

# Cálculo y emisiones de CO<sub>2</sub> en materiales propios de la arquitectura (vernáculo e industrial)

**césar e. arguedas garro**

Foro de Arquitectura Iberoamericana- arquiberam.

San José, Costa Rica

## **1.Introducción**

### **1.1 Fuentes de energía y producción de materiales**

El sector de la edificación genera un impacto directo en el ambiente por diferentes factores, uno de ellos está en la industria de los materiales de la construcción, el cual se implica a una producción con altas concentraciones de gases efecto invernadero- GEI, el objetivo de desarrollar materiales de gran eficiencia térmica, la búsqueda de la calidad de los materiales, el mantenimiento de los materiales, costo de la producción de la obra, diseño y durabilidad de la edificación, fuentes energéticas de la matriz de producción, ha generado diferentes resultados en la arquitectura actual, desde aquellos que son sostenibles a los de altas emisiones de carbono -CO<sub>2</sub>, propiciado una industria masiva de producción de materiales para la edificación con rendimiento térmico adecuado pero de alto impacto ambiental; el cambio climático está generando la necesidad de una transformación en el sector productivo de la edificación, en donde el control de las emisiones de CO<sub>2</sub> debe identificar el desarrollo para la producción de materiales de bajo impacto, por ejemplo en una transformación en los procesos productivos a base de energías renovables y de uso de transporte sostenible.

La dependencia de energías limpias y un impacto de producción controlado, es el fundamento de una tecnología de materiales con bajas emisiones de gases efecto invernadero- GEIs, la aplicación de conceptos como la descarbonización de la economía, economía hipocarbónica, restauración ecológica, implica la evolu-

ción de una sociedad hacia el desarrollo innovador de protección ambiental. La bioingeniería y restauración ecológica definen un potencial de acciones en donde establecer proyectos, utilidad del suelo y del agua, así como un desarrollo y conocimiento multidisciplinario que permite una recuperación ambiental, aportando conocimiento para el desarrollo de recursos de gran utilidad en diversos campos de producción (Bifulco et al., 2019).

El entendimiento de la energía embebida en la edificación y la producción de materiales de bajas emisiones permite revertir la dependencia sobre sistemas tradicionales de hidrocarburos basados en la destrucción ecológica; el sistema actual en la urbanística se rige bajo redes de transporte con grandes impactos de gases efecto invernadero - GEIs, siendo la red de transporte actual una de las mayores causantes de la contaminación en los países industrializados, lo que demuestra que existe una gran relación entre las redes de transporte de caminos y carreteras y el impacto ambiental por emisiones, siendo necesario el desarrollo de políticas de mejora de tecnologías para un mayor control en el impacto de la contaminación en los vehículos, un caso de ello es el Reino Unido, con las proyecciones de ahorro del uso de los combustibles tal como el petróleo y el diésel, en relación a la generación de CO<sub>2</sub> en su red de caminos de transporte, en donde se han propuesto objetivos para contener el impacto del transporte por medio de propuestas de control y análisis de la actividad vehicular (Kolosz, 2015). El impacto del transporte afecta todo tipo de sectores, lo cual hace necesaria una transformación energética.

Según Wennersten un caso demostrativo de la capacidad de demanda de energía eléctrica para el transporte se puede interpretar en la utilidad de vehículos eléctricos en relación a las ubicaciones de recarga y a 4 tipos de actividades, 1-residencial, 2-trabajo, 3-negocios, 4-recreación, en donde los fines de los viajes son el hogar-permanencia, trabajo, compras, comida, carga, descarga, recreación, en el que existen demandas energéticas según el perfil de carga promedio y en donde el análisis de los casos, demostró la necesidad de una demanda mayor de puntos de carga de energía eléctrica, identificando que el transporte a base de electricidad sería útil por uso a causa de las actividades (Wennersten et al., 2017).

La actividad de trabajo, carga y descarga se relaciona con los procesos de producción, en este caso demostrando una alta demanda del servicio de transporte por desplazamiento, indicando a la vez que el uso de vehículos a base de energía

eléctrica, es una alternativa válida para disminuir el impacto ambiental de las emisiones de GEI, debido a que un entorno urbano siempre tendrá una necesidad de utilizar servicios de transporte en las horas con más demanda; el uso de una red de transporte a base de energía eléctrica sostenible, impacta de manera directa a la industria de los materiales de la edificación, dada la relación con la etapa A1-A3 en las fases de producción y del ciclo de vida, en las que el transporte genera grandes emisiones. La industria de los materiales de la edificación es en la actualidad totalmente dependiente de energías de hidrocarburos, aún así la transformación hacia una producción a base de energías limpias es rentable.

La transformación de una industria de menor impacto de GEIs está siendo promovida en diferentes contextos internacionales, un caso es la Unión Europea- UE, en donde se han establecido criterios conjuntos aplicados a los países miembros en cuanto a la cuantía de los GEIs en la industria y la edificación, dadas las políticas ambientales con objetivos de la transformación energética de cara al 2050, en paralelo de regular las emisiones ante el incremento de la población, un caso de ello se identifica en el nZEB (Schimschar et al., 2013) y en las normativas (UNE- EN 15804: 2012) (UNE- EN 15804: 2012+ A1: 2014) (UNE- EN ISO 14025, 2010).

