

Emisión de CO₂ equivalente en la construcción de viviendas unifamiliares de adobe y ladrillo

CO₂ equivalent emission in the construction of adobe and brick single family homes

Fecha de envío: 3 de marzo 2023

Fecha de aceptación: 27 de julio 2023

Yoner Sanchez-Agurto, Edward Santa María-Dávila y Janeth Saravia Hinoztroza

Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú, ysancheza@uni.pe, esantamariad@uni.edu.pe, jsaravia@uni.edu.pe

El presente estudio se centra en conocer el impacto ambiental en términos de CO₂ equivalente (CO₂e) en la construcción de viviendas unifamiliares de adobe y ladrillo en el distrito de Aucallama, provincia de Huaral, Lima. La metodología seguida fue observacional, cuasi experimental. Se realizaron estudios de campo, tomando datos necesarios para el análisis de las partidas unitarias, estos involucran todos los recursos que se necesitan en las actividades del proceso de construcción de las viviendas. Con el fin de tener resultados certeros y confiables, se han hecho los cálculos de metros y Huella del Carbono HC con viviendas diseñadas bajo las recomendaciones de la normativa peruana. Los cálculos de la Huella del Carbono HC, fueron realizados con la ayuda de Factores de Emisión de inventarios internacionales e investigaciones nacionales. Los cálculos se hacen para los tres procesos: producción de insumos, transporte de los mismos, y ejecución. En la construcción de la vivienda de adobe se han obtenido 14 ton de CO₂e, mientras que, para la vivienda de ladrillo, 50 ton de CO₂e. La baja HC incorporada de la vivienda de adobe, es debido a las actividades e insumos para la construcción de dicha vivienda, estos son artesanales y no se requiere de grandes equipos para cada proceso, lo que lo convierte en una vivienda sostenible.

Palabras clave: Huella de Carbono, unidad funcional, área útil, CO₂ equivalente

The present study focuses on knowing the environmental impact in terms of CO₂ equivalent (CO₂e) in the construction of adobe and brick single-family homes in the district of Aucallama, province of Huaral, Lima. The methodology followed was observational - quasi-experimental. Field studies were carried out, taking necessary data for the analysis of the unit items, these involve all the resources that are needed in the activities of the housing construction process. In order to have accurate and reliable results, calculations of meters and Carbon Footprint have been made with homes designed under the recommendations of the Peruvian Standards. The Carbon Footprint CF calculations were made with the help of Emission Factors from international inventories and national research. The calculations are made for the three processes: production of inputs, transportation, and execution. In the construction of the adobe house, 14 tons of CO₂e have been obtained, while for the brick house, 50 tons of CO₂e. The low built-in CF of the adobe house is due to the activities and inputs for the construction of those houses, which are handmade and large equipment is not required for each process, which makes it a sustainable house.

Keywords: Carbon Footprint, functional unit, useful area, CO₂ equivalent

Introducción

El cambio climático afecta de forma global, en esto participan variados sectores en sus diferentes actividades diarias, sectores como la agricultura, industria, transporte

y construcción, los cuales tienen implicancias directas en el fenómeno del cambio climático.

El sector de la construcción genera alrededor de un tercio del total de emisiones de CO₂ equivalente CO₂e (Aleksanin,

2019; Ghaffar *et al.*, 2020). El aporte de este sector a lo largo de todas sus etapas está enmarcado de acuerdo con las decisiones que se tomen en la fase inicial del diseño de cada tipo de construcción, dado que cada etapa aporta proporciones distintas de CO₂e, esto debido a que cada etapa tiene procesos y recursos distintos (Badilla *et al.*, 2015).

El Perú no es un país ajeno de los que vienen siendo afectados por el Cambio climático, en tanto, se vienen desarrollando alternativas de materiales y procesos constructivos, a fin de mitigar el aumento acelerado de las emisiones de CO₂e, producto de procesos industrializados con elevada quema de combustibles fósiles.

Planteamiento del problema

La quema de combustibles fósiles aumenta la concentración de gases de efecto invernadero GEI en la atmósfera, principalmente CO₂ (OMM, 2019). En el Perú, estamos en un estado principiante con relación a cálculos de las emisiones de CO₂ en las distintas industrias y políticas de reducción.

Objetivos

El objetivo es calcular el impacto ambiental en función de emisiones de CO₂e en la construcción de viviendas unifamiliares de adobe y ladrillo considerando todos sus procesos de construcción. Además de realizar un análisis comparativo de los impactos ambientales en la construcción de estos dos tipos de viviendas unifamiliares.

Definiciones

Características de las construcciones de adobe

El adobe es un material tradicional, donde se usan métodos y técnicas constructivas ancestrales, se emplean materia prima o productos de la zona obtenidos mediante un proceso artesanal. Las viviendas de adobe deberán cumplir ciertas características, como ser de un solo nivel, con ancho mínimo de 40 cm, y otros criterios mencionados en la norma de referencia (Norma E080, 2017).

