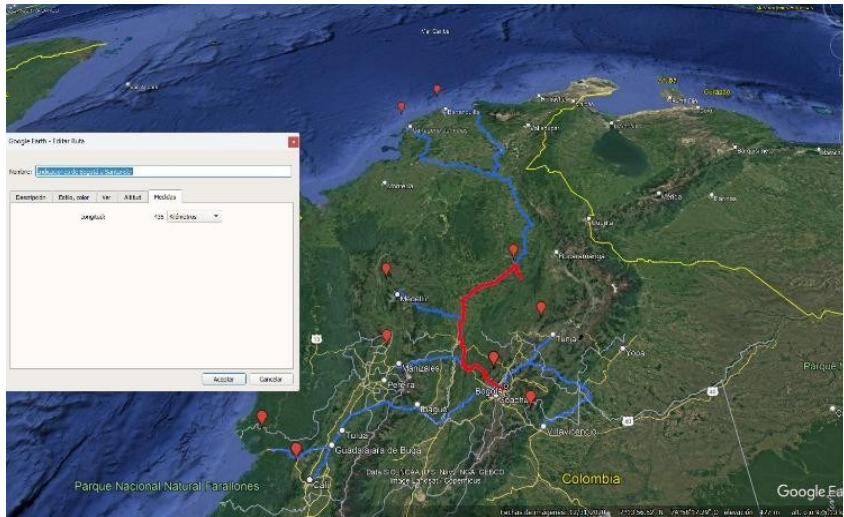


Figura 3. Rutas analizadas en la herramienta

Fuente: Elaboración propia, con apoyo de Google Earth y My Maps.

Tabla 2
Factores de emisión para actividades (caso de estudio)

001	Proyecto	Materiales /equipos	Unidad	Cantidad	Factor de emisión CO ₂ en la fuente (kg CO ₂ e)	Distancia	Origen	Destino	Tipo de transporte	Factor CO ₂ -t/km	Tipo de fuente
001	Campo Rubiales	Excavación mecánica en material común, incluye transporte a una distancia ≤ a 1 km	m ³	56,08	10,71	752	Bogotá	Putumayo: Mocoa	TT001	0,11626	MP
001	Campo Rubiales	Concreto clase D (210 kg/cm ² o 3000 psi) preparado con cemento verde.	m ³	6,39	387,92	752	Bogotá	Putumayo: Mocoa	TT001	0,11626	S
001	Campo Rubiales	Concreto clase E (175 kg/cm ² o 2500 psi) preparado con cemento verde.	m ³	0,29	359,61	752	Bogotá	Putumayo: Mocoa	TT001	0,11626	M
001	Campo Rubiales	Junta de construcción con cinta PVC 15	m	11,60	2,56	752	Bogotá	Putumayo: Mocoa	TT001	0,11626	MP
001	Campo Rubiales	Acero fy: 60000 psi (4200 kg/cm ²)	kg	31,82	1,20	841	Estados Unidos Los Ángeles	Buenaventura	TT003	0,602	MP
001	Campo Rubiales	Malla electrosoldada fy: 60000 psi (4200 kg/cm ²)	kg	355,13	1,20	841	Estados Unidos Los Ángeles	Buenaventura	TT003	0,602	MP
001	Campo Rubiales	Suministro e Instalación de estructura metálica para misceláneos.	kg	504,73	1,20	841	Estados Unidos Los Ángeles	Buenaventura	TT003	0,602	S
001	Campo Rubiales	Junta impermeabilizada	m	11,60	2,56	752	Bogotá	Putumayo: Mocoa	TT001	0,11626	S
	Campo Rubiales	Suministro e Instalación de tubo conductor de ø12" a ø20" (incluye suministro y transporte).	kg	6,00	0,10	841	Estados Unidos Los Ángeles	Buenaventura	TT003	0,602	S

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3
Factores de consumo de agua para actividades del caso de estudio