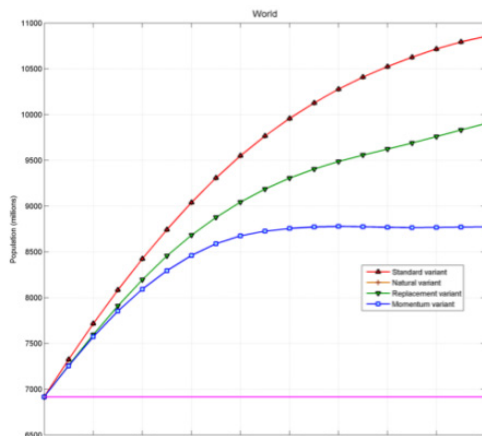


Imagen 1.1. Variantes de las proyecciones de la población y crecimiento futuro de la población, 2010-2100. (Andreev et al., 2013)

El departamento de asuntos económicos y sociales de las Naciones Unidas- UN, prevé un incremento elevado de la población mundial con un estimado que ronda hacia el 2100 en una cuantía de cerca de 11000 millones de habitantes (Andreev et al., 2013) lo cual va acompañado del incremento de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, estableciéndose una identificación muy considerable de los incrementos de carbono en la atmósfera desde 1960 al desarrollo de la primer década del siglo XXI, según el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático-IPCC (Stocker et al., 2013).

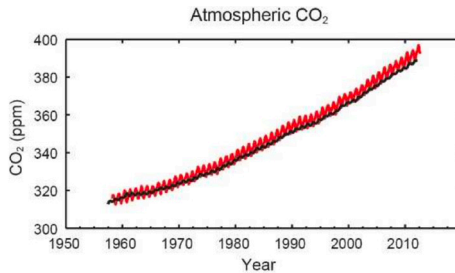


Imagen 1.2. Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático- IPCC; Proyección de las concentraciones atmosféricas de CO<sub>2</sub> de 1960 a 2010. (Stocker et al., 2013).

Estas predicciones y datos cuantitativos, han generado un cambio en las políticas de estado dirigidas a la descarbonización y a la transformación e independencia de los hidrocarburos, de manera consecuente las investigaciones en materiales de la edificación identifican cada vez, la atención sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> en donde las empresas aportan datos de impacto de los materiales, en base a criterios de cálculo del impacto real durante la producción, ejemplo de esto se identifica en las Declaraciones Ambientales de Producto- DAPs, las cuales aportan información diversificada sobre el proceso de producción del material y los indicadores de GEI.

Un caso de vinculación entre política de estado, protección ambiental y descarbonización, sucede en el gobierno de la República de Costa Rica en América, en donde la política de estado está centrando los objetivos hacia la transformación de la dependencia de los hidrocarburos, con el fin de ser un país carbono neutral sin una flota vehicular a base de los hidrocarburos (2020-2030) (Vargas y Leiner, 2013), en donde la producción de emisiones esté compensada por una disminución de las mismas; en la actualidad Costa Rica tiene una matriz energética 100% a base de renovables.

Dentro de los objetivos del cambio de hidrocarburos en el sector transporte, se han estudiado diversos índices sobre la contaminación por transporte vehicular; en estos estudios en Costa Rica ha participado el PNUD (Naciones Unidas) programa regional para estrategias climáticas- (LECRDS por sus siglas en inglés), la Unión Europea, el gobierno de Alemania, de Australia, de España, en regencia el MINAE- Ministerio de Ambiente y Tecnología de Costa Rica (Vargas y Leiner, 2013), a ello se suman otros aportes recíprocos ante políticas similares como es el caso de Canadá. A estos objetivos se suma la unión en 2021 entre Costa Rica y Dinamarca, para poner fin al uso del petróleo y del gas.

En el caso de la Unión Europea se han hecho esfuerzos para respetar los tratados internacionales y protocolos ambientales, aun así hace falta más compromiso de parte de los estados miembros en establecer políticas realmente contundentes en materia de protección de los recursos naturales y creación de zonas de protección ambiental; en cuanto a la edificación el nZEB 2020 (Schimschar et al., 2013) se ha sumado a los objetivos de descarbonización económica rumbo al 2050, incrementándose los proyectos i+D+I sostenibles.

## **1.2 Emisiones de CO<sub>2</sub> y normativas**

La aplicación de materiales de bajas emisiones para edificios integrados en una urbanística vinculada a la sostenibilidad, tienen muchos campos de acción, uno de ellos es el caso de las fachadas en las edificaciones y su aporte a la demanda energética y producción de CO<sub>2</sub> en el proceso de la construcción y uso de materiales, aspecto que también se vincula a la urgencia de edificar considerando la salud del ser humano y el desarrollo de materiales menos contaminantes, tal como lo indican algunas investigaciones (Kobeticova, 2017), en donde se identifica la realidad ecotoxicológica que hay detrás de los materiales de construcción y daño a la salud humana, en procesos de producción de impacto directo en sustancias liberadas, que se transportan, acumulan, degradan y se absorben por los organismos.