Características de las construcciones con ladrillo

Las unidades de albañilería deberán tener un tratamiento previo al asentado de acuerdo a las condiciones climatológicas de la ubicación de la obra, esto es, regarlos durante media hora, 10 a 15 horas antes de su asentada. Las unidades se asentarán con las superficies limpias de

polvo y sin agua libre. Los muros se construirán a plomo y en línea, el espesor de las juntas de mortero será como mínimo de 10 mm y como máximo de 15 mm. No se asentará más de 1.30 m de altura en una jornada de trabajo (Norma E070, 2021).

Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El Análisis del Ciclo de Vida es una técnica para determinar y evaluar los aspectos ambientales e impactos potenciales a un producto, compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema. El ACV consiste en evaluar cada uno de los efectos ambientales generados a lo largo de la vida de un producto, vale decir, desde las fuentes de recursos primarios, hasta el consumo y disposición final (ISO 14040, 2006).

La metodología del Análisis de Ciclo de Vida es utilizada para comparar los tipos de materiales de construcción. El ACV se refiere a las diferentes etapas que tiene un producto, proceso o servicio y así cuantificar los impactos ambientales. Las fases que componen el ACV son: 1) definición del objetivo y alcance, 2) análisis de inventario, 3) evaluación del impacto y 4) interpretación (Balderas y Arista, 2019).

Unidad Funcional

Cantidad de producto que se utiliza como unidad de referencia para la cuantificación de la Huella de Carbono. Esta debe ser cuantificada en base a una unidad declarada o unidad funcional y sus resultados deben ser expresados de acuerdo con ello (MAATE, 2021).

Dióxido de Carbono

Gas que se produce de forma natural y también como subproducto de la combustión de combustibles fósiles y biomasa, cambios en su uso de las tierras y otros procesos industriales. Es el principal gas de efecto invernadero antropogénico que afecta al equilibrio de radiación del planeta. Es el gas de referencia frente al que se miden otros gases de efecto invernadero, y, por lo tanto, tiene un potencial de calentamiento mundial de 1 (IPCC, 2014).

Huella de Carbono (HC)

Busca cuantificar la cantidad de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), medida en emisiones de CO₂e,

que son liberadas a la atmósfera debido a las actividades cotidianas o a la comercialización de un producto. Este análisis abarca todas las actividades de su ciclo de vida, desde la adquisición de las materias primas hasta su gestión como residuo.

Modelo de la cuantificación de las emisiones de CO₂

Nivel 0: Selección de la muestra y cuantificación de los recursos materiales consumidos en la ejecución del Modelo Constructivo Habitual (MCH).

Nivel 1: Emisiones de CO₂ por Componente Básico de Material (CBM).

Nivel 2: Cuantificación de las emisiones de CO₂ en la construcción. Se cuantifican las emisiones que se producen en la ejecución del MCH, en kg CO₂/m² de superficie construida, derivados de la fabricación de los CBM (Mercader *et al.*, 2012).

Campo de estudio

Delimitación del campo de estudio

Como foco de estudio se tomaron dos viviendas de distinta unidad de albañilería, el adobe, como material tradicional, y el ladrillo de arcilla, como material convencional. Ambas viviendas, ubicadas en el distrito de Aucallama, provincia de Huaral, departamento de Lima.

La vivienda de adobe, con contrafuertes también de adobe y cobertura de caña chancada, sobre esta se coloca mezcla de tierra y agua con un espesor de 5 cm. Por su parte, la vivienda de ladrillo cuenta con columnas de concreto armado como elemento de confinamiento de los muros, vigas y losa aligerada. Ambas viviendas son de un solo nivel y área útil de 57 m². Entiéndase por área útil, como la diferencia del área construida y el área de muro proyectada.

El cálculo de la Huella de Carbono HC, se realizó para la fase de construcción de las viviendas, considerando en ellas tres procesos: producción de insumos, transporte de insumos y ejecución de obra.

Justificación de elección de viviendas

Se buscó conocer el impacto ambiental en la construcción de viviendas a fin de conocer, numéricamente, la sostenibilidad en términos de emisiones de CO₂e. Para tal fin, se ha elegido una vivienda de adobe y otra de ladrillo

de arcilla, ambos ubicados en la misma localidad, a fin de compararlos en las mismas condiciones.

Unidad Funcional

La unidad funcional UF es el indicador común con la cual se comparan los resultados para ambos casos estudiados, vivienda unifamiliar de adobe y ladrillo. Se ha establecido como unidad funcional, a la cantidad de emisiones de CO₂ equivalente por cada m² de área construida, esto es:

$$UF = \frac{\text{Emisión de CO}_2\text{e (kg CO}_2\text{)}}{\text{área construida (m}^2\text{)}} \quad (1)$$

Metodología

Datos de entrada

Para los cálculos de la Huella de Carbono, se requirieron ciertos valores a los que llamamos datos de entrada. Estos datos, corresponden a los Factores de Emisión de CO₂e de los materiales y/o actividades involucradas en las fases de producción de insumos, transporte y ejecución de la construcción. Otros datos de entrada son los metrados de las partidas y cantidades de insumos utilizados.

Los Factores de Emisión de los materiales, equipos y actividades se tomaron de las bases de datos de huellas de carbono de inventarios certificados e investigaciones hechas por distintas instituciones en el Perú y el exterior. Dado que se han tenido más de una fuente para algunos recursos, se realizó una simulación de Montecarlo para obtener el valor más probable del Factor de Emisión de algunos insumos.