ID	Consumo de agua						Referencias
	Ítem	Unidad	Canti- dad	Factor de huella hídrica azul	Cantidad 2	Total	
1	Grouting cementoso	m ³	1	1,50	9,37	14,06	WFN / Pavco (2025)
2	Grouting epóxido	m ³	1	1,97	1,84	3,62	WFN / Pavco (2025)
3	Junta de construcción con cinta PVC 22	m	1	0,34	11,69	3,98	WFN / Pavco (2025)
4	Junta de construcción con cinta PVC 15	m	1	0,34	11,69	3,98	WFN / Pavco (2025)
5	Junta de dilatación	m	1	0,34	11,69	3,98	WFN / Pavco (2025)
6	Junta impermeabilizada	m	1	0,34	11,69	3,98	WFN / Pavco (2025)
7	Concreto clase H (105 kg/cm ² o 1500 psi)	m ³	1	6,33	16,00	101,28	Mora-González y Cruz-Zúñiga (2024)
8	Concreto clase F (140 kg/cm ² o 2000 psi)	m ³	1	6,33	17,00	107,61	Mora-González y Cruz-Zúñiga (2024)
9	Concreto clase E (175 kg/cm ² o 2500 psi)	m ³	1	6,33	22,40	141,79	Mora-González y Cruz-Zúñiga (2024)
10	Concreto clase D (210 kg/cm ² o 3000 psi)	m ³	1	6,33	22,60	143,06	Mora-González y Cruz-Zúñiga (2024)
11	Concreto clase C (280 kg/cm ² o 4000 psi)	m ³	1	6,33	24,80	156,98	Mora-González y Cruz-Zúñiga (2024)
12	Concreto clase D (210 kg/cm ² o 3000 psi), preparado con cemento verde.	m ³	1	6,03	22,60	136,28	Mora-González y Cruz-Zúñiga (2024)
13	Concreto clase E (175 kg/cm ² o 2500 psi) preparado con cemento verde.	m ³	1	6,03	22,40	135,07	Mora-González & Cruz-Zúñiga (2024)
14	Concreto clase E con mineral rojo (175 kg/cm ² o 2500 psi)	m ³	1	6,03	22,40	135,07	Mora-González y Cruz-Zúñiga (2024)
15	Demolición manual de concreto	m ³	1	6,00	1,00	6,00	Mora-González y Cruz-Zúñiga (2024)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4
Cálculo de CO₂eq y consumo de agua para actividades del contrapozo del caso de estudio

Código del proyecto	Proyecto	Ítem	Unidad	Canti- dad	Emisiones (kg CO ₂ e)	Emision es (t CO ₂ e)	Consu- mo de agua (m ³)
001	Campo Rubiales	Excavación mecánica en material común, incluye transporte a una distancia ≤ a 1 km	m ³	56,08	796	0,796	191
001	Campo Rubiales	Concreto clase D (210 kg/cm ² o 3000 psi) preparado con cemento verde	m ³	6,39	2615	2,615	871
001	Campo Rubiales	Concreto clase E (175 kg/cm ² o 2500 psi) preparado con cemento verde	m ³	0,29	1265	1,265	39
001	Campo Rubiales	Junta de construcción con cinta pvc 15	m	11,6	194	0,194	46
001	Campo Rubiales	Acero fy: 60000 psi (4200 kg/cm ²)	kg	31,82	572	0,572	3278
001	Campo Rubiales	Malla electrosoldada fy: 60.000 psi (4200 kg/cm ²)	kg	355,13	935	0,935	3661
001	Campo Rubiales	Suministro e instalación estructura metálica para misceláneos	kg	504,73	605,676	0,605676	49999
001	Campo Rubiales	Junta impermeabilizada	m	11,6	29,7482	0,029748 2	46
001	Campo Rubiales	Suministro e instalación tubo conductor de ø12" a ø20" (incluye suministro y transporte)	kg	6	297,988	0,297988	203
				Totales	7211	7,211	58334

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de alternativas

Los resultados presentados en la sección anterior se toman como línea base para el proyecto, debido a que es una construcción con materiales y procesos constructivos convencionales.

Para evaluar qué impacto puede tener la consideración de las nuevas variables de evaluación propuestas en esta investigación (por ejemplo, emisiones de CO₂ eq y consumo de Agua) en la toma de decisiones en la ejecución de proyectos del sector O&G, se repite el mismo ejercicio realizado en la sección anterior, pero para estructuras de contrapozo con diferencias geométricas y en materiales alternativos, como se muestra a continuación. Allí aparece un *cellar* en estructura metálica recubierto por concreto en un espesor menor que garantiza la estanqueidad de la estructura, que también corresponde a la alternativa 1 (figura 3). Se tomó en cuenta una alternativa 2, que corresponde (geométricamente) a la misma estructura mostrada con anterioridad (figura 1), pero el tipo de concreto considerado para la construcción se genera utilizando cemento de bajas emisiones de CO₂, en cambio del cemento con clínker tradicional.