El uso de los materiales en la edificación y los datos de emisiones implica identificar los factores participantes en la liberación de los GEIs, durante su proceso de producción y uso, en donde se identifica al vapor de agua (H<sub>2</sub>O), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), Metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), y el grupo de gases formados

por contenidos de bromo, flúor- Perfluorocarbonos (PFC), Hexafloruro de azufre (SF<sub>6</sub>), GEIs establecidos desde el protocolo de Kyoto, de la Convención del Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, siendo todos estos gases muy perjudiciales para la salud humana así como letales para los ecosistemas. (Naciones Unidas, 1998) (Naciones Unidas, 2003)

Según los datos de la Unión Europea, los edificios son responsables de aproximadamente el 40% del consumo de energía y el 36% de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la UE. En la actualidad, aproximadamente el 35% de los edificios de la UE tienen más de 50 años y casi el 75% del parque inmobiliario es ineficiente desde el punto de vista energético, mientras que solo el 0,4-1,2% (Políticas y legislación adecuadas para reformar el parque inmobiliario de la UE, consultado el 5 de marzo de 2020, <https://ec.europa.eu/>) del parque inmobiliario se renueva cada año. Por lo tanto, una mayor renovación de los edificios existentes puede conducir a importantes ahorros de energía, reduciendo potencialmente el consumo total de energía de la UE entre un 5-6% y reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub> en aproximadamente un 5%, generando espacios saludables (Boermans et al., 2015).

En cuanto a un proceso de mejora en las políticas de estado en relación a la edificación y al impacto ambiental, se identifica el caso de los estados miembros de la UE, los cuales han establecido la referencia de los edificios según categorías, definidas en tres tipos: 1. Edificios unifamiliares, 2. El bloque de edificio de apartamentos multi familiares, 3. Los edificios de oficinas (EU Commission. Commission Delegated Regulation 244, 2012); bajo esta clasificación se establecieron criterios para los edificios en cuanto a las demandas energéticas y los reglamentos a cumplir, así mismo estos están implicados a la condición del edificio, nuevo o edificio existente reformado o restaurado. Se establecieron subcategorías según los años de construcción, costo estructural, construcción material, uso de zona climática, así como las características nacionales del edificio; dentro de los criterios de la eficiencia energética, se incluyeron los costes óptimos, en función del consumo de energía casi nulo (Boermans et al., 2015).

En el Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea el 30 de mayo de 2018 (UE, 2018) aprobaron formalmente acuerdos políticos sobre la revisión propuesta de la directiva sobre el rendimiento energético de los edificios. Esta revisión intro-

duce enmiendas específicas a la directiva actual destinadas a acelerar la renovación rentable de los edificios existentes, con la visión de un edificio descarbonizado para 2050. La revisión también respalda el despliegue de infraestructura y de la electro movilidad en los aparcamientos de edificios e introduce nuevas disposiciones para mejorar las tecnologías inteligentes y los sistemas de construcción incluida la automatización (Boermans et al., 2015).

Las normativas recientes de Unión Europea establecen un referente en donde se han ido evolucionando los criterios para identificar y calcular la emisiones de GEI, a partir del concepto de emisiones en organizaciones, productos, edificación, (ISO 14064-3, 2012) que determinó un aporte importante en el criterio de métodos de cuantía de GEI, en el cual se conjuntan procedimientos para evaluar, determinar y cuantificar las emisiones, el ISO 14064, implicó un conjunto de tres partes de la que el 3, valida las declaraciones.

En el punto 4 de la Regulación delegada, de la Unión Europea (EU) No. 244 (EU Commission. Commission Delegated Regulation 244, 2012), define el cálculo o costo global en términos del valor presente por referencia de la construcción, se indica en el punto (e), en donde el costo implicado en una edificación incluye también a las emisiones generadas de CO<sub>2</sub>, Cost of greenhouse gas emissions, lo cual implica el costo operacional del resultado de las emisiones de CO<sub>2</sub> en valor en toneladas equivalentes a su periodo de cálculo.

## **2. Metodología y resultados**

### **2.1 Criterios de para el cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub> en la edificación.**

A continuación, vemos el proceso indicado para el cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub> en edificios ocupados por el global de las actividades para obtener un costo óptimo, en balance de las actividades, demanda energética, edificación, según la commission delegated regulation (EU) No 244/2012 del 12 de enero (EU Commission. Commission Delegated Regulation 244, 2012).

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[ \sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j) \times R_d(i)) - V_{f,\tau}(j) \right]$$

Fórmula 1.1-a. Calculation of global costs, financial calculation (EU Commission. Commission Delegated Regulation 244, 2012).