La metodología de investigación seguida fue observacional, cuasi experimental. Se trabajaron en dos tipos de viviendas, adobe y ladrillo, ambos ubicados en la misma localidad. Se conocieron in situ los rendimientos y cantidades de insumos que intervienen durante la elaboración del adobe y la construcción de vivienda con dicha unidad de albañilería, esto, con la ayuda de uno de los fabricantes del adobe, a quien se le encomendó el trabajo de hacer 100 unidades de adobe y un muro de la misma unidad de albañilería con dimensiones de 1.0 m x 1.0 m.

Los datos tomados en campo corresponden a viviendas construidas sin criterios de ingeniería. Sin embargo, el objetivo es conocer la HC de una vivienda construida con todos los criterios de ingeniería que la norma

exige. Por tanto, se han diseñado dos viviendas con las recomendaciones de las Normas E080 (2017) y E070 (2021), de los cuales se han obtenido los metrados correspondientes. Para poder obtener la cantidad de CO₂e de cada vivienda, se han tenido en cuenta todas las partidas que involucran la construcción. Luego, con los Factores de Emisión y los metrados de cada partida, se obtiene la HC. Finalmente, con una sumatoria simple, la HC total para cada tipo de vivienda analizada.

Cálculos y resultados

La HC del proceso de producción de insumos, consiste en todas las emisiones de CO₂ equivalente que se producen durante el proceso de producción de cada insumo que interviene en la construcción, por lo cual, se hizo el análisis de dichos procesos, a fin de conocer sus HC parciales. Se tienen insumos, de los cuales no hace falta hacer tal análisis, dado que se toman de los inventarios de HC nacionales e internacionales mostrados en las Tablas 1 y 2.

Del mismo modo, la HC por el transporte de insumos, consiste en las emisiones de CO₂ equivalente que se producen durante el transporte de los insumos, desde su lugar de producción o explotación, hasta el lugar de la obra. Este transporte se realizó en distintos vehículos y distintas cantidades, sin embargo, por medio de factores de conversión, se calcula la HC por la unidad de medida de cada insumo.

Por su parte, la HC que se obtiene durante la ejecución de obra, consiste en las emisiones de CO₂e por la mano de obra y equipos utilizados.

Los cálculos de la HC para cada vivienda se realizó con la ayuda del análisis de Montecarlo, toda vez que se tiene más

Tabla 1: Factor de emisión de insumos, primeras fuentes

Insumos	Unidad	Factor	Fuente
Cemento,	kg CO ₂ /kg	0.629	1
Acero de refuerzo	kg CO ₂ /kg	1.950	2
Cal	kg CO ₂ /kg	0.750	3
Madera	kg CO ₂ /kg	0.262	4
Ladrillo k.k.	kg CO ₂ /kg	1.123	5
Agua suministrada	kg CO ₂ /m ³	0.149	6

1: UNACEM (2019), 2: Michell (2012), 3: IPCC (2021), 4: de Wolf *et al.* (2016), 5: Freire *et al.* (2016), 6: UK Government (2022)

de una fuente de información para el Factor de Emisión de algunos insumos por su proceso de producción. Este análisis, se realizó con 400 iteraciones, los cuales arrojaron cantidades de datos en un rango específico, de tal forma que se comportaba como la curva o campana de Gauss (ver Gráficos 1 y 3), de donde se tomó como resultado el valor más probable de Factor de Emisión para los insumos que se mencionan en las Tablas 1 y 2.

Tabla 2: Factor de emisión de insumos, segundas fuentes

Insumos	Unidad	Factor	Fuente
Cemento	kg CO ₂ /t	510.57	1
Acero de Refuerzo	kg CO ₂ /kg	1.623	2
Cal	kg CO ₂ /kg	0.790	3
Madera	kg CO ₂ /t	321.61	4

1: León-Velez y Guillén-Mena (2020), 2: Freire *et al.* (2016), 3: Rodríguez *et al.* (2020), 4: UK Government (2022)

De igual forma que los insumos, se tienen dos fuentes de información de los Factores de Emisión de los combustibles (ver Tabla 3 y 4).

Tabla 3: Factor de emisión de combustibles, primeras fuentes

Insumos	Unidad	Factor	Fuente
Energía Eléctrica	kg CO ₂ /kWh	0.52144	1
GLP	kg CO ₂ /kg	2.75	2
Diésel	kg CO ₂ /gal	9.7	2
Gasolina	kg CO ₂ /gal	7.9	2

1: Saavedra-Farfán (2020), 2: MEM (2020)

Tabla 4: Factor de emisión de combustibles, segunda fuente

Insumos	Unidad	Factor	Fuente
Energía Eléctrica	kg CO ₂ /kWh	0.3	1
GLP	kg CO ₂ /kg	3.015	1
Diésel	kg CO ₂ /gal	2.61	1
Gasolina	kg CO ₂ /gal	2.38	1

1: OCCC (2013)

Otros datos de entrada que se requieren en los cálculos de la HC son los rendimientos del consumo de combustible o energía por unidad específica, los cuales son mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5: Rendimiento de combustible o energía