Las actividades y cantidades de materiales requeridos para las alternativas 1 y 2 se muestran a renglón seguido (tablas 5 y 6).



Figura 3. Contrapozo convencional en concreto
Fuente: Elaboración propia.

Los factores de emisión y los factores de consumo de agua se recuperan (por ejemplo, están directamente incorporados en la herramienta generada) de las bases de datos construidas, en forma análoga a lo mostrado anteriormente (tablas 2 y 3). Las emisiones y consumos de agua por cada actividad, al igual que las emisiones y consumo totales para cada actividad, se estiman de la misma manera que para la línea base. Los resultados se resumen a continuación (tabla 7 y figura 4).

Tabla 5
Cantidades de obra para la alternativa 1 del contrapozo

Contrapozo metálico			
Material	Unidad de medida	Cantidad	Peso (kg)
Excavación mecánica en material común (incluye transporte a una distancia ≤ a 1 km)	m ³	13,76	1700,00
Concreto clase d (210 kg/cm ² o 3000 psi)	m ³	2,44	2813,92
Concreto clase H (105 kg/cm ² o 1500 psi)	m ³	0,29	2645,00
Acero fy: 60000 psi (4200 kg/cm ²)	kg	323,40	1,00
Suministro e instalación de perfilería ASTM a36 (columnas, vigas, entrepisos, casetas, etc.)	kg	150,48	1,00
Suministro e instalación de estructura metálica para misceláneos	kg	621,25	1,00
Suministro e instalación de tubo conductor de ø12" a ø20" (incluye suministro y transporte)	m	7,00	1,00
Suministro e instalación de tubería en lámina metálica corrugada MP 152 galvanizada, fabricada bajo la norma ASTM a761, para cellar foso de perforación, calibre 8 hasta calibre 12	kg	682,00	1,00
Suministro e instalación de tubería en lámina metálica corrugada MP 152 galvanizada, fabricada bajo la norma ASTM a761, para cellar foso de perforación, calibre 2 hasta calibre 6	kg	280,50	1,00
Concreto clase D (210 kg/cm ² o 3000 psi)	m ³	1,40	2813,92

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6
Cantidades de obra para la alternativa 2 del contrapozo

Contrapozo en concreto en bajas emisiones			
Material	Unidad de medida	Cantidad	Peso (kg)
Excavación mecánica en material común (incluye transporte a una distancia $\leq$ a 1 km)	m ³	56,08	1,00
Concreto clase D (210 kg/cm ² o 3000 psi) preparado con cemento verde	m ³	6,39	1,00
Concreto clase E (175 kg/cm² ó 2500 psi) preparado con cemento verde	m ³	0,29	1,00
Junta de construcción con cinta PVC 15	m	11,60	1,00
Acero fy: 60.000 psi (4200 kg/cm ²)	kg	31,82	1,00
Malla electrosoldada fy: 60.000 psi (4200 kg/cm ²)	kg	355,13	3504,00
Suministro e instalación estructura metálica para misceláneos	kg	507,83	0,05
Junta impermeabilizada	m	11,60	1,00
Suministro e instalación de tubo conductor de Ø12" a Ø20" (incluye suministro y transporte)	m	6,00	1,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7
Consolidado de emisiones de CO₂eq y consumo de agua para alternativas a la línea base

Escenario	Emisiones de CO ₂	Consumo de agua (m ³)
Línea base	8295	61.687
Alternativa 1 (contrapozo metálico)	8797	121.079
Alternativa 2 (contrapozo en concreto de bajas emisiones)	7211	58.334

Comparación de alternativas

La alternativa del contrapozo metálico (alternativa 1) presenta ahorros en tiempos de construcción; sin embargo, incrementa el consumo de agua en comparación con la línea base y no representa una mejora en términos de reducción de GEI. Por el contrario, la alternativa 2 (concreto con cemento de bajas emisiones) sí presenta reducciones significativas tanto en emisiones como en consumo hídrico, atribuibles a la incorporación de tecnologías limpias y métodos constructivos optimizados.