$\tau$	Significa el período de cálculo.
$C_g(\tau)$	Significa el costo global (referido al año inicial $\tau_0$ ) durante el período de cálculo.
$C_I$	Significa costo de inversión inicial para medida o conjunto de medidas j.
$C_{a,i}(j)$	Significa el costo anual durante el año i para medida o conjunto de medidas j.
$V_{f,\tau}(j)$	Significa el valor residual de la medida o conjunto de medidas j al final del período de cálculo (descontado al año de inicio $\tau_0$ ).
$R_d(i)$	Significa factor de descuento para el año i base <del>donde</del> tasa de descuento $r$ para calcular.

$$R_d(p) = \left( \frac{1}{1 + r/100} \right)^p$$

Fórmula 1.1-b. Donde p significa el número de años desde el período inicial y r significa la tasa de descuento real, (EU Commission. Commission Delegated Regulation 244, 2012)

Bajo estos procedimientos de cálculo se puede establecer el criterio para el costo de emisiones de carbono -cost of greenhouse gas emissions; la categoría de costos de las emisiones GEIs está definida en un conjunto de aspectos que buscan integrar diversos conceptos de cálculo de emisiones de los países miembros de la unión europea, según la metodología de costo global (EU Commission. Commission Delegated Regulation 244, 2012). A continuación, se ven ajustes para los valores globales para el cálculo macroeconómico implicado a las emisiones de CO<sub>2</sub>



$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[ \sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i}(j)R_d(i) + C_{c,i}(j)) - V_{f,\tau}(j) \right]$$

En la fórmula  $C_{c,i}(j)$  Significa el costo del CO<sub>2</sub> para la medida o conjunto de medidas j durante el año i.

Fórmula 1.2. Calculation of global costs for the macroeconomic calculation (EU Commission. Commission Delegated Regulation 244, 2012).

El punto 4.4, del cálculo del costo global para el cálculo macroeconómico indica en el paréntesis (3) traducido: El estado miembro calculará el costo de CO<sub>2</sub> acumulado de medidas / paquetes / variantes durante el período de cálculo tomando la suma de las emisiones anuales de GEIs multiplicadas por los precios esperados por tonelada equivalente-eq de CO<sub>2</sub> de los derechos de emisión de GEIs en cada año emitido, utilizando como límite inferior mínimo inicialmente de al menos 20 euros por tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente hasta 2025, 35 euros hasta 2030 y 50 euros más allá de 2030, según las proyecciones actuales de la Comisión. Escenarios de precios (medidos en precios reales y constantes de 2008, para adaptarse a las fechas de cálculo y metodología elegida). Los escenarios actualizados se tendrán en cuenta cada vez que se lleve a cabo una revisión de los cálculos de costo óptimo (EU Commission. Commission Delegated Regulation 244, 2012).

Dentro de los costos globales de una edificación, es prioridad establecer los valores del costo por precios esperados por toneladas equivalente de CO<sub>2</sub> al costo de las emisiones de gases de efecto invernadero, esto desde un cálculo macroeconómico (EU Commission. Commission Delegated Regulation 244, 2012).

La Unión Europea ha establecido herramientas complejas para el análisis, cuantificación y cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> como las anteriores (ejemplo de criterios globales de cálculo para costo óptimo), a las que podemos sumar las normas vigentes (UNE-EN ISO 14064-1-2-3, 2012) (UNE-EN ISO 14064-2, 2012) (UNE-EN ISO 14064-3, 2012) en ellas se ha dado un avance en criterios unificados para establecer los informes de GEIs en las organizaciones- empresas, siendo herramientas importantes para establecer criterios de cuantificación.

Dentro de los cálculos de demanda energética en los edificios, de las certificaciones pretendidas en los objetivos del Passive House (Nearly Zero Energy Buildings- NZEB) (Schimschar et al., 2013) y la demanda de energía casi nula de la Unión Europea, se consideran varios aspectos tal como: categoría de edificio, métodos de cálculo, condiciones climáticas, geometría del edificio, volumen, área, número de pisos, radiación, orientación, ganancias térmicas internas, elementos del edificio, sistemas del edificio, ventilación, aperturas ejemplo ventanas, horarios, necesidades de uso de energía, energía del edificio generada en el sitio, consumo de energía en el que se involucra el combustible fósil, biomasa, calefacción, refrigeración, energía primaria.

Las emisiones de GEI entendidas en el CO<sub>2</sub> equivalente, en las edificaciones tienen relación directa con la macroeconomía del proyecto, estos datos tienen que ser considerados en los cálculos de emisiones de GEIs en relación al uso de materiales de construcción y su función con la eficiencia energética, a los que se le pueden incluir datos por criterio de recuento de las contribuciones de CO<sub>2</sub> detallados y derivados de la dependencia de energías fósiles y biomasa en el proceso de producción, transporte, uso y re utilidad.

## **2.2 Meta criterio de cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub> en la energía embebida en la edificación**

El carbón embebido representa el total del impacto a causa del uso de los materiales en una construcción, considerado en las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas incluyendo la manufacturación, la construcción, uso de los materiales en el edificio, reemplazo de esos materiales, e inicio y fin de la vida útil del material y su tratamiento y reutilización.