Insumo	Combustible que utiliza	Consumo	Unid.	Fuente
Mezcladora	Gasolina	2.7	l/hm	Ficha técnica mezclador de concreto - La casa Stihl
Vibrador de C°	Gasolina	1.5	l/hm	Ficha técnica vibrador de concreto - Promart
Cargador frontal	Diésel	2.0	gal/hm	Maestro de equipos - Concar
Chancadora (primaria, cónica, fijas)	Energía eléctrica	400	kWh	Toma de datos en campo - chancadora Acaray
Zaranda vibratoria	Energía eléctrica	100	kWh	Toma de datos en campo - chancadora Acaray
Trefiladora	Energía eléctrica	55	kWh	Jacom: Aliados estratégicos en máquinas
Cortadora	Energía eléctrica	5.5	kWh	HTK welding equipment manufacture Co

Vivienda de adobe

Se presentan los resultados obtenidos de las emisiones de CO₂e producidas durante la construcción de la vivienda de adobe (ver Tabla 6). La vivienda de adobe diseñada con las recomendaciones de la Norma E080 (2017), tiene un área construida de 82.84 m² y área útil de 57.29 m².

En la Tabla 6 se presentan las emisiones de CO₂e producidas por la producción y transporte de los insumos requeridos durante la construcción de la vivienda unifamiliar de adobe.

Respecto a la HC por producción de insumos, se tiene al cemento como insumo con la más alta HC incorporada, toda vez que su producción requiere de grandes equipos industriales que consumen elevadas cantidades de energía. La cal hidratada es otro insumo con elevada HC incorporada, por la misma razón que el cemento. Por su parte, en la HC por proceso de transporte de insumos, se tiene a la cal hidratada como el insumo con mayor valor de HC unitaria, dado que este insumo se considera producido en Puno, el cual es transportado por carretera hasta el lugar de la obra, 1387 km de recorrido.

La HC unitaria por proceso de ejecución de obra, se realizó por partidas y no por insumo, toda vez que, en este proceso, se evalúan los recursos utilizados (ver Tabla 7).

Tabla 6: Rendimiento de combustible o energía

Insumo	Unid.	Cant.	HC Prod., kgCO ₂ /unid	HC Trans., kgCO ₂ /unid
Alambre negro recocido N° 8	kg	26.531	0.045	4.393
Acero Corrugado $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$	kg	0.848	1.786	4.393
Clavos para madera con cabeza 3/4"	kg	4.982	0.074	4.393
Clavos	kg	15.676	0.074	4.393
Piedra mediana de 6"	kg	3.217	0.180	18.270
Piedra grande de 8"	m ³	10.346	0.180	18.270
Arena fina	m ³	4.881	0.361	20.880
Hormigón	m ³	29.292	0.340	20.880
Tierra de chacra	m ³	16.144	1.185	15.660
Cemento Portland Tipo I (42 kg)	bol	150.764	24.289	14.697
Cal hidratada bolsa 25 kg	bol	1.697	19.266	185.192
Adobe 0.4 x 0.2 x 0.1	unid	5948.00	0.023	0.047
Caña brava	m	1445.364	0.026	0.146
Caña chancada de 1"	m ²	86.982	0.045	13.141
Madera tornillo inc. corte p/enconf	p2	134.120	0.301	2.542
Madera cedro	p2	108.931	0.562	4.743
Madera de eucalipto de 4"	m	7.100	6.463	54.500
Madera de 2" x 7"	m	56.200	1.508	12.716
Bisagra de fierro de 2"	par	15.000	0.000	4.393
Pintura latex supermate	gal	6.956	0.000	19.369
Imprimante	gal	22.607	0.000	21.232
Barniz marino	gal	1.300	0.000	12.680
Agua	m ³	10.576	0.149	16.240

De la Tabla 7, las partidas de mayor valor de HC unitario por proceso de ejecución de obra, son las partidas de concreto, dado que usan mayor cantidad de recursos mano de obra, y, son las únicas partidas de esta obra, donde se utiliza equipo, la mezcladora de concreto. Con la ayuda de los resultados obtenidos en las Tablas 6 y 7, se calculó la HC total de cada proceso analizado (ver Tabla 8).

Tabla 7: HC por proceso de ejecución de obra

Actividades	Unid.	Cant.	HC Unit., kgCO ₂ /unid
Limpieza de terreno manual	m ²	82.84	0.33
Trazo y replanteo inicial	m ²	84.84	0.110
Excavación manual de zanja para cimientos	m ³	22.99	2.747
Acarreo de material excedente manual	m ³	22.99	2.060
Concreto C:H = 1:10 + 30% P.G. para cimiento corrido	m ³	22.99	6.344
Encofrado y desencofrado de sobrecimiento	m ²	38.32	1.373
Concreto C:H = 1:8 + 25% P.M. para sobrecimiento	m ³	7.66	4.266
Muros cabeza con adobe 0.4 x 0.2 m	m ²	118.96	1.545
Dintel para vanos de eucalipto de 4"	m	7.10	0.412
Tarrajeo en muros de adobe	m ²	162.69	2.472
Falso piso de 4" de concreto C:H = 1:10	m ³	4.29	12.964
Pintura en muros interiores	m ²	162.69	0.375
Pintura en muros exteriores	m ²	11.21	0.375
Viga solera de madera de 2" x 7"	m	56.20	1.03
Caña chancada de e = 1"	m ²	82.84	0.309
Torta de barro de e = 2"	m ²	82.84	0.247
Puerta principal 1.0 x 2.2 m	unid	1.00	8.24
Puertas interiores	unid	4.00	8.24

Tabla 8: HC por cada proceso

Proceso	Unid.	Cant.
Producción de insumos	t CO ₂	4.1
Transporte de insumos	t CO ₂	8.4
Ejecución de obra	t CO ₂	1.2
Total: 13.7		

El Gráfico 1 muestra el histograma de los resultados obtenidos luego de realizar el cálculo de la HC bajo el análisis de Montecarlo para la construcción de la vivienda de adobe.