La selección de alternativas se hace por medio de un gráfico tipo estrella, que integra siete indicadores de sostenibilidad con diferentes pesos relativos: a) eficiencia en tiempo (20 %); b) eficiencia en costos (15 %); c) facilidad de construcción (10 %); d) vida útil (10 %); e) necesidad de mantenimiento (10 %); f) económica circular (15 %), y, finalmente, g) descarbonización.

Esta forma de calificación busca llegar un criterio de decisión que evalúe de manera holística las ventajas y desventajas de cada alternativa propuesta. Los resultados para el caso de estudio y las alternativas presentadas en esta investigación se presentan en la figura anterior (figura 4).

Los resultados muestran que la alternativa 2, correspondiente al contrapozo en concreto verde, presenta el comportamiento más uniforme en todos los indicadores de decisión investigados, a pesar de no ser la alternativa

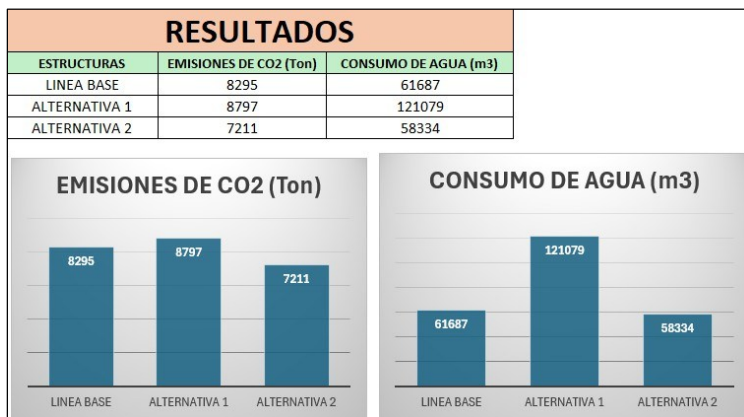


Figura 4. Emisiones de CO₂eq y consumo de agua total para el contrapozo del caso de estudio y sus alternativas

Fuente: Elaboración propia.

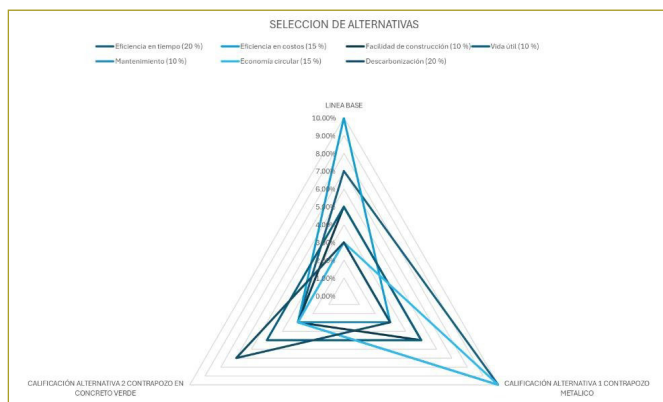


Figura 5. Diagrama de selección de alternativas y evaluación de indicadores

Fuente: Elaboración del autor.

más favorecida para un solo indicador, como sí lo es, por ejemplo, el contrapozo metálico para eficiencia en costos y facilidad de construcción.

Por un lado, la alternativa 2 presenta ahorros significativos en consumo de agua y reducción de emisiones de GEI, y por otro, que desde un punto de evaluación holístico la alternativa es competitiva, a pesar de no ser la más efectiva para un indicador de desempeño particular (figuras 4 y 5).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el fin de evaluar la robustez de la metodología implementada en la herramienta de cálculo de huella de carbono y consumo hídrico, se efectuó un análisis de sensibilidad aplicando variaciones de $\pm 10\%$ en los factores de emisión de CO_2 equivalente y en los coeficientes de huella hídrica azules asociados a materiales y procesos constructivos. Los resultados muestran que las emisiones totales de GEI presentan fluctuaciones en el rango del 8 % al 12 %, dependiendo de la actividad predominante y las fuentes consultadas, con el concreto y el acero como materiales de mayor incidencia en dichas variaciones.

En el caso del consumo de agua, las desviaciones alcanzan hasta un 9 % del valor total estimado, lo que confirma que este indicador es igualmente sensible a la calidad y precisión de los factores empleados. Este comportamiento evidencia que la confiabilidad de los resultados depende directamente de la actualización, trazabilidad y pertinencia de las fuentes utilizadas (IPCC, WFN, Icontec, entre otras), reforzando la necesidad

de recurrir a bases de datos verificadas y bibliografía técnica reconocida para garantizar la validez del análisis ambiental en proyectos del sector oil & gas.