La investigación de Meneghelli, interpreta a las etapas de producción (Etapa de producto: A1-A3) como unas de las de mayor impacto, representando las emisiones de CO<sub>2</sub> incorporadas en el proceso de extracción del material, transporte y fabricación a las que se le suma el resto de las etapas (de la cuna a la puerta) (Meneghelli, 2018). En la fórmula 1.3, se ve el criterio de Meneghelli del LEED, por concepto de CO<sub>2</sub> sumando el transporte.

$$EC_{A4} = \sum_{i=1}^n EC \text{ transp}, i = \sum_{i=1}^n Mi \times di \times ECCtrasp, i$$

ECtransp, i: Carbon embebido en el transporte de materiales de construcción del fabricante al sitio.

Fórmula 1.3. Identificada por Meneghelli. (Meneghelli, 2018).

En la fórmula 1.3, es importante identificar la relación entre una edificación con una vida esperada de 60 años, el proceso del reemplazamiento del edificio, el reciclado y la distancia de travesía de manufactura del material en el sentido de su producción y transporte.

Meneghelli agrega luego, los tiempos de vida de los componentes de construcción esperados, que determinan las cantidades de nuevos materiales y, por lo tanto, las emisiones relacionadas para la extracción del material, fabricación y transporte al sitio de construcción (Meneghelli, 2018).

Involucrando los criterios anteriores a la (EU) No 244/2012 del 12 de enero de 2012 (EU Commission. Commission Delegated Regulation, 2012) se pueden identificar unos puntos indispensables en el cálculo de las emisiones de carbono para una edificación y relacionarlo al uso de materiales de la edificación; en este artículo se indican los siguientes criterios para analizar el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub>, en una edificación, según el multi criterio del método Delphi (García y Suárez, 2013) con el cual se conjuntan criterios, aportando un criterio de cálculo detallado para cuantificar las emisiones generadas por el uso de materiales en fachadas en relación al área de la fachada, al consumo del material en la fachada y al impacto estimado de GEI según los valores acumulados de emisiones en base al CO<sub>2</sub> eq declarado en las DAPs de los materiales de la edificación utilizados; por lo que es importante:

a-Conocer rango de vida útil esperado de los materiales en el edificio (para identificar el rango de vida útil del edificio).

b-Identificar las cantidades individuales de unidades consumidas en cada material x áreas, según el diseño del edificio y las fachadas.

c-Multiplicar los GEI de cada material utilizado según el área o volumetría consumida de material en el edificio x los Potenciales de Calentamiento Global relativos a CO<sub>2</sub> - PCG según las normas (UNE- ISO/TR 14069, 2015). Considerar acá, los datos derivados de las emisiones en las fases A1-A3, B1-B7, C1-C3, D, según las DAPs.

d- Sumar las emisiones por demolición de la obra.

e-Sumar costes por escenario de uso del material en relación al clima y mantenimiento y al coste óptimo.

f-Identificar un rango de vida útil (un rango de vida útil de 50 a 60).

g-Considerar los datos de transporte del material puesto de la fábrica a la obra y su colocación-ensamblado (A1-A3).

h-definir un rango de demanda energética durante la construcción y costes por consumo de energía pública o privada (EU Commission. Commission Delegated Regulation, 2012).

i-Catalogar los materiales a utilizar según el impacto calculado de emisiones para respectivas comparativas de materiales (en catálogo de materiales, o en bases de precios de la construcción).

j-Investigar los datos de emisiones de GEI de los materiales dentro de una base de precios de la construcción, según los datos de CO<sub>2</sub>.

k- Realizar el cálculo del carbono incorporado, según los datos de emisiones en las etapas.

De los criterios anteriores para un cálculo global del impacto de una obra en su ciclo de vida, se detallan los siguientes criterios específicos para calcular el impacto de GEI en el caso de fachadas con necesidad de mejoras para el rendimiento térmico por medio del uso de materiales de la edificación con datos tCO<sub>2</sub>-e.

Hay dos etapas para el cálculo de GEI (UNE-ISO / TR 14069 2015); La primera etapa consiste en convertir los datos de la actividad en emisiones de GEI: emisiones o remociones de GEI = datos de la actividad x factor de emisión o remoción. La segunda etapa considera el Potencial de Calentamiento Global- GWP de cada GEI y permite calcular la conservación de las emisiones o remociones de GEI en el impacto climático, identificadas en toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> (tCO<sub>2</sub>-e) de la siguiente forma:

## **Emisiones de GEI = $\Sigma$ emisiones x GWP gas gas**

Fórmula 1.4. Cálculo de emisiones de GEI; Definición de símbolos: GEI, equivalente de CO<sub>2</sub>;  $\Sigma$ , suma de las emisiones de gases; PCG, al potencial del calentamiento global. (UNE-ISO / TR 14069 2015).

Ecuación (1). Fuente: (UNE-ISO / TR 14069 2015)

La Asociación de Investigación e Información de Servicios de Edificación- BRI-SA, indica que para calcular el carbono incorporado en el edificio, es necesario: a- Identificar el tipo de material a utilizar en un proyecto o diseño, b- establecer la cantidad de materiales a utilizar, c- hacer uso del Inventario de Carbono y Energía, desarrollado por Bath University, Reino Unido, d- Multiplicar cada peso de cada material por el factor de emisión de CO<sub>2</sub>, obteniendo las emisiones de CO<sub>2</sub> de cada material que se ha utilizado en el edificio, e- finalmente suman todas las emisiones de CO<sub>2</sub> obtenidas de cada material utilizado para ver el impacto total del carbono incorporado. (BRSRIA Midiendo el carbono incorporado: el próximo indicador de sostenibilidad, consultado el 10 de agosto de 2020, <https://www.bsria.com/>).