De la Tabla 8, se tiene que el transporte de insumos es el proceso de mayor impacto, representando el 61% de la HC

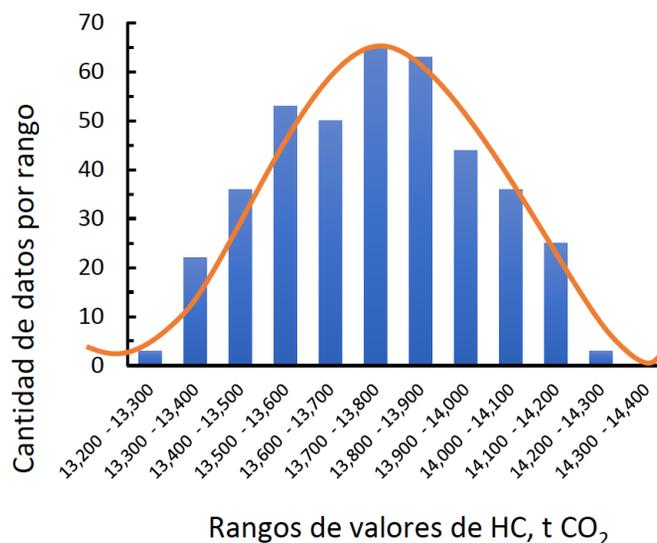


Gráfico 1: Histograma de resultados – HC vivienda de adobe

total (ver Gráfico 2). Del mismo modo, considerando la unidad funcional planteada, se puede decir que, por cada m² de construcción de vivienda unifamiliar de adobe, se emiten 166 kg CO₂e.

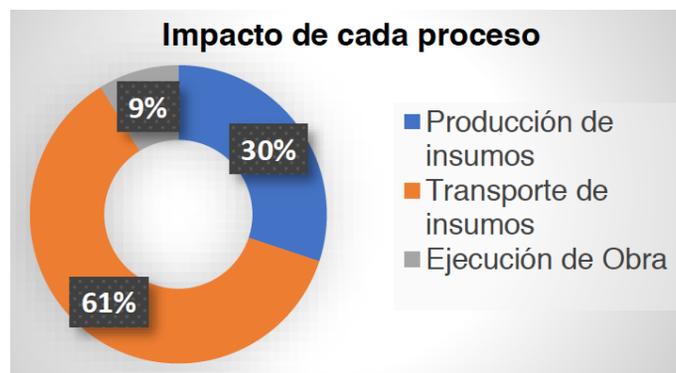


Gráfico 2: Impacto de HC de cada proceso en vivienda de adobe

Vivienda de ladrillo

Se presentan los resultados obtenidos de las emisiones de CO₂e producidas durante la construcción de la vivienda de ladrillo (ver Tabla 9). La vivienda de ladrillo diseñada con las recomendaciones de la Norma E070 (2021), tiene un área construida de 66.15 m² y área útil de 57.29 m².

En la Tabla 9 se presentan las emisiones de CO₂e producidas por la producción y transporte de los insumos requeridos durante la construcción de la vivienda unifamiliar de ladrillo de arcilla.

Tabla 9: Rendimiento de combustible o energía

Insumo	Unid.	Cant.	HC Prod., kgCO ₂ /unid	HC Trans., kgCO ₂ /unid
Alambre negro recocido N° 8	kg	20.38	0.045	4.388
Alambre negro recocido N° 16	kg	28.86	0.045	4.388
Acero Corrugado $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$	kg	1515.63	1.794	4.388
Clavos para madera con cabeza 3/4"	kg	25.04	0.074	4.388
Clavos para madera con cabeza 1/2"	kg	3.25	0.074	4.388
Piedra grande de 8"	m ³	9.32	0.180	18.261
Piedra chancada de 1/2"	m ³	10.99	4.694	52.175
Arena fina	m ³	4.01	0.361	20.870
Arena gruesa	m ³	13.20	0.279	52.175
Hormigón	m ³	21.27	0.340	20.870
Cemento Portland Tipo I (42 kg)	bol	293.42	24.153	14.691
Cal Hidratada bolsa 25 kg	bol	1.32	19.263	185.021
Ladrillo k.k. 18 huecos 9 x 12.5 x 23 cm	unid	4614.39	3.144	0.682
Ladrillo p/techo de 15 x 30 x 30 cm	unid	452.19	8.759	1.920
Madera tornillo inc. corte p/enconf	p2	507.51	0.299	2.541
Madera cedro	p2	108.93	0.558	4.740
Bisagra de fierro de 2"	par	15.00	0.000	4.388
Pintura latex Supermate	gal	9.07	0.000	19.342
Imprimante	gal	29.47	0.000	21.202
Barniz marino	gal	1.30	0.000	12.662
Agua	m ³	8.68	0.149	16.233