Los aspectos más destacados de la evaluación de alternativas después de la implementación de la metodología de cálculo propuesta al caso de estudio se pueden resumir de la siguiente manera:

- **Reducción de emisiones.** La alternativa en concreto de bajas emisiones logra una reducción del 19 %, mientras que la alternativa metálica presenta solo un incremento del 5 % con respecto a la línea base.
- **Optimización hídrica.** El acero es la opción más deficiente en consumo de agua. En contraste, la alternativa de concreto bajo en CO_2 también mejora significativamente frente a la línea base. La alternativa 1 registra un aumento del 96 % con respecto a la línea base, mientras que la alternativa 2 presenta una reducción de casi el 6 %.
- **Impacto en decisiones.** La aplicación de la metodología de estimación permitió identificar que, manteniendo la funcionalidad estructural, es posible reducir impactos ambientales mediante selección de materiales.
- **Curso de acción.** Para el caso de estudio, se recomienda priorizar el uso de concretos con menor huella de carbono, especialmente si la zona de construcción cuenta con restricciones hídricas.
- **Valor de la herramienta.** La herramienta desarrollada demostró ser útil para integrar criterios ambientales en decisiones de diseño, ya que permite cuantificar impactos y facilitar la trazabilidad en matrices comparativas.

Los resultados del caso de estudio, aunque acotados, apuntan en forma clara a la relevancia de considerar las emisiones de GEI y el consumo de agua como variables técnicas en la estructuración, planificación y diseño de obras civiles en el sector O&G. Es razonable esperar que, en proyectos de mayor envergadura o en análisis integrales de ciclo de vida, estas diferencias se amplíen y tengan un impacto más decisivo en la selección de alternativas.

Si bien la viabilidad técnica y la factibilidad económica seguirán siendo pilares fundamentales en la ejecución de proyectos, las nuevas variables introducidas por esta investigación (las emisiones de GEI y la huella hídrica)

deben comenzar a ocupar un lugar prioritario en la conciencia de los responsables técnicos, financieros y estratégicos a lo largo de la cadena de valor. Esto es especialmente relevante si se pretende cumplir con los compromisos sectoriales y nacionales de reducción de emisiones de CO₂ y uso eficiente del recurso hídrico.

Vale la pena anotar que la inclusión de criterios ambientales en el diseño puede modificar el curso de acción en proyectos del sector O&G. El impacto hídrico es dominante para el caso de estudio y sus alternativas, aun cuando las diferencias en emisiones son marginales, lo que resalta la necesidad de priorizar la eficiencia en el uso de agua, en particular si la zona de construcción es un área con estrés hídrico. Desde este punto de vista, la alternativa del contrapozo en concreto verde (alternativa 2) sería ampliamente favorecida, dado que no existen problemas técnicos con esta alternativa. Otros aspectos importantes, como el costo inicial de inversión y los posibles ahorros por la implementación de tecnología verde, entrarían a jugar en la selección de una alternativa final.

CONCLUSIONES

La investigación desarrolló una metodología estandarizada para estimar emisiones de CO₂ equivalente y consumo hídrico en obras civiles del sector oil & gas en Colombia, integrando factores asociados a materiales, transporte y maquinaria en una herramienta práctica de cálculo. Este enfoque permite la cuantificación trazable de impactos ambientales y facilita la comparación entre alternativas constructivas desde etapas tempranas de diseño.

Hay que reconocer las limitaciones inherentes al enfoque. La precisión de los resultados depende directamente de la calidad, representatividad y actualización de los datos de entrada, así como de la correcta selección de factores de emisión y huella hídrica provenientes de fuentes confiables, como el IPCC, la UPME y la bibliografía técnica especializada. El empleo de valores promedio y la simplificación de ciertos procesos pueden introducir sesgos o subestimar la variabilidad contextual, sobre todo en proyectos con condiciones geográficas, tecnológicas y operativas particulares.