Mejorando el criterio anterior (desarrollado por Bath University, Reino Unido) en el objetivo de detallar el impacto por uso de materiales en el caso de fachadas a reformar por criterio de eficiencia energética, se propone el siguiente criterio de cálculo.

Para realizar el cálculo de CO<sub>2</sub> es necesario: a-Identificar los datos de la unidad funcional declarada del material según la DAP en base a la normativa de la Unión Europea (UNE-EN 15804 2012) (EN ISO 14025 2010), b-Identificar el área en m<sup>2</sup> de la superficie a intervenir con el (los) material (s) a utilizar, c- Multiplicar los datos proporcionados por los datos GWP declarados en las DAPs (emisiones de CO<sub>2</sub> declaradas en cada material) por el área en m<sup>2</sup> a intervenir, d- Sumar las emisiones obtenidas GEI por cada material a utilizar para definir la totalidad del CO<sub>2</sub> incorporado en el edificio o diseño propuesto durante la actividad de diseño, en este caso la rehabilitación térmica de la fachada. De lo anterior se propone la siguiente fórmula (meta criterio) para el respectivo cálculo:

**A1-A2 kg CO<sub>2</sub> equiv/UF x A.m<sup>2</sup> = kg CO<sub>2</sub> equiv/UF**

(Siendo: A1-A2: módulos, Etapa producto terminado. A.m<sup>2</sup>: Área de Fachada y el Kg CO<sub>2</sub> equiv/UF: la Σ emisiones)

Fórmula 1.5. Meta criterio de cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub>. Fórmula propuesta por César Arguedas.

Seguidamente se muestran los ejemplos de cálculo aplicados según el uso de materiales en fachadas para a rehabilitación con materiales termo acústicos. Caso A) comparativa de 2 materiales industriales termoacústicos, Caso B) comparativa de 2 materiales industriales siendo uno originario de la arquitectura vernácula (cerámicos), siendo el caso del ladrillo uno de los de menor impacto de GEI en comprobación con el cálculo de emisiones.



	Material A	Capa de protección: Sistema de Aislamiento Térmico por el Exterior (SATE)	A1- A3: 9,50 (GlobalEPD-RCP-007, 2017)	9,50 kg CO <sub>2</sub> equiv/UF (1m <sup>2</sup> ) x 131,652 m <sup>2</sup> = 1.250,694 kg CO <sub>2</sub> equiv/UF
	Material B	Mortero de impermeabilización (capa)	A1-A3: 8,22E-01 (GlobalEPD: 006-007 rev. 1)	8,22E-01 kg CO <sub>2</sub> equiv/UF (1m <sup>2</sup> ) x 131,652 m <sup>2</sup> = 1.082,17944 kg CO <sub>2</sub> equiv/UF 

Tabla 1.1. Caso A) Cálculo de CO<sub>2</sub> aplicado a fachada de estudio, edificio residencial en la ciudad de Roma, Italia (foto. César Arguedas, edificio en: Piazzale del Parco della Rimembranza, Roma). Área de fachada: 131.652 m<sup>2</sup>. (Toma de datos y cálculo, estancia de investigación en La Sapienza di Roma-UNIROMA).

	Material A	Capa de protección: Sistema de Aislamiento Térmico por el Exterior (SATE)	A1- A3: 9,50 (GlobalEPD-RCP-007, 2017)	9,50 kg CO <sub>2</sub> equiv/UF (1m <sup>2</sup> ) x 46,55 m <sup>2</sup> = 442,225 kg CO <sub>2</sub> equiv/UF
	Material B	Ladrillos Cerámico Cara Vista (Sistema)	A1-A3: 2,56E+02 (GlobalEPD-RCP-008, 2017)	2,56 CO <sub>2</sub> equiv/UF (1ton ). 0,00090367347 m <sup>2</sup> x 46,55 m <sup>2</sup> = 0,042 kg CO <sub>2</sub> equiv/UF 

Tabla 1.2. Caso B) Cálculo de CO<sub>2</sub> aplicado a fachada de estudio de edificio residencial en la ciudad de Valencia, España (foto. César Arguedas, edificio en: Carrer de la Reina, Valencia). Área de fachada: 46, 55 m<sup>2</sup>. (Toma de datos y cálculo, estancia de investigación Instituto Valenciano de la Edificación- IVE).

Los cálculos realizados a diferentes fachadas durante las estancias de investigación en la ciudad de Roma, Italia y Valencia, España, son demostraciones útiles para aplicar el meta criterio del cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub> propuesto (según la fórmula 1.5), demostrando que los datos de emisiones aportados por las DAPs y de utilidad para indexar a una base de precios de la construcción (Base de Datos de Construcción, 2021), son utilizables en el procedimiento del cálculo; además son de utilidad los datos aportados por el uso de materiales termoacústicos en el área de la fachada y en la sumatoria de GEIs por los GWP, lo que permite desarrollar un cálculo según el tipo de material y su uso en fachada para cuantificar el GEI por uso de los materiales.