Respecto a la HC por producción de insumos, se tiene nuevamente al cemento, como insumo con la más alta HC incorporada, toda vez que su producción requiere de grandes equipos industriales que consumen elevadas cantidades de energía. El mismo escenario, sucede con la cal hidratada, ladrillos de arcilla y la piedra chancada de 1/2". Por su parte, en la HC por proceso de transporte de insumos, se tiene a la cal hidratada como el insumo con mayor valor de HC unitaria comentado en el caso anterior. Los agregados también tienen alta HC unitaria, debido a la distancia que existe desde la cantera al lugar de la

construcción. La HC unitaria por proceso de ejecución de obra, al igual que el caso anterior, se realizó por partidas y no por insumo, dado que se evalúan los recursos utilizados (ver Tabla 10).

Tabla 10: HC por proceso de ejecución de obra

Actividades	Unid.	Cant.	HC Unit., kgCO ₂ /unid
Limpieza de terreno manual	m ²	66.15	0.033
Trazo y replanteo inicial	m ²	66.15	0.110
Excavación manual de zanja para cimientos	m ³	20.71	3.433
Acarreo de material excedente manual	m ³	26.92	2.060
Concreto C:H = 1:10 + 30% P.G. para cimiento corrido	m ³	20.71	9.935
Acero de refuerzo $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ en sobrecimiento	kg	145.13	0.055
Encofrado y desencofrado de sobrecimiento	m ²	18.96	1.373
Concreto C:H = 1:8 + 25% P.M. para sobrecimiento	m ³	1.78	12.258
Muros ladrillo k.k. de arcilla 18h (9 x 12.5 x 23 cm)	m ²	118.32	1.301
Acero de refuerzo $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ en columnas	kg	263.88	0.055
Encofrado y desencofrado de columnas	m ²	24.92	1.648
Concreto $f'_c = 175 \text{ kg/cm}^2$ en columnas	m ³	2.31	15.742
Acero de refuerzo $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ en vigas	kg	701.33	0.055
Encofrado y desencofrado de vigas	m ²	28.07	1.831
Concreto $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ en vigas	m ³	4.86	15.742
Acero de refuerzo $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ en losa aligerada	kg	332.49	0.055
Encofrado y desencofrado de losa aligerada	m ²	51.70	1.099
Ladrillo hueco de arcilla 15 x 30 x 30 cm	unid	430.66	0.021
Concreto $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ en losa aligerada	m ³	4.56	12.593
Tarrajeo en muros	m ²	174.98	1.030
Tarrajeo en cielo raso	m ²	51.70	1.236
Contrapiso de 2" de concreto mezcla 1:5	m ²	59.39	1.141
Piso de cemento pulido e=2" mezcla 1:4	m ²	59.39	2.283
Pintura en muros	m ²	174.98	0.375
Pintura en cielo raso	m ²	51.70	0.375
Puerta principal de 1.0 x 2.2 m	unid	1.00	8.24
Puertas interiores	unid	4.00	8.24

De la Tabla 10, las partidas de mayor valor de HC unitario por proceso de ejecución de obra, son las partidas de concreto, dado que usan una mayor cantidad de recursos de mano de obra, y, son las únicas partidas de esta obra, donde se utilizan equipos, estos son: mezcladora y vibrador de concreto. Con la ayuda de los resultados obtenidos en las Tablas 9 y 10, se calculó la HC total de cada proceso analizado (ver Tabla 11).

Tabla 11: HC por cada proceso

Proceso	Unid.	Cant
Producción de insumos	t CO ₂	28.6
Transporte de insumos	t CO ₂	20.4
Ejecución de obra	t CO ₂	1.5
Total: 50.5		

El Gráfico 3, muestra el Histograma de los resultados obtenidos luego de realizar el cálculo de la Huella de Carbono bajo el análisis de Montecarlo para la construcción de la vivienda de ladrillo.

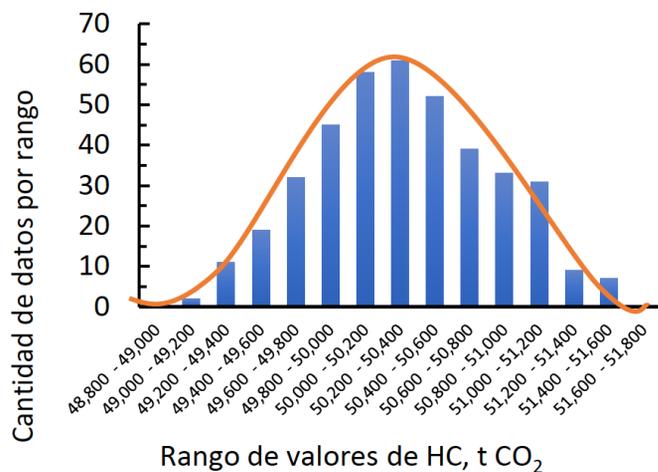


Gráfico 3: Histograma de resultados – HC vivienda de ladrillo

De la Tabla 11 se tiene que la producción de insumos es el proceso de mayor impacto, representando el 57% de la HC total (ver Gráfico 4). Del mismo modo, considerando la unidad funcional planteada, se puede decir que, por cada m² de construcción de vivienda unifamiliar de ladrillo, se emiten 761 kg CO₂e.