La aplicación al caso de estudio evidenció reducciones de hasta un 19 % en emisiones de CO₂ y mejoras significativas en el consumo de agua al incorporar ma-

teriales de menor impacto ambiental, como concretos de bajas emisiones. Estos resultados demuestran que la inclusión de variables ambientales puede influir de un modo determinante en la selección de alternativas constructivas.

Si bien el caso de estudio se enmarca en el sector oil & gas, la metodología propuesta posee un carácter transversal y puede aplicarse a distintos tipos de estructuras civiles. Siempre que se disponga de información sobre cantidades de materiales, logística de transporte y factores de emisión e hídricos, es posible hacer estimaciones confiables en proyectos de diversa naturaleza, desde edificaciones urbanas hasta obras de infraestructura. Esta flexibilidad amplía el alcance de la herramienta y la posiciona como un insumo estratégico para la gestión ambiental y la toma de decisiones.

Hacia el futuro, se requiere avanzar en la integración dinámica de la metodología con bases de datos actualizadas y verificadas de factores de emisión y consumo de agua, con el fin de evitar su desactualización y mejorar la precisión de los resultados. Así mismo, se evidencia la necesidad de desarrollar factores ajustados al contexto colombiano, que reflejen las condiciones reales de los procesos constructivos y fortalezcan la validez de las estimaciones.

Por último, la aplicación de la metodología en otros contextos exige considerar la disponibilidad y calidad de los datos, la adecuación de los factores al entorno local y las condiciones logísticas específicas de cada proyecto, aspectos que resultan determinantes para garantizar la confiabilidad del análisis.

REFERENCIAS

- <https://acp.com.co/portal/aportes-a-la-descarbonizacion-hechos-de-sostenibilidad-del-sector-petroleo-y-gas-en-colombia/>
- Beltrán Pérez, Y. A. (2025). *Guía metodológica estandarizada y herramienta que permite medir, reportar y consultar en tiempo real la estimación de emisiones de GEI y consumo de agua en proyectos de construcción de obras civiles del sector oil & gas en Colombia* [trabajo de grado, Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito].
- Centro Internacional de Agricultura Tropical (2021). *Guía para certificación de reducción de emisiones en hidrocarburos*. CIAT.
- Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, Hill y Universidad de los Andes (2022, 14 de mayo). *Línea base de las emisiones del sector de las edificaciones*. CCCS. <https://cccs.org.co/wp-content/uploads/2023/02/29.-linea-base-de-las-emisiones-de-sector-de-las-edificaciones.pdf>
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (2016). *Metodología de cálculo para la medición de huella de carbono*

- municipal CAEM*. Centro de Asistencia Técnica a la Industria Ambiental. <https://doi.org/10.1234/ra.2021.23.2.45> (doi.org in Bing).
<https://ghgprotocol.org/gpc>
- Greenhouse Gas Protocol (2024). *Protocolo de GEI: estándar para inventarios corporativos*. World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/protocolo_spanish.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva: IPCC. Disponible en <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/> (ipcc-nggip.iges.or.jp in Bing).
- Ingei (2025). *Inventario nacional de emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. https://pigccme.minenergia.gov.co/public/uploads/web_documentos/622bac681f8f1.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. IPCC. [nggip.iges.or.jp](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp) in Bing).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2019). *Guidelines for national greenhouse gas inventories*. IPCC. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/guia_huella_carbono_tcm30-479093.pdf
 actualizada/documentos-oficiales.
- Mora González, J. (2023). *Factores de consumo de agua en procesos constructivos*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co>. (repositorio.unal.edu.co in Bing)
- León Flórez, N. V., y Ruiz Báez, L. K. (2022). Construcción sostenible en Colombia: retos y oportunidades. *Revista Ingeniería y Sociedad*, 18(1), 33-49. <https://revistas.unal.edu.co>. (revistas.unal.edu.co in Bing).
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y GlobalABC (2025, 17 de marzo). *Las emisiones del sector de la construcción han dejado de crecer por primera vez desde 2020, según Naciones Unidas*. PNUMA. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/las-emisiones-del-sector-de-la-construccion-han-dejado>
<https://doi.org/10.5678/ria.2019.12.3.77>.
- Unidad de Planeación Minero-Energética (s.f.). *Calculadora de emisiones*. UPME. https://app.upme.gov.co/calculadora_emisiones1/new/calculadora.html
- World Steel Association (2025). *Sustainability indicators report 2025*. <https://www.worldsteel.org>