En las estancias de investigación, se estudiaron 25 casos de fachadas (Roma, Valencia) tomando en cuenta la comparativa de 815 materiales de la edificación, con 265 casos de materiales con datos de utilidad para la (Base de Datos de Construcción, 2021) con los que el meta criterio de cálculo de emisiones de CO<sub>2</sub> es de uso justificado y demostrado.

La presente investigación forma parte de un capítulo desarrollado por el autor<sup>1</sup> en el doctorado de Arquitectura, Edificación Urbanística y Paisaje, en la Universidad Politécnica de Valencia-UPV, Valencia, España, aportado contenido a indexar en bases de datos de construcción; se tomó como modelo el objetivo de inclusión de datos de los indicadores de GEI del Instituto Valenciano de la Edificación – IVE, aportando los datos en 2020, 2021 al IVE. (Base de Datos de Construcción, 2021).

## **2.3 Discusión**

Para los datos de emisiones de CO<sub>2</sub> de los materiales es necesario establecer una base de cálculo que funcione como metodología aplicada a los datos que aporta un material y así poder establecer el cálculo de GEI por el uso de materiales en una edificación.

Muchas bases de datos de materiales aportan información sobre el material, pero carecen de un aporte clasificado de datos de impacto de GEI para aplicar a un cálculo previo para valorar el uso o no de un material a según el impacto de emisiones. Para lo anterior es importante incluir dentro de los datos la información que aportan las empresas sobre el producto (Declaración ambiental de producto -DAP).

La industria de la edificación tiene carencias respecto a datos de emisiones en algunos materiales de origen en la arquitectura vernácula así como de bajo impacto

ambiental, debido a un menor consumo del material en el sector edificatorio, lo que identifica un interés por materiales de innovación tecnológica con alto rendimiento térmico pero con gran impacto de emisiones de GEI, lo que permite analizar una ausencia en el criterio de elección de materiales de parte de los profesionales en arquitectura basado en las bajas emisiones, según las normas (UNE-EN ISO 14025, 2010), (UNE-EN 15804:2012+A1, 2014).

### 3. Conclusiones

Es importante implicar en los cálculos de GEI en los materiales los siguientes datos: Volumen del material en metros cúbicos ( $m^3$ ) o área del material ( $m^2$ ), densidad del material en kilogramos por metro cubico ( $Kg/m^3$ ) y un coeficiente de carbón embebido del material en valor de kilogramo de carbono por kilogramo de material. ( $Kg CO_2 e/Kg$  material), multiplicarlos por el área de consumo del material y sumar las emisiones y multiplicarlas por los PCG: Potenciales de Calentamiento Global relativos a  $CO_2$ , según la Tabla 1.1 indicada en el documento de los Potenciales de Calentamiento Global (PCG) relativos a  $CO_2$  por el horizonte temporal de 100 años (Intergovernmental Panel on Climate Change, & Houghton, 1997).

La escogencia de los materiales al momento de un procedimiento de diseño en una edificación determinará la capacidad de emisiones de carbono en un edificio, en donde la selectividad material del edificio se desarrolla a partir de un criterio de mejorías de coste por reducción de emisiones de GEI. La escogencia de los materiales debe basarse en una comparativa del impacto ambiental generado.

Los datos de  $CO_2$  equivalente y de los GWP, deben de estar clasificados y calificados por un macro criterio de análisis de datos, por medio del cual se puedan aportar datos a bases precios para la construcción, dichos datos deberán ser autenticados en DAPs según las normativas vigentes (UNE-EN ISO 14025, 2010), (UNE-EN 15804:2012+A1, 2014).

El meta criterio de cálculo (Fórmula 1.5) aportado en esta investigación faculta a los profesionales de la edificación a un proceso de cuantificación del impacto de GEI según los materiales utilizados, es aplicable a todo diseño y región.



## Bibliografía

- \_AENOR. 2010. "UNE-EN ISO 14025:2010 Etiquetas y declaraciones ambientales. Declaraciones ambientales tipo III. Principios y procedimientos.
- \_AENOR. 2012. "UNE, E. 15804: 2012 Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones Ambientales de Producto. Reglas de Categoría de Productos básicas para productos de construcción".
- \_AENOR. 2014. "UNE-EN 15804:2012+A1:2014 Sostenibilidad en la construcción. Declaraciones ambientales de producto. Reglas de categoría de producto básicas para productos de construcción".
- \_Andreev, K., Kantorová, V., & Bongaarts, J. (2013). Demographic components of future population growth. Technical Paper, 3.
- \_Boermans, T., Grözinger, J., von Manteuffel, B., Surmeli-Anac, N., John, A., Klemens Leutgöb, K., & Bachner, D. (2015). Assessment of cost optimal calculations in the context of the EPBD. Final report of Project number: BUIDE13705, Ecofys.
- BRSRIA. "Measuring embedded carbon - the next indicator of sustainability". Consultado el 10 de agosto de 2020. <https://www.bsria.com/>
- \_De La Convención, P. D. K. Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Naciones Unidas, 1998. FCCC/INFORMAL/83. <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>.
- \_Directiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética. PE/4/2018/REV/1.
- \_EU Commission. Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31. EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings.
- \_García Valdés, M., & Suárez Marín, M. (2013). El método Delphi para la consulta a expertos en la investigación científica. Revista Cubana de Salud Pública, 39(2), 253-267.
- \_GlobalEPD-RCP-007. Sistema de aislamiento térmico por el exterior (SATE). AENOR. Junio de 2017. <[https://www.aenor.com/Producto\\_DAP\\_pdf/GlobalEPD\\_007\\_001\\_02\\_ESP.pdf](https://www.aenor.com/Producto_DAP_pdf/GlobalEPD_007_001_02_ESP.pdf)> [Consulta: 15 de noviembre de 2019]
- \_GlobalEPD-RCP-008. Ladrillos cerámicos cara vista. Pieza "U" según la Norma UNE-EN 771-1. AENOR. Junio de 2017. [https://www.aenor.com/Producto\\_DAP\\_pdf/GlobalEPD\\_008\\_004\\_ESP.pdf](https://www.aenor.com/Producto_DAP_pdf/GlobalEPD_008_004_ESP.pdf)> [Consulta: 20 de noviembre de 2019]
- \_GlobalEPD: 006-007 rev. 1). Morteros para impermeabilización. AENOR. Mayo de 2018 <https://www.grupopuma.com/uploads/company/dap/DAP-morteros-para-impermeabilizacion.pdf>> [Consulta: 10 de noviembre de 2020]
- \_Instituto Valenciano de la Edificación. (2021). Base de Datos de Construcción 2021, Anexo I: Aislantes térmicos y acústicos. Anexo II: Condiciones de cálculo de las características técnicas. Valencia: IVE.
- \_Intergovernmental Panel on Climate Change, & Houghton, J. T. (1997). Greenhouse gas inventory: Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. OECD.
- \_Kobeticova, K. (2017). Ecotoxicology of building materials: A critical review of recent studies. Journal of Cleaner Production., 165, 500-508.
- \_Kolosz, B. (2015). Extending cost-benefit analysis for the sustainability impact of inter-urban Intelligent Transport Systems. Environmental Impact Assessment Review., 50, 167-177.

\_Meneghelli, A. (2018). Whole-building embodied carbon of a North American LEED-certified library: Sensitivity analysis of the environmental impact of buildings materials. *Building and Environment*, 134, 230-241.

\_Naciones Unidas. (2003). Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.

\_Políticas y legislación adecuadas para reformar el parque inmobiliario de la UE, consultado el 5 de marzo de 2020, [https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-feb-17\\_es](https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-feb-17_es)

\_Rey, F., Bifulco, C., Bischetti, G. B., Bourrier, F., De Cesare, G., Florineth, F., ... & Stokes, A. (2019). Soil and water bioengineering: Practice and research needs for reconciling natural hazard control and ecological restoration. *Science of the total environment*, 648, 1210-1218.

\_Schimschar, S., Hermelink, A., Boermans, T., Pagliano, L., Zangheri, P., Voss, K., & Musall, E. (2013). Towards nearly zero-energy buildings—Definition of common principles under the EPBD. Ecofys, Politecnico di Milano, University of Wuppertal (Unpublished) for European Commission.

\_Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M. M. B., Allen, S. K., Boschung, J., ... & Midgley, P. M. (2013). Working Group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. IPCC, Geneva, Switzerland.

\_UNE-EN ISO 14064-3:2012 Gases de efecto invernadero. Parte 3: Especificación con orientación para la validación y verificación de declaraciones sobre gases de efecto invernadero. (ISO 14064-3:2006).

\_UNE-EN ISO 14064-1:2012 Gases de efecto invernadero. Parte 1: Especificación con orientación, a nivel de las organizaciones, para la cuantificación y el informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero. (ISO 14064-1:2006).

\_UNE-EN ISO 14064-2:2012 Gases de efecto invernadero. Parte 2: Especificación con orientación, a nivel de proyecto, para la cuantificación, el seguimiento y el informe de la reducción de emisiones o el aumento en las remociones de gases de efecto invernadero. (ISO 14064-2:2006).

\_UNE-EN ISO 14064-3: 2012 Gases de efecto invernadero. Parte 3: Especificación con orientación para la validación y verificación de declaraciones sobre gases de efecto invernadero. (ISO 14064-3:2006).

\_UNE-ISO/TR 14069:2015 IN. Gases de efecto invernadero. Cuantificación e informe de las emisiones de gases de efecto invernadero para las organizaciones. Orientación para la aplicación de la Norma ISO 14064-1.

\_Vargas, Leiner. (2013). Rumbo al carbono neutralidad en el transporte público de Costa Rica. National University of Costa Rica. UNDP.

\_Wennersten, Ronald, & Sun, Qie. (2017). Outline of principles for building scenarios - Transition toward more sustainable energy systems. *Applied Energy*, 185, 1890-1898.