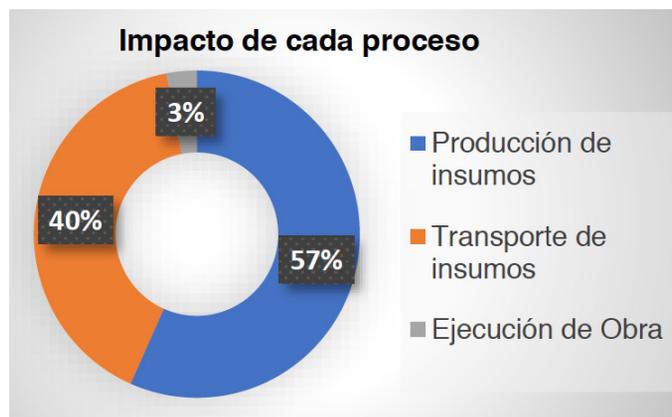


Gráfico 4: Impacto de HC de cada proceso en vivienda de ladrillo

Análisis comparativo

En la construcción de 82.84 m² de vivienda de adobe, se emite 13.7 t CO₂e. Del mismo modo, en la construcción de 66.15 m² de vivienda de ladrillo, se emite 50.5 t CO₂e. Usando la unidad funcional establecida, a fin de comparar sus emisiones globales, se tiene que, para la vivienda de adobe, se emiten 166 kgCO₂ por cada m² de área construida, mientras que, para la vivienda de ladrillo, 761 kgCO₂.

El análisis comparativo se hizo dadas las dos formas de cálculo que se ha utilizado, la Huella de Carbono global y por especialidades. La primera forma, consiste en el cálculo por los tres aspectos analizados, producción de insumo transporte y ejecución de obra. La segunda forma, es el cálculo por especialidades involucradas en el proceso de construcción de una vivienda, esto es, obras preliminares, estructuras y arquitectura. Del primer análisis por procesos, se muestra el resumen de los resultados en un cuadro comparativo en la Tabla 12. Esta es la mejor y más entendible manera de comparar los resultados, puesto que se analizaron bajo los 3 aspectos principales y correctamente diferenciados.

Tabla 12: Comparativo de HC por procesos (t CO₂)

Insumos	Producción de insumos	Transporte de insumos	Ejecución de obra
Vivienda de Adobe	4.1	8.4	1.2
Vivienda de Ladrillo	28.6	20.4	1.5

De la Tabla 12, la HC para la vivienda de adobe es muy superior para el caso de producción y transporte de

insumos, sin embargo, para el proceso de ejecución de obra, lo es ligeramente. La vivienda de adobe es elaborada con materiales artesanales de baja HC incorporada, mientras que, la vivienda de ladrillo, son todos materiales obtenidos mediante un proceso industrial con alta HC incorporada, además de la cantidad de materiales. Para el caso del proceso de ejecución de obra, la ligera diferencia es debido a que se considera únicamente la mano de obra y dos equipos (mezclador y vibrador de concreto).

Del segundo análisis por especialidades, se muestra el resumen de los resultados en un cuadro comparativo en la Tabla 13. Esta es una manera de ver el análisis, enfocándonos a la parte de los trabajos preliminares, la estructura misma y finalmente el impacto de los acabados en términos de HC.

Tabla 13: Comparativo de HC por especialidades, t CO₂

Insumos	Obras preliminares	Estructuras	Arquitectura
Vivienda de Adobe	0.36	7.44	5.94
Vivienda de Ladrillo	0.28	44.38	5.67

De la Tabla 13, las Huellas de Carbono en las obras preliminares y arquitectura, son casi equivalentes, debido a las actividades comunes en tales especialidades para ambas viviendas. Para el caso de la especialidad de estructuras, la diferencia es alta, esto, está justificado en los elementos no comunes de concreto armado para la vivienda de ladrillo, tales como vigas y losa aligerada. En estos, se concentra elevada cantidad de cemento y acero, dos insumos con elevada HC incorporada, por tanto, las actividades que los contienen serán también de alto valor de HC. Otro factor, es el uso del ladrillo de arcilla, al ser industrial, a diferencia del adobe que es artesanal, tiene alto valor de HC incorporada.

Conclusiones

Las viviendas de adobe y ladrillo diseñadas tienen un factor común, el área efectiva o área aprovechable. Por tal motivo, el área construida es distinta, siendo mayor en la vivienda de adobe por el mayor ancho de los muros. En la construcción de la vivienda unifamiliar de adobe diseñada, se tiene una emisión total de 13.7 ton de CO₂e. Teniendo en cuenta la unidad funcional, se obtuvo que, por cada m² de área construida, se emiten 166 kg CO₂e.

La Huella de Carbono total, se calculó por medio del análisis de tres procesos de la construcción, estos son: producción de insumos, transporte de insumos y ejecución de obra, en los que se obtuvo 4.1, 8.4 y 1.2 ton de CO₂e, respectivamente. En la construcción de la vivienda unifamiliar de ladrillo diseñada, se tiene una emisión total de 50.5 ton de CO₂e. Teniendo en cuenta la unidad funcional, se obtuvo que, por cada m² de área construida, se emiten 761 kg CO₂e. La HC de los procesos de producción de insumos, transporte de insumos y ejecución de obra en la construcción de la vivienda de ladrillo son 28.6, 20.4 y 1.5 ton de CO₂e, respectivamente.

Los insumos de mayor HC unitaria para el proceso de producción son el cemento y la cal hidratada, debido al proceso industrial que se requiere para su producción, donde se utilizan equipos que consumen grandes cantidades de energía. Los insumos de mayor HC unitaria para el proceso de transporte son la cal hidratada y los agregados. Respecto a la cal, se considera que el insumo es traído desde Puno, haciendo un recorrido de 1387 km, mientras que, los agregados, es producto de la distancia desde la cantera más cercana, al lugar de la construcción, siendo la distancia 4 km.

Respecto a la HC por proceso de ejecución de obra, los mayores valores se concentran en las partidas de concreto, esto, debido a dos factores: los metrados de las partidas y el hecho que son las partidas donde se utilizan los mayores recursos de mano de obra, adicional a ello, son las únicas partidas de las construcciones analizadas, donde se hace uso de dos equipos, mezcladora y vibrador de concreto. De los resultados obtenidos, se tiene a la vivienda de adobe, como la vivienda más sostenible. Su baja HC incorporada, es debido a los insumos artesanales que intervienen y la baja cantidad de recursos que se requieren para su construcción.

Recomendaciones

Hacer extensivo el análisis de la HC para cada vivienda, incorporando un cuarto proceso, el mantenimiento que se requiere para conservar las viviendas en buen estado durante su vida útil. Se ha trabajado con Factores de Emisión (FE) de inventarios nacionales e internacionales, los cuales son información bibliográfica, condicionados al país de procedencia. El Perú, debería tener un banco de información de FE para que este cálculo tenga mayor

representación en el contexto local. Utilizar los datos encontrados, para calcular la HC de viviendas de otro tipo de unidad de albañilería, pudiendo ser, bloques de concreto. En su defecto, viviendas de madera u otra construcción. Reducir la HC a través de insumos alternativos con baja HC de producción o transporte, además de considerar los materiales reciclados. El cemento puzolánico, requiere menor quema de combustibles fósiles para su producción. El acero reciclado o acero de alta resistencia y baja aleación pueden ser utilizados siempre que se cumplan con los requerimientos para los elementos que lo contienen. Del mismo modo, se recomienda reducir distancias de transporte y usar vehículos de menor consumo de combustible.

Referencias

- Aleksanin, A. (2019). Development of construction waste management. *XXII International Scientific Conference on Construction for the Formation of Living Environment FORM2019*, E3S Web of Conferences 97, 06040
- Badilla, P., Elizondo, J.A., Fernández, T., Méndez, J., Mora F. y Quesada, M. (2015). CO₂e: *Cálculo de huella de carbono para materiales de construcción en Costa Rica*. Seminario de graduación de Arquitectura, Universidad de Costa Rica, San José de Costa Rica
- Balderas, H. y Arista, G.J. (2019). Análisis comparativos del ciclo de vida en procesos e insumos para construcción y vivienda. *Seminario Internacional Hábitat Accesible*, Universidad Autónoma de San Luis de Potosí, México
- de Wolf, C., Yang, F., Cox, D., Charlson, A., Hattan, A.S. and Ochsendorf, J. (2016). Material quantities and embodied carbon dioxide in structures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Engineering Sustainability* 169(4), 150-161
- Freire, A., Muñoz, J. y Marrero, M. (2016). Incorporación de huella de carbono y huella ecológica en las bases de costes de construcción. Estudio de caso de un proyecto de urbanización en Écija, España. *Hábitat Sustentable* 6(1), 7-17
- Ghaffar, S.H., Burman, M. and Braimah, N. (2020). Pathways to circular construction: an integrated management of construction and demolition waste for resource recovery. *Journal of Cleaner Production* 244, 118710
- IPCC (2014). Cambio climático 2014. Informe de síntesis. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.), Ginebra, Suiza
- IPCC (2021). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Vol.3, Procesos industriales y uso de productos. Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, Ginebra, Suiza
- ISO 14040 (2006). Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia. Ginebra, Suiza
- León-Velez, A. y Guillén-Mena, V. (2020). Energía contenida y emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador. *Ambiente Construido* 20(3), 611-625
- MAATE (2021). Norma técnica alcance a producto del programa Ecuador Carbono Cero. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica MAATE, Quito, Ecuador
- MEM (2020). Uso eficiente de la energía. Guía metodológica para docentes del nivel inicial y primaria. Presentación Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Eficiencia Energética, Perú.
- Mercader, M.P., Ramírez de Arellano, A. y Olivares, M. (2012). Modelo de cuantificación de las emisiones de CO₂ producidas en edificación derivadas de los recursos materiales consumidos en su ejecución. *Informes de la Construcción* 64 (527), 401-414
- Michell Torres, H. (2012). Perfil ambiental del acero. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia