

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES Y DESARROLLO DE
PROPUESTAS DE MITIGACIÓN DE IMPACTOS PARA VIVIENDAS
DE EMERGENCIA EN LA REGIÓN DE PISCO**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Civil

AUTORA:

Vania Lorena Carhuamaca Llatas

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

Harold Aaron Aronés Ortega

ASESOR:

Karin Bartl

Lima, noviembre 2023

Informe de Similitud

Yo, Karin Bartl, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado

EVALUACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES Y DESARROLLO DE PROPUESTAS DE MITIGACIÓN DE IMPACTOS PARA VIVIENDAS DE EMERGENCIA EN LA REGIÓN DE PISCO,

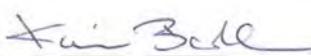
del/de la autor(a)/ de los(as) autores(as)

VANIA LORENA CARHUAMACA LLATAS y HAROLD AARON ARONÉS ORTEGA,

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 20% (excluyendo bibliografía). Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 25/11/2023. Confirmando que el porcentaje de similitud detectado es debido al trabajo de investigación de los mismos alumnos, por lo que no es considerado plagio ya que es de los mismos autores.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 25.11.2023

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>Bartl, Karin</u>	
DNI: 000324631	Firma 
ORCID: 0000-0002-9856-5231	

RESUMEN

El Perú es un país que ha pasado por desastres naturales de gran magnitud, lo cual ha resultado en pérdidas significativas de vidas humanas e infraestructura. En respuesta a estas emergencias, se ha llevado a cabo el proceso de rehabilitación urbana de zonas damnificadas a través de programas de reconstrucción de viviendas. Sin embargo, la construcción de estas viviendas a gran escala conlleva impactos ambientales notables dado que el sector de la construcción es responsable de una importante cantidad de emisor de gases de efecto invernadero y consumidor de energía a nivel mundial.

Por ello, la presente investigación se centra en el proyecto de reconstrucción de viviendas “Renacer” que evalúa y cuantifica los impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida mediante la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Las categorías de impacto ambiental analizadas son: potencial de calentamiento global, toxicidad humana, formación de partículas finas, acidificación, eutrofización marina y escasez de recursos fósiles. Por otro lado, el enfoque del análisis es “de la cuna a la puerta” (de la extracción de la materia prima hasta la finalización del proceso constructivo). Además, se ha desarrollado la normalización y ponderación de los impactos de cada alternativa propuesta con el fin de estandarizar los resultados y proponer un ecodiseño menos subjetivo.

Los resultados revelan que los materiales que más significativos en términos de impacto ambiental son el concreto, el acero y los ladrillos de arcilla. Además, con respecto a los escenarios planteados, el uso de cemento puzolánico conlleva a una reducción de 14.3% al 18.6% en la mayoría de las categorías de impacto. En el caso del ladrillo sílico calcáreo, los impactos se redujeron en un rango del 8.7% 14.3%. Con respecto a las placas de yeso, su uso genera una reducción del 4% al 10.4%, sin embargo, genera un aumento de hasta un 42.5% en la toxicidad

humana en módulos de albañilería. En general, no se obtiene la misma tendencia de reducción para cada categoría de impacto a analizar, principalmente a la diferencia que existe tanto en las sustancias y compuestos químicos emitidos como en el proceso de extracción de cada material.

Finalmente, se estandarizaron los resultados a través de la normalización con los factores de referencia brindados por el reporte publicado por la Comisión Europea: *Global normalisation factors for the Environmental Footprint and Life Cycle Assessment* y la base de datos *Normalization scores ReCiPe 2016 (National Institute for Public Health and the Environment, 2020)* para luego ponderarlos según los valores establecidos por la Unión Europea (Salas, S. et al., 2018) y la establecida por Shu Su a través de la ponderación estática y dinámica (Shu Su, 2019), resultando que el diseño con el mejor desempeño ambiental de los módulos analizados corresponde al uso del cemento puzolánico junto con el ladrillo sílico calcáreo, obteniendo reducciones en un rango del 15% al 18%. Sin embargo, es importante mencionar que futuras investigaciones deberían incluir también el análisis de otros diseños alternativos, así como establecerse diferentes fuentes para los factores de normalización y ponderación con el fin de alcanzar soluciones más sustentables.

ABSTRACT

Peru is a country that has experienced natural disasters of great magnitude, resulting in significant losses of human lives and infrastructure. In response to these emergencies, the process of urban rehabilitation in affected areas has been carried out through housing reconstruction programs. However, the large-scale construction of these houses has notable environmental impacts because the construction sector is responsible for a significant amount of greenhouse gas emissions and global energy consumption.

Therefore, this research focuses on the housing reconstruction project "Renacer," which evaluates and quantifies environmental impacts throughout the life cycle using the Life Cycle Assessment (LCA) methodology. The analyzed environmental impact categories include global warming potential, human toxicity, fine particulate matter formation, acidification, marine eutrophication, and fossil resource scarcity. Furthermore, the analysis follows a "cradle-to-gate" approach, considering the entire life cycle from raw material extraction to the completion of the construction process. Additionally, normalization and weighting of the impacts of each proposed alternative have been developed to standardize the results and propose a less subjective eco-design.

The results obtained show that the materials that contribute the most to the impacts of each impact category are concrete, steel and clay bricks. In addition, with respect to the scenarios proposed, the use of pozzolanic cement leads to a reduction from 14.3% to 18.6% in most impact categories. In the case of the sand lime brick, the impacts were reduced in a range of 8.7% 14.3%. Regarding gypsum plasterboard, its use generates a reduction from 4% to 10.4%, however, it generates an increase of up to 42.5% in human toxicity in masonry modules. In general, the same reduction trend is not obtained for each impact category to be analyzed, mainly due to the

difference that exists both in the substances and chemical compounds emitted and in the extraction process of each material.

Finally, the results were standardized through normalization with the reference factors provided by the report published by the European Commission: Global normalization factors for the Environmental Footprint and Life Cycle Assessment and the Normalization scores ReCiPe 2016 database (National Institute for Public Health and the Environment, 2020) to then weight them according to the values established by the European Union (Salas, S. et al., 2018) and the one established by Shu Su through static and dynamic weighting (Shu Su, 2019). Based on the normalized and weighted results, the design with the best environmental performance corresponds to the use of pozzolanic cement together with sand lime brick, obtaining impact reductions in a range of 15% to 18%. However, it is important to mention that future research should also include the analysis of other alternative designs, as well as establishing different sources for the normalization and weighting factors to reach more sustainable solutions.

DEDICATORIA

A mi familia, por todo su apoyo y sacrificio a lo largo de estos años para poder brindarme la oportunidad de realizar esta etapa de mi formación profesional y personal.

A nuestra asesora Karin Bartl, por todo su tiempo y atención para con nosotros, así como todos los valiosos consejos que nos ha brindado para el desarrollo de esta investigación.

A mis amigos y profesores de los cuales me llevo gratos momentos y que de una u otra manera han aportado a mi vida universitaria.

Harold Aaron Aronés Ortega

Un sincero agradecimiento a mis amados padres, por su continuo apoyo, comprensión y sacrificio. Por su confianza en mí y cuidado brindado en todos estos años.

Un agradecimiento especial a nuestra asesora Karin Bartl, por su constante guía y conocimientos que fueron compartidos amablemente durante todo este proyecto de investigación.

Y no olvidaré el apoyo de mis amigos, profesores, compañeros de clases. Cada aprendizaje y momentos compartidos que hicieron agradable mi trayectoria académica.

Vania Lorena Carhuamaca Llatas

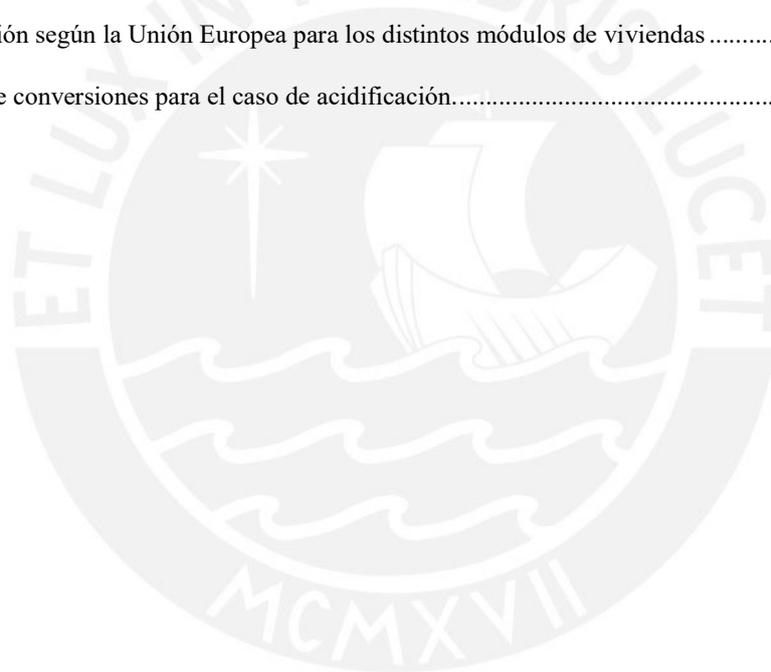
INDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos	3
1.3 Hipótesis	3
1.4 Alcances y limitaciones.....	3
1.5 Justificación	4
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	5
2.1 Antecedentes y contexto de la provincia de Pisco.....	5
2.2 Impacto ambiental del sector de la construcción.....	6
2.3 Impactos ambientales de los materiales de construcción	8
2.4 Estudios de ACV aplicado a edificaciones en el mundo	13
2.5 Estudios de ACV en Latinoamérica	16
2.6 Estudios de ACV en el Perú.....	19
2.7 Ecodiseño aplicado al sector de la construcción	21
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	23
3.1 Metodología aplicada del ACV	23
3.2 Objetivos y alcance del estudio.....	24
3.3 Inventario del ciclo de vida	25
3.4 Evaluación del impacto de ciclo de vida	27
3.5 Normalización y ponderación	30
3.6 Interpretación de los resultados.....	31
CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO	36
4.1 Inventario del ciclo de vida del diseño original.....	38
4.2 Escenario 1: cambio de cemento Portland por cemento puzolánico	44
4.3 Escenario 2: cambio de ladrillos de arcilla por ladrillos sílico calcáreo.....	46
4.4 Escenario 3: cambio de ladrillos de arcilla por placas de yeso	49
4.5 Escenario 4: cambio de ladrillos de arcilla por ladrillos sílico calcáreo usando cemento puzolánico.....	51
4.6 Escenario 5: cambio de ladrillos de arcilla por placas de yeso usando cemento puzolánico	52
CAPÍTULO 5. RESULTADOS OBTENIDOS.....	53
5.1 Impacto ambiental por módulo	53
5.2 Impacto ambiental por materiales	55
5.3 Impactos ambientales por escenarios	65
5.3.1 Impactos ambientales del escenario 1 con cemento puzolánico	65
5.3.2 Impactos ambientales del escenario 2 con ladrillo sílico-calcáreo	66
5.3.3 Impactos ambientales del escenario 3 con placas de yeso	67
5.3.4 Impactos ambientales del escenario 4 con ladrillo sílico-calcáreo y cemento puzolánico	68
5.3.5 Impactos ambientales del escenario 5 con placas de yeso y cemento puzolánico	69
5.4 Comparación de impactos ambientales por escenarios	70
5.4.1 Comparación de escenarios para los módulos de placas	70
5.4.2 Comparación de escenarios para los módulos de albañilería.....	76
5.5 Normalización y ponderación de los resultados	82
5.6 Discusión de resultados.....	90
5.6.1 Comparación de impactos ambientales con otros estudios	90
5.7 Limitaciones del estudio	92
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....	94
CAPÍTULO 7. REFERENCIAS	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Impactos de los materiales de construcción en vivienda de concreto armado y bloques de hormigón.	9
Figura 2. Impactos de los materiales de construcción en vivienda tradicional de albañilería.....	10
Figura 3. Resultados de impactos ambientales diseñado para 3 escenarios: madera (a), concreto (b) y acero (c)	12
Figura 4. Distribución comparativa entre el peso (kg/m ²) v/s la energía contenida (MJ/m ²)	17
Figura 5. Fases en el análisis de ciclo de vida.	24
Figura 6. Procedimientos simplificados para el análisis de inventario.	26
Figura 7. Terreno donde se ubica el proyecto antes y después de la construcción de las viviendas de emergencias.	36
Figura 8. Distribución de viviendas de acuerdo con el tipo de construcción.....	37
Figura 9. Lista de materiales modelados en Simapro. Los procesos predefinidos en los materiales de origen nacional fueron adaptados de manera que se encuentren más acorde al contexto del proyecto.....	42
Figura 10. Montaje del inventario de ciclo de vida en el programa Simapro del módulo Futura 30	44
Figura 11. Resultados de las categorías de impacto para cada módulo del proyecto RENACER.	54
Figura 12. Contribución de los materiales por categoría de impacto de los módulos de placas.	58
Figura 13. Contribución de los materiales por categoría de impacto de los módulos de albañilería.	64
Figura 14. Comparación de escenarios del potencial de calentamiento global para módulos de placas.....	71
Figura 15. Comparación de escenarios de la toxicidad humana cancerígena para módulos de placas	72
Figura 16. Comparación de escenarios de la toxicidad humana no cancerígena para módulos de placas	73
Figura 17. Comparación de escenarios del material particulado para módulos de placas	73
Figura 18. Comparación de escenarios de la acidificación para módulos de placas.....	74
Figura 19. Comparación de escenarios de la eutrofización marina para módulos de placas	75
Figura 20. Comparación de escenarios de la escasez de recursos fósiles para módulos de placas	76
Figura 21. Comparación de escenarios del potencial de calentamiento global para módulos de albañilería.....	77
Figura 22. Comparación de escenarios de la toxicidad humana cancerígena para módulos de albañilería	78
Figura 23. Comparación de escenarios de la toxicidad humana no cancerígena para módulos de albañilería	78
Figura 24. Comparación de escenarios del material particulado para módulos de albañilería	79
Figura 25. Comparación de escenarios de la acidificación para módulos de albañilería	80
Figura 26. Comparación de escenarios de la eutrofización marina para módulos de albañilería.....	81

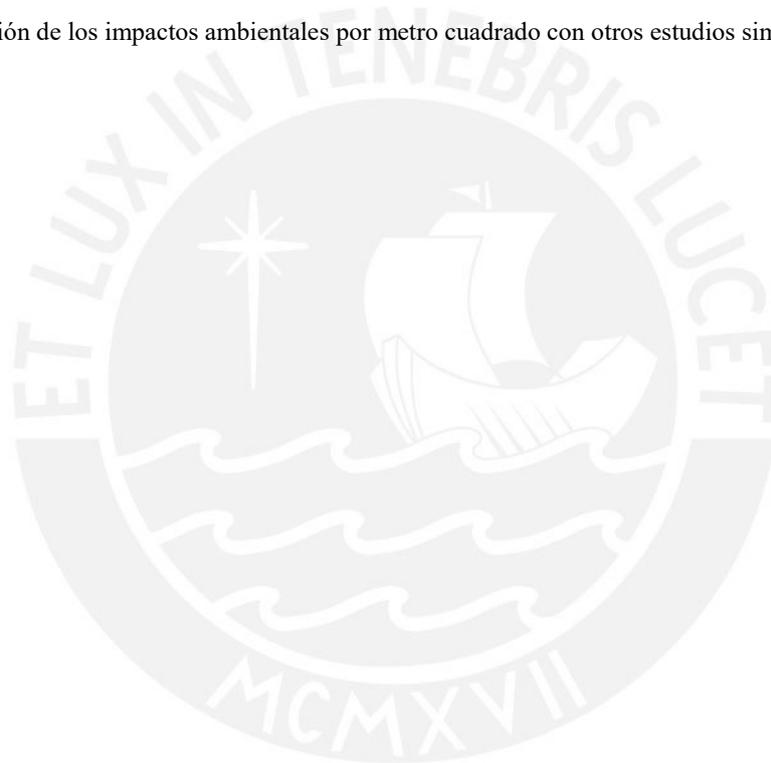
Figura 27. Comparación de escenarios de la escasez de recursos fósiles para módulos de albañilería	82
Figura 28. Comparación de puntajes de normalización de los distintos escenarios para el módulo Máxima 42.....	83
Figura 29. Comparación de puntajes de normalización de los distintos escenarios para el módulo Paracas 23.....	83
Figura 30. Comparación de puntajes de normalización de los distintos escenarios para el módulo Paracas 38.....	84
Figura 31. Comparación de puntajes de normalización de los distintos escenarios para el módulo Paracas 50.....	84
Figura 32. Comparación de puntajes de normalización de los distintos escenarios para el módulo Futura 30	85
Figura 33. Comparación de puntajes de normalización de los distintos escenarios para el módulo Premium 36	85
Figura 34. Ponderación estática según Shu Su para los distintos módulos de viviendas	87
Figura 35. Ponderación estática según Shu Su para los distintos módulos de viviendas	88
Figura 36. Ponderación según la Unión Europea para los distintos módulos de viviendas	89
Figura 37. Cuadro de conversiones para el caso de acidificación.....	92



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Impactos ambientales durante el proceso de construcción.....	7
Tabla 2 Factores de referencia de emisiones globales por persona del año 2010 modelados para ReCiPe.....	32
Tabla 3 Factores de normalización de emisiones globales por persona del año 2010 modelados para USEtox e IPCC.....	32
Tabla 4 Conjunto de ponderaciones recomendado para todas las categorías de impacto midpoint.....	34
Tabla 5 Distribución proporcional de las categorías de impacto ponderadas en un sistema estático y dinámico.....	35
Tabla 6 Inventario del ciclo de vida por unidad de módulo que conforman el proyecto RENACER.....	39
Tabla 7 Distancias en kilómetro requeridas para el transporte de cada material.....	41
Tabla 8 Procesos incluidos y modificaciones en el inventario.....	42
Tabla 9 Procesos incluidos y modificaciones en el inventario para el cemento puzolánico.....	45
Tabla 10 Ventajas y desventajas comparativas en el uso del ladrillo de arcilla y el ladrillo sílico calcáreo.....	47
Tabla 11 Procesos incluidos y modificaciones en el inventario para el ladrillo sílico calcáreo.....	47
Tabla 12 Inventario del ciclo de vida para cada módulo del proyecto RENACER implementando el uso de ladrillo sílico calcáreo.....	48
Tabla 13 Procesos incluidos y modificaciones en el inventario para el drywall.....	49
Tabla 14 Inventario del ciclo de vida para cada módulo del proyecto RENACER implementando el uso de drywall.....	50
Tabla 15 Resumen de los impactos ambientales por metro cuadrado de cada módulo del proyecto RENACER.....	55
Tabla 16 Resumen de los porcentajes de contribución de los materiales a cada categoría de impacto en el módulo Futura 30.....	56
Tabla 17 Resumen de los porcentajes de contribución de los materiales a cada categoría de impacto en el módulo Premium 36.....	57
Tabla 18 Resumen de los porcentajes de contribución de los materiales a cada categoría de impacto en el módulo Paracas 23.....	60
Tabla 19 Resumen de los porcentajes de contribución de los materiales a cada categoría de impacto en el módulo Paracas 38.....	61
Tabla 20 Resumen de los porcentajes de contribución de los materiales a cada categoría de impacto en el módulo Paracas 50.....	62
Tabla 21 Resumen de los porcentajes de contribución de los materiales a cada categoría de impacto en el módulo Máxima 42.....	63

Tabla 22 Resumen de los impactos ambientales por metro cuadrado del escenario 1 con cemento puzolánico de cada módulo del proyecto RENACER.....	65
Tabla 23 Resumen de los impactos ambientales por metro cuadrado del escenario 2 con ladrillo sílico calcáreo de cada módulo del proyecto RENACER.	66
Tabla 24 Resumen de los impactos ambientales por metro cuadrado del escenario 3 con drywall de cada módulo del proyecto RENACER.....	67
Tabla 25 Resumen de los impactos ambientales por metro cuadrado del escenario 4 con ladrillo sílico-calcáreo y cemento puzolánico de cada módulo del proyecto RENACER.....	68
Tabla 26 Resumen de los impactos ambientales por metro cuadrado del escenario 5 con placas de yeso y cemento puzolánico de cada módulo del proyecto RENACER.	69
Tabla 27 Comparación de los impactos ambientales por metro cuadrado con otros estudios similares	91



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El Perú es uno de los países que pertenecen al Cinturón de Fuego del Pacífico, por lo que presenta actividad sísmica importante. De acuerdo con Casaverde (1995), asesor científico del INDECI, dentro de los terremotos más devastadores que se han suscitado en el país, se encuentra el del año 1970 en el departamento de Áncash, el cual dejó como resultado 67.000 muertos y 60.000 viviendas damnificadas. Asimismo, de acuerdo con los datos obtenidos de INDECI (2011), en el año 2007, un movimiento telúrico dejó como consecuencia cerca de 140.000 viviendas afectadas y 600 fallecidos en el departamento de Ica.

Ante los daños que generan terremotos de esta magnitud, a través del diario oficial El Peruano (2015), se estableció el Decreto Supremo N°12–2015 del sector vivienda que explica el procedimiento para la entrega de módulos de vivienda en casos de declaratoria de estado de emergencia. Estos hogares, según indica el centro de investigación y prevención de desastres PREDES (2013), son construcciones temporales diseñadas para ofrecer refugio y protección a individuos que han perdido sus viviendas debido a circunstancias externas. Además, deben contemplar un espacio esencial aceptable para su utilización y adecuado rendimiento, cumpliendo con los requisitos necesarios.

Por lo mismo, los programas de reconstrucción priorizan la construcción de este tipo de viviendas en el menor tiempo posible. Debido a esto, se puede estar obviando algunos aspectos importantes como los impactos ambientales que generan su construcción. Además, debido a que el proceso de rehabilitación urbana suele ser lento o, en algunos casos, este queda estancado, este tipo de viviendas se mantiene por más tiempo del que se tiene planeado, pudiendo agravar más

estos impactos. Debido a esto, es necesario realizar un análisis de impacto ambiental a estas viviendas para identificar sus impactos potenciales sobre el ambiente y proponer mejoras.

Una herramienta ampliamente empleada en la evaluación de los efectos ambientales es el análisis del ciclo de vida (ACV). Según lo establecido en la Norma ISO:14040 (2006), el ACV se define como una metodología para identificar los aspectos ambientales e impactos posibles vinculados a un producto. Este proceso implica recopilar un inventario de las entradas y salidas pertinentes del sistema, con el fin de evaluar los posibles impactos ambientales derivados de dichas entradas y salidas. Esta metodología es una de las más usadas en el mundo pues su alcance es muy amplio y completo, teniendo en cuenta los impactos generados desde la obtención de los materiales hasta en el uso del producto, como su desecho o reciclaje.

Finalmente, como se han realizado en otros estudios en edificaciones, los resultados del ACV se pueden usar como base para proponer cambios en la selección de los materiales a fin de reducir los impactos ambientales en la construcción de la vivienda de emergencia a fin de conseguir un diseño que pueda tomarse en cuenta en futuros proyectos de construcción de viviendas en zonas de riesgo.

1.1 Objetivo general

La presente tesis tiene por objetivo general identificar el impacto ambiental de las viviendas de emergencia predominantes en la provincia de Pisco, una de las zonas con alto riesgo sísmico, a fin de proponer propuestas para su reducción.

1.2 Objetivos específicos

- Obtener los materiales de construcción utilizados en viviendas de emergencia a través de datos estadísticos sobre el terremoto en Pisco en el año 2007 y expedientes técnicos del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
- Determinar la composición estructural de una vivienda típica de una zona de emergencia con sus materiales predominantes.
- Evaluar el impacto ambiental a través de la metodología del análisis de ciclo de vida utilizando el programa Simapro.
- Proponer diferentes escenarios en el que se modifique los materiales de construcción de la vivienda de emergencia de manera que se reduzcan los impactos ambientales.
- Comparar los escenarios y determinar el modelo con menor impacto ambiental.

1.3 Hipótesis

Las viviendas construidas en áreas de emergencia pueden generar a menudo un impacto ambiental significativo debido a la priorización de la velocidad de construcción en lugar de considerar medidas respetuosas con el medio ambiente. Sin embargo, es posible reducir este impacto aplicando el análisis del ciclo de vida y modificando los materiales utilizados en el diseño de las viviendas de emergencia.

1.4 Alcances y limitaciones

Esta investigación se enfocará principalmente en el estudio de viviendas de emergencia en zonas de riesgo en la provincia de Pisco, pudiendo ser aplicable de manera similar en otras zonas de riesgo. Además, las categorías de impacto comprenden el calentamiento global, eutrofización

marina, acidificación y material particulado. Finalmente, las etapas del ciclo de vida trabajadas contemplan únicamente el pre-uso definidas por la manufactura, transporte y proceso constructivo.

1.5 Justificación

El presente trabajo de tesis desea poner en manifiesto los impactos ambientales que genera la construcción de viviendas en zonas de riesgo como respuesta a terremotos, debido a que su proceso constructivo es rápido y deja de lado algunos puntos importantes como el aspecto ambiental. Además, las condiciones de salubridad del entorno pueden no ser completamente adecuadas, tanto en el grado de toxicidad de los materiales que conforman las viviendas de emergencia, como en el estado de los recursos del cual se prestan los habitantes.

Debido a todo esto, esta investigación analizará los impactos asociados a los puntos antes mencionados aplicando la metodología del ACV, y a través de esta, propondrá un modelo de vivienda más ecoamigable a través de cambios en la composición de los materiales. Además, este trabajo pretende ser una alternativa para la construcción de este tipo de viviendas y, a su vez, un punto de partida para futuras investigaciones a esta clase de proyectos, ya que aún es poca la información que se tiene respecto a estos.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Antecedentes y contexto de la provincia de Pisco

En un compendio estadístico realizado por el Instituto Nacional de Defensa Civil (2007), se estimaron las consecuencias producidas luego del terremoto del 15 de agosto de ese mismo año. Según este informe, el terremoto resultó en 434 614 personas damnificadas, 22 160 personas afectadas, 596 fallecidos, y un total de 93 708 viviendas que quedaron destruidas e inhabilitadas. También se registraron pérdidas significativas en términos de daños materiales, infraestructuras educativas, de salud, transporte y agricultura.

En el año 2013, Lévano, Flores, Fuentes y Cabrel (2013) llevaron a cabo un estudio sobre el impacto socioambiental en la ciudad de Pisco después del terremoto. En este trabajo, recopilaron información de damnificados y representantes del Estado, concluyendo que la mayoría de las personas afectadas aún reside en viviendas precarias. También observaron un deterioro en la salud física y mental de estos individuos, quienes han fortalecido sus redes familiares y vecinales como una estrategia para hacer frente al desastre. Además, se destacó la ausencia de políticas preventivas para enfrentar eventos catastróficos de esta magnitud. Complementando lo anterior, los resultados hacen énfasis en que las acciones de socorro luego del terremoto fueron más inclusivas y privilegiadas en construcciones relacionadas con el sector salud y educación, dejando en segundo plano al sector vivienda.

Por último, distintas fuentes radiales y periodísticas han elaborado año tras años noticias acerca de las condiciones en que se encuentran las regiones más afectadas por el terremoto en Pisco, dando muestra del lento avance del proceso de rehabilitación urbana y la poca preocupación del Estado por otorgar a los damnificados mejores condiciones de vida. Uno de los más recientes

la elabora la revista Perú 21 (2019) a doce años de la tragedia, donde se entrevista al alcalde provincial Juan Mendoza, el cual afirma que aún hay familias que viven en módulos y que de los 15 mil predios que debieron titularse, hasta la fecha, no se han avanzado ni tres mil en la última década debido a la falta de profesionales y la informalidad. Además, de acuerdo con una entrevista realizada por Exitosa Noticias (2021), el alcalde provincial mencionó que, en los distritos de Paracas, San Andrés, La Villa, San Clemente, Humay y Huancano, la reconstrucción en redes de alcantarillado se encuentra al 65%. Asimismo, afirmó que, de las 76.000 viviendas damnificadas, el casco urbano falta completar en 27% a nivel provincial.

2.2 Impacto ambiental del sector de la construcción

Según una investigación realizada por Ding (2008), al considerar las ciudades como ecosistemas vulnerables a diversas influencias económicas, sociales, culturales y ambientales, se identifica que estas áreas se convierten en fuentes de contaminación ambiental debido a la carga que soportan en términos de población, agotamiento de recursos e actividad industrial. En este contexto de sostenibilidad, se plantea que la industria de la construcción enfrenta un desafío y una responsabilidad de incorporar la gestión ambiental en toda la cadena de valor de sus proyectos, prestando especial atención al consumo excesivo de los recursos mundiales como uno de los elementos fundamentales que definen el punto de partida de cualquier desarrollo.

Desde una perspectiva global, el sector de la construcción concentra numerosos impactos energéticos y ambientales (Krausmann et al., 2009). Este sector representa aproximadamente el 40% del consumo mundial de energía, el 30% del uso de materias primas, el 25% de la generación de desechos sólidos, el 25% del consumo de agua, el 12% del uso del suelo y el 33% de las emisiones globales relacionadas con gases de efecto invernadero (Chau et al., 2015).

Tabla 1*Impactos ambientales durante el proceso de construcción.*

Etapa del ciclo de vida de la construcción	Tipos básicos de impacto ambiental
Extracción de materias primas	Agotamiento de los recursos, distorsión del paisaje y daño a los ecosistemas.
Fabricación de materiales de construcción, artículos, elementos estructurales.	Emisiones nocivas, consumo de energía y desperdicios.
Trabajos de diseño y levantamiento. Construcción de caminos y tajos abiertos	Consumo de energía, contaminación del medio ambiente y generación de residuos
Organización del sitio de construcción	Distorsión de la escorrentía inmediata, erosión del suelo, cambio de paisaje, generación de escombros y conducción de vehículos de carretera contaminados.
Construcción: transporte, operación de equipos de construcción.	Contaminación del aire atmosférico, suelo y agua del subsuelo, contaminación acústica y consumo de energía.
Construcción: operaciones de soldadura, aislamiento, techado y acabado	Emisiones nocivas al medio ambiente (gas, polvo, etc.) y consumo de energía.
Construcción: piedra y obras de construcción.	Generación de residuos y contaminación por polvo del aire, cargas de vibración y ruido y consumo de energía
Operación del inmueble	Emisiones nocivas, influencia en la salud de las personas y consumo de energía
Demolición del inmueble	Generación de residuos en el transcurso del allanamiento de morada, contaminación del medio ambiente y distorsión del paisaje

Nota: Extraído de *Problem of environmental safety during construction (analysis of construction impact on environment)*, Smirnova y Larionova 2019.

Un espectro significativo de impactos se atribuye a los efectos ecológicos negativos en relación con el ciclo de vida de la construcción: agotamiento de los recursos, contaminación de la atmósfera, contaminación del medio ambiente acuático, demolición de la capa superior del suelo, contaminación acústica, generación de residuos, degradación de la vegetación, variación de la condición hidrogeológica, otros efectos directos e indirectos, los cuales se detallan en la Tabla 1.

La excavación y el transporte de suelo provocan la contaminación del aire con polvo y gases de escape de los motores de los vehículos (Smirnova y Larionova, 2019).

En base a esto, la Norma ISO:14001 (2004) menciona que la industria de la construcción, vinculada al progreso de los países mediante la creación, mejora y transformación de estructuras, tiene como objetivo primordial satisfacer las necesidades de la sociedad. Simultáneamente, su gestión ambiental se enfoca en abordar los impactos, ya sean adversos o beneficiosos, que surgen a lo largo de las diversas etapas del desarrollo de un proyecto constructivo. En este contexto, se subrayan los aspectos relacionados con el entorno humano y natural, así como sus interacciones con los proyectos de construcción. La industria de la construcción abarca diversas fuentes de contaminación que pueden clasificarse en los distintos aspectos e impactos ambientales inherentes al sector económico, afectando los componentes abióticos de los ecosistemas, como el suelo, el aire y el agua.

2.3 Impactos ambientales de los materiales de construcción

Según la Comisión Europea (2008), los productos son responsables de los impactos en el medio ambiente (calentamiento global, agotamiento de la capa de ozono, acidificación, toxicidad, etc.) en todo su ciclo de vida. El aumento tanto en el número como en la complejidad de productos de todo tipo es una causa principal de los problemas ambientales actuales. Por esta razón, el alcance de las políticas ambientales se ha ampliado en los últimos años, pasando de iniciativas de producción más limpia a una perspectiva integrada de su ciclo de vida.

Como se mencionó anteriormente, el sector de la construcción es uno de los mayores responsables de los efectos nocivos que sufre el medio ambiente. Esto se debe en gran medida a los procesos de obtención y utilización de los distintos materiales que participan en la construcción

de proyectos. Es por ello que los materiales de construcción juegan un papel importante en la influencia de los edificios en el medio ambiente (ACIU y MANEA, 2014).

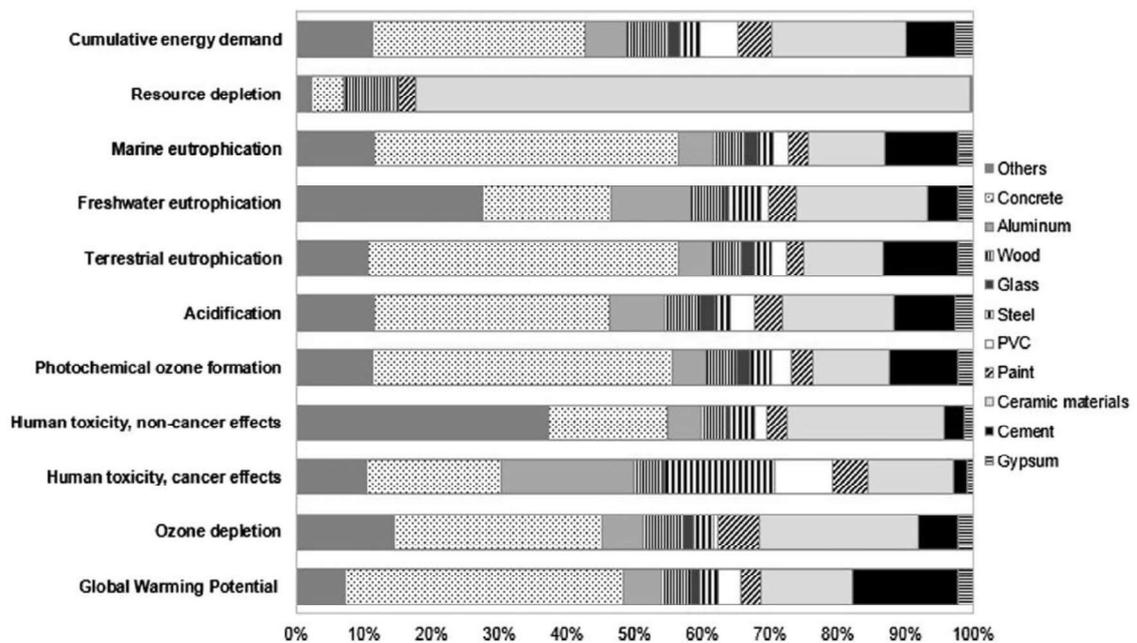


Figura 1. Impactos de los materiales de construcción en vivienda de concreto armado y bloques de hormigón.

Fuente: *Environmental performance analysis of residential buildings in Brazil using life cycle assessment (LCA)* Evangelista et al., 2019.

En la investigación realizada por Evangelista et al. (2018) se analiza el impacto de los principales materiales de construcción. Observaron que el hormigón, el acero y las tejas de cerámica fueron los que generaron un mayor impacto ambiental, los cuales suelen empelarse para todo el casco estructural y arquitectónico del edificio. Sin embargo, también concluyen que los impactos dependen del sistema estructural de la vivienda construida. La Figura 1 muestra el impacto de los materiales para una edificación con sistema constructivo de concreto armado y bloques de hormigón. Se observa que, para categorías como potencial de calentamiento global, formación de ozono, acidificación, eutrofización terrestre, el concreto es el material predominante

como agente contaminante. Pero en el caso de la categoría de escasez de recursos, los productos compuestos por cerámicos es el más desfavorable (Evangelista et al., 2018).

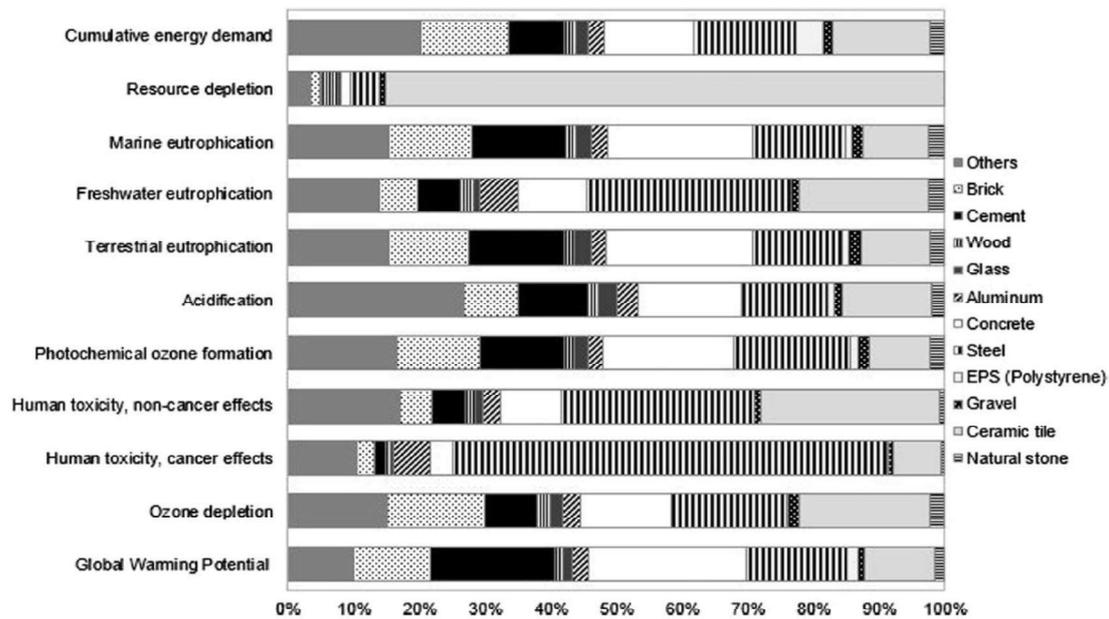


Figura 2. Impactos de los materiales de construcción en vivienda tradicional de albañilería
Fuente: Environmental performance analysis of residential buildings in Brazil using life cycle assessment (LCA) Evangelista et al., 2019.

De igual forma se realizó el análisis para una vivienda tradicional de albañilería. En la Figura 2 se aprecia como el concreto se asoció con los mayores impactos en las categorías de potencial de calentamiento global, formación de ozono, eutrofización terrestre y marina. El acero tuvo los mayores impactos en la toxicidad humana: cancerígena y no cancerígena, y en la eutrofización del agua dulce. Las baldosas cerámicas impactan más en la escasez de recursos (Evangelista et al., 2019). La comparación de estos resultados para el desempeño ambiental de los materiales de construcción es difícil de interpretar, ya que solo se presentan resultados particulares (Porhinčák, 2011).

Complementando lo anterior, muchos materiales de construcción (hormigón, cemento, ladrillos de arcilla, bloques de concreto) utilizan grandes cantidades de energía en su fabricación

y transporte. La mayor parte de esta energía proviene de la quema de combustibles fósiles, aumentando la cantidad de CO₂ liberado a la atmósfera, con el consiguiente efecto de calentamiento global (Lawrence, 2015).

Uno de los recientes estudios en Australia realizado por Lu et al., (2017) compara el ciclo de vida de materiales alternativos para la construcción, donde se explica que el uso de la madera es visto como una alternativa sostenible para reducir impactos ambientales. Los resultados de esta investigación indican que las vigas y columnas de madera tuvieron un rendimiento mucho mejor a comparación de materiales convencionales como el concreto y acero con respecto al calentamiento global. Unos de los factores principales son la baja intensidad energética y la utilización de poco material de valor en la fabricación de las vigas y columnas. Además, el uso de combustible de biomasa para sustituir el combustible fósil como fuente de energía durante el proceso de fabricación condujo a una reducción significativa en las emisiones de gases de efecto invernadero. Las estructuras de hormigón fueron la alternativa menos favorable debido a un gran índice de calentamiento global. Los mayores impactos fueron atribuidos principalmente al uso de materiales intensivos en energía y su peso que requería más energía durante la fabricación y el transporte. Por otro lado, las estructuras de acero funcionaron ligeramente mejor que la viga de hormigón debido a su peso más ligero, lo que condujo a una reducción en el consumo de energía y consumo de material, así como transporte. Además, el reciclaje de acero contribuyó a importantes compensaciones en las emisiones de GEI. En la Figura 3a se observa los valores resultantes por cada categoría de impacto (potencial de calentamiento global, acidificación, eutrofización terrestre, agotamiento de recursos fósiles y toxicidad humana) para la alternativa donde se propone el uso de madera como material sostenible. De igual forma se tienen los valores para las alternativas del uso de concreto (Figura 3b) y acero (Figura 3c).

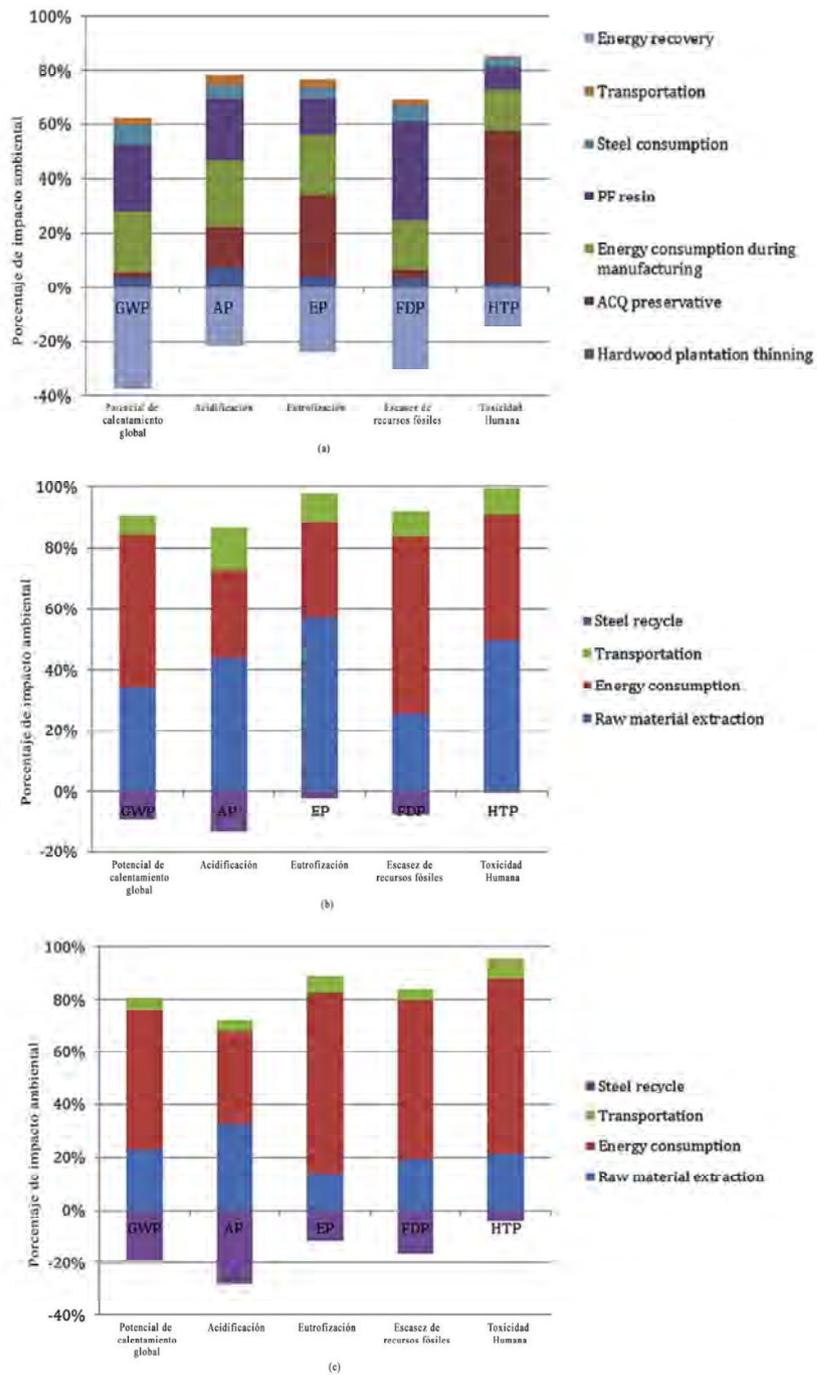


Figura 3. Resultados de impactos ambientales diseñado para 3 escenarios: madera (a), concreto (b) y acero (c)

Fuente: A comparative life cycle study of alternative materials for Australian multi-storey apartment building frame constructions: Environmental and economic perspective. Lu et al., 2017

Por otra parte, la prefabricación es una estrategia considerada para proporcionar un mejor desempeño ambiental para la construcción de edificios. Sin embargo, no existe una gran variedad de investigaciones científicas detalladas o estudios de casos que traten con los beneficios ambientales potenciales de la prefabricación. Es por ello que Aye et al. (2012) realiza un artículo que cuantifica la energía incorporada de los edificios prefabricados modulares de acero y madera y edificios residenciales múltiples en Australia para determinar si esta forma de construcción proporciona un mejor desempeño ambiental sobre métodos convencionales de construcción de hormigón. Este estudio llegó a la conclusión de que la masa del edificio de hormigón, aunque sea 4 veces más grande que las viviendas prefabricadas, no es un índice directo de la cantidad de energía utilizada. El total de la energía incorporada en el módulo prefabricado de acero es aproximadamente un 50% más alta que del edificio de hormigón, además para el edificio de madera con columnas y vigas de acero, la energía total incorporada es de aproximadamente 10% más alto que el de un edificio de concreto. Además, también evidencia que el edificio con estructura de acero tiene alrededor del 50% de emisiones de gases de efecto invernadero más, en comparación con la alternativa de hormigón. Las emisiones de efecto invernadero incorporadas por metro cuadrado de superficie son 864, 630 y 578 kg de CO₂ para el sistema de construcción de acero, madera y hormigón, respectivamente.

2.4 Estudios de ACV aplicado a edificaciones en el mundo

De acuerdo con la Norma ISO:14040 (2006), el análisis de ciclo de vida es una compilación y evaluación de *inputs*, *outputs* y el impacto ambiental que origina un producto a través de su ciclo de vida. En base a los estudios realizados por Cerda et al. (2009), en los años 1960 y 1970 se originaron los primeros estudios de ACV que buscaron optimizar el consumo de energía y materia prima. Este método pudo demostrar que el ACV puede ser utilizado para la modelación y

simulación de diversos escenarios. De acuerdo con Finnveden et al., (2009), la metodología del ACV ha sido desarrollada y estudiada durante los últimos 50 años en todo el mundo, por lo que existen estudios realizados en el campo de la construcción donde se aplica este análisis.

Asimismo, un artículo realizado por Bastos et al., (2014) presenta un estudio de comparación de tres tipos de edificios residenciales representativos en un área conocida en Lisboa (Alvalade), en la cual se concluye que la fase de uso fue dominante, representando 69-83% del requerimiento total de energía y emisiones de GEI durante los 75 años de vida útil de los edificios. Teniendo en cuenta la fase de construcción, los muros representan el mayor requisito de energía incorporada y emisiones de GEI, por ejemplo, en los tres tipos de edificios, las paredes exteriores representaron 30-33% y 34-37% de energía y GEI, respectivamente; las paredes interiores representaron el 23-24% y el 34%, y los pisos 30-37% y 18-23%.

Otro caso digno de mención es el análisis llevado a cabo por Rosselló–Batle et al. (2010), en el cual se investigó el consumo de energía, las emisiones de dióxido de carbono y la generación de residuos de un hotel en las Islas Baleares. Los resultados indicaron que la fase de funcionamiento es la que tiene un mayor impacto, representando aproximadamente el 70% al 80% del consumo total de energía. Además, se concluyó que la energía utilizada en la fabricación de materiales constituye una quinta parte del consumo total, y se identificó que el consumo eléctrico es la principal causa de las emisiones de CO₂. Según el ejemplo estudiado, se evidenció que el consumo total de energía durante la fase de construcción equivale a una quinta parte del consumo total de energía durante la fase de operación, asumiendo una vida útil de 50 años. Además, cerca del 78% del consumo total de energía a lo largo de una vida útil estimada de 50 años proviene de la fase de operación.

Además, Kua y Wong (2012) llevaron a cabo un estudio centrado en una fábrica industrial de alimentos en Singapur. Sus hallazgos indicaron que la fase de operación contribuye con un 80% del total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), excluyendo la gestión de residuos. En relación con el consumo de energía, las etapas más significativas fueron la de operación y construcción, representando el 86% y el 11% del consumo, respectivamente. Cuando se considera la gestión de residuos, las emisiones por etapa experimentan cambios sustanciales. Las emisiones por incineración para el tratamiento de residuos representan el 74%, mientras que la fase de operación contribuye con el 20% del total de emisiones de GEI. En cuanto al consumo de energía, la etapa de operación representa el 85%, la construcción el 11%, la incineración el 0,5%, y el porcentaje restante se distribuye entre las fases de construcción, renovación y demolición.

Por otro lado, Yu et al. (2011) descubrieron que, al comparar con una construcción convencional de ladrillos de hormigón, un edificio construido con bambú requiere menos energía y emite menos dióxido de carbono para cumplir con requisitos funcionales idénticos. Los resultados señalaron un potencial para reducir el consumo de energía en un 11% al emplear materiales con contenido reciclado, además de lograr una disminución del 18.5% en las emisiones de dióxido de carbono. No obstante, se aclara que el impacto práctico de estos potenciales varía significativamente según los niveles de gestión de proyectos y las tecnologías disponibles en el mercado actual.

De igual manera, Muñoz et al. (2018) realizaron un análisis sobre los beneficios ambientales al incorporar escorias Waelz, también conocido como ferrosita, en ladrillos cerámicos. La ferrosita es un subproducto de la recuperación de polvos de zinc a través del proceso Waelz (Quijorna, 2013). La incorporación de residuos de escorias Waelz disminuye la magnitud de las reacciones endotérmicas durante la fabricación de ladrillos, reduciendo así el consumo de combustible. Es

por ello que el impacto sobre el cambio climático de los ladrillos de escoria Waelz fue un 11,8% menor que el de los ladrillos estándar. También se observaron una disminución en otras categorías de impacto como el agotamiento del ozono (reducción en 10,6 %), la eutrofización de agua dulce (reducción en 12,4%) y el agotamiento de recursos fósiles (reducción en 11,5 %).

Como último caso a mencionar, Colangelo et al. (2020) comparan 8 mezclas con diferentes proporciones de cemento y agregados reciclados, 4 de ellos con cemento Portland y los otros 4 con cemento polimérico. En su investigación concluyeron que la mezcla de cemento portland con un 25% de agregados reciclados es una buena alternativa, reduciendo un 3% del impacto del calentamiento global. Por otro lado, se observaron que las muestras con cemento polimérico obtienen una reducción del 14% de kg CO₂ equivalente comparado a las mezclas con cemento Portland; sin embargo, en los demás efectos como ecotoxicidad terrestre, energía no renovable y material particulado resultan ser menos favorables.

2.5 Estudios de ACV en Latinoamérica

En Latinoamérica, la cantidad de estudios que aplican un análisis de ciclo de vida en el sector de la construcción es menor en comparación con las investigaciones a nivel global. No obstante, algunos de estos estudios merecen ser destacados, como el trabajo de Muñoz et al. (2012). Este artículo se centra en exponer las implicaciones energéticas y medioambientales de una solución habitacional de construcción masiva en Chile. La investigación utiliza como caso de estudio una unidad habitacional correspondiente a una vivienda social, pareada de dos pisos (primer nivel de albañilería y segundo nivel de madera), que forma parte de un conjunto habitacional de 225 viviendas sociales ubicado en la Región del Biobío. La unidad funcional definida para el análisis es el metro cuadrado de vivienda tipo, evaluando aspectos ambientales relacionados con la energía

contenida y la participación porcentual de cada partida. Entre sus conclusiones se observa que la energía contenida en albañilería de ladrillo es de 2606 MJ/m² y el hormigón 805 MJ/m² tal como se observa en la Figura 4.

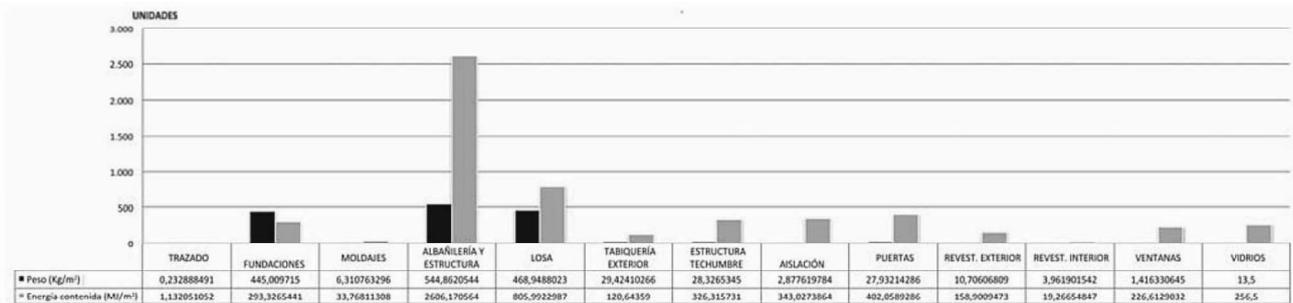


Figura 4. Distribución comparativa entre el peso (kg/m²) v/s la energía contenida (MJ/m²)

Fuente: Estudio del flujo energético en el ciclo de vida de una vivienda y su implicancia en las emisiones de gases de efecto invernadero, durante la fase de construcción Caso Estudio: Vivienda Tipología Social. Región del Biobío, Chile. Muñoz et al., 2012

Como segunda conclusión, el 47.5 % de emisión de CO₂ se produce en la etapa de fundaciones (0.79 kg CO₂/m²), le sigue la etapa de hormigones y albañilería con un 36.9% (0.62 kg CO₂/m²), y termina con la partida de losa con un 15.7 % (0.42 kg CO₂/m²).

En Brasil, Evangelista et al. (2018) realizó un análisis de ciclo de vida desde la cuna a la tumba de 4 edificios residenciales típicos. Permitted observar que el impacto de construcción varía de acuerdo con el tamaño, nivel socioeconómico, características del edificio, número de ocupantes, procesos constructivos y materiales. Este estudio concluyó que la vivienda unifamiliar (CS3) tuvo un mayor impacto que la vivienda multifamiliar (CS1), siendo ambas del mismo nivel socioeconómico; al igual que las viviendas con menor nivel son más impactantes que las de alto nivel por la dimensión de su superficie, cantidad de habitantes y perfil de consumo; a pesar de contar con una mayor área de vivienda, poseen una baja densidad poblacional, el cual resulta en un menor consumo de agua y energía. Según su análisis de contribución de los principales materiales de construcción, el hormigón, el acero y las tejas de cerámica fueron los de mayor

impacto ambiental. También concluyeron que la fase operativa es la más relevante debido al importante consumo de energía eléctrica, contribuyendo más del 80% en muchas de las categorías de impacto. Sin embargo, esto podría variar en función al perfil de consumo. Respecto a la fase de pre-uso, cuanto mayor sea la superficie construida y el consumo de materiales de construcción, más significativa será esta fase. Y, por último, la fase post-operatoria tiene una mínima importancia en todos los casos de estudio, con aportes inferiores al 6%.

Por otro lado, Salazar et al. (2018) realizaron una investigación para reducir el impacto ambiental de la producción del cemento Portland, ya que este impacto se estima en 2 mil millones ton/año de emisiones de CO₂, lo que corresponde un 9% de las emisiones del mundo (Nehdi, Yassine, 2020). Ellos evaluaron un análisis de ciclo de vida de un concreto binario activado por álcali (AABC) a base de puzolana volcánica natural de Colombia (70%) y escoria granulada de alto horno (30%). En sus resultados respecto a la categoría de calentamiento global obtuvieron 210.90 kg CO₂ eq. por 1 m³ de concreto activado por álcali, mientras que un 1 m³ de concreto con cemento Portland resultó un total de 381.17 kg CO₂ eq. Por ello concluyeron que este hormigón sería una nueva alternativa al hormigón tradicional con una reducción de 44.7% del potencial del calentamiento global, sus propiedades mecánicas también permiten su uso como “hormigón de resistencia normal” (uso tradicional) ya que su resistencia puede alcanzar hasta 33 MPa después de 360 días.

En Uruguay se están llevando a cabo medidas para reducir el impacto ambiental de actividades humanas y emisiones de CO₂. Es por ello que Soust-Verdaguer et al. (2018) desarrolló un método basado en ACV que integra el modelado de información para la construcción (BIM) para evaluar alternativas de construcción. Se escogió una vivienda unifamiliar con un área de 67 m² y construida con mampostería tradicional. La alternativa 1 contiene paneles compuestos de

acero galvanizado y poliestireno y la segunda alternativa, de zinc galvanizado, lana de vidrio y poliestireno. En la etapa de pre-uso, se obtuvo que para la categoría de calentamiento global la alternativa 1 es más contaminante en un 31% respecto a la vivienda de mampostería tradicional y la alternativa 2 es mayor en un 20% al caso original aproximadamente. Sin embargo, en la etapa de uso resultó que la alternativa 1 es la más eficiente con una reducción del 13% respecto al caso original, en comparación de la segunda alternativa, el cual aumenta en un 40%.

2.6 Estudios de ACV en el Perú

En el Perú, la aplicación de la metodología del análisis del ciclo de vida ha logrado aportar información relevante acerca de los impactos ambientales que genera el sector de la construcción. Además, a partir de estas aplicaciones, se han podido proponer posibles medidas que se pueden adoptar para reducir estos impactos (García, 2015).

Uno de los trabajos realizados por la Red Peruana de Ciclo de Vida en Cusco a través del Programa de Eficiencia Energética en Ladrilleras Artesanales de América Latina EELA (2013) comprobó que, en términos ambientales, la construcción de 1 m² de pared con ladrillos artesanales tiene aproximadamente el doble de impacto en comparación con 1 m² de pared construida con ladrillos mecanizados. Esta disparidad se debe a que la cantidad de ladrillos artesanales necesarios para la construcción de un metro cuadrado de pared es 2.58 veces mayor que la requerida para los ladrillos mecanizados, y también se considera el impacto asociado a la producción, especialmente la emisión de gases durante la quema en los hornos. Además, la construcción de 1 m² de pared con ladrillos artesanales tiene un impacto ambiental aproximadamente un 50% mayor que la construcción de 1 m² de pared con bloques de concreto. Esta diferencia se debe a que la cantidad de ladrillos artesanales necesarios para la construcción de un metro cuadrado de pared es 3.76

veces mayor en comparación con los ladrillos mecanizados requeridos para los bloques de concreto. El impacto de calentamiento global generado por 1 m² de ladrillos artesanales es de 27 kg CO₂ eq, mientras que 1 m² de ladrillos mecanizados es de 14.2 kg CO₂ eq.

Por otro lado, el estudio realizado por García Torres (2015) aplicando la metodología del ACV para la evaluación ambiental de una vivienda unifamiliar de tres pisos en Lima determinó los impactos ambientales de cada fase de la construcción del proyecto. De este análisis, pudieron establecer etapas críticas para cada indicador ambiental y que materiales son los mayores causantes de estos efectos. Por ejemplo, con respecto al consumo de energía primaria, la etapa de uso es la más significativa con un consumo del 55% de la energía total, esto se debe principalmente al mantenimiento, remodelación y consumo de energía en artefactos. La etapa de pre-uso resultó un 42% de la energía total primaria. También recalca que la fase de construcción es menor a 20% de la energía total, sin embargo, es la fase que afecta directamente a la población.

Además, otro estudio realizado por Corzo Remigio (2016) aplicando el ACV en una vivienda unifamiliar en Huancayo concluyó que, en la categoría de potencial de calentamiento global, la etapa de pre-uso es la más predominante, esta representa un 53.93% de un total de 1806 kg CO₂ eq por m². En el caso del indicador de acidificación marina, la etapa más resaltante es la del uso, la cual representa un 49% de un total de 12.05 kg SO₂ eq. por m². De igual forma se comportó la categoría de consumo de combustibles fósiles, la etapa de uso representa un 56.19% de un total de 12770 MJ por m².

Guerra Jesús (2021) propone como material de construcción al bambú en su reciente investigación. Uno de los beneficios resultantes es que la energía demandada para la cosecha del bambú es el 20% a 30% de la energía demandada de la tala de árboles para la obtención de madera.

Además, a pesar de ser el material predominante en su estructura, tan solo representa el 7% del total de emisiones de CO₂. El bambú emite 5 kg CO₂ eq/m² de un total de 123 kg CO₂ eq/m², siendo el transporte y la preservación los procesos con mayor impacto, representan el 87% de emisiones de kg CO₂ eq y el 88% en consumo de energía.

Por último, la investigación de tesis realizada por Cáceres Cebrecos (2016), que analiza edificaciones multifamiliares en Lima, concluye en sus resultados que un elevado nivel socioeconómico se traduce en un mayor poder adquisitivo de las personas, lo que, a su vez, se refleja en un incremento en el consumo energético y en el impacto ambiental de la vivienda. Según el estudio, uno de los factores fundamentales que influyen en el impacto total de la vivienda es el área construida, donde los departamentos de mayor extensión tendrán un impacto más significativo, siempre y cuando los materiales de construcción y el tipo de edificación sean similares en los casos analizados.

2.7 Ecodiseño aplicado al sector de la construcción

La norma ISO:14006 (2011) define el término ecodiseño como la integración de los aspectos ambientales del diseño y desarrollo de productos con el objetivo de reducir los impactos ambientales durante la vida útil del producto. Este documento no detalla sobre cómo realizar el diseño, pero proporciona una guía específica de principios y directrices genéricas a tomar en cuenta a través de actividades ecológicas en el diseño y desarrollo de productos. En base a esto, Marques et al. (2017) realiza una orientación sobre cómo abordar los impactos ambientales de los productos o servicios en el contexto del sistema de gestión ambiental a través de los siguientes puntos:

- Pensamiento del ciclo de vida: minimiza los impactos ambientales negativos más significativos identificados a lo largo de las diferentes etapas del ciclo de vida.

- Proceso del ecodiseño: equilibra los aspectos ambientales con otros requisitos relevantes.
- Evaluación ambiental de productos: los métodos y herramientas deben elegirse según la estrategia de la organización, el tipo de producto, el tiempo o el presupuesto.
- Revisión de ecodiseño: continuo análisis ambiental de los productos hacia posibilidades de diseñar mejoras.
- Participación de la cadena de valor: cooperación entre todas las partes involucradas en la cadena de valor, con el fin de alcanzar los objetivos del ecodiseño.

De igual forma, Gonzáles, Gómez y Rosa (2018) aplicaron etapas generales similares para su ecodiseño de placas constructivas en la ciudad de México. En el segundo paso, el cual es la evaluación de ecodiseño, realizaron la descripción del producto, materiales y del sistema producto, donde relacionaron las etapas del ciclo de vida del producto con los materiales y procesos involucrados. Para el siguiente paso, análisis de aspectos ambientales, aplicaron la matriz MET. Éste es un método semi cuantitativo donde se requiere información sobre los materiales (M) empleados, energía consumida (E) y emisiones generadas (T), por el cual se organiza la información ambiental relevante para facilitar la identificación de amenazas y oportunidades de mejora. Al igual que este método, existen otras alternativas como los ecoindicadores y herramientas de software para el ACV. Después de la aplicación de la matriz, obtuvieron un ecoperfil del producto, esta información está compuesta por: vector para la satisfacción de las funciones, eficiencia de la selección de materiales, fabricación del producto, comercialización y distribución, uso del producto y por último su disposición o forma de como finaliza el ciclo de vida del producto. En base a la información resultante, plantearon propuestas de mejora y analizaron la viabilidad de estas para recopilar suficiente información y obtuvieron un ecoperfil comparativo de resultados de ecosideño con relación al estado inicial.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

La presente investigación se ha realizado utilizando el análisis de ciclo de vida que establece la Norma ISO 14040:2006. Esta norma establece las etapas del análisis, en qué consisten y la información necesaria para realizar cada una, a fin de obtener resultados de los potenciales impactos ambientales del objeto de estudio. En base a esto, ha sido necesario recopilar información de distintas fuentes a fin de desarrollar las cuatro fases del ACV.

3.1 Metodología aplicada del ACV

Según la Asociación Española para la Calidad (AEC), el análisis de ciclo de vida es una metodología que posibilita la evaluación de los impactos ambientales y puede ser útil para identificar oportunidades de mejora en el desempeño ambiental de los productos en diversas etapas de su ciclo de vida. Esta herramienta puede proporcionar información valiosa para la industria, así como para organizaciones gubernamentales o no gubernamentales, en actividades como la planificación estratégica, el establecimiento de prioridades y el diseño o rediseño de productos o procesos. Además, el análisis de ciclo de vida contribuye a la selección de indicadores pertinentes para evaluar el desempeño ambiental y facilita la comercialización de productos (AEC, 2019).

Hay cuatro fases en un estudio de ACV: la fase de definición del objetivo y el alcance, la fase del análisis de inventario, la fase de evaluación de impacto y la fase de interpretación. A medida que se va desarrollando el estudio se pueden ir identificando nueva información y ampliar los datos a considerar, lo que da lugar a que las fases mencionadas entren en un proceso iterativo el cual se encuentra esquematizado en la Figura 5. Según la norma ISO 14040:2006, el ciclo de vida de un producto abarca diversas etapas consecutivas interconectadas en un sistema, desde la extracción de la materia prima hasta su disposición final. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) se

define como el proceso de recopilación y evaluación de las entradas, salidas e impactos ambientales potenciales del sistema de un producto a lo largo de todas las fases de su ciclo de vida.

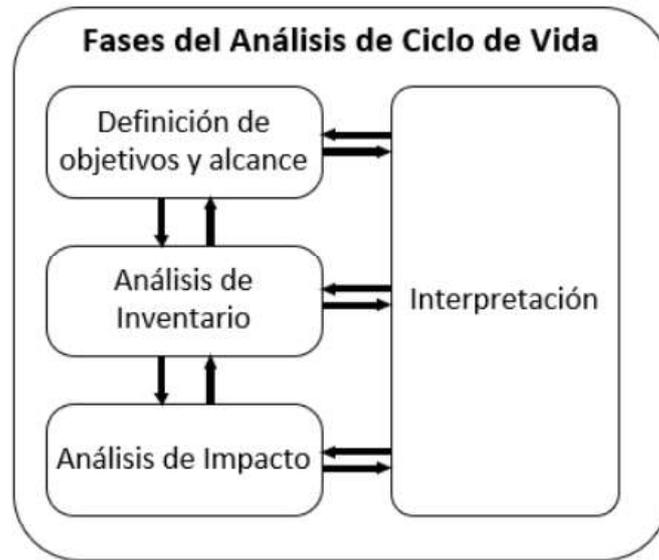


Figura 5. Fases en el análisis de ciclo de vida. Adaptado de la Norma ISO 14040

3.2 Objetivos y alcance del estudio

El objetivo y el alcance de un ACV deben ser claramente definidos y coherentes con la aplicación prevista. Dada la naturaleza iterativa del ACV, es posible que sea necesario refinar la extensión durante el estudio. Al establecer el objetivo de un ACV, se deben definir sin ambigüedades los siguientes elementos relacionados con la aplicación prevista: las razones para llevar a cabo el estudio, la audiencia a la que se pretenden comunicar los resultados y si estos están destinados a ser utilizados en afirmaciones comparativas que se revelarán al público.

Además, es esencial especificar la unidad funcional o unidad de análisis del sistema, así como sus límites. Conforme a la norma ISO 14040, la unidad funcional se refiere al rendimiento cuantificado de un sistema de producto, destinado a ser utilizado como una unidad de referencia. Los límites del sistema determinan los procesos unitarios que están incluidos y aquellos que se

excluyen. La unidad funcional debe ser coherente con los objetivos y la extensión del estudio. Un propósito fundamental de la unidad funcional es servir como un punto de referencia para normalizar los datos de entrada y salida, por lo tanto, es crucial que esté claramente definida y medible. Para el caso del presente estudio, la unidad funcional consiste en un metro cuadrado construido de vivienda.

Además, dentro de los alcances de este estudio se contempla únicamente los procesos relacionados a la extracción de materiales, manufactura, transporte de materiales y construcción, dejando de lado las etapas de uso y las posteriores a esta. Finalmente, teniendo en cuenta el uso de cemento puzolánico, ladrillos sílico calcáreo y placas de yeso, se plantearán distintos escenarios a fin de reducir los impactos ambientales hallados previamente, los cuales se detallan a continuación:

- Escenario 1: Cambio de cemento Portland por cemento puzolánico
- Escenario 2: Uso de ladrillo sílico calcáreo como unidad de albañilería
- Escenario 3: Uso de placas de yeso como muros no portantes
- Escenario 4: Combinación en el uso de cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo
- Escenario 5: Combinación en el uso de cemento puzolánico y placas de yeso.

3.3 Inventario del ciclo de vida

En esta etapa del ACV se definen y cuantifican las entradas, las cuales se relacionan con el uso de recursos y materiales, y las salidas, las cuales se asocian con las emisiones al suelo, agua, aire y generación de residuos. En este sentido, la norma ISO 14040 propone una guía para el análisis del inventario del ciclo de vida, el cual se describe de manera detallada en la Figura 6.

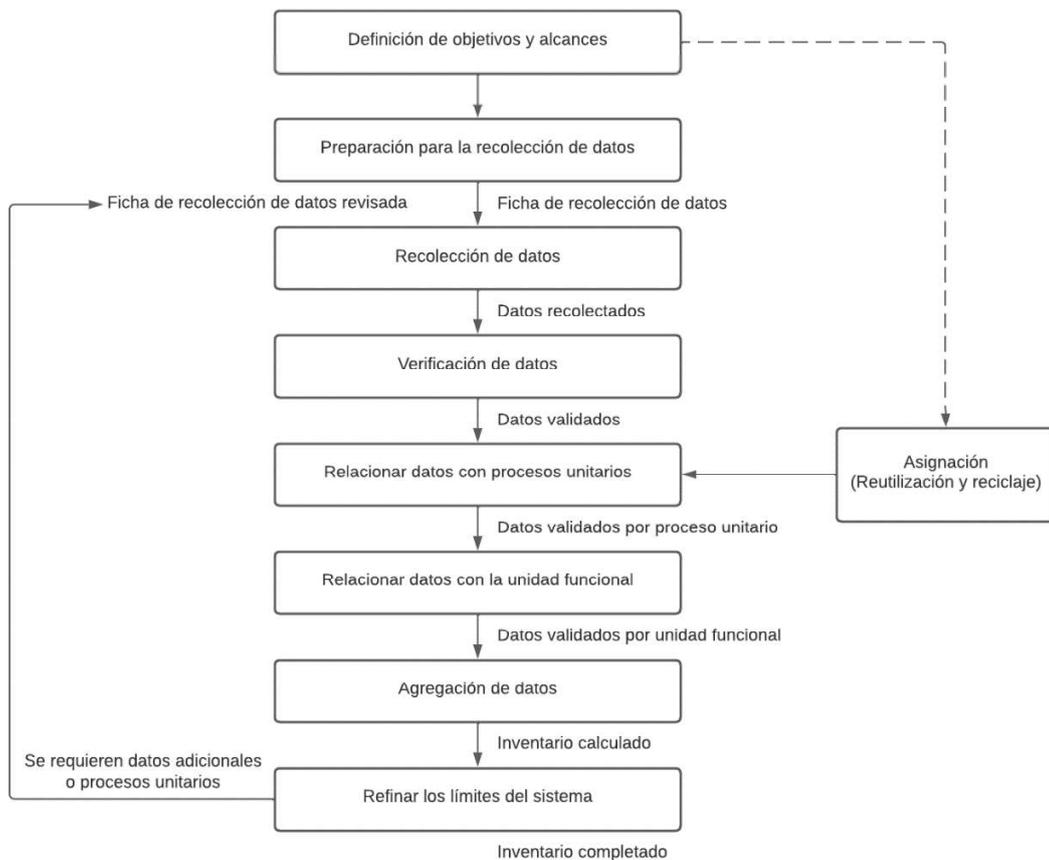


Figura 6. Procedimientos simplificados para el análisis de inventario. Adaptado de la Norma ISO 14044

En base al gráfico anterior, uno de los primeros e importantes pasos a realizar en esta etapa es la recopilación de los datos necesarios para el análisis de ciclo de vida. Inicialmente, se realizó la revisión de la literatura respecto a los datos estadísticos y la situación socioambiental de la región de Pisco luego del terremoto del 15 de agosto, la metodología del ACV y las distintas aplicaciones en el mundo, Latinoamérica y el Perú a fin de conocer los resultados de investigaciones previas que den mayor relevancia a la presente tesis. Los planos de detalles en las especialidades de arquitectura, estructuras e instalaciones eléctricas y sanitarias de las viviendas de emergencia a analizar fueron proporcionados por la empresa constructora encargada del proyecto en estudio.

Una vez recopilados y verificados estos datos, se va elaborando el inventario del ciclo de vida, relacionándolos en todo momento con la unidad funcional definida. A través de la información obtenida de la vivienda de emergencia, se realizó el metrado de los materiales participantes en el proceso constructivo. Luego, se establecieron las características de cada material, la cual corresponde a su clasificación, cantidad e insumos requeridos para su elaboración. Adicionalmente, se evaluará la necesidad de requerir más datos de los cuales ya se tienen recopilados para el cumplimiento de los objetivos planteados. Estos datos deberán pasar por las etapas previamente descritas para que puedan ser ingresadas al inventario.

Por último, teniendo en cuenta la complejidad de los procesos por los que atraviesan los distintos recursos y materiales, distintas empresas y organizaciones han ido desarrollando base de datos de manera que se facilite esta labor, ya que recogen y establecen información acerca de las entradas y salidas de una variedad de procesos de distintas regiones del mundo. Para el presente estudio, se hizo uso de la base de datos Ecoinvent.

3.4 Evaluación del impacto de ciclo de vida

Esta etapa consiste en relacionar las entradas y salidas del inventario con los impactos generados al ecosistema, la salud humana y los recursos. Para realizar esta etapa del ACV, la norma ISO 14040:2006 establece las directrices para el desarrollo del análisis de los impactos ambientales, los cuales están conformados por la clasificación, caracterización y valoración de estos.

Como primer paso de esta etapa, es necesario especificar las categorías de impacto que se pretenden abordar en la investigación. Estas categorías se definen como una clasificación que representa las repercusiones ambientales resultantes de los procesos o sistemas de producto

(Vallejo, 2004). Según las investigaciones previamente descritas, se identifica que las categorías de impacto mayormente estudiados en el sector construcción son el potencial de calentamiento global, eutrofización marina, acidificación, toxicidad humana y material particulado. Estas categorías de impacto se describirán a continuación de manera breve en base al Environmental Protection Agency (2012):

- **Potencial de calentamiento global:** El calentamiento global se define como el aumento promedio de la temperatura de la atmósfera de la tierra, la cual es la causa principal del cambio climático. Este indicador ambiental se relaciona fuertemente con el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero. Para determinar el potencial de calentamiento global se establece una equivalencia a la potencia de los gases de efecto invernadero con respecto a las emisiones de dióxido de carbono, el cual se suele representar en unidades de kilogramos de CO₂ equivalentes. Para el presente estudio, se analizará esta categoría de impacto para un tiempo proyectado de 100 años con la metodología del *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) del año 2013 realizado por Myhre et. al. (2013).
- **Eutrofización:** Esta categoría de impacto examina el enriquecimiento del ecosistema acuático con nutrientes que estimulan la productividad biológica, dando lugar a un crecimiento no deseado de la biomasa y la proliferación de algas. Este fenómeno se atribuye principalmente a las elevadas concentraciones de fósforo y nitrógeno. El aumento descontrolado de estas algas constituye un aspecto ambiental significativo, ya que los microorganismos encargados de su descomposición consumen el oxígeno disponible en el entorno. En la presente investigación se abordará la eutrofización marina, la cual se cuantifica en kilogramos de nitrógeno equivalente emitido.

- **Acidificación:** Se describe como el aumento en la concentración del ion de hidrógeno en un entorno local. Los principales contribuyentes a esta categoría de impacto son los óxidos nitrosos y el dióxido de azufre, los cuales, al ser liberados al aire, pueden desplazarse distancias considerables antes de depositarse, ya sea como lluvia ácida, niebla o deposición seca en forma de polvo. Estas sustancias pueden ocasionar daños a los materiales de construcción y generar impactos negativos significativos en los ecosistemas vivos. En el caso de esta tesis, la acidificación se cuantificará en kilogramo equivalente de dióxido de azufre emitido.
- **Toxicidad humana:** Esta categoría de impacto se encarga de estudiar el daño al ser humano relativo a la toxicidad que causa enfermedades cancerígenas y no cancerígenas. Para el análisis de esta categoría se utiliza la unidad comparativa de toxicidad (CTU) por kilogramo de sustancia emitida, la cual se estima como casos de enfermedad por kilogramo emitido.
- **Material particulado:** Esta categoría estudia la cantidad de partículas muy pequeñas que se encuentran en el ambiente del aire y que tienen la capacidad de causar daño a la salud humana en forma de enfermedades respiratorias y/o hasta la muerte. Las sustancias que se utilizan como referencia para esta categoría de impacto son las partículas PM^{2.5}, las cuales se caracterizan por tener un diámetro menor a 2.5 micrómetros. Esta propiedad las hace potencialmente peligrosas ya que el sistema respiratorio difícilmente puede filtrarlas, pudiendo ser capaces de llegar a los alvéolos pulmonares. Para el presente estudio el material particulado será cuantificado en kilogramo de PM^{2.5} equivalente.

Por su parte, la caracterización se dará de acuerdo con el cálculo de los impactos a partir de los indicadores ambientales establecidos previamente en los objetivos. Ambos procedimientos

pueden ser desarrollados a través de distintas metodologías mundialmente aceptadas. Para el caso del presente estudio, se aplicará la metodología del ReCiPe desarrollado por Huijbregts et. al. (2016), la cual cuantificará la eutrofización, acidificación, material particulado y escasez de recursos fósiles; la metodología IPCC 2013 realizado por Myhre et. al. (2013), la cual se aplicará para cuantificar el calentamiento global; y finalmente, la metodología USEtox desarrollado por Rosenbaum et. al. (2008), la cual cuantificará la toxicidad humana cancerígena y no cancerígena.

Las metodologías previamente mencionadas pueden ser aplicadas a través del software SimaPro desarrollado por *PRé Consultants* (2020), ya que contiene dentro de su base de datos estas metodologías, por lo que resulta conveniente su uso en el presente estudio. Complementado lo anterior, de acuerdo con Anthesis Lavola (2018), empresa especializada en sostenibilidad en España, dentro de las distintas herramientas que existe en el mundo para la evaluación de impacto ambiental, el software Simapro 9.1 destaca como una herramienta líder en el ámbito académico y la industria para llevar a cabo el Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Este programa posibilita el cálculo de los impactos ambientales, sociales y económicos vinculados a un producto, servicio u organización a lo largo de todas las etapas de su ciclo de vida. Además, su aplicación es práctica y sencilla, contiene una base de datos muy amplia y se cuenta con la facilidad de obtener una licencia educativa para el uso del programa.

3.5 Normalización y ponderación

Adicionalmente, se pueden realizar procedimientos complementarios dependiendo de los objetivos y alcances del estudio. En este sentido, la Norma ISO 14040:2006 explica algunos de estos, los cuales se describen a continuación:

- **Normalización:** Es la relación entre la magnitud cuantificada de una categoría de impacto con respecto a un valor referencial.

- **Agrupación:** Se establece la clasificación y posible catalogación de los indicadores.
- **Ponderación:** Consiste en establecer factores que designan una importancia relativa a distintas categorías de impacto, a fin de sumarlas y obtener un resultado ponderado para definir un único índice ambiental global del sistema.

La elección de un modelo menos contaminante es un desafío debido a la gran variedad de impactos ambientales resultantes. En este sentido, si bien la normalización y ponderación son pasos optativos para poder realizar una evaluación de impacto según la norma ISO 14040:2006, es importante tener en cuenta que resulta relevante tanto para estandarizar las distintas categorías de impactos y asignarles grados de importancia.

3.6 Interpretación de los resultados

En esta última etapa del ACV, se discuten los resultados obtenidos en cada uno de los impactos de acuerdo con los objetivos y alcances planteados en las etapas iniciales. En primer lugar, deben identificarse los problemas que se han presentado a lo largo del análisis. Luego, debe evaluarse la consistencia y la complejidad de los resultados realizando las comparaciones que sean necesarias. Finalmente, tomando en cuenta todo lo anterior, deben establecerse conclusiones del análisis realizado a fin de que este pueda cumplir con los objetivos del estudio y, además, pueda proponer recomendaciones para la toma de decisiones en el futuro.

Como primer punto, la normalización compara las unidades de cada impacto con valores de referencia, los cuales se denominan Factores de Normalización (NF). La ventaja de emplear la normalización es poder analizar resultados obtenidos de un método de evaluación de impacto múltiple ya que estos se reestructuran en valores adimensionales. En el presente estudio se usaron los factores de referencia de las distintas categorías de impacto establecidas es el reporte publicado

por la Comisión Europea: *Global normalisation factors for the Environmental Footprint and Life Cycle Assessment* (Sala, S. et al., 2017) y la base de datos *Normalization scores ReCiPe 2016* (National Institute for Public Health and the Environment, 2020).

Tabla 2

Factores de referencia de emisiones globales por persona del año 2010 modelados para ReCiPe

CATEGORÍAS DE IMPACTO	UNIDADES - MID POINT	GLOBAL		
		INDIVIDUALISTA	JERÁRQUICO	IGUALITARIO
Formación de partículas finas	kg PM2.5 eq. por persona en 2010	1.60E+01	2.56E+01	2.56E+01
Acidificación	kg SO ₂ eq. por persona en 2010	4.10E+01	4.10E+01	4.10E+01
Eutrofización marina	kg N eq. por persona en 2010	4.62E+00	4.62E+00	4.62E+00
Escasez de recursos fósiles	kg oil eq por persona en 2010	9.83E+02	9.83E+02	9.83E+02

Notas: Esta tabla detalla los factores de referencia de los impactos a emplear de acuerdo con distintos escenarios. Adaptado de “*Normalization scores ReCiPe 2016*” por National Institute for Public Health and the Environment, 2020.

Tabla 3

Factores de normalización de emisiones globales por persona del año 2010 modelados para USEtox e IPCC

CATEGORÍAS DE IMPACTO	UNIDADES	FN POR IMPACTO	FN POR IMPACTO POR PERSONA
Toxicidad humana (cancerígena)	CTUh	2.66E+05	3.85E-05
Toxicidad humana (no cancerígena)	CTUh	3.27E+06	4.75E-04
Cambio climático	Kg CO ₂ eq.	5.79E+13	8.40E+03

Notas: Esta tabla detalla los factores de normalización (FN) de los impactos a emplear. Adaptado de “*Global normalization factors for the Environmental Footprint and Life Cycle Assessment*” por Salas, et al., 2017.

En la Tabla 2 se observa valores de acuerdo con tres perspectivas: individualista, jerárquico e igualitario, estos escenarios se emplean para agrupar similares suposiciones y elecciones. La perspectiva individualista se basa en un interés a corto plazo de 20 años, el jerárquico de 100 años y el igualitario toma el plazo más largo con 1000 años. Además, es un escenario con un optimismo tecnológico respecto a la adaptación humana. Para las categorías de impacto restantes, tales como toxicidad humana cancerígena y no cancerígena y cambio climático, se está empleando los valores

mostrados en la Tabla 3 obtenidos según el estudio *Global normalization factors for the Environmental Footprint and Life Cycle Assessment* (Salas et al., 2017).

Para la presente investigación, las cantidades obtenidas por cada categoría de impacto se dividirán por cantidad de habitantes por módulos según el Reglamento Especial de Habilitación Urbana y Edificación el cual brinda información sobre la densidad máxima en viviendas según la cantidad de dormitorios; estos valores se compararán con los factores de normalización según el impacto por persona promedio europea.

La ponderación es el siguiente paso después de la normalización, en el cual se agrega una prioridad a los resultados de cada categoría para garantizar un enfoque más centrado en los aspectos que más importan. A lo largo de las investigaciones realizadas, se han planteado distintos criterios para establecer dichas prioridades, las cuales dependen de la región o proyecto a realizar. Dada la subjetividad inherente de estos criterios, resulta necesario aplicar diferentes métodos con el fin de obtener distintos resultados y analizar si convergen en el mismo escenario. Para ello, se emplearán tres tipos de factores, los cuales se detallan a continuación:

- Ponderación según la Unión Europea: en este estudio se tiene un grupo de valores de ponderación recomendado para la huella ambiental. Se realizó una encuesta al público de 2400 personas de diferentes países (Alemania, Italia, España, Reino Unido, Polonia y Francia), otra encuesta dirigida a expertos de LCA que consta de 518 personas de 48 diversos países, y la tercera se trata criterios basado en un estudio de Soares (Soares et al., 2006). En base a este estudio, los factores de ponderación para las distintas categorías de impacto se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4

Conjunto de ponderaciones recomendado para todas las categorías de impacto midpoint.

CATEGORIAS DE IMPACTO	FP
Cambio climático	21.06
Agotamiento de ozono	6.31
Toxicidad humana, cancerígena	2.13
Toxicidad humana, no cancerígena	1.84
Formación de partículas finas	8.96
Radiación ionizante	5.01
Formación de ozono	4.78
Acidificación	6.2
Eutrofización terrestre	3.71
Eutrofización de agua dulce	2.8
Eutrofización marina	2.96
Ecotoxicidad de agua dulce	1.92
Uso del suelo	7.94
Uso del agua	8.51
Escasez de recursos minerales	7.55
Escasez de recursos fósiles	8.32

Notas: Esta tabla detalla los factores de ponderación (FP) de todos los impactos ambientales. Adaptado de “*Development of a weighting approach for the Environmental Footprint*” por Salas, et al., 2018

- Ponderación estática de Shu Su: realizado bajo la metodología IPPC, estos valores no consideran las variaciones temporales durante todo el ciclo de vida, ya que la exclusión de esta información puede disminuir la relevancia ambiental. Además, este estudio toma en consideración todos los impactos a emplear en esta investigación, excepto toxicidad humana cancerígena y no cancerígena (Shu Su, 2019).

- Ponderación dinámica de Shu Su: al igual que la ponderación estática, el punto de evaluación no cambia, esta sigue siendo antes de la construcción. Sin embargo, se seleccionan algunos años donde se aplicarán los indicadores de objetivos relacionados. Por ello, el sistema de ponderación dinámico presenta variaciones y prioridades ambientales a lo largo del tiempo. Al igual que el caso anterior, este estudio toma en consideración todos los impactos a emplear en esta

investigación, excepto toxicidad humana cancerígena y no cancerígena (Shu Su, 2019). Los valores establecidos para ambos casos de ponderación de este autor se encuentran especificados en la Tabla 5.

Tabla 5.

Distribución proporcional de las categorías de impacto ponderadas en un sistema estático y dinámico.

	CATEGORÍAS DE IMPACTO	SISTEMA DE PONDERACIÓN ESTÁTICA	SISTEMA DE PONDERACIÓN DINÁMICA
Índice de daño ecológico (EDI)	Material particulado	13.6%	10.4%
	Eutrofización	5.2%	3.6%
	Acidificación	43.1%	39.4%
	Calentamiento global	38.0%	46.6%
Índice de agotamiento de recursos (RDI)	Mineral de hierro	1.3%	1.2%
	Bauxita	6.2%	2.9%
	Mineral de manganeso	3.6%	5.7%
	Agua	39.7%	34.7%
	Energía primaria	49.1%	55.6%

Nota: Adaptado de *A dynamic weighting system considering temporal variations using the DTT approach in LCA of buildings. Ecological Damage Index (EDI), Resource Depletion Index (RDI)*

Por último, se debe tomar en cuenta que el proceso de ponderación resulta ser bastante subjetivo, ya que está a decisión del investigador escoger las fuentes para definir los valores antes mencionados, dando lugar a una variedad de criterios entre estudios. Sin embargo, consultar varios puntos de vista y discutir los resultados que ofrece la aplicación de cada uno puede resolver de cierta manera esta desventaja y dar mayor solidez a las conclusiones que se establezcan.

CAPÍTULO 4. CASO DE ESTUDIO

Los módulos de viviendas estudiados en la presente investigación están ubicados en la actual urbanización Renacer, la cual se localiza en la provincia de Pisco y ocupa cerca de 197 814 m². Estos módulos fueron construidos como resultado del colapso de gran parte de las viviendas de la zona luego del terremoto del 15 de agosto del 2007 con epicentro cerca a las costas de Pisco. De esta manera, el Estado a través del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento impulsó el proyecto Renacer, el cual fue uno de los muchos proyectos de rehabilitación urbana que fueron dándose lugar en la zona para mejorar las difíciles condiciones de vida que vivían los pobladores luego de la catástrofe. En la Figura 8 se puede apreciar las condiciones del terreno en el año del terremoto antes mencionado y como se encuentra en la actualidad.



Figura 7. Terreno donde se ubica el proyecto antes y después de la construcción de las viviendas de emergencias. Adaptado de los mapas proporcionados por Google Earth.

El proyecto en cuestión consistió en la construcción de 1885 módulos de viviendas distribuidas y lotizadas de acuerdo con la memoria descriptiva y las especificaciones técnicas del proyecto. En estos documentos se detalla la división de toda la urbanización en diversos sectores, donde cada uno tiene un tipo específico de módulo con una variación en el diseño arquitectónico y los materiales empleados para el sistema estructural. La Figura 9 muestra dicha distribución y una leyenda que describe la característica de cada sector. La información recolectada en el presente trabajo de investigación fue adquirida por la contratista que tuvo a su cargo la construcción de la mayoría de estos módulos, por lo que resulta representativa para los fines de este estudio.

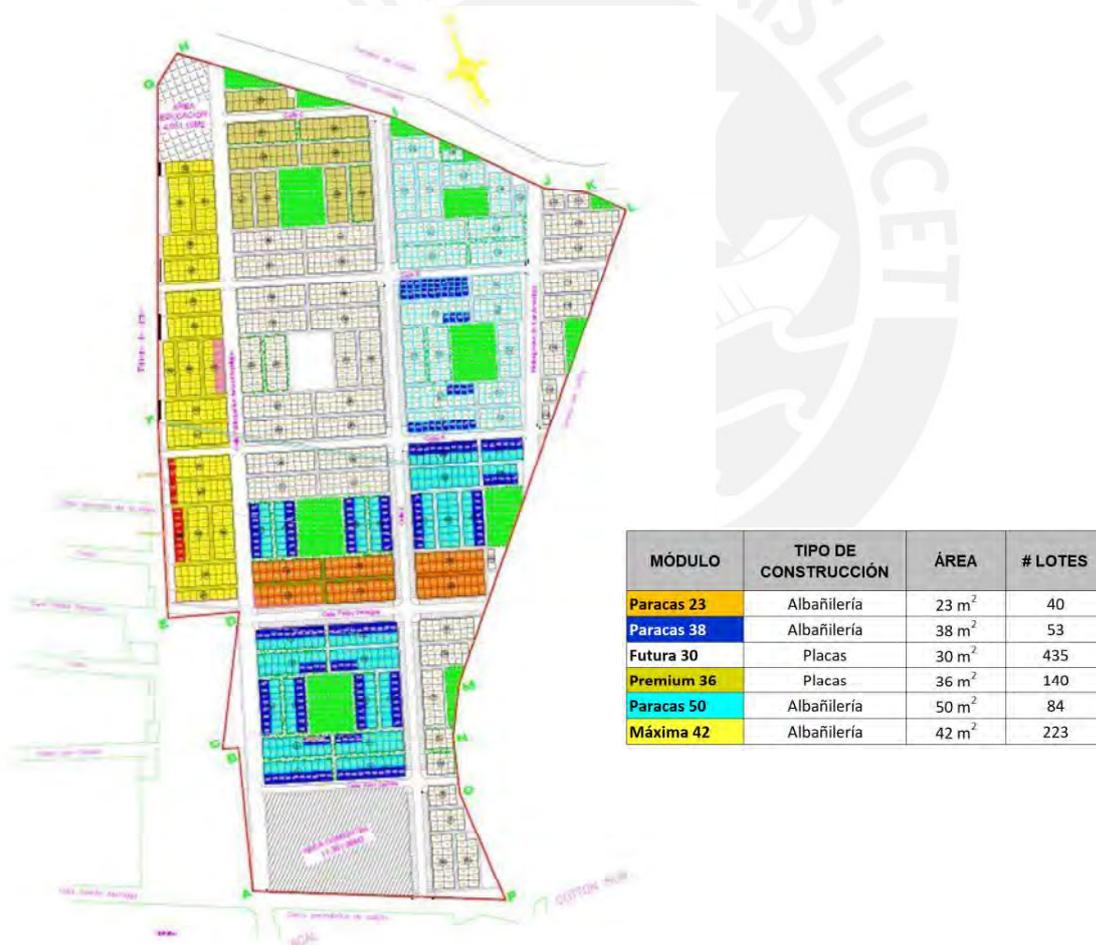


Figura 8. Distribución de viviendas de acuerdo con el tipo de construcción. La leyenda muestra el tipo de construcción, el área del terreno y el número de lotes de cada tipo de módulo. Adaptado de los planos proporcionados por la constructora Total Inmuebles.

4.1 Inventario del ciclo de vida del diseño original

Como primer paso para el análisis a realizar, se debe definir el inventario del ciclo de vida de la vivienda. Este inventario debe contener información importante de los materiales empleados para la construcción de dichas viviendas. Para ello, se realizó el metrado de cada tipo de vivienda en el proyecto la cual se encuentra detallada en la Tabla 6. Adicionalmente, fue necesario realizar una descripción de las características más importantes de cada material, tales como el uso, la distancia entre su origen y la ubicación del proyecto, equipos y maquinarias empleados para su empleo.

De acuerdo con esta lista de materiales, se procedió a modelar cada uno utilizando la base de datos Ecoinvent. En algunos casos, fue necesario realizar modificaciones en los procesos preestablecidos en esta biblioteca de manera que se adapten mejor al contexto real que se está analizando. Explicando cada uno de los materiales, el concreto trabajado en este proyecto fue premezclado traído a obra con un *mixer* de manera que sea vaciado directamente en la construcción. Con respecto al modelamiento, fue necesario modificar los valores preestablecidos por el programa en la dosificación de manera que sea acorde a la resistencia requerida. Además, teniendo en cuenta que se ha utilizado un cemento nacional, hay insumos que debieron modificarse a fin de que su proceso no considere importaciones. Para el mortero se procedió de la misma manera, teniendo en cuenta que esta se elabora en la misma obra, por lo que su especificación de mezclado es distinta al del concreto.

Tabla 6

Inventario del ciclo de vida por unidad de módulo de módulo que conforman el proyecto RENACER.

MÓDULO	PARACAS 23	PARACAS 38	FUTURA 30	PREMIUM 36	PARACAS 50	MAXIMA 42
ÁREA TECHADA (m ²)	45.19	69.49	130.4	155.05	87.7	88.2
TIPO DE CONSTRUCCIÓN	ALBAÑILERÍA	ALBAÑILERÍA	PLACAS	PLACAS	ALBAÑILERÍA	ALBAÑILERÍA
INVENTARIO						
PARTIDA	UNIDAD	METRADO	METRADO	METRADO	METRADO	METRADO
Excavación manual	m ³	17.53	25.68	48.67	54.91	21.68
Concreto simple f'c: 100 kg/cm ²	m ³	6.50	9.81	19.66	20.77	12.59
Concreto armado f'c: 175 kg/cm ²	m ³	9.66	14.57	29.19	36.44	18.65
Acero f'y: 4200 kg/cm ²	kg	907.11	1368.31	2118.96	2519.52	1743.62
Encofrado	m ³	0.86	1.33	3.96	4.71	1.67
Ladrillo de arcilla	kg	10543.33	15903.97	2352.00	2822.40	20268.03
Tecnopor	kg	0.78	1.18	0.64	0.76	1.44
Mortero	kg	683.33	1030.77	957.74	1138.79	1384.72
Pintura	kg	3.18	4.80	9.01	10.71	5.88
Puerta contraplacada	m ²	6.15	9.84	17.41	20.70	11.37
Vidrio	kg	94.73	145.2	377.40	444.40	175.60
Tubería PVC	kg	58.02	89.20	167.40	199.10	112.6

Notas: Esta tabla resume los valores calculados del metrado correspondiente a los planos y especificaciones técnicas proporcionados por la constructora responsable del proyecto.

Para el caso del acero de refuerzo, este también es fabricado dentro del país, por lo que los procesos como la utilización del gas natural y el gasto de energía de voltaje medio y alto debieron modificarse de manera que los insumos y procesos sean considerados dentro de un origen geográfico peruano. De la misma manera para el triplay utilizado en los encofrados y la pintura para los acabados en ambiente. En el caso de los ladrillos King Kong, tuvo que realizarse el mismo cambio de origen al uso de aceite combustible y algunos insumos como el agua potable, la arcilla y la arena. En casos como el tecnopor y las tuberías y accesorios de PVC, además de los insumos mencionados, la base de datos especifica un tratamiento de residuos, el cual también debió adaptarse a un origen peruano, dado que son materiales fabricados y distribuidos en Perú. Culminando con los materiales, las puertas de madera contraplacadas y los vidrios para las ventanas son netamente importados, por lo que en estos casos no fue necesario realizar alguna adaptación, lo cual se puede constatar en la Tabla 8.

Con respecto a los procesos, los trabajos de excavación, debido al poco volumen de tierra a extraer para este tipo de vivienda, se utilizó un minicargador frontal, cuyo modelamiento se encuentra establecido en la base de datos. En el caso del transporte, para los materiales obtenidos en la provincia de Pisco cerca al proyecto, se estimó una distancia recorrida de 5 km para transportar dichos productos; y para los materiales traídos de las fábricas en Lima, se estimó 234 km de trayectoria hacia el proyecto. Los camiones de carga fueron modelados con una capacidad de carga entre 16 a 32 metros cúbicos con una categoría EURO3. Por otro lado, el transporte de materiales importados se dio a través de vía marítima, teniendo que estimarse la distancia total de la ruta de un barco de carga desde el puerto del Callao al puerto de Hong Kong para el caso de los vidrios, y al puerto de Valparaíso en el caso de las puertas de madera. En ambos métodos de

transporte, fue necesario determinar la cantidad de kilómetros requeridos para el modelamiento de estos procesos, cuyos valores se consignan en la Tabla 7.

Tabla 7

Distancias en kilómetro requeridas para el transporte de cada material.

MATERIAL	TRANSPORTE TERRESTRE (km)	TRANSPORTE MARITIMO (km)
Cemento	234.1	-
Arena	5	-
Piedra	5	-
Acero f'y: 4200 kg/cm²	234.1	-
Encofrado	234.1	-
Ladrillo	234.1	-
Tecnopor	234.1	-
Pintura	234.1	-
Puerta contraplacada	234.1	18, 347
Vidrio	234.1	3, 250
Tubería PVC	234.1	-

Nota: La presente tabla resume los cálculos obtenidos en la estimación de las toneladas-kilómetro necesarias para transportar los materiales vía terrestre y marítima.

El trabajo de modelamiento de estos materiales en el programa Simapro se puede apreciar en la Figura 9, como también el proceso seleccionado y las modificaciones específicas para cada material en la Tabla 8. En todos los casos, cada proceso será modelado mediante el enfoque designado en Ecoinvent como “*allocation at the point of substitution, unit*” (APOS, U en Simapro) de manera que los impactos se distribuyen a los subproductos asociados a los distintos procesos y los resultados se presentan de manera simple y estructurada. Cabe resaltar que la base de datos asigna a los procesos una fracción de las distintas tecnologías en el mundo cuando estas se modelan con procedencia del resto del mundo (“RoW” en Simapro), por lo que, para los materiales hechos en Perú antes mencionados, dichas tecnologías fueron llevadas a una procedencia peruana (“PE” en Simapro).

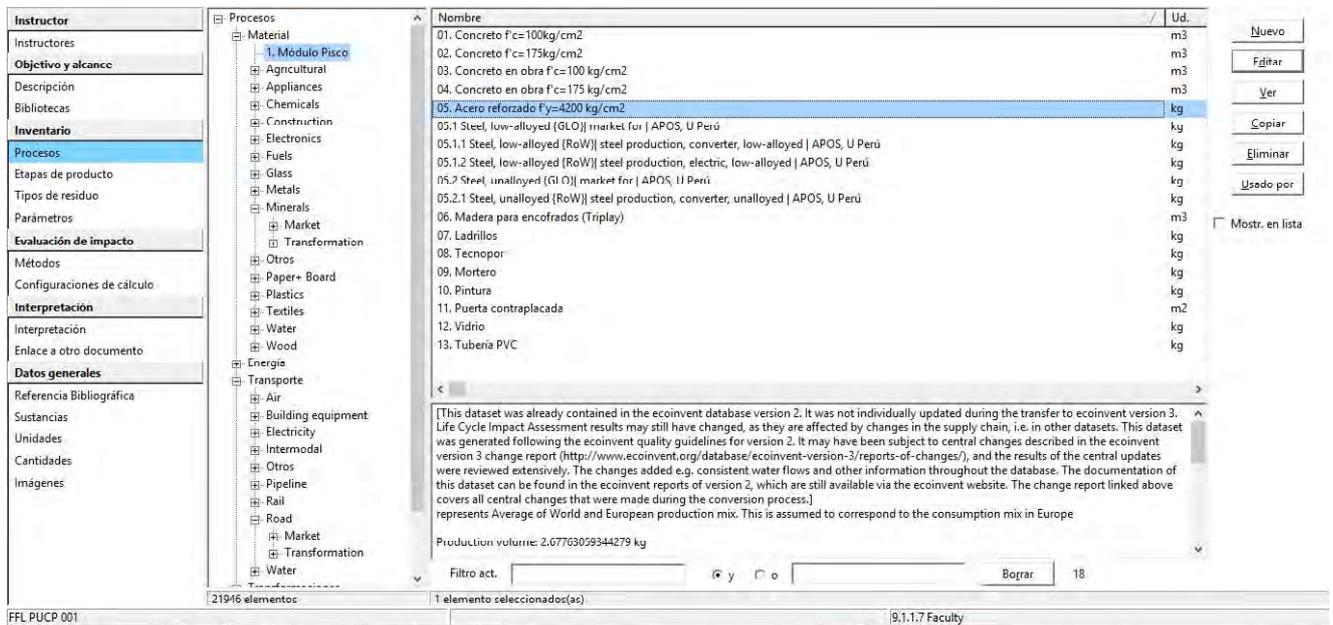


Figura 9. Lista de materiales modelados en Simapro. Los procesos predefinidos en los materiales de origen nacional fueron adaptados de manera que se encuentren más acorde al contexto del proyecto.

Tabla 8

Procesos incluidos y modificaciones en el inventario.

MATERIAL	PROCESO EN ECOINVENT	MODIFICACIÓN
Concreto simple f'c: 100 kg/cm ²	Concrete, 20MPa {PE} concrete production, 20MPa, ready-mix, with Portland cement APOS, U	Cement, Portland {PE} = 242 kg Gravel, crushed {RoW} = 1170 kg Sand {RoW} = 774 kg Tap water {PE} = 171 kg
Concreto armado f'c: 175 kg/cm ²	Concrete, 20MPa {PE} concrete production, 20MPa, ready-mix, with Portland cement APOS, U	Cement, Portland {PE} = 317 kg Gravel, crushed {RoW} = 1205 kg Sand {RoW} = 640 kg Tap water {PE} = 204 kg
Acero f'y: 4200 kg/cm ²	Reinforcing steel {RoW} production APOS, U	Cambio de origen geográfico a {PE}
Encofrado de madera	Plywood, for outdoor use {RoW} production APOS, U	Cambio de origen geográfico a {PE}

MATERIAL	PROCESO EN ECOINVENT	MODIFICACIÓN
Ladrillo	Clay brick {RoW} production APOS, U	Cambio de origen geográfico a {PE}
Tecnopor	Polystyrene, expandable {RoW} production APOS, U	Cambio de origen geográfico a {PE}
Mortero	Cement mortar {RoW} cement mortar production, hand-mixed, on-site APOS, U	Cement, Portland {PE} = 0.2732 kg Sand {RoW} = 0.7377 kg Tap water {PE} = 0.000168 kg
Pintura	Acrylic varnish, without water, in 87.5% solution state {RoW} acrylic varnish production, product in 87.5% solution state APOS, U	Cambio de origen geográfico a {PE}
Puerta contraplacada	Door, inner, wood {RoW} production APOS, U	Ninguna
Vidrio	Flat glass, coated {RoW} production	Ninguna
Tubería PVC	Polyvinylchloride, suspension polymerised {RoW} polyvinylchloride production	Cambio de origen geográfico a {PE}
Excavación	Excavation, skid-steer loader {RoW} processing APOS, U	Ninguna
Transporte terrestre	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW} market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 APOS, U	Ninguna
Transporte marítimo	Transport, freight, sea, container ship {GLO} transport, freight, sea, container ship APOS, U	Ninguna

Nota: Esta tabla muestra a detalle los procesos seleccionados de la biblioteca Ecoinvent 3 para cada uno de los materiales del inventario del ciclo de vida y sus respectivas modificaciones de manera que se adapten al contexto real del proyecto.

Una vez asignados estos procesos con sus respectivas adaptaciones, se procedió con el ensamblaje para cada uno de los módulos, donde se consignaron los metrados y distancias calculadas. La Figura 10 muestra este paso en el programa Simapro, lo cual da por culminada la etapa del inventario del ciclo de vida.

Entrada/salida		Parámetros					
Futura 30		Neg.					
Materiales/Ensamblajes	Cantidad	Ud.	Distribución	DS ¹ /2 or 2 ^o /DS	Min	Max	Comentario
01. Concreto Fc=100kg/cm2	19.66	m3	Indefinido				
02. Concreto Fc=175kg/cm2	29.19	m3	Indefinido				
05. Acero reforzado Fy=4200 kg/cm2	2118.56	kg	Indefinido				
06. Madera para encofrados (Triplay)	3.96	m3	Indefinido				
07. Ladrillos	2352.00	kg	Indefinido				
08. Tecnopor	0.64	kg	Indefinido				
09. Mortero	957.74	kg	Indefinido				
10. Pintura	9.01	kg	Indefinido				
11. Puerta contraplacada	17.41	m2	Indefinido				
12. Vidrio	377.40	kg	Indefinido				
13. Tubería PVC	167.40	kg	Indefinido				
(instalar/inea aquí)							
Procesos	Cantidad	Ud.	Distribución	DS ¹ /2 or 2 ^o /DS	Min	Max	Comentario
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 (RoW)	1332.95	tkm	Indefinido				Concreto f'cs 100 kg/cm2
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 (RoW)	2490.05	tkm	Indefinido				Concreto f'cs 175 kg/cm2
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 (RoW)	508.55	tkm	Indefinido				Acero
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 (RoW)	954	tkm	Indefinido				Triplay
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 (RoW)	564.48	tkm	Indefinido				Ladrillos
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 (RoW)	0.15	tkm	Indefinido				Tecnopor
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 (RoW)	229.86	tkm	Indefinido				Mortero
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 (RoW)	2.16	tkm	Indefinido				Pintura
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 (RoW)	108.64	tkm	Indefinido				Puerta
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 (RoW)	90.58	tkm	Indefinido				Vidrio
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 (RoW)	40.18	tkm	Indefinido				Tubería PVC
Excavation, std-steer loader (RoW) processing APDS	48.67	m3	Indefinido				Excavación
Transport, freight, sea, container ship (GLD) transport	15616.71	tkm	Indefinido				Transporte en barco de vidrios
Transport, freight, sea, container ship (GLD) transport	1248.15	tkm	Indefinido				Transporte en barco de puertas

Figura 10. Montaje del inventario de ciclo de vida en el programa Simapro del módulo Futura 30. Los valores consignados en este proceso fueron colocados de acuerdo con el inventario del ciclo de vida.

Por otro lado, no se ha tomado en consideración algunos acabados, tales como el enchapado y laminado de pisos y paredes, así como la instalación de mobiliarios y aparatos sanitarios y eléctricos, debido principalmente a que estos insumos no varían entre los escenarios. Asimismo, tampoco se ha considerado obras civiles, tales como pistas, pavimento, parques y jardines, ya que corresponden intrínsecamente a los módulos por analizar. Con respecto a la maquinaria, solo se ha considerado una excavadora, ya que no se tiene información adecuada del uso de una compactadora ni del volumen o frecuencia de la maquinaria utilizada para la eliminación de desmonte.

4.2 Escenario 1: cambio de cemento Portland por cemento puzolánico

Una de las propuestas para el ecodiseño de los módulos de viviendas de emergencia consiste en la sustitución en el uso del cemento Portland convencional por un cemento puzolánico. De acuerdo con un estudio realizado por Cagliao Villar et.al (2010), el empleo de materiales cementantes suplementarios como la puzolana reduce las emisiones de CO₂, la cantidad de energía necesaria para la fabricación del concreto, además de reducir la cantidad de residuos y obtener un

concreto de mejores condiciones, como una mayor trabajabilidad, menor permeabilidad y resistencias incluso mayores que con una mezcla pura de cemento Portland. Por otro lado, una de las conclusiones a la que llegan Jarre, Howland, Guerrero y Britto (2017) en su estudio en los impactos en la utilización de la puzolana es la demostración de la factibilidad económica, social y ambiental de introducir el uso de la puzolana natural como sustituto parcial de más de un 35% de cemento convencional en la elaboración de concreto, con posibilidades de reducir los impactos ambientales asociados a la industria de la construcción. En el Perú, hay fábricas que lanzan al mercado este tipo de cementos, por lo que su uso no amerita una gran dificultad. Además, las fichas técnicas de estos productos corroboran lo explicado previamente, complementando el cumplimiento de las normas técnicas que deben cumplirse en su fabricación.

Tabla 9

Procesos incluidos y modificaciones en el inventario para el cemento puzolánico.

MATERIAL	PROCESO EN ECOINVENT	MODIFICACIÓN
Cemento puzolánico	Cement, pozzolana and fly ash 36-55% {PE} APOS, U	Ninguna
Concreto simple f_c: 100 kg/cm²	Concrete, 20MPa {PE} concrete production, 20MPa, ready-mix, with Portland cement APOS, U	Cemento Portland cambiado a cemento puzolánico de acuerdo con el proceso definido previamente. El peso de cemento en el metrado original se mantiene.
Concreto armado f_c: 175 kg/cm²	Concrete, 20MPa {PE} concrete production, 20MPa, ready-mix, with Portland cement APOS, U	
Mortero	Cement mortar {RoW} cement mortar production, hand-mixed, on-site APOS, U	

Nota: Esta tabla muestra a detalle los procesos cambiados y adicionados de la biblioteca Ecoinvent 3 en el inventario del ciclo de vida para el escenario con cemento puzolánico y sus respectivas modificaciones de manera que se adapten al contexto real del proyecto.

En base a lo anterior, se considera óptimo modelar este material de acuerdo con los parámetros establecidos en los módulos. Así, se escogió un proceso preestablecido de la biblioteca Ecoinvent 3 con la descripción del cemento puzolánico acorde a las características del producto, teniendo que adaptar algunos subprocesos de manera que el modelo sea lo más cercano al utilizado

en el proyecto. En la Tabla 9 se describe a detalle el proceso de modelamiento de este nuevo elemento y cómo varían otros materiales en el inventario del ciclo de vida.

4.3 Escenario 2: cambio de ladrillos de arcilla por ladrillos sílico calcáreo

Como segunda propuesta, se sustituirán las unidades de albañilería de arcilla por ladrillos sílico calcáreo. Este material está constituido por cal viva finamente molida e hidratada, arena fina con un alto contenido de sílice y agua. Los ladrillos se moldean mediante alta presión y se endurecen a través de un proceso de curado expuesto a vapor de agua. En una investigación realizada por Himler Cano et al. (2015), se concluyen diversas ventajas con respecto al ladrillo de arcilla. Entre estas, las dos más destacadas son la posibilidad de apilar los muros sin necesidad de utilizar mortero, lo que implica una mejora en la eficiencia de la mano de obra, y la capacidad de enlucir directamente los muros sin requerir revestimiento previo. Además, se consigue una mayor resistencia, la cual se obtiene por un menor porcentaje de vacíos en comparación de las unidades de arcilla, como también una reducción en el costo directo, peso, cantidad de actividades, personal necesario y en la eliminación de material producido por el tarrajeo de interiores. A través de la Tabla 10 se presenta una comparación entre las ventajas y desventajas de este material a comparación del ladrillo de arcilla.

Para el modelamiento de este material se consideró un proceso preestablecido de la biblioteca Ecoinvent 3 con la descripción del ladrillo sílico calcáreo acorde a las características del producto, teniendo que adaptarse algunos subprocesos de manera que el modelo sea lo más cercano al utilizado en el proyecto. En la Tabla 11 se describe a detalle el proceso de modelamiento de este nuevo elemento. Además, al sustituir una cantidad de ladrillos de arcilla por ladrillo sílico calcáreo, el metrado original cambia, teniendo que establecer un nuevo inventario, el cual se detalla en la Tabla 12.

Tabla 10

Ventajas y desventajas comparativas en el uso del ladrillo de arcilla y el ladrillo sílico calcáreo.

Criterio	Muros con ladrillo de arcilla	Muros con ladrillo sílico calcáreo
Columnetas	Requiere columnetas (concreto, encofrado, acero, etc.)	No requiere columnetas
Tarrajeo	Se requiere tarrajeo	No se requiere tarrajeo
Instalaciones	Las instalaciones se realizan luego de haberlos construido	Las instalaciones se colocan previo al asentado
Orden y limpieza	Menor orden y limpieza	Mayor orden y limpieza
Desperdicios	Mayor eliminación de desperdicios	Menor eliminación de desperdicios
Personal requerido	Considera una mayor cantidad de personal de obra por el proceso constructivo	Considera una menor cantidad de personal de obra por el proceso constructivo
Área útil y peso	Menor área útil y mayor peso del muro	Mayor área útil y menor peso del muro
Aislamiento termo acústico	Aceptable aislamiento termo acústico	Aceptable aislamiento termo acústico
Tiempo de ejecución	Mayor tiempo de ejecución por el proceso constructivo	Menor tiempo de ejecución debido a la menor cantidad de actividades ejecutadas
Costo directo	Mayor costo directo por las columnetas y el tarrajeo	Menor costo directo por la eliminación de columnetas y el tarrajeo
Costo indirecto	Mayor costo indirecto por el mayor tiempo que requiere el proceso constructivo	Menor costo indirecto por el tiempo de ahorro en la ejecución

Nota: Esta tabla muestra las ventajas y desventajas en la construcción de un muro de albañilería con ladrillo de arcilla frente al ladrillo blanco. Adaptado de un estudio realizado en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

Tabla 11

Procesos incluidos y modificaciones en el inventario para el ladrillo sílico calcáreo.

MATERIAL	PROCESO EN ECOINVENT	MODIFICACIÓN
Ladrillo sílico calcáreo	Sand-lime brick {RoW} production APOS, U	Cambio de origen geográfico a {PE}

Nota: Esta tabla muestra a detalle los procesos cambiados y adicionados de la biblioteca Ecoinvent 3 en el inventario del ciclo de vida para el escenario con ladrillo sílico calcáreo y sus respectivas modificaciones de manera que se adapten al contexto real del proyecto.

Tabla 12

Inventario del ciclo de vida para cada módulo del proyecto RENACER implementando el uso de ladrillo sílico calcáreo

MÓDULO	PARACAS 23	PARACAS 38	FUTURA 30	PREMIUM 36	PARACAS 50	MAXIMA 42
ÁREA TECHADA (m ²)	45.19	69.49	130.4	155.05	87.7	88.2
TIPO DE CONSTRUCCIÓN	ALBAÑILERÍA	ALBAÑILERÍA	PLACAS	PLACAS	ALBAÑILERÍA	ALBAÑILERÍA
INVENTARIO						
PARTIDA	UNIDAD	METRADO	METRADO	METRADO	METRADO	METRADO
Excavación manual	m ³	17.53	25.68	48.67	54.91	21.68
Concreto simple f'c: 100 kg/cm ²	m ³	6.19	9.52	18.77	19.83	12.02
Concreto armado f'c: 175 kg/cm ²	m ³	8.79	13.52	26.70	33.33	17.06
Acero f'y: 4200 kg/cm ²	kg	818.52	1258.66	1930.45	2295.37	1588.50
Encofrado	m ³	0.81	1.24	3.72	4.43	1.57
Ladrillo de arcilla	kg	2278.51	3503.73	5868.00	6977.25	4421.885
Ladrillo sílico calcáreo	kg	10733.94	16505.89	3761.05	4472.02	20831.30
Tecnopor	kg	0.65	1.00	0.56	0.66	1.26
Mortero	kg	606.49	932.62	814.08	967.97	1177.01
Pintura	kg	3.18	4.80	9.01	10.71	5.88
Puerta contraplacada	m ²	6.15	9.84	17.41	20.70	11.37
Vidrio	kg	94.73	145.2	377.40	444.40	175.60
Tubería PVC	kg	58.02	89.20	167.40	199.10	112.6

Notas: Esta tabla resume los valores calculados del metrado correspondiente a los planos y especificaciones técnicas proporcionados por la constructora responsable del proyecto, adaptado al uso del ladrillo sílico calcáreo.

4.4 Escenario 3: cambio de ladrillos de arcilla por placas de yeso

La tercera propuesta consta de otra alternativa no convencional conocida como sistema de drywall. La placa está conformada por un núcleo de yeso y aditivos especiales, y se denomina "muro seco" porque no utiliza agua en su proceso de desarrollo. Además, incorpora perfiles metálicos galvanizados, que son elementos livianos que reducen la carga durante la construcción, disminuyen los costos de transporte y cuentan con protección anticorrosiva para garantizar durabilidad y resistencia. Según un informe de la revista Perú Construye (2021), este sistema constructivo presenta diversas ventajas, que incluyen:

- una característica antisísmica destacada debido a su menor peso, lo que resulta en una masa reducida y, combinado con su estructura flexible, dificulta su colapso.
- un acabado similar al obtenido con ladrillo y cemento
- es un sistema en seco que prescinde de mezclas de agua o arena, la que puede traducirse en ahorros del 15%,
- el tiempo de construcción será menor que un sistema tradicional,
- contará con aislamiento térmico y acústico.

Tabla 13

Procesos incluidos y modificaciones en el inventario para el drywall.

MATERIAL	PROCESO EN ECOINVENT	MODIFICACIÓN
Drywall	Gypsum plasterboard {RoW} production APOS, U	Cambio de origen geográfico a {PE}
Accesorios de acero galvanizado	Steel, low-alloyed {GLO} market for APOS, U	Cambio de origen geográfico a {PE}

Nota: Esta tabla muestra los procesos cambiados y adicionados de la biblioteca Ecoinvent 3 al inventario del ciclo de vida para el escenario con drywall y las modificaciones de manera que se adapten al contexto real del proyecto.

Tabla 14

Inventario del ciclo de vida para cada módulo del proyecto RENACER implementando el uso de drywall

MÓDULO	PARACAS 23	PARACAS 38	FUTURA 30	PREMIUM 36	PARACAS 50	MAXIMA 42
ÁREA TECHADA (m ²)	45.19	69.49	130.4	155.05	87.7	88.2
TIPO DE CONSTRUCCIÓN	ALBAÑILERÍA	ALBAÑILERÍA	PLACAS	PLACAS	ALBAÑILERÍA	ALBAÑILERÍA
INVENTARIO						
PARTIDA	UNIDAD	METRADO	METRADO	METRADO	METRADO	METRADO
Excavación manual	m ³	17.53	25.68	48.67	54.91	21.68
Concreto simple f'c: 100 kg/cm ²	m ³	6.19	9.52	18.77	19.83	12.02
Concreto armado f'c: 175 kg/cm ²	m ³	8.97	13.79	27.23	34.00	17.40
Acero f'y: 4200 kg/cm ²	kg	843.08	1296.42	1988.36	2364.23	1636.16
Encofrado	m ³	0.82	1.26	3.84	4.65	1.59
Ladrillo de arcilla	kg	6876.08	10372.15	6044.04	7186.57	13218.28
Drywall	kg	335.10	505.47	327.18	388.38	644.17
Acero galvanizado	kg	360.86	544.34	352.31	418.22	693.70
Tecnopor	kg	0.74	1.12	0.61	0.72	1.37
Mortero	kg	642.33	968.92	900.28	1070.46	1301.64
Pintura	kg	3.18	4.80	9.01	10.71	5.88
Puerta contraplacada	m ²	6.15	9.84	17.41	20.70	11.37
Vidrio	kg	94.73	145.2	377.40	444.40	175.60
Tubería PVC	kg	58.02	89.2	167.40	199.10	112.60

Notas: Esta tabla resume los valores calculados del metrado correspondiente a los planos y especificaciones técnicas proporcionados por la constructora responsable del proyecto, adaptado al uso de drywall.

En base a lo anterior, se considera óptimo modelar este material de acuerdo con los parámetros establecidos en los módulos. En este sentido, se escogió un proceso preestablecido de la biblioteca Ecoinvent 3 con la descripción del drywall acorde a las características del producto, teniendo que adaptar algunos subprocesos de manera que el modelo sea lo más cercano al utilizado en el proyecto. En la Tabla 13 se describe a detalle el proceso de modelamiento de este nuevo material y de los accesorios que requiere para su instalación. Además, al sustituir la albañilería de los muros divisorios por placas de yeso y añadiendo elementos galvanizados, el metrado original cambia, teniendo que establecer un nuevo inventario el cual se detalla en la Tabla 14.

4.5 Escenario 4: cambio de ladrillos de arcilla por ladrillos sílico calcáreo usando cemento puzolánico

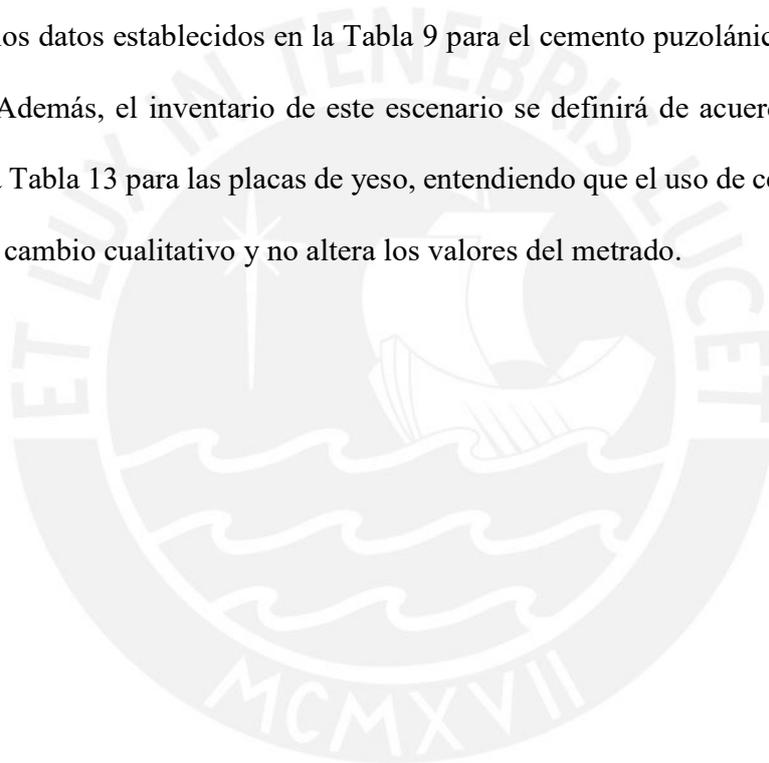
La cuarta propuesta a plantear para el presente estudio consiste en el uso combinado del ladrillo sílico calcáreo para las unidades de albañilería y el cemento puzolánico tanto para el concreto como para el mortero utilizado en el proyecto. Como se explicó en cada escenario independiente, se espera una reducción de los impactos ambientales al aplicar estas alternativas, por lo que se proyecta tener resultados óptimos al aplicarlas de manera simultánea.

Ya que los materiales y procesos a implementar fueron previamente modelados, se tomará como referencia los datos establecidos en la Tabla 9 para el cemento puzolánico y en la Tabla 11 para el ladrillo sílico calcáreo. Además, el inventario de este escenario se definirá de acuerdo con los valores establecidos en la Tabla 12 para el ladrillo sílico calcáreo, entendiendo que el uso de cemento puzolánico corresponde a un cambio cualitativo y no altera los valores del metrado.

4.6 Escenario 5: cambio de ladrillos de arcilla por placas de yeso usando cemento puzolánico

Finalmente, la quinta propuesta a plantear para el presente estudio consiste en el uso combinado del ladrillo sílico calcáreo para las unidades de albañilería y el cemento puzolánico tanto para el concreto como para el mortero utilizado en el proyecto. De manera similar al caso anterior, se proyecta tener resultados óptimos al aplicar de manera simultánea ambas propuestas.

Ya que los materiales y procesos a implementar fueron previamente modelados, se tomará como referencia los datos establecidos en la Tabla 9 para el cemento puzolánico y en la Tabla 14 para el drywall. Además, el inventario de este escenario se definirá de acuerdo con los valores establecidos en la Tabla 13 para las placas de yeso, entendiendo que el uso de cemento puzolánico corresponde a un cambio cualitativo y no altera los valores del metrado.



CAPÍTULO 5. RESULTADOS OBTENIDOS

Inicialmente, se detallarán los resultados de cada impacto ambiental por metro cuadrado de los módulos estudiados. Luego, se presentará el aporte de cada material a las diferentes categorías de impacto evaluadas. Finalmente, de acuerdo con las propuestas de ecodiseño se mostrará cómo varían las categorías de impacto al aplicar estos escenarios y se compararán con el diseño original.

5.1 Impacto ambiental por módulo

De acuerdo con los resultados obtenidos con respecto a los impactos ambientales por cada categoría de impacto de los módulos que conforman el proyecto, se estableció un cociente para cada uno de estos valores en función del área techada de cada módulo a fin de establecer impactos por metro cuadrado, a fin de que sea acorde a la unidad funcional establecida y poder hacer comparaciones de manera más adecuada. De acuerdo con las gráficas a presentar en la Figura 11, se pudo observar que, en todos los casos, el mayor índice de impacto ambiental lo presentan los módulos de albañilería a comparación de los módulos construidos con placas. Un punto a considerar dentro de esta evaluación es el hecho de la gran variación en la utilización de los ladrillos y los encofrados de madera. Además, en el caso de los módulos de placas, el concreto era traído a obra premezclado, mientras que en los de albañilería era hecho in situ. En general, la diferencia se debe principalmente al sistema estructural y proceso constructivo que presenta cada tipo de módulo. A continuación, se presenta lo explicado anteriormente en las siguientes gráficas, cuyos resultados serán resumidos en la Tabla 15.

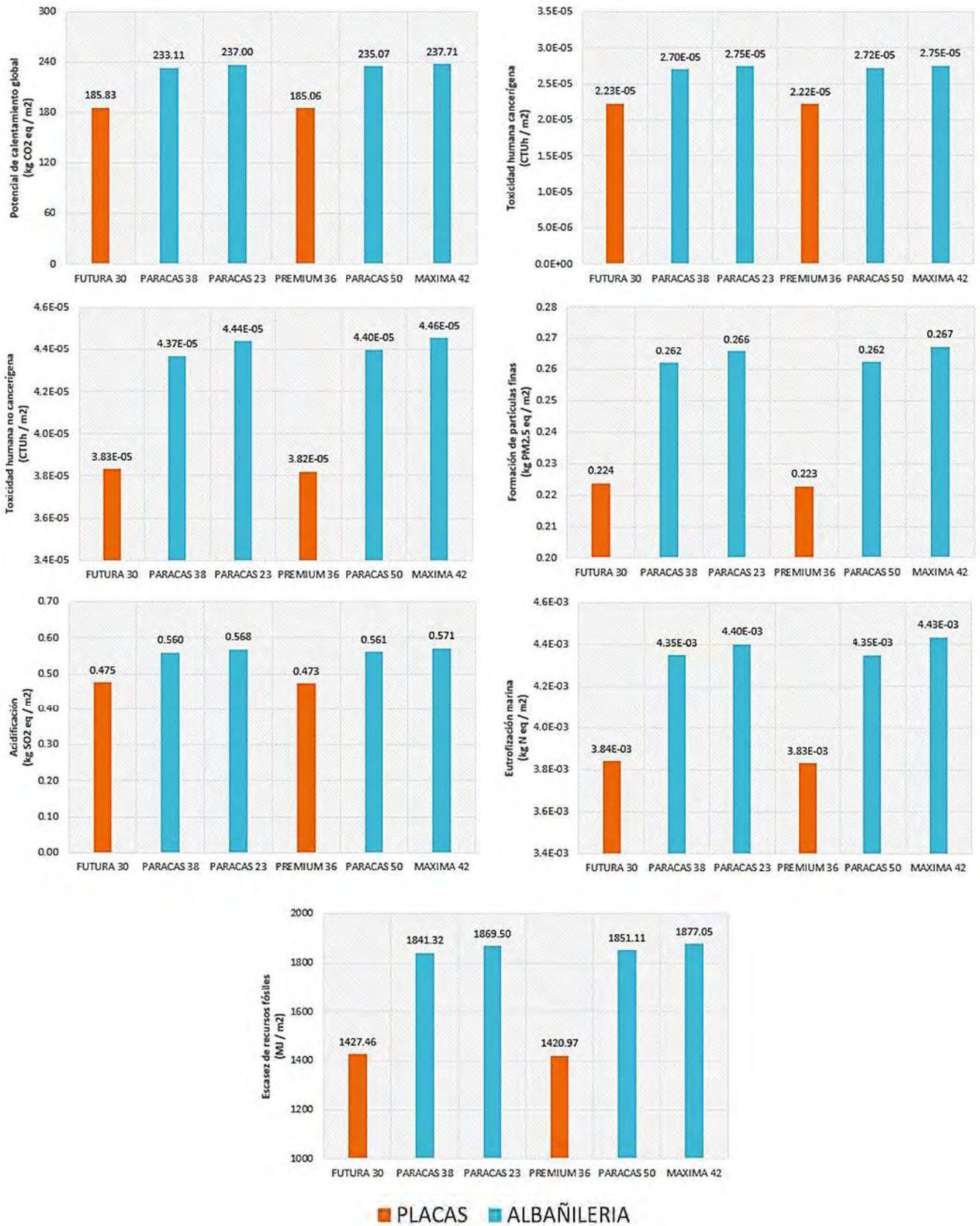


Figura 11. Resultados de las categorías de impacto para cada módulo del proyecto RENACER.

En el caso del potencial de calentamiento global y la escasez de recursos fósiles, los módulos de albañilería presentan valores un 30% más con respecto a los de placas. Para la toxicidad humana cancerígena, material particulado y acidificación, esta variación es del 20%. Por último, en la toxicidad humana no cancerígena y eutrofización, la variación es del 15%.

Tabla 15

Resumen de los impactos ambientales por metro cuadrado de cada módulo del proyecto RENACER.

MÓDULO	FUTURA 30	PARACAS 38	PARACAS 23	PREMIUM 36	PARACAS 50	MAXIMA 42
ÁREA TECHADA (m ²)	130.4	69.49	45.19	155.05	87.7	88.2
TIPO DE CONSTRUCCIÓN	PLACAS	ALBAÑILERÍA	ALBAÑILERÍA	PLACAS	ALBAÑILERÍA	ALBAÑILERÍA
CATEGORIAS DE IMPACTO						
Calentamiento Global (kg CO2 eq/m ²)	185.83	233.11	237.00	185.06	235.07	237.71
Toxicidad humana, cáncer (CTUh)	2.23E-05	2.70E-05	2.75E-05	2.22E-05	2.72E-05	2.75E-05
Toxicidad humana, no cancerosa (CTUh)	3.83E-05	4.37E-05	4.44E-05	3.82E-05	4.40E-05	4.46E-05
Formación de partículas finas (kg PM2.5eq/m ²)	0.22	0.26	0.27	0.22	0.26	0.27
Acidificación (kg SO2 eq/m ²)	0.48	0.56	0.57	0.47	0.56	0.57
Eutrofización marina (kg N eq/m ²)	3.84E-03	4.35E-03	4.40E-03	3.83E-03	4.35E-03	4.43E-03
Escasez de recursos fósiles (MJ/m ²)	1427.46	1841.32	1869.50	1420.97	1851.11	1877.05

Notas: Esta tabla resume los resultados obtenidos en las distintas categorías de impacto de los módulos del proyecto RENACER.

5.2 Impacto ambiental por materiales

A continuación, se muestra el porcentaje de contribución a las categorías de impacto de los materiales para cada uno de los módulos estudiados. Para establecer un primer análisis, en la Tabla 16, Tabla 17 y Figura 12 se presentarán los impactos ambientales de los módulos Premium 36 y Futura 30 cuyo sistema estructural está definido por placas.

Tabla 16

Resumen de los porcentajes de contribución de los materiales a cada categoría de impacto en el módulo Futura 30.

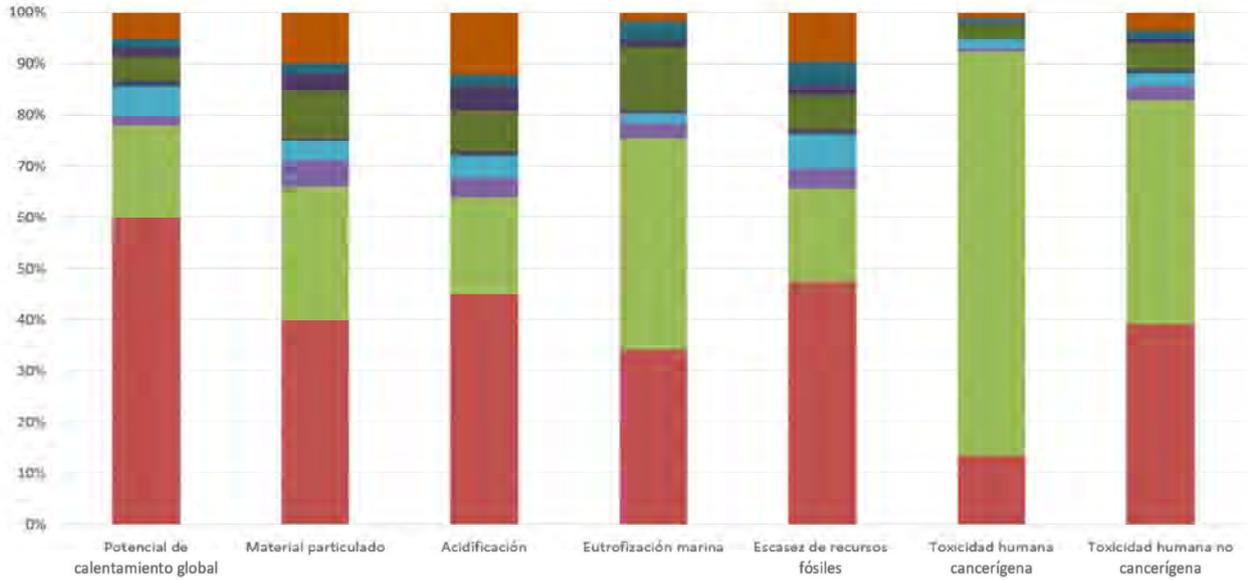
	CALENTAMIENTO GLOBAL	MATERIAL PARTICULADO	ACIDIFICACIÓN	EUTROFIZACIÓN MARINA	ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES	TOXICIDAD HUMANA CANCERIGENA	TOXICIDAD HUMANA NO CANCERIGENA
Excavación	0.10%	0.24%	0.22%	0.02%	0.18%	0.02%	0.02%
Concreto	59.68%	39.57%	44.92%	34.05%	47.23%	13.47%	39.12%
Acero	18.10%	26.30%	18.74%	41.43%	18.30%	78.81%	43.69%
Encofrado	1.88%	5.13%	3.88%	2.91%	3.68%	0.69%	3.03%
Ladrillo	5.98%	3.61%	4.27%	2.04%	6.92%	1.62%	2.36%
Tecnopor	0.01%	0.01%	0.01%	0.00%	0.03%	0.00%	0.00%
Mortero	1.01%	0.56%	0.65%	0.48%	0.67%	0.16%	0.57%
Pintura	0.10%	0.17%	0.19%	0.19%	0.18%	0.05%	0.11%
Puertas	4.50%	8.86%	8.09%	12.16%	6.56%	2.80%	4.90%
Vidrio	1.76%	3.67%	4.86%	1.41%	2.31%	0.41%	1.24%
Tubería PVC	1.65%	2.05%	2.03%	3.51%	4.38%	0.69%	1.63%
Transporte	5.24%	9.82%	12.15%	1.81%	9.57%	1.27%	3.32%

Tabla 17

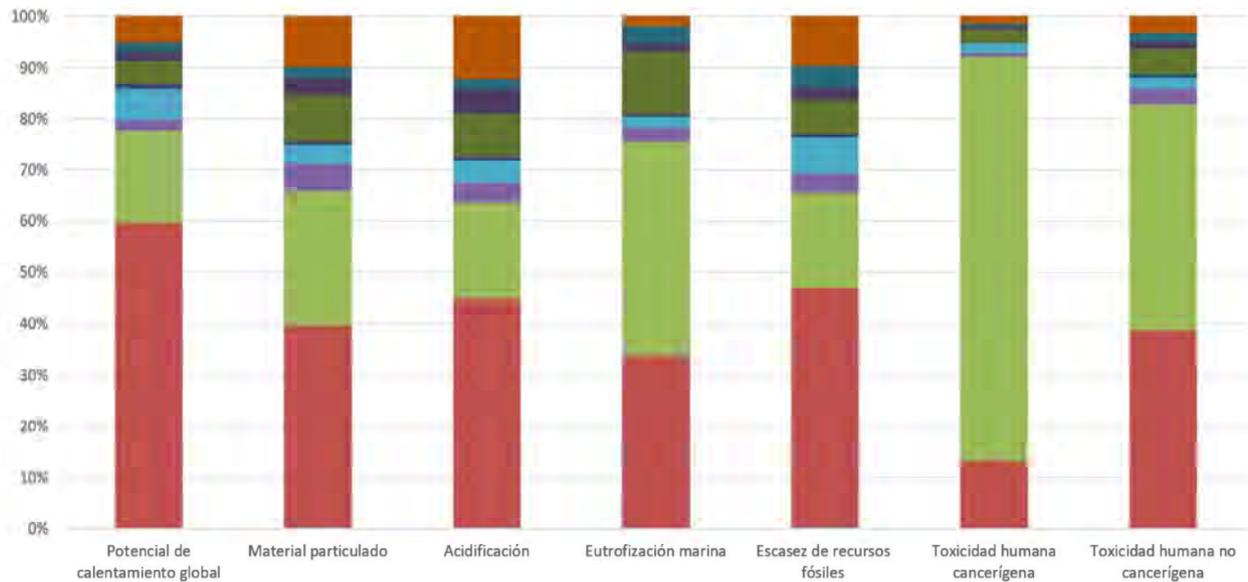
Resumen de los porcentajes de contribución de los materiales a cada categoría de impacto en el módulo Premium 36.

	CALENTAMIENTO GLOBAL	MATERIAL PARTICULADO	ACIDIFICACIÓN	EUTROFIZACIÓN MARINA	ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES	TOXICIDAD HUMANA CANCERIGENA	TOXICIDAD HUMANA NO CANCERIGENA
Excavación	0.10%	0.23%	0.21%	0.02%	0.17%	0.02%	0.02%
Concreto	59.55%	39.40%	44.76%	33.88%	47.05%	13.36%	38.95%
Acero	18.17%	26.41%	18.83%	41.55%	18.38%	78.91%	43.83%
Encofrado	1.90%	5.17%	3.91%	2.93%	3.71%	0.70%	3.05%
Ladrillo	6.01%	3.63%	4.29%	2.04%	6.95%	1.62%	2.37%
Tecnopor	0.01%	0.01%	0.01%	0.00%	0.03%	0.00%	0.00%
Mortero	1.02%	0.56%	0.66%	0.48%	0.67%	0.16%	0.58%
Pintura	0.10%	0.17%	0.19%	0.19%	0.18%	0.05%	0.11%
Puertas	4.52%	8.90%	8.13%	12.19%	6.59%	2.81%	4.91%
Vidrio	1.75%	3.65%	4.84%	1.40%	2.30%	0.41%	1.24%
Tubería PVC	1.65%	2.06%	2.04%	3.52%	4.40%	0.69%	1.63%
Transporte	5.24%	9.81%	12.13%	1.80%	9.57%	1.26%	3.31%

FUTURA 30



PREMIUM 36



■ Excavación ■ Concreto ■ Acero ■ Encofrado ■ Ladrillo ■ Tecnopor ■ Mortero ■ Pintura ■ Puerta ■ Vidrio ■ Tubería PVC ■ Transporte

Figura 12. Contribución de los materiales por categoría de impacto de los módulos de placas.

Como se puede apreciar de las gráficas, los materiales que más contribuyen a los impactos ambientales son el concreto y el acero. Además, se puede apreciar una poca presencia en la participación del ladrillo, lo cual es coherente debido a que el sistema estructural no requiere una

alta demanda de este elemento. Con respecto al concreto, este aporta al potencial de calentamiento global cerca del 60% de esta categoría de impacto, mientras que en otras categorías de impacto oscila entre el 30% al 40%, siendo su menor aporte en la toxicidad humana cancerígena, alcanzando aproximadamente el 13%. De esta última categoría de impacto mencionada, destaca en gran medida el acero, el cual aporta alrededor del 79%. Otros aportes de este material se dan al contribuir en un 40% a la eutrofización marina y a la toxicidad humana no cancerígena, mientras que en los otros impactos ambientales este aporte se encuentra oscilando entre el 18% al 26%.

Continuando con este análisis, en la Tabla del 18 al 21 y en la Figura 13 se mostrará a continuación el porcentaje de contribución a las categorías de impacto de cada material del inventario del ciclo de vida para el módulo Máxima 42, Paracas 50, Paracas 23 y Paracas 38, los cuales constituyen módulos cuyo sistema estructural es principalmente de albañilería. De las gráficas mostradas, se aprecia que los materiales más contribuyentes a los impactos ambientales en estos tipos de módulo son el concreto, el acero y los ladrillos de arcilla. A comparación de los primeros módulos descritos, se presenta una inversión en el porcentaje de participación entre el ladrillo y el encofrado, debido principalmente al aumento en la cantidad de muros de albañilería, el cual va de la mano con la reducción de placas en la estructura. Con respecto al concreto, este aporta al potencial de calentamiento global cerca del 43% de esta categoría de impacto, mientras que en otras oscila entre el 26% al 30%, siendo su menor aporte en la toxicidad humana cancerígena, alcanzando aproximadamente el 9%. De esta última categoría de impacto mencionada, destaca en gran medida el acero, el cual aporta alrededor del 79%. Otros aportes de este material se dan al contribuir en un 45% a la eutrofización marina y a la toxicidad humana no cancerígena, mientras que en los otros impactos ambientales este aporte se encuentra oscilando entre el 17% al 27%.

Tabla 18

Resumen de los porcentajes de contribución de los materiales a cada categoría de impacto en el módulo Paracas 23.

	CALENTAMIENTO GLOBAL	MATERIAL PARTICULADO	ACIDIFICACIÓN	EUTROFIZACIÓN MARINA	ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES	TOXICIDAD HUMANA CANCERIGENA	TOXICIDAD HUMANA NO CANCERIGENA
Excavación	0.08%	0.21%	0.20%	0.02%	0.14%	0.02%	0.02%
Concreto	43.36%	29.60%	33.44%	26.23%	30.60%	9.02%	28.73%
Acero	17.53%	27.36%	19.39%	44.64%	17.26%	78.86%	46.57%
Encofrado	0.95%	2.77%	2.08%	1.63%	1.80%	0.36%	1.68%
Ladrillo	23.16%	15.01%	17.66%	8.78%	26.10%	6.48%	10.06%
Tecnopor	0.03%	0.02%	0.03%	0.01%	0.07%	0.01%	0.00%
Mortero	1.63%	0.97%	1.13%	0.86%	1.05%	0.27%	1.02%
Pintura	0.08%	0.14%	0.16%	0.17%	0.14%	0.04%	0.10%
Puertas	3.59%	7.61%	6.90%	10.81%	5.11%	2.31%	4.31%
Vidrio	1.00%	2.24%	2.95%	0.89%	1.28%	0.24%	0.78%
Tubería PVC	1.29%	1.73%	1.70%	3.06%	3.34%	0.56%	1.41%
Transporte	7.30%	12.34%	14.37%	2.90%	13.11%	1.84%	5.32%

Tabla 19

Resumen de los porcentajes de contribución de los materiales a cada categoría de impacto en el módulo Paracas 38.

	CALENTAMIENTO GLOBAL	MATERIAL PARTICULADO	ACIDIFICACIÓN	EUTROFIZACIÓN MARINA	ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES	TOXICIDAD HUMANA CANCERIGENA	TOXICIDAD HUMANA NO CANCERIGENA
Excavación	0.08%	0.20%	0.19%	0.02%	0.14%	0.02%	0.02%
Concreto	43.25%	29.44%	33.25%	26.05%	30.48%	9.00%	28.65%
Acero	17.48%	27.20%	19.28%	44.32%	17.19%	78.73%	46.43%
Encofrado	0.94%	2.74%	2.06%	1.61%	1.79%	0.36%	1.67%
Ladrillo	23.10%	14.93%	17.56%	8.72%	25.99%	6.47%	10.03%
Tecnopor	0.03%	0.02%	0.03%	0.01%	0.07%	0.01%	0.00%
Mortero	1.63%	0.97%	1.12%	0.85%	1.05%	0.27%	1.02%
Pintura	0.08%	0.14%	0.16%	0.17%	0.14%	0.04%	0.10%
Puertas	3.80%	8.02%	7.28%	11.38%	5.39%	2.45%	4.55%
Vidrio	1.01%	2.26%	2.98%	0.90%	1.29%	0.25%	0.79%
Tubería PVC	1.31%	1.75%	1.72%	3.10%	3.39%	0.57%	1.43%
Transporte	7.29%	12.32%	14.37%	2.88%	13.08%	1.84%	5.31%

Tabla 20

Resumen de los porcentajes de contribución de los materiales a cada categoría de impacto en el módulo Paracas 50.

	CALENTAMIENTO GLOBAL	MATERIAL PARTICULADO	ACIDIFICACIÓN	EUTROFIZACIÓN MARINA	ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES	TOXICIDAD HUMANA CANCERIGENA	TOXICIDAD HUMANA NO CANCERIGENA
Excavación	0.08%	0.20%	0.19%	0.02%	0.14%	0.02%	0.02%
Concreto	43.54%	29.85%	33.71%	26.45%	30.78%	9.07%	28.89%
Acero	17.50%	27.43%	19.44%	44.77%	17.27%	78.88%	46.58%
Encofrado	0.92%	2.70%	2.03%	1.58%	1.75%	0.35%	1.63%
Ladrillo	23.13%	15.06%	17.70%	8.81%	26.11%	6.48%	10.06%
Tecnopor	0.03%	0.02%	0.03%	0.01%	0.07%	0.01%	0.00%
Mortero	1.72%	1.03%	1.19%	0.91%	1.11%	0.28%	1.07%
Pintura	0.07%	0.14%	0.15%	0.17%	0.13%	0.04%	0.10%
Puertas	3.45%	7.34%	6.66%	10.42%	4.91%	2.23%	4.14%
Vidrio	0.96%	2.17%	2.85%	0.86%	1.23%	0.23%	0.75%
Tubería PVC	1.30%	1.75%	1.72%	3.10%	3.38%	0.56%	1.42%
Transporte	7.30%	12.32%	14.32%	2.91%	13.13%	1.84%	5.34%

Tabla 21

Resumen de los porcentajes de contribución de los materiales a cada categoría de impacto en el módulo Máxima 42.

	CALENTAMIENTO GLOBAL	MATERIAL PARTICULADO	ACIDIFICACIÓN	EUTROFIZACIÓN MARINA	ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES	TOXICIDAD HUMANA CANCERIGENA	TOXICIDAD HUMANA NO CANCERIGENA
Excavación	0.08%	0.19%	0.18%	0.01%	0.13%	0.02%	0.02%
Concreto	42.00%	27.15%	31.25%	24.84%	28.87%	8.90%	27.26%
Acero	16.98%	25.09%	18.12%	42.28%	16.28%	77.87%	44.19%
Encofrado	3.65%	10.12%	7.75%	6.14%	6.77%	1.42%	6.34%
Ladrillo	22.44%	13.77%	16.50%	8.32%	24.62%	6.40%	9.54%
Tecnopor	0.03%	0.02%	0.03%	0.01%	0.07%	0.01%	0.00%
Mortero	1.58%	0.89%	1.05%	0.81%	0.99%	0.27%	0.97%
Pintura	0.07%	0.13%	0.15%	0.16%	0.13%	0.04%	0.10%
Puertas	3.69%	7.40%	6.85%	10.86%	5.11%	2.42%	4.33%
Vidrio	0.98%	2.09%	2.80%	0.85%	1.23%	0.24%	0.75%
Tubería PVC	1.25%	1.59%	1.59%	2.90%	3.15%	0.55%	1.33%
Transporte	7.24%	11.57%	13.74%	2.81%	12.66%	1.86%	5.17%

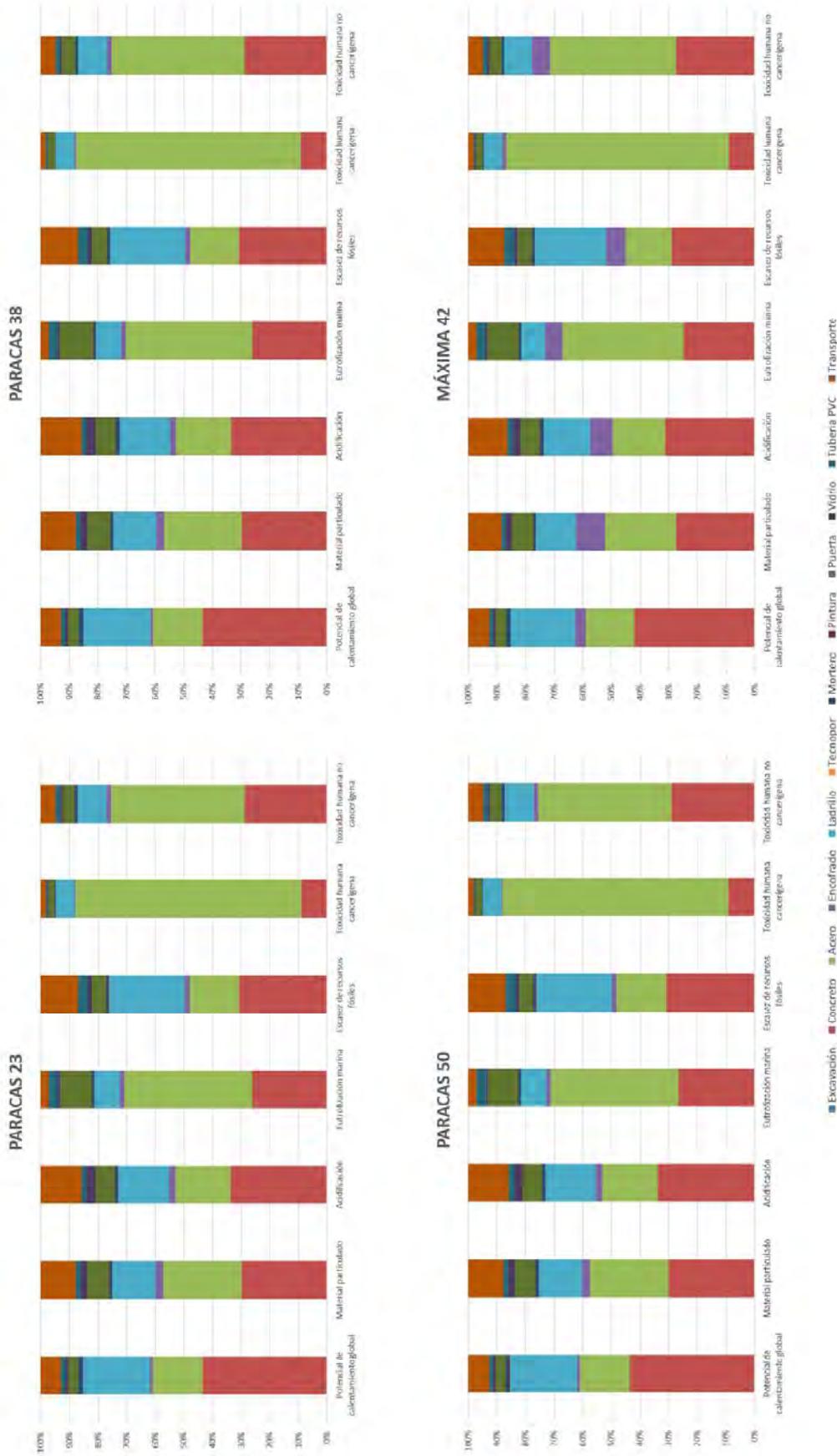


Figura 13. Contribución de los materiales por categoría de impacto de los módulos de albañilería.

5.3 Impactos ambientales por escenarios

5.3.1 Impactos ambientales del escenario 1 con cemento puzolánico.

Como primer modelo de ecodiseño, se tendrá en cuenta el uso del cemento puzolánico a cambio del cemento Portland convencional para el vaciado de concreto en sus distintas resistencias y la elaboración del mortero, manteniendo los metrados realizados para el inventario original del ciclo de vida de los módulos. Los resultados obtenidos en las distintas categorías de impacto de los módulos del proyecto RENACER cambiando el cemento Portland del diseño original a cemento puzolánico se resumen en la Tabla 22.

Tabla 22

Resumen de los impactos ambientales por metro cuadrado del escenario 1 con cemento puzolánico de cada módulo del proyecto RENACER.

MÓDULO	FUTURA 30	PARACAS 38	PARACAS 23	PREMIUM 36	PARACAS 50	MAXIMA 42
ÁREA TECHADA (m ²)	130.4	69.49	45.19	155.05	87.7	88.2
TIPO DE CONSTRUCCIÓN	PLACAS	ALBAÑILERÍA	ALBAÑILERÍA	PLACAS	ALBAÑILERÍA	ALBAÑILERÍA
CATEGORIAS DE IMPACTO						
Calentamiento Global (kg CO ₂ eq/m ²)	151.79	201.23	204.50	151.18	202.76	205.14
Toxicidad humana, cáncer (CTUh)	2.18E-05	2.66E-05	2.70E-05	2.18E-05	2.68E-05	2.71E-05
Toxicidad humana, no cancerosa (CTUh)	3.49E-05	4.05E-05	4.11E-05	3.48E-05	4.07E-05	4.12E-05
Formación de partículas finas (kg PM _{2.5} eq/m ²)	0.21	0.24	0.25	0.20	0.24	0.25
Acidificación (kg SO ₂ eq/m ²)	0.43	0.52	0.52	0.43	0.52	0.53
Eutrofización marina (kg N eq/m ²)	3.53E-03	4.06E-03	4.11E-03	3.52E-03	4.05E-03	4.14E-03
Escasez de recursos fósiles (MJ/m ²)	1280.30	1703.51	1728.97	1274.53	1712.00	1735.66

5.3.2 Impactos ambientales del escenario 2 con ladrillo sílico-calcáreo

Para este caso, se toma en cuenta la implementación del ladrillo blanco en el proceso constructivo de los módulos, reduciendo de manera significativa el uso de ladrillos de arcilla y, en menor grado, la de otros elementos como el acero, concreto, mortero y encofrado. En base a esto, se muestra a continuación la Tabla 23 la cual resume los resultados obtenidos en las distintas categorías de impacto de los módulos del proyecto cambiando en su mayoría los muros con ladrillo de arcilla por ladrillo sílico calcáreo.

Tabla 23

Resumen de los impactos ambientales por metro cuadrado del escenario 2 con ladrillo sílico calcáreo de cada módulo del proyecto RENACER.

MÓDULO	FUTURA 30	PARACAS 38	PARACAS 23	PREMIUM 36	PARACAS 50	MAXIMA 42
ÁREA TECHADA (m ²)	130.4	69.49	45.19	155.05	87.7	88.2
TIPO DE CONSTRUCCIÓN	PLACAS	ALBAÑILERÍA	ALBAÑILERÍA	PLACAS	ALBAÑILERÍA	ALBAÑILERÍA
CATEGORIAS DE IMPACTO						
Calentamiento Global (kg CO ₂ eq/m ²)	178.88	219.52	219.15	177.91	218.54	219.78
Toxicidad humana, cáncer (CTUh)	2.07E-05	2.55E-05	2.54E-05	2.06E-05	2.54E-05	2.55E-05
Toxicidad humana, no cancerosa (CTUh)	3.63E-05	4.27E-05	4.26E-05	3.61E-05	4.25E-05	4.28E-05
Formación de partículas finas (kg PM _{2.5} eq/m ²)	0.22	0.26	0.25	0.21	0.25	0.26
Acidificación (kg SO ₂ eq/m ²)	0.46	0.55	0.55	0.46	0.54	0.55
Eutrofización marina (kg N eq/m ²)	3.68E-03	4.49E-03	4.47E-03	3.66E-03	4.45E-03	4.50E-03
Escasez de recursos fósiles (MJ/m ²)	1381.69	1647.78	1643.72	1373.88	1636.68	1650.49

5.3.3 Impactos ambientales del escenario 3 con placas de yeso

Para este caso, se toma en cuenta la implementación de las placas de yeso en el proceso constructivo de los módulos. De manera similar al ladrillo sílico calcáreo, esta alternativa reduce en gran medida el uso de ladrillos de arcilla. Sin embargo, también se añade al inventario los accesorios de acero galvanizado, los cuales se utilizan para la estructura del drywall. En base a esto, se muestra a continuación la Tabla 24 la cual resume los resultados obtenidos en las distintas categorías de impacto de los módulos del proyecto RENACER cambiando en su mayoría los muros con ladrillo de arcilla por drywall.

Tabla 24

Resumen de los impactos ambientales por metro cuadrado del escenario 3 con drywall de cada módulo del proyecto RENACER.

MÓDULO	FUTURA 30	PARACAS 38	PARACAS 23	PREMIUM 36	PARACAS 50	MAXIMA 42
ÁREA TECHADA (m ²)	130.4	69.49	45.19	155.05	87.7	88.2
TIPO DE CONSTRUCCIÓN	PLACAS	ALBAÑILERÍA	ALBAÑILERÍA	PLACAS	ALBAÑILERÍA	ALBAÑILERÍA
CATEGORIAS DE IMPACTO						
Calentamiento Global (kg CO ₂ eq/m ²)	181.76	219.50	220.35	181.21	219.40	221.02
Toxicidad humana, cáncer (CTUh)	2.58E-05	3.89E-05	3.92E-05	2.57E-05	3.90E-05	3.92E-05
Toxicidad humana, no cancerosa (CTUh)	4.20E-05	5.65E-05	5.68E-05	4.19E-05	5.65E-05	5.70E-05
Formación de partículas finas (kg PM _{2.5} eq/m ²)	0.23	0.27	0.27	0.22	0.27	0.27
Acidificación (kg SO ₂ eq/m ²)	0.47	0.55	0.55	0.47	0.55	0.56
Eutrofización marina (kg N eq/m ²)	3.95E-03	4.89E-03	4.90E-03	3.94E-03	4.86E-03	4.93E-03
Escasez de recursos fósiles (MJ/m ²)	1409.81	1718.20	1725.34	1405.70	1714.82	1732.99

5.3.4 Impactos ambientales del escenario 4 con ladrillo sílico-calcáreo y cemento puzolánico

Para este modelo, se toma en cuenta la implementación de manera combinada tanto del ladrillo sílico-calcáreo como del cemento puzolánico en el proceso constructivo de los módulos. Como se explicó anteriormente, el uso de esta unidad de albañilería reduce de manera significativa el uso de ladrillos de arcilla y, en menor grado, la de otros elementos como el acero, concreto, mortero y encofrado. Adicionalmente, toda mezcla para el mortero y concreto tendrá en su composición el cemento puzolánico. En base a esto, se muestra a continuación la Tabla 25 la cual resume los resultados obtenidos en las distintas categorías de impacto de los módulos del proyecto RENACER cambiando en su mayoría los muros con ladrillo de arcilla por ladrillo sílico-calcáreo y haciendo uso del cemento puzolánico.

Tabla 25

Resumen de los impactos ambientales por metro cuadrado del escenario 4 con ladrillo sílico-calcáreo y cemento puzolánico de cada módulo del proyecto RENACER.

MÓDULO	FUTURA 30	PARACAS 38	PARACAS 23	PREMIUM 36	PARACAS 50	MAXIMA 42
ÁREA TECHADA (m ²)	130.4	69.49	45.19	155.05	87.7	88.2
TIPO DE CONSTRUCCIÓN	PLACAS	ALBAÑILERÍA	ALBAÑILERÍA	PLACAS	ALBAÑILERÍA	ALBAÑILERÍA
CATEGORIAS DE IMPACTO						
Calentamiento Global (kg CO ₂ eq/m ²)	147.28	189.47	189.11	146.52	188.50	189.72
Toxicidad humana, cáncer (CTUh)	2.02E-05	2.51E-05	2.50E-05	2.02E-05	2.50E-05	2.51E-05
Toxicidad humana, no cancerosa (CTUh)	3.30E-05	3.96E-05	3.96E-05	3.29E-05	3.94E-05	3.97E-05
Formación de partículas finas (kg PM _{2.5} eq/m ²)	0.20	0.24	0.24	0.20	0.24	0.24
Acidificación (kg SO ₂ eq/m ²)	0.42	0.51	0.50	0.42	0.50	0.51
Eutrofización marina (kg N eq/m ²)	3.39E-03	4.21E-03	4.19E-03	3.38E-03	4.17E-03	4.23E-03
Escasez de recursos fósiles (MJ/m ²)	1245.08	1517.90	1513.87	1238.16	1506.79	1520.58

5.3.5 Impactos ambientales del escenario 5 con placas de yeso y cemento puzolánico

Para este modelo, se toma en cuenta la implementación de manera combinada tanto de las placas de yeso como del cemento puzolánico en el proceso constructivo de los módulos. Como se explicó anteriormente, el uso de esta unidad de albañilería reduce de manera significativa el uso de ladrillos de arcilla y, en menor grado, la de otros elementos como el acero, concreto, mortero y encofrado. Además, los elementos estructurales tendrán en la composición del mortero y del concreto el uso de cemento puzolánico. En base a esto, se muestra a continuación la Tabla 26 la cual resume los resultados obtenidos en las distintas categorías de impacto de los módulos del proyecto cambiando en su mayoría los muros con ladrillo de arcilla por placas de yeso y haciendo uso del cemento puzolánico en los elementos estructurales restantes.

Tabla 26

Resumen de los impactos ambientales por metro cuadrado del escenario 5 con placas de yeso y cemento puzolánico de cada módulo del proyecto RENACER.

MÓDULO	FUTURA 30	PARACAS 38	PARACAS 23	PREMIUM 36	PARACAS 50	MAXIMA 42
ÁREA TECHADA (m ²)	130.4	69.49	45.19	155.05	87.7	88.2
TIPO DE CONSTRUCCIÓN	PLACAS	ALBAÑILERÍA	ALBAÑILERÍA	PLACAS	ALBAÑILERÍA	ALBAÑILERÍA
CATEGORIAS DE IMPACTO						
Calentamiento Global (kg CO ₂ eq/m ²)	149.75	189.06	189.91	149.38	188.96	190.58
Toxicidad humana, cáncer (CTUh)	2.53E-05	3.85E-05	3.88E-05	2.53E-05	3.86E-05	3.88E-05
Toxicidad humana, no cancerosa (CTUh)	3.87E-05	5.34E-05	5.37E-05	3.86E-05	5.34E-05	5.39E-05
Formación de partículas finas (kg PM _{2.5} eq/m ²)	0.21	0.25	0.25	0.21	0.25	0.26
Acidificación (kg SO ₂ eq/m ²)	0.43	0.51	0.51	0.43	0.51	0.51
Eutrofización marina (kg N eq/m ²)	3.66E-03	4.61E-03	4.62E-03	3.65E-03	4.59E-03	4.65E-03
Escasez de recursos fósiles (MJ/m ²)	1271.44	1586.63	1593.75	1268.11	1583.25	1601.41

5.4 Comparación de impactos ambientales por escenarios

Para esta parte, se procederá a comparar los resultados obtenidos de las alternativas propuestas. En este sentido, se realizará un análisis por separado para los módulos de albañilería y los módulos de placas, ya que, como se aprecia de los valores conseguidos, estos presentan un comportamiento similar para un mismo sistema estructural. En cada gráfica mostrada, se mostrarán los impactos ambientales de manera comparativa entre el modelo original, el escenario 1 correspondiente a la aplicación del cemento puzolánico, el escenario 2 asociado al uso del ladrillo sílico calcáreo, el escenario 3, en el cual se aplica el sistema de *drywall*, el escenario 4, donde se combina el uso del cemento puzolánico con el ladrillo sílico calcáreo y el escenario 5, el cual resulta de la combinación de las placas de yeso con el cemento puzolánico.

5.4.1 Comparación de escenarios para los módulos de placas

Iniciando con el potencial de calentamiento global, se puede apreciar en la Figura 14 una reducción de los impactos ambientales en todos los escenarios, siendo el caso óptimo el escenario 4 con una reducción del 20.8%, mientras que el menos recomendable es el escenario 3 al obtener una reducción del 2.1%. De la gráfica se puede afirmar que los escenarios que usan cemento puzolánico presentan una reducción significativa a comparación de los otros. Además, entre el ladrillo sílico calcáreo y el *drywall*, el primero resulta ligeramente más efectivo en reducir este impacto ambiental, aunque la reducción no sea mayor del 4%.



Figura 14. Comparación de escenarios del potencial de calentamiento global para módulos de placas. Cemento puzolánico (Escenario 1); Ladrillo sílico calcáreo (Escenario 2); Placas de yeso (Escenario 3); Cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo (Escenario 4); Cemento puzolánico y placas de yeso (Escenario 5).

Con respecto a la toxicidad humana cancerígena, se puede apreciar en la Figura 15 una reducción de los impactos ambientales en el primer, segundo y cuarto escenario, siendo el caso óptimo el escenario 4 con una reducción del 9.1%, mientras que el menos recomendable es el escenario 3 al obtener un aumento del 15.8%. De la gráfica se puede afirmar que los escenarios que usan ladrillo blanco presentan una reducción significativa a comparación de los otros. Además, el uso del *drywall* aumenta los valores de esta categoría de impacto, ya que, si bien se reducen los valores de la mayoría de los materiales, los accesorios de acero galvanizado necesarios para las placas de yeso generan un aumento del 21% con respecto al total del diseño original.



Figura 15. Comparación de escenarios de la toxicidad humana cancerígena para módulos de placas. Cemento puzolánico (Escenario 1); Ladrillo sílico calcáreo (Escenario 2); Placas de yeso (Escenario 3); Cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo (Escenario 4); Cemento puzolánico y placas de yeso (Escenario 5).

Con respecto a la toxicidad humana no cancerígena, se puede apreciar en la Figura 16 una reducción de los impactos ambientales en el primer, segundo y cuarto escenario, siendo el caso óptimo el escenario 4 con una reducción del 19.9%, mientras que el menos recomendable es el escenario 3 al obtener un aumento del 2.1%. De la gráfica se puede afirmar que los escenarios que usan cemento puzolánico presentan una reducción significativa a comparación de los otros. Además, el uso del *drywall* aumenta los valores de esta categoría de impacto, ya que los accesorios de acero galvanizado generan un aumento del 14% con respecto al total del diseño original.

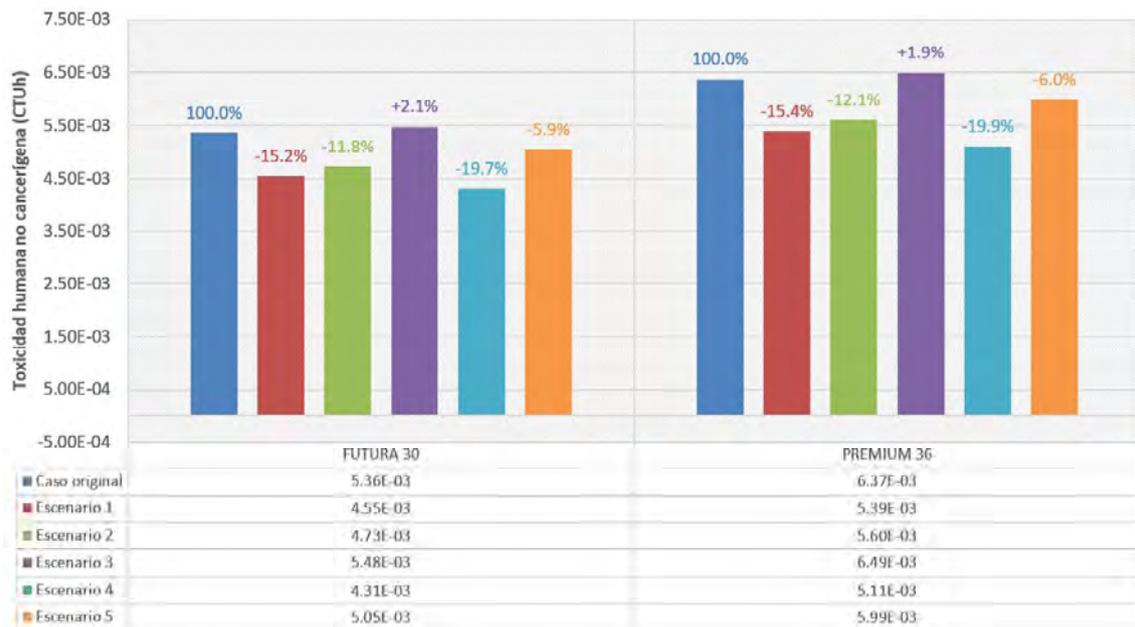


Figura 16. Comparación de escenarios de la toxicidad humana no cancerígena para módulos de placas. Cemento puzolánico (Escenario 1); Ladrillo sílico calcáreo (Escenario 2); Placas de yeso (Escenario 3); Cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo (Escenario 4); Cemento puzolánico y placas de yeso (Escenario 5).

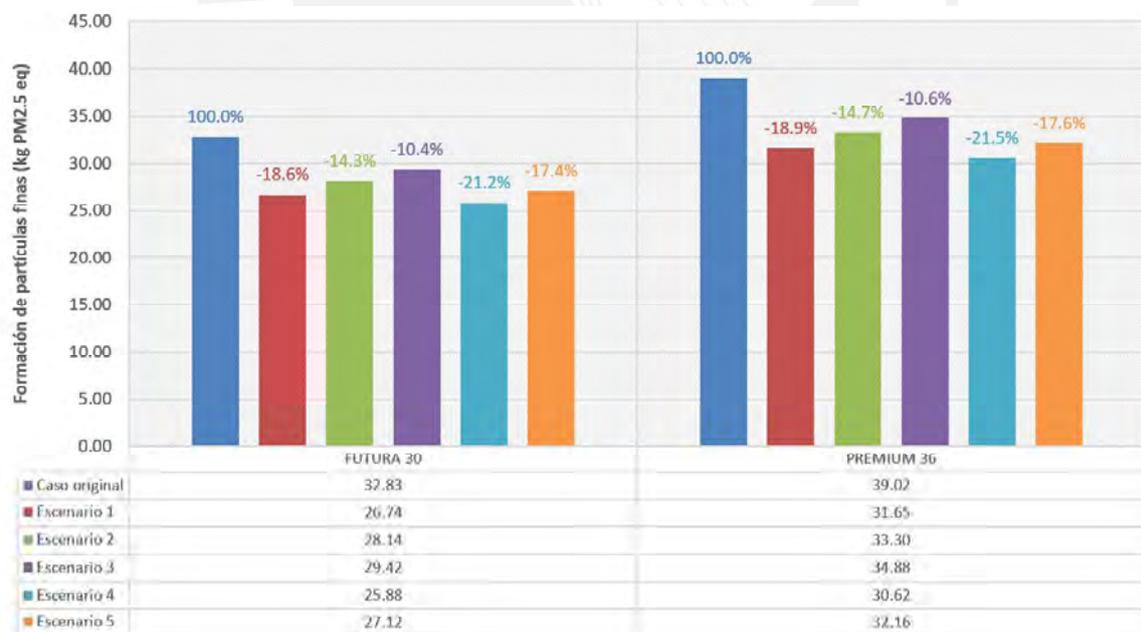


Figura 17. Comparación de escenarios del material particulado para módulos de placas. Cemento puzolánico (Escenario 1); Ladrillo sílico calcáreo (Escenario 2); Placas de yeso (Escenario 3); Cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo (Escenario 4); Cemento puzolánico y placas de yeso (Escenario 5).

Con respecto al material particulado, se puede apreciar en la Figura 17 una reducción de los impactos ambientales en todos los escenarios, siendo el caso óptimo el escenario 4 con una reducción del 21.5%, mientras que el menos recomendable es el escenario 2 al obtener una reducción del 14.3%. De la gráfica se puede afirmar que los escenarios que usan cemento puzolánico presentan una reducción significativa a comparación de los otros. Además, entre el ladrillo sílico calcáreo y el *drywall*, el primero resulta más efectivo en reducir este impacto ambiental con una reducción del 14.7% a comparación del 10.4% que ofrece la otra opción.

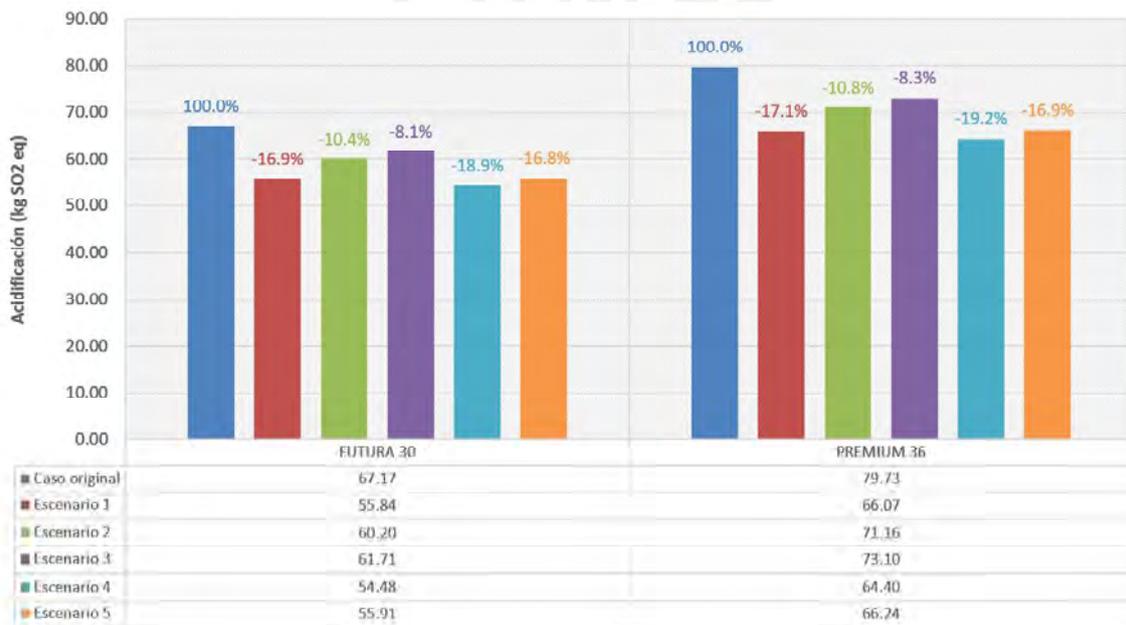


Figura 18. Comparación de escenarios de la acidificación para módulos de placas. Cemento puzolánico (Escenario 1); Ladrillo sílico calcáreo (Escenario 2); Placas de yeso (Escenario 3); Cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo (Escenario 4); Cemento puzolánico y placas de yeso (Escenario 5).

En el caso de la acidificación, se puede apreciar en la Figura 18 una reducción de los impactos ambientales en todos los escenarios, siendo el caso óptimo el escenario 4 con una reducción del 19.2%, mientras que el menos recomendable es el escenario 3 al obtener una reducción del 8.3%. De la gráfica se puede afirmar que los escenarios que usan cemento puzolánico presentan una reducción significativa a comparación de los otros. Además, entre el ladrillo sílico

calcáreo y el *drywall*, el primero resulta más efectivo en reducir este impacto ambiental con una reducción del 10.8% a comparación del 8.1% que ofrece la otra opción.

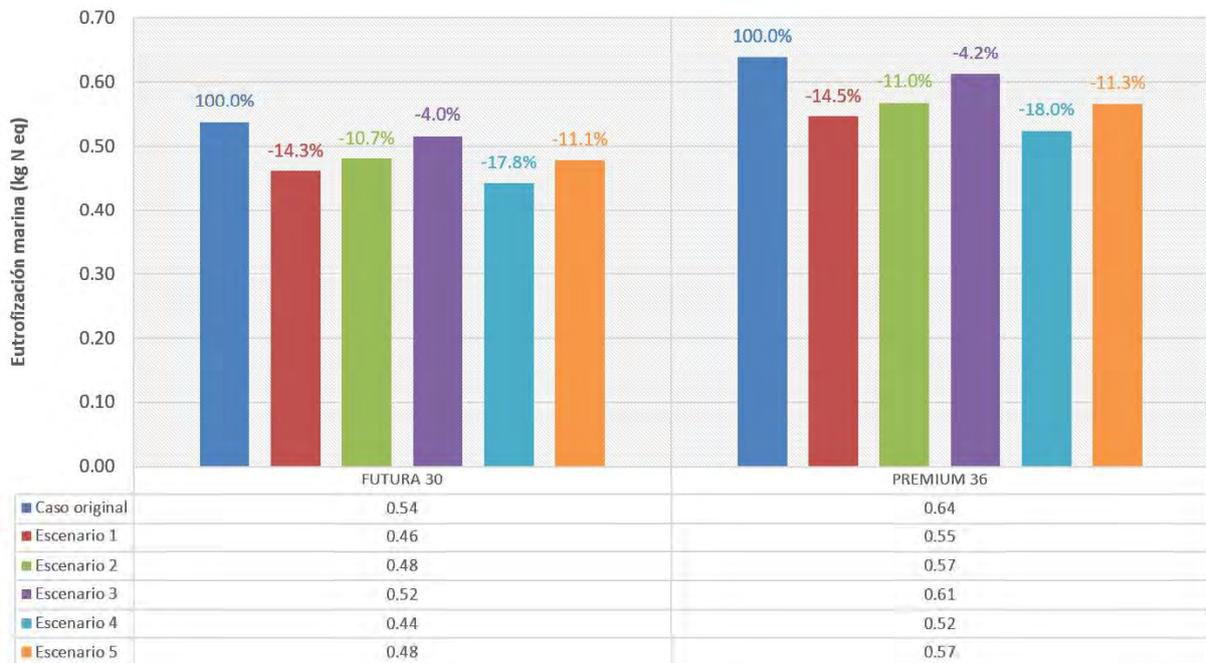


Figura 19. Comparación de escenarios de la eutrofización marina para módulos de placas. Cemento puzolánico (Escenario 1); Ladrillo sílico calcáreo (Escenario 2); Placas de yeso (Escenario 3); Cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo (Escenario 4); Cemento puzolánico y placas de yeso (Escenario 5).

Para la eutrofización marina, se puede apreciar en la Figura 19 una reducción de los impactos ambientales en todos los escenarios, siendo el caso óptimo el escenario 4 con una reducción del 18%, mientras que el menos recomendable es el escenario 3 al obtener una reducción del 4%. De la gráfica se puede afirmar que los escenarios que usan cemento puzolánico presentan una reducción significativa a comparación de los otros. Además, entre el ladrillo sílico calcáreo y el *drywall*, el primero resulta más efectivo en reducir este impacto ambiental con una reducción del 11% a comparación del 4.2% que ofrece la otra opción.

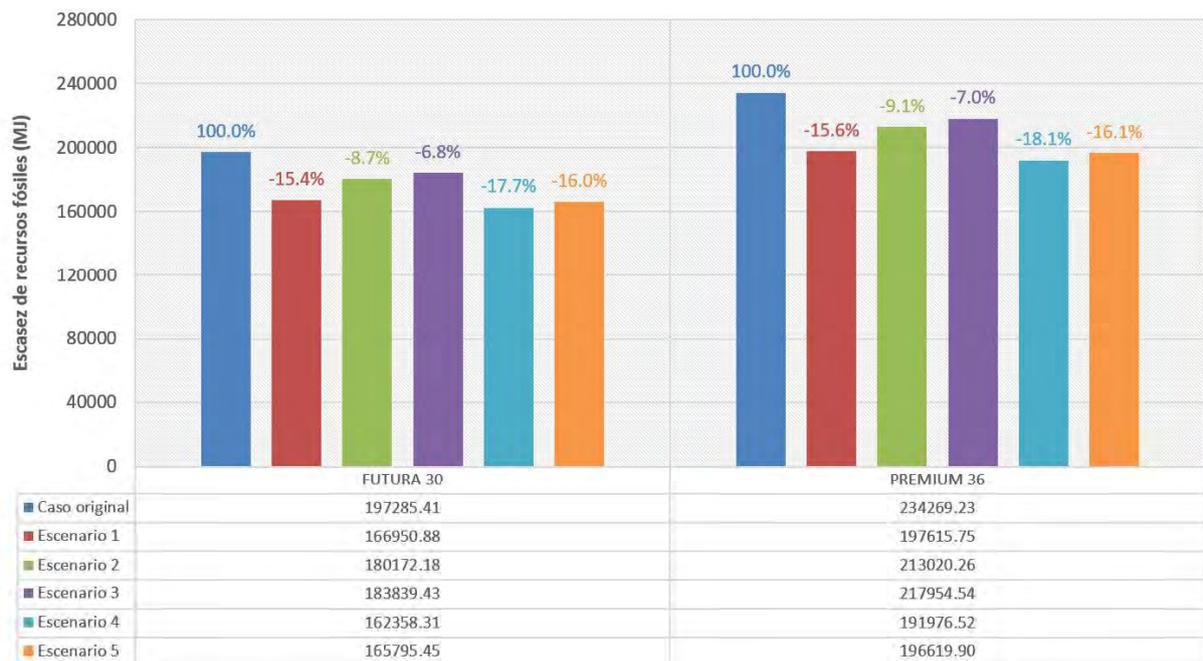


Figura 20. Comparación de escenarios de la escasez de recursos fósiles para módulos de placas. Cemento puzolánico (Escenario 1); Ladrillo sílico calcáreo (Escenario 2); Placas de yeso (Escenario 3); Cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo (Escenario 4); Cemento puzolánico y placas de yeso (Escenario 5).

Con respecto a la escasez de recursos fósiles, se puede apreciar en la Figura 20 una reducción de los impactos ambientales en todos los escenarios, siendo el caso óptimo el escenario 4 con una reducción del 18.1%, mientras que el menos recomendable es el escenario 3 al obtener una reducción del 6.8%. De la gráfica se puede afirmar que los escenarios que usan cemento puzolánico presentan una reducción significativa a comparación de los otros. Además, entre el ladrillo sílico calcáreo y el *drywall*, el primero resulta más efectivo en reducir este impacto ambiental con una reducción del 9.1% a comparación del 7% que ofrece la otra opción.

5.4.2 Comparación de escenarios para los módulos de albañilería

Iniciando con el potencial de calentamiento global, se puede apreciar en la Figura 21 una reducción de los impactos ambientales en todos los escenarios, siendo el caso óptimo el escenario

4 con una reducción del 20.2%, mientras que el menos recomendable es el escenario 3 al obtener una reducción del 5.8%. De la gráfica se puede afirmar que los escenarios que usan cemento puzolánico presentan una reducción significativa a comparación de los otros. Además, entre el ladrillo sílico calcáreo y el *drywall* no hay una variación importante.



Figura 21. Comparación de escenarios del potencial de calentamiento global para módulos de albañilería. Cemento puzolánico (Escenario 1); Ladrillo sílico calcáreo (Escenario 2); Placas de yeso (Escenario 3); Cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo (Escenario 4); Cemento puzolánico y placas de yeso (Escenario 5).

Con respecto a la toxicidad humana cancerígena, se puede apreciar en la Figura 22 una reducción de los impactos ambientales en el primer, segundo y cuarto escenario, siendo el caso óptimo el escenario 4 con una reducción del 8.9%, mientras que el menos recomendable es el escenario 3 al obtener un aumento del 44.2%. De la gráfica se puede afirmar que los escenarios que usan ladrillo blanco presentan una reducción significativa a comparación de los otros. Además, el uso del *drywall* aumenta los valores de esta categoría de impacto, ya que los accesorios de acero galvanizado generan un aumento del 51% con respecto al total del diseño original.

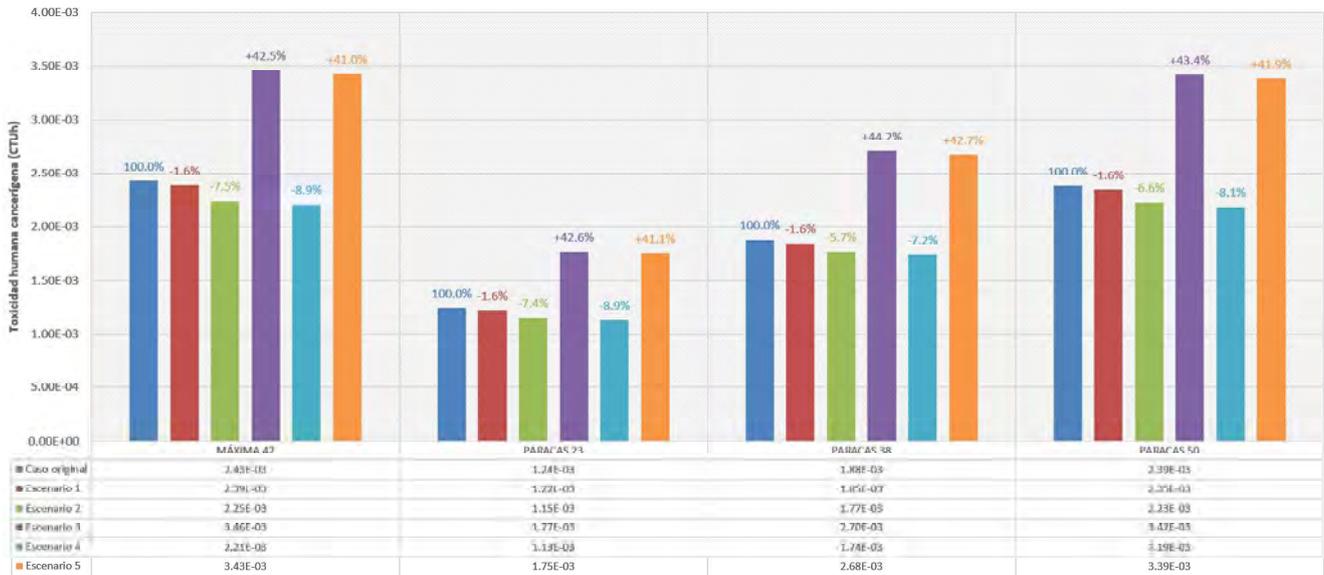


Figura 22. Comparación de escenarios de la toxicidad humana cancerígena para módulos de albañilería. Cemento puzolánico (Escenario 1); Ladrillo sílico calcáreo (Escenario 2); Placas de yeso (Escenario 3); Cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo (Escenario 4); Cemento puzolánico y placas de yeso (Escenario 5).



Figura 23. Comparación de escenarios de la toxicidad humana no cancerígena para módulos de albañilería. Cemento puzolánico (Escenario 1); Ladrillo sílico calcáreo (Escenario 2); Placas de yeso (Escenario 3); Cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo (Escenario 4); Cemento puzolánico y placas de yeso (Escenario 5).

Con respecto a la toxicidad humana no cancerígena, se puede apreciar en la Figura 23 una reducción de los impactos ambientales en el primer, segundo y cuarto escenario, siendo el caso óptimo el escenario 4 con una reducción del 11%, mientras que el menos recomendable es el escenario 3 al obtener un aumento del 29.2%. De la gráfica se puede afirmar que los escenarios que usan cemento puzolánico presentan una reducción significativa a comparación de los otros. Además, el uso del *drywall* aumenta los valores de esta categoría de impacto, ya que los accesorios de acero galvanizado generan un aumento del 36% con respecto al total del diseño original.

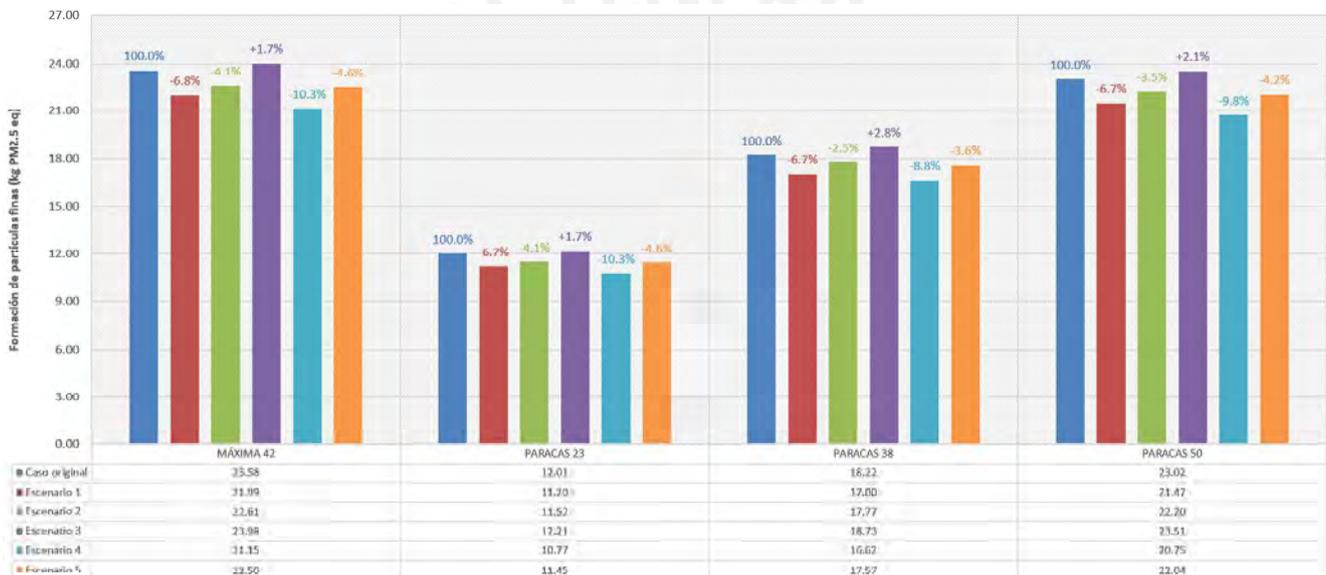


Figura 24. Comparación de escenarios del material particulado para módulos de albañilería. Cemento puzolánico (Escenario 1); Ladrillo sílico calcáreo (Escenario 2); Placas de yeso (Escenario 3); Cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo (Escenario 4); Cemento puzolánico y placas de yeso (Escenario 5).

Con respecto al material particulado, se puede apreciar en la Figura 24 una reducción de los impactos ambientales en todos los escenarios, excepto uno, siendo el caso óptimo el escenario 4 con una reducción del 10.3%, mientras que el menos recomendable es el escenario 3 al obtener un aumento del 2.8%. De la gráfica se puede afirmar que los escenarios que usan cemento puzolánico presentan una reducción significativa a comparación de los otros. Además, el uso del *drywall*

aumenta los valores de esta categoría de impacto, ya que las placas de yeso junto con los accesorios galvanizados generan un aumento del 13% con respecto al diseño original.

En el caso de la acidificación, se puede apreciar en la Figura 25 una reducción de los impactos ambientales en todos los escenarios, siendo el caso óptimo el escenario 4 con una reducción del 11.1%, mientras que el menos recomendable es el escenario 3 al obtener una reducción del 1.7%. De la gráfica se puede afirmar que los escenarios que usan cemento puzolánico presentan una reducción significativa a comparación de los otros. Además, entre el ladrillo sílico calcáreo y el *drywall*, el primero resulta ligeramente más efectivo en reducir este impacto ambiental

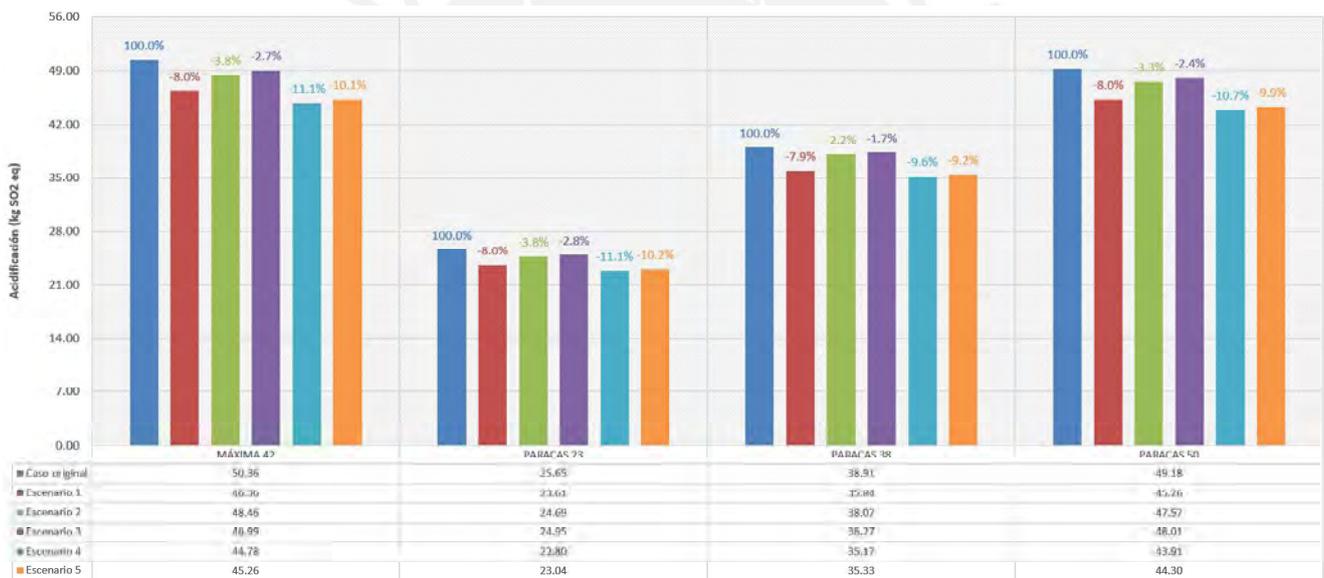


Figura 25. Comparación de escenarios de la acidificación para módulos de albañilería. Cemento puzolánico (Escenario 1); Ladrillo sílico calcáreo (Escenario 2); Placas de yeso (Escenario 3); Cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo (Escenario 4); Cemento puzolánico y placas de yeso (Escenario 5).

Para la eutrofización marina, se puede apreciar en la Figura 26 una reducción de los impactos ambientales en solo el primer y cuarto escenario, siendo el caso óptimo el escenario 1 con una reducción del 6.8%, mientras que el menos recomendable es el escenario 3 al obtener un aumento del 12.5%. De la gráfica se puede afirmar que los escenarios que usan cemento puzolánico

presentan una reducción significativa a comparación de los otros. En el caso del ladrillo sílico calcáreo, el uso adicional de tecnopor para las unidades de albañilería genera un aumento del 15%, mientras que en el caso del *drywall*, las placas de yeso juntos con sus accesorios generan un aumento del 19%.

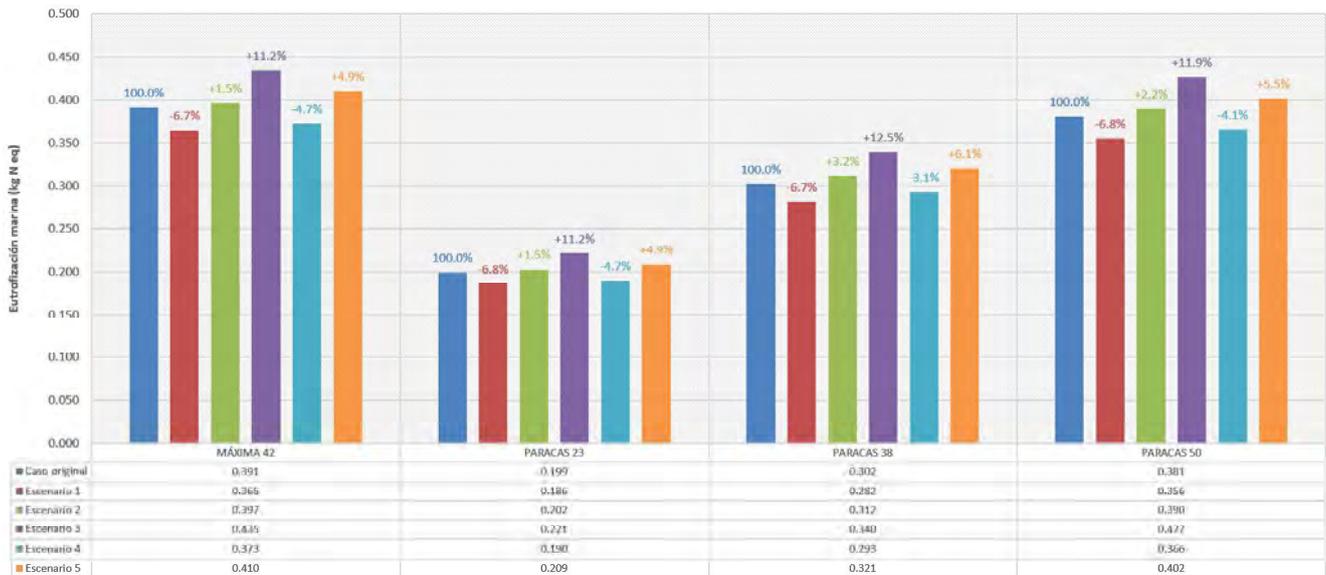


Figura 26. Comparación de escenarios de la eutrofización marina para módulos de albañilería. Cemento puzolánico (Escenario 1); Ladrillo sílico calcáreo (Escenario 2); Placas de yeso (Escenario 3); Cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo (Escenario 4); Cemento puzolánico y placas de yeso (Escenario 5).

Con respecto a la escasez de recursos fósiles, se puede apreciar en la Figura 27 una reducción de los impactos ambientales en todos los escenarios, siendo el caso óptimo el escenario 4 con una reducción del 19%, mientras que el menos recomendable es el escenario 3 al obtener una reducción del 7.7%. De la gráfica se puede afirmar que los escenarios que usan ladrillo sílico calcáreo presentan una reducción significativa a comparación de los otros. Además, tanto el cemento puzolánico como el *drywall* presentan comportamientos similares en esta categoría de impacto, siendo sus valores muy similares.

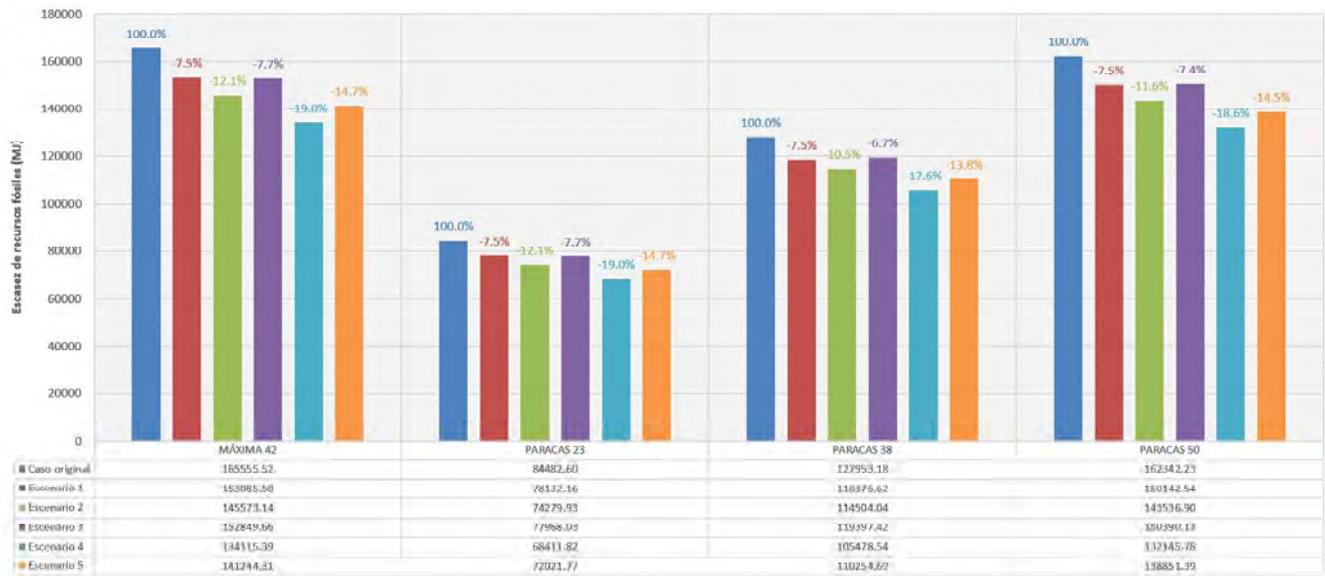


Figura 27. Comparación de escenarios de la escasez de recursos fósiles para módulos de albañilería. Cemento puzolánico (Escenario 1); Ladrillo sílico calcáreo (Escenario 2); Placas de yeso (Escenario 3); Cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo (Escenario 4); Cemento puzolánico y placas de yeso (Escenario 5).

5.5 Normalización y ponderación de los resultados

Como se mencionó previamente, dada la diversidad de los resultados como consecuencia de haber analizado diversas categorías de impacto, resulta complicado poder establecer el escenario que cumpla el objetivo de reducir todos los impactos ambientales, ya que, para un mismo escenario, una categoría de impacto se puede ver reducida de manera óptima mientras que en otra no se da de la misma manera, pudiendo incluso aumentar los impactos ambientales de esta categoría. Debido a esto, el primer paso para determinar el escenario más favorable será el de normalizar los valores resultantes con los factores de normalización según lo establecido en la Tabla 2 y Tabla 3. Una vez aplicado este proceso, se obtiene las puntuaciones normalizadas para los seis tipos de módulos estudiados en la presente investigación, cuyos valores se detallan de la Figura 28 a la 33.

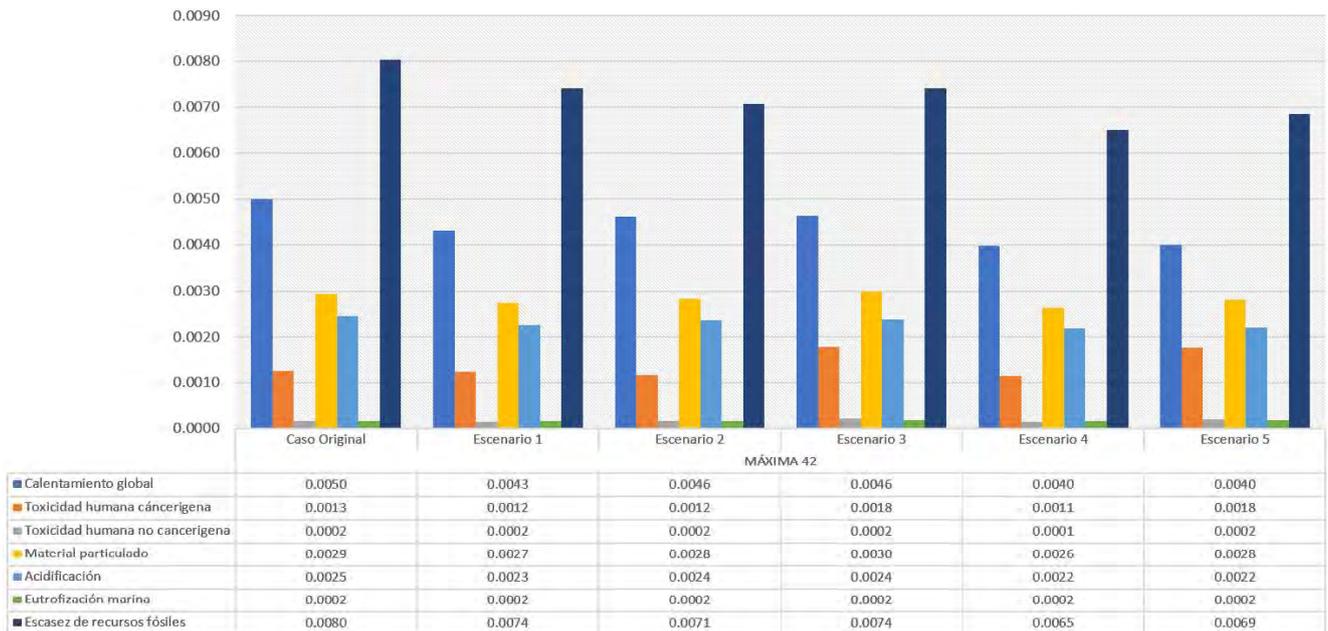


Figura 28. Comparación de puntajes de normalización de los distintos escenarios para el módulo Máxima 42. Cemento puzolánico (Escenario 1); Ladrillo sílico calcáreo (Escenario 2); Placas de yeso (Escenario 3); Cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo (Escenario 4); Cemento puzolánico y placas de yeso (Escenario 5).

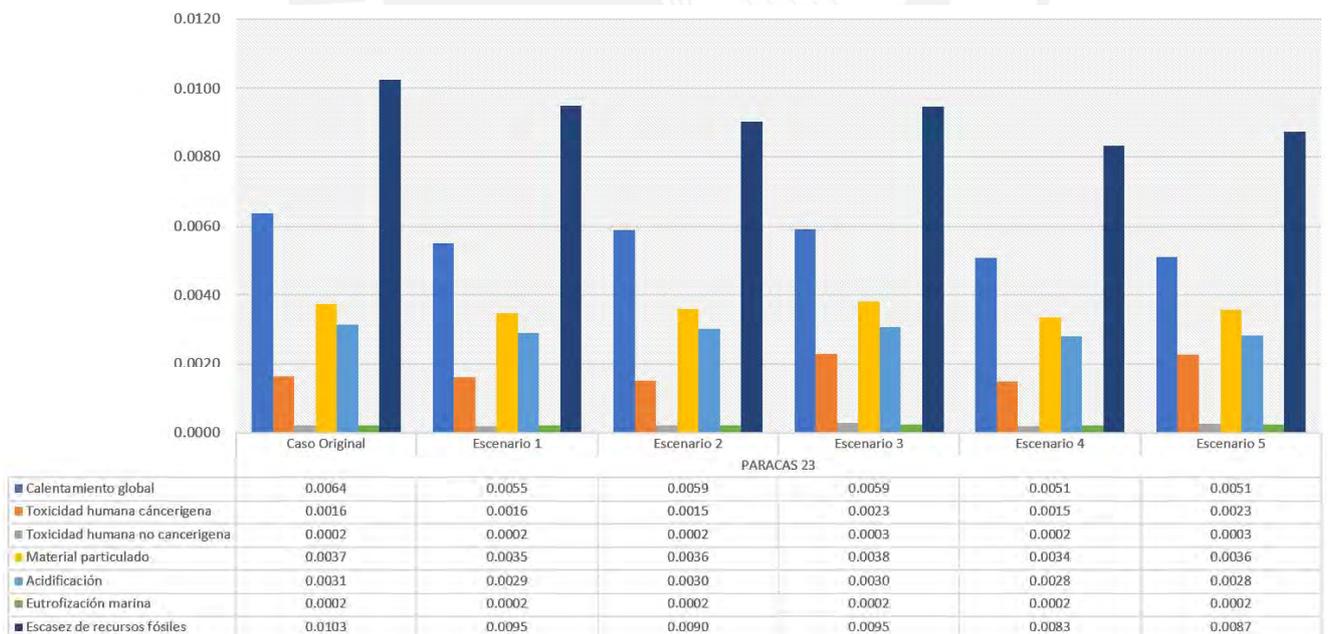


Figura 29. Comparación de puntajes de normalización de los distintos escenarios para el módulo Paracas 23. Cemento puzolánico (Escenario 1); Ladrillo sílico calcáreo (Escenario 2); Placas de yeso (Escenario 3); Cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo (Escenario 4); Cemento puzolánico y placas de yeso (Escenario 5).

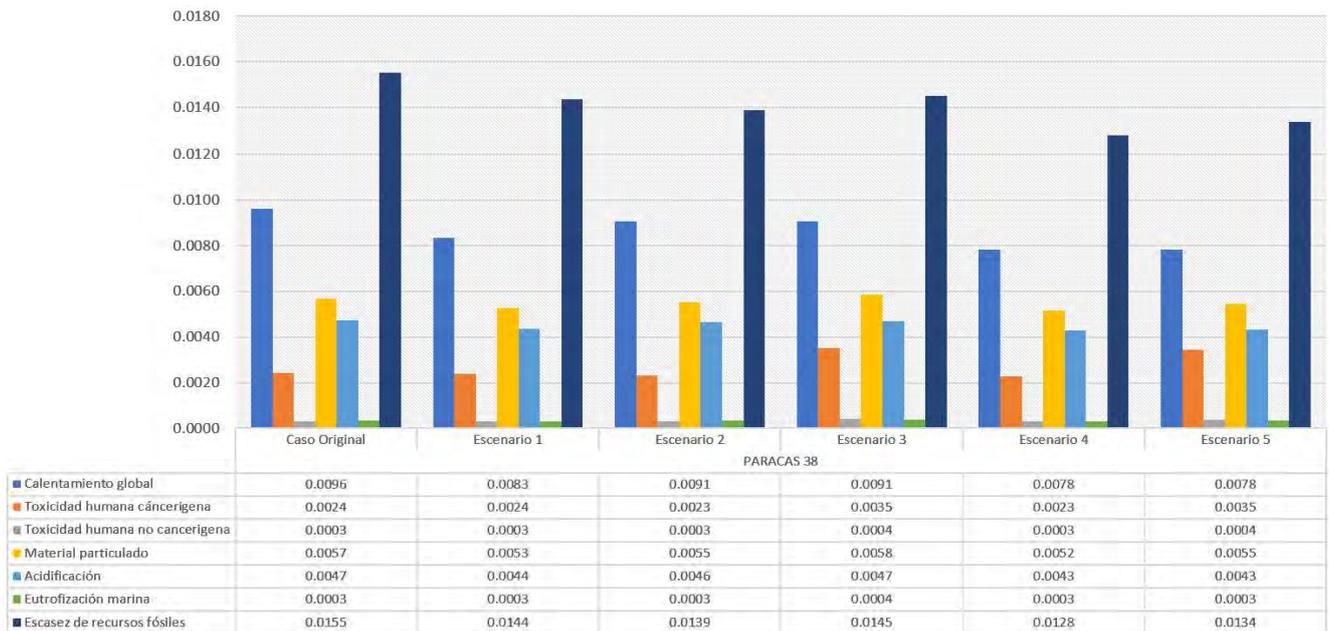


Figura 30. Comparación de puntajes de normalización de los distintos escenarios para el módulo Paracas 38. Cemento puzolánico (Escenario 1); Ladrillo sílico calcáreo (Escenario 2); Placas de yeso (Escenario 3); Cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo (Escenario 4); Cemento puzolánico y placas de yeso (Escenario 5).

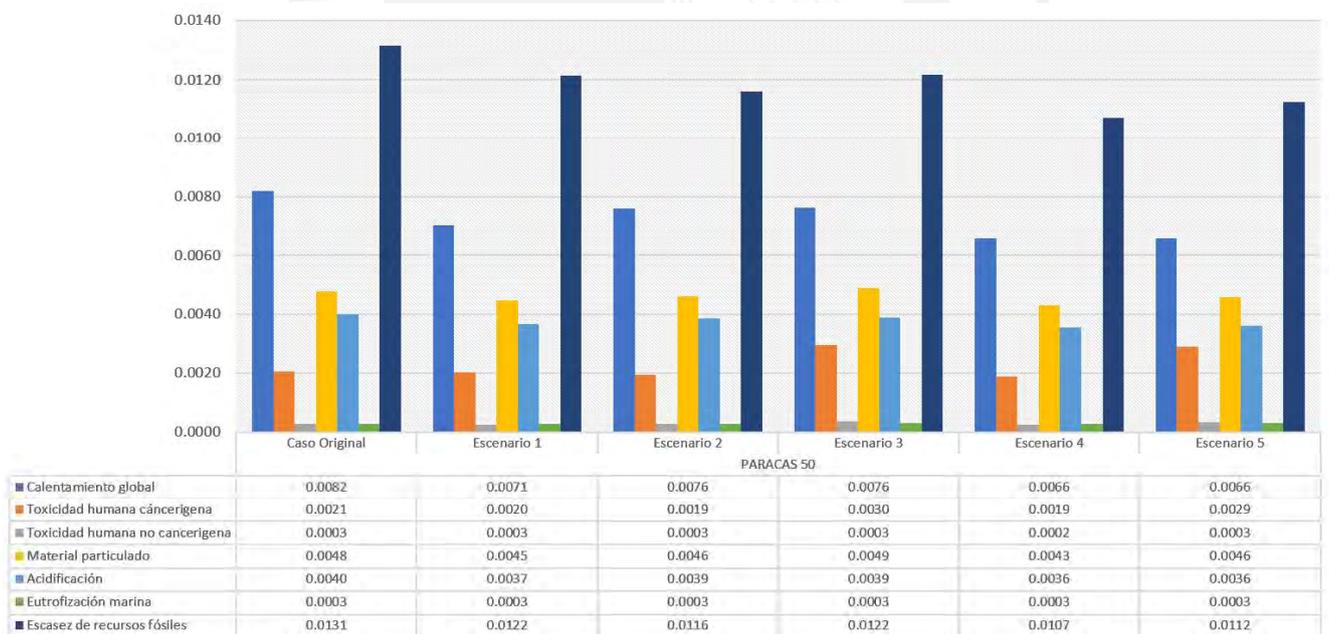


Figura 31. Comparación de puntajes de normalización de los distintos escenarios para el módulo Paracas 50. Cemento puzolánico (Escenario 1); Ladrillo sílico calcáreo (Escenario 2); Placas de yeso (Escenario 3); Cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo (Escenario 4); Cemento puzolánico y placas de yeso (Escenario 5).

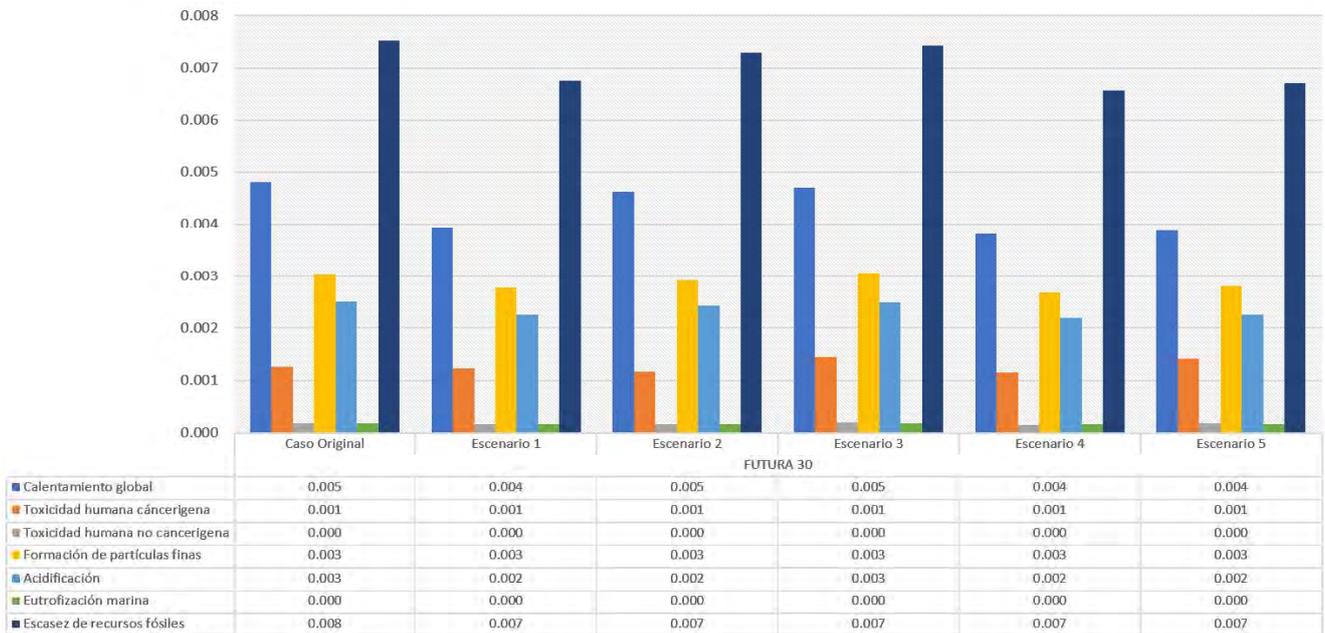


Figura 32. Comparación de puntajes de normalización de los distintos escenarios para el módulo Futura 30. Cemento puzolánico (Escenario 1); Ladrillo sílico calcáreo (Escenario 2); Placas de yeso (Escenario 3); Cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo (Escenario 4); Cemento puzolánico y placas de yeso (Escenario 5).

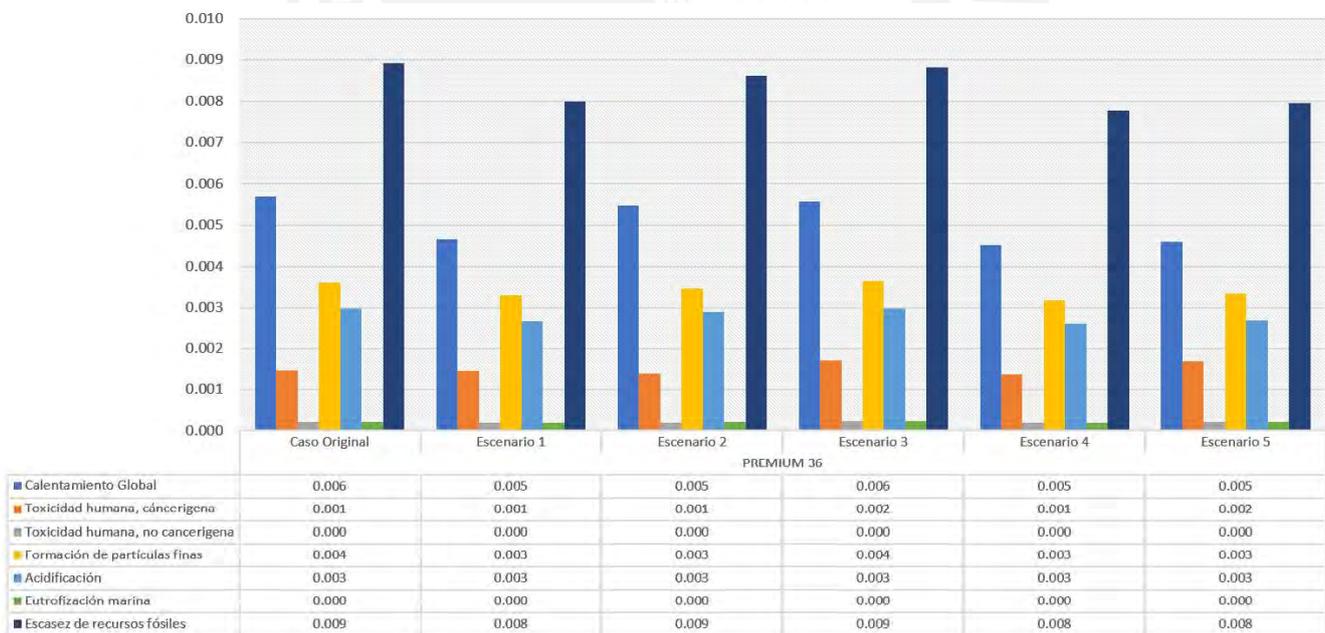


Figura 33. Comparación de puntajes de normalización de los distintos escenarios para el módulo Premium 36. Cemento puzolánico (Escenario 1); Ladrillo sílico calcáreo (Escenario 2); Placas de yeso (Escenario 3); Cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo (Escenario 4); Cemento puzolánico y placas de yeso (Escenario 5).

En base a estos valores, se observa que los impactos más resaltantes a tomar en cuenta para todos los casos son la escasez de recursos fósiles y el potencial de calentamiento global, después le siguen tanto la formación de partículas finas como la acidificación. Sin embargo, a pesar de que los valores ya se encuentran en una escala uniforme para una comparación más efectiva, los resultados expresados de esta forma aún son complicados de evaluar con la finalidad de determinar cuál escenario sería el más beneficioso ecológicamente, ya que un escenario puede ser eficiente para cierta categoría de impacto, pero para otra puede resultar no muy conveniente. Dada esta situación, el siguiente paso consiste en la ponderación de estos resultados, a fin de lograr comparar directamente los valores normalizados determinando pesos a cada categoría de impactos de acuerdo con su importancia. Asignados estos pesos, se realizará el promedio ponderado de los valores normalizados de las categorías de impacto para cada uno de los escenarios planteados, analizando como se desempeñan en cada uno de los módulos estudiados. Para el desarrollo de este procedimiento, se emplearán tres sets de factores de ponderación los cuales fueron previamente explicados: la ponderación estática de Shu Su, cuyos resultados se muestran en la Figura 34; la versión dinámica del mismo autor, presentado sus resultados en la Figura 35 y, por último, la ponderación de acuerdo con la Unión Europea, cuyos resultados se explican en la Figura 36.

Con todos los resultados obtenidos se observa que, para todos los conjuntos de factores de ponderación, el escenario 4 resulta ser el más favorable ecológicamente, el cual establece el uso de cemento puzolánico en las mezclas de concreto y mortero, utilizando a su vez la implementación del ladrillo sílico calcáreo en el sistema estructural.

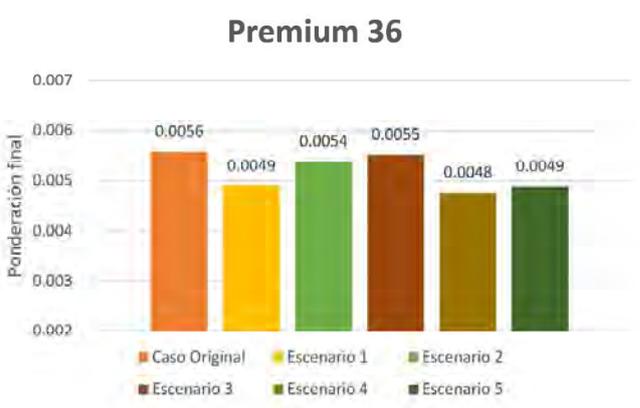
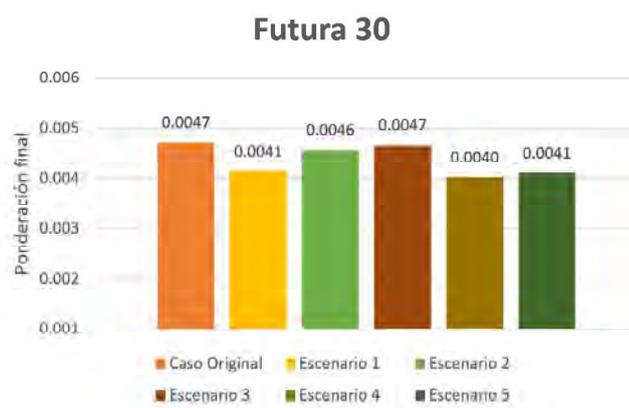
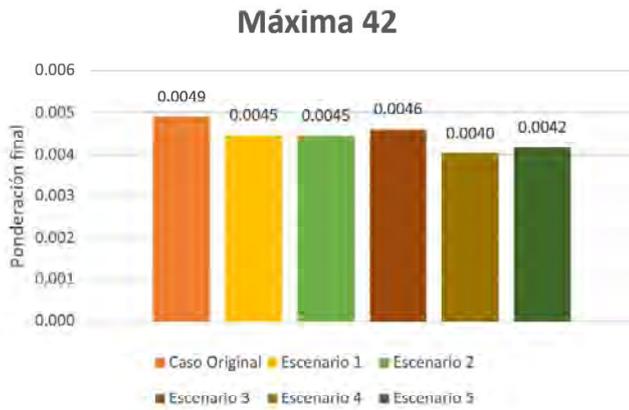


Figura 34. Ponderación estática según Shu Su para los distintos módulos de viviendas. Cemento puzolánico (Escenario 1); Ladrillo silico calcáreo (Escenario 2); Placas de yeso (Escenario 3); Cemento puzolánico y ladrillo silico calcáreo (Escenario 4); Cemento puzolánico y placas de yeso (Escenario 5).

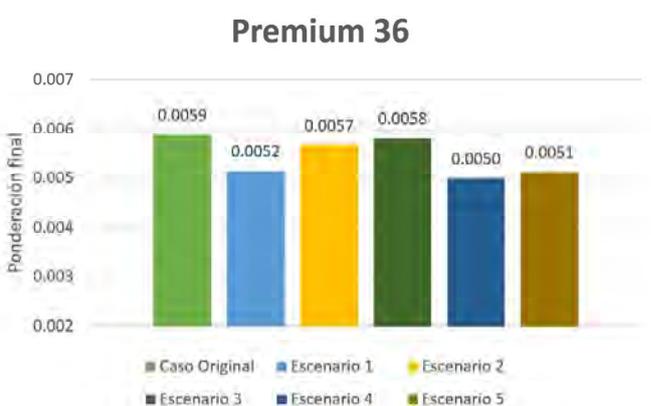
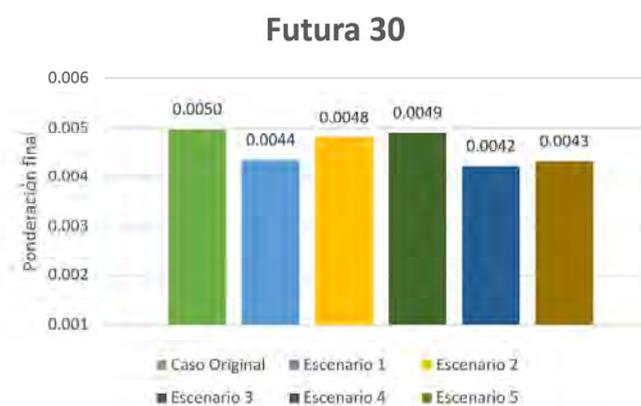
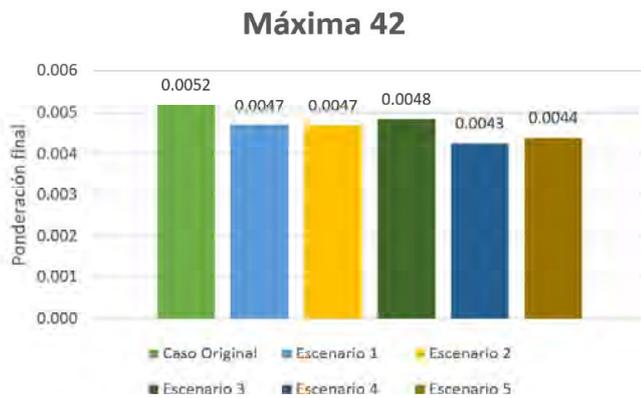


Figura 35. Ponderación estática según Shu Su para los distintos módulos de viviendas. Cemento puzolánico (Escenario 1); Ladrillo sílico calcáreo (Escenario 2); Placas de yeso (Escenario 3); Cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo (Escenario 4); Cemento puzolánico y placas de yeso (Escenario 5).

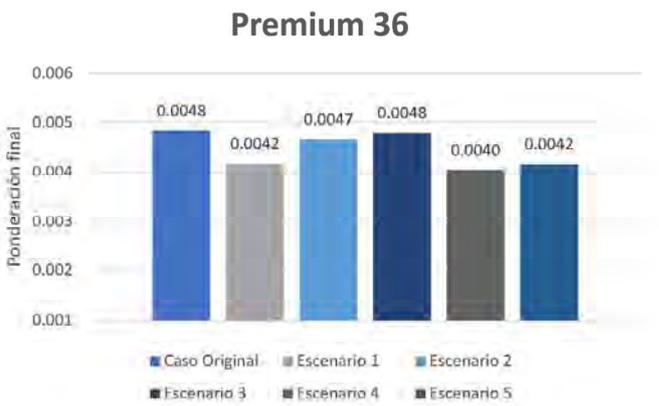
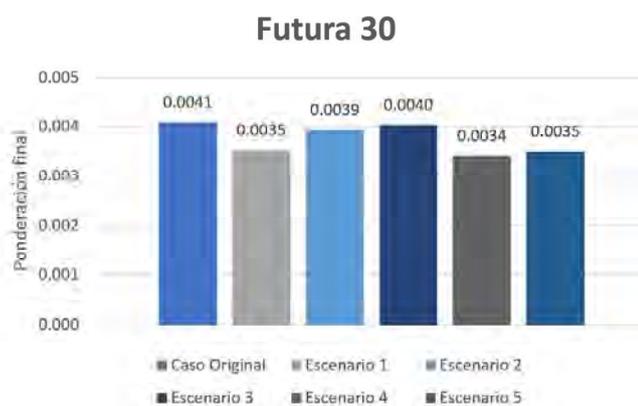
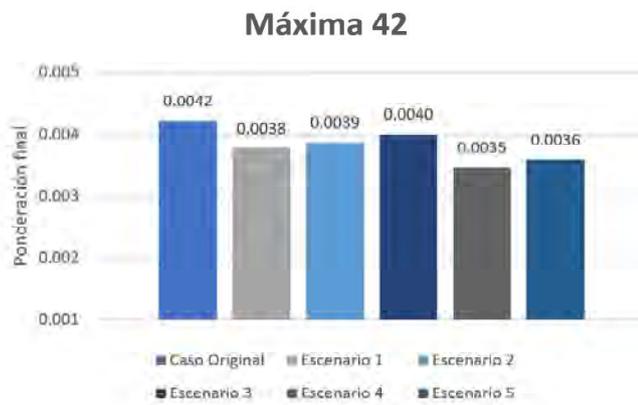


Figura 36. Ponderación según la Unión Europea para los distintos módulos de viviendas. Cemento puzolánico (Escenario 1); Ladrillo sílico calcáreo (Escenario 2); Placas de yeso (Escenario 3); Cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo (Escenario 4); Cemento puzolánico y placas de yeso (Escenario 5).

5.6 Discusión de resultados

5.6.1 Comparación de impactos ambientales con otros estudios

Iniciando con la evaluación de resultados, resulta necesario comparar los valores obtenidos con otros estudios que estudien viviendas de similares características a fin de examinar su validez y evaluar posibles errores dentro del desarrollo de la metodología planteada y los cálculos establecidos. Una de las fuentes que se ha escogido para este análisis corresponde a Evangelista et al. (2018) quienes cuantificaron el impacto ambiental de residenciales típicas de Brasil. En este estudio se analizó desde la cuna a la tumba, sin embargo, también obtuvo proporciones por cada fase del ciclo de vida: fase preoperacional, fase operacional y fase post operacional, por el cual se podrá realizar la comparación separando los resultados que corresponden a las etapas semejantes a las del presente estudio. La segunda fuente por tomar en cuenta consiste en un estudio realizado por Corzo (2016), donde se aplica el ACV para evaluar los impactos ambientales de una vivienda unifamiliar con un área de 130 m² en Huancayo. Finalmente, se ha tomado de manera representativa un módulo de albañilería y otro de placas del presente estudio, teniendo en cuenta que los resultados entre los módulos del mismo sistema estructural son muy similares. Los valores para las distintas categorías de impacto por metro cuadrado de esta comparación se detallan en la Tabla 27.

Tabla 27

Comparación de los impactos ambientales por metro cuadrado con otros estudios similares

	PONTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (kg CO ₂ eq/m ²)	TOXICIDAD HUMANA CANCERIGENA (CTUh/m ²)	TOXICIDAD HUMANA NO CANCERIGENA (CTUh/m ²)	MATERIAL PARTICULADO (kg PM2.5 eq/m ²)	ACIDIFICACIÓN (kg SO ₂ eq/m ²)	EUTROFIZACIÓN MARINA (kg N eq/m ²)	ESCASEZ DE RECURSOS FÓSILES (MJ/m ²)
Presente investigación	Módulo Futura 30 Área Total: 130 m ² Sistema constructivo: placas	185.83	2.23E-05	3.83E-05	0.22	3.84E-03	1427.46
	Módulo Paracas 38 Área Total: 69 m ² Sistema constructivo: albañilería	233.11	2.70E-05	4.37E-05	0.26	4.35E-03	1841.32
Evangelista et al. (2018)	Vivienda CS1 Área Total: 10,79 m ² Sistema constructivo: placas	172.9	1.15E-05	4.55E-05	—	1.24E-01	1392
	Vivienda CS3 Área Total: 561 m ² Sistema constructivo: albañilería	297	3.20E-05	7.74E-05	—	2.27E-01	2263.2
	Vivienda CS4 Área Total: 56 m ² Sistema constructivo: placas	227.7	2.00E-05	7.65E-05	—	1.00	1914
	Vivienda unifamiliar Área Total: 130 m ² Sistema constructivo: albañilería	154.11	—	—	0.18	1.60	1902

Nota: Esta tabla resume los resultados obtenidos en las distintas investigaciones para la comparación de las categorías de impacto por m².

Como se puede observar, con respecto al potencial de calentamiento global, toxicidad humana cancerígena y no cancerígena, material particulado, y escasez de recursos fósiles los valores no varían mucho entre sí. Para el caso de acidificación se empleó un cambio de unidades planteados por Dong et al. (2021) debido a que para el estudio de viviendas en Brasil se empleó una metodología recomendada por la Unión Europea: International Reference Life Cycle Data System (ILCD 2011) v1.03 (midpoint) tal como se muestra en la Figura 37.

Acidification								
CML	1	15.67	1.162	0.944	1.162	0.944	0.815	0.941
EDIP	0.064	1	0.074	0.06	0.074	0.06	0.052	0.06
EF	0.86	13.484	1	0.812	1	0.812	0.701	0.81
EPD	1.058	16.602	1.231	1	1.231	1	0.862	0.997
ILCD	0.86	13.484	1	0.812	1	0.812	0.701	0.81
IMPACT	1.058	16.601	1.231	1	1.231	1	0.862	0.997
ReCiPe	1.228	19.238	1.427	1.159	1.427	1.159	1	1.158
TRACI	1.062	16.65	1.234	1.003	1.234	1.003	0.865	1
	CML	EDIP	EF	EPD	ILCD	IMPACT	ReCiPe	TRACI

Figura 37. Cuadro de conversiones para el caso de acidificación.

Fuente: *Developing Conversion Factors of LCIA Methods for Comparison of LCA Results in the Construction Sector, Dong et al., 2021.*

Se observa que en las categorías de acidificación y eutrofización marina se tiene una diferencia respecto a los otros estudios, esto se debería a que no se está considerando acabados interiores y exteriores. De acuerdo con estudios previos mencionados anteriormente (Evangelista et al. 2018), se tiene que materiales como pisos cerámicos, muros enchapados o cubiertas de arcilla aportan desfavorablemente a estas categorías.

5.7 Limitaciones del estudio

Si bien se han obtenido resultados apropiados y se ha concluido en una propuesta más eficiente a comparación de las otras planteadas, es importante reconocer las limitaciones presentadas tanto en el desarrollo del ACV como en la normalización y ponderación de las

categorías de impacto. La principal desventaja de estos últimos procedimientos reside en la subjetividad del grupo de investigación al asignar los factores de ponderación a cada impacto. Teniendo en cuenta este asunto, la norma ISO exige el uso de varios conjuntos de factores para la ponderación a fin de mitigar esta situación y que los resultados sean más objetivos.

Por otro lado, debe tomarse en cuenta que el alcance de este estudio se da desde la extracción de recursos hasta el transporte de materiales al proyecto (de la cuna a la puerta), ya que no se cuenta con una data que detalle el uso de servicios como energía eléctrica, agua y desagüe. Además, existe una variedad en los valores que conciernen a estos puntos para viviendas de un mismo tipo de módulo, siendo difícil generalizarlo para el modelamiento. Complementando lo anterior, muchos de los materiales utilizados en la etapa de acabados tampoco fueron considerados por falta de información sobre los detalles de acabados de cada tipo de vivienda y realizar su asunción presentaría mucha variabilidad del proyecto real.

Sin embargo, se considera relevante el poder tener en cuenta la información de estos materiales y servicios dentro del análisis, por lo que se podría considerar estimaciones de estos puntos consultando a una muestra de personas que habitan actualmente en el proyecto. Además, otro punto que puede complementar el presente estudio es una evaluación de costos a los escenarios propuestos, ya que una mejora en la calidad ambiental normalmente amerita un costo adicional. Por último, resulta atrayente el poder establecer otras alternativas usando materiales no convencionales que mitiguen los impactos ambientales, a fin de compararlos con los presentados en este estudio y evaluar si existe una mejor opción.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

En el Perú, el enfoque hacia una construcción sostenible se ha ido intensificando. Durante los 10 últimos años se viene promoviendo diversas estrategias a fin de reducir el impacto que tienen sobre el uso de recursos tales como el agua, energía y materia prima. Sin embargo, en algunos casos no se cuenta con suficiente información que desarrolle las consecuencias ambientales en todas las etapas de ciclo de vida de las edificaciones. En contexto con lo anterior, este estudio se enfoca principalmente en la etapa de pre-uso, debido a que estudios realizados en el país concluyen que, durante la fabricación de materiales, distribución y procesos constructivos, se muestra un gran índice de contaminantes similares a la etapa de uso, por lo que se considera un punto partida importante de analizar.

Considerando los resultados empíricos obtenidos y el análisis efectuado en el marco del diseño original y las diversas configuraciones escénicas contempladas, se puede confirmar la eficacia de la implementación de la Metodología del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) como enfoque apropiado para la evaluación del impacto ambiental. Este método facilita la estimación de las emisiones de sustancias vinculadas a los procesos del inventario ambiental. Además, la aplicación de técnicas de normalización y ponderación demostró ser un procedimiento eficaz y de relativa simplicidad para la estandarización de los resultados, permitiendo así la comparación y evaluación de los impactos en distintas categorías de impacto analizadas.

Con respecto al diseño original de las viviendas, se puede concluir que los módulos construidos con albañilería convencional exhiben un impacto ambiental superior en comparación con los módulos que están estructuralmente compuestos por placas. Esta disparidad se atribuye principalmente al significativo aumento en la cantidad de ladrillos de arcilla empleados, ya que

para los módulos de placas se utilizaban alrededor de 3000 kg de este tipo de ladrillo, mientras que en los otros módulos de albañilería se registra un aumento de 25 000 kg de este material. Además, dicho aspecto se ve agravado considerando el transporte de materiales el cual se efectúa desde la ciudad de Lima a Pisco.

Con respecto a los escenarios considerados, las propuestas en el empleo de otros materiales de construcción, tales como el cemento puzolánico, el ladrillo sílico calcáreo y las placas de yeso, fueron estudiadas previamente en otros trabajos de investigación, en las cuales se confirmaron su menor impacto en comparación con los materiales tradicionales. De acuerdo a los hallazgos presentados en esta tesis, lo anterior resulta corroborado ya que, de acuerdo con la Figura 22, se obtuvo una reducción que varía entre el 4% a 21% en sistemas constructivos de placas y, en base a la Figura 28, esta reducción oscila entre el 6% al 20% en los sistemas de albañilería, ambos casos correspondiendo el potencial de calentamiento global, por poner un ejemplo. No obstante, no siempre se obtendrá un comportamiento similar en todas las categorías de impacto analizadas, debido a las notables disparidades en las emisiones de sustancias y compuestos químicos, así como en los procesos de extracción asociados con cada material. Además, es importante mencionar que el cambio de los materiales en cada escenario está intrínsecamente vinculado con el desempeño que presenta en conjunto toda la vivienda, tanto en la reformulación del inventario como los procesos que se han contemplado en su conjunto.

En la etapa final del proceso de ecodiseño, se llevaron a cabo diversas combinaciones de materiales con el objetivo de identificar el escenario que lograra la máxima reducción porcentual en el impacto ambiental. En este contexto, la normalización desempeñó un papel crucial al permitir la estandarización de las distintas categorías de impacto, que originalmente se presentaban en unidades diferentes, facilitando así su comparación mutua. Por su parte, la ponderación se utilizó

para asignar pesos específicos a cada uno de los impactos evaluados, lo que permitió calcular un promedio ponderado de los valores normalizados. Los resultados de este proceso revelan que los nuevos escenarios diseñados son, efectivamente, más ecoamigables en comparación con el modelo original. Como resultado final, se determina que la propuesta de ecodiseño más eficaz es el escenario 4, que implica la utilización de cemento puzolánico y ladrillo sílico calcáreo. Este escenario logra una reducción que oscila entre el 15% y el 18% en los valores de impacto, lo cual respalda la hipótesis planteada al inicio de esta investigación.

Finalmente, se ha podido validar la importancia de llevar a cabo un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en las viviendas de emergencia, ya que presentan índices de categoría de impacto por metro cuadrado comparables a proyectos de construcción de mayor envergadura. En este sentido, tomando en cuenta la construcción a gran escala de estos módulos luego de un desastre natural, existe un riesgo potencial de causar impactos ambientales significativos en el ecosistema, los cuales no son deseables en el contexto actual. Debido a esto, esta investigación propone un punto de partida para avanzar en el análisis de este tipo de viviendas, con el fin de fomentar la búsqueda de propuestas aún más ecoamigables. Además, el objetivo es no solo identificar soluciones de construcción más respetuosas con el medio ambiente, sino también colaborar en la creación de políticas públicas que respalden la implementación de prácticas sostenibles en el desarrollo de estas viviendas de emergencia agregando factores como la regulación económica, la salud pública y calidad de vida, entre otros. De esta manera, se contribuye al bienestar de las comunidades afectadas por desastres naturales, sin comprometer el equilibrio ecológico y con una visión a largo plazo de un futuro más sostenible.

CAPÍTULO 7. REFERENCIAS

ACIU, C., & MANEA, D. L. (2014). Environmental Impact of the Choice of Building Materials in the Context of Sustainable Development. *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Agriculture*, 71(2)

Antón Vallejo, M. (2004). Utilización del Análisis del ciclo de vida en la evaluación del impacto ambiental del cultivo bajo invernadero mediterráneo, 45–70.

Ardente, F., Beccali, M., Cellura, M., & Mistretta, M. (2008). Building energy performance: A LCA case study of kenaf-fibres insulation board. *Energy and Buildings*, 40(1), 1–10.

Arena, A., & De Rosa, C. (2003). Life cycle assessment of energy and environmental implications of the implementation of conservation technologies in school buildings in Mendoza—Argentina. *Building and Environment*, 38(2), 359–368.

Aye, L., Ngo, T., Crawford, R., Gammampila, R., & Mendis, P. (2012). Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules. *Energy and Buildings*, 47, 159–168.

Anthesis Lavola (2018). Simapro. La herramienta indispensable para el Análisis de Ciclo de Vida. Recuperado de: <https://www.lavola.com/es/simapro/>

Bastos, J., Batterman, S. A., & Freire, F. (2014). Life-cycle energy and greenhouse gas analysis of three building types in a residential area in Lisbon. *Energy and Buildings*, 69, 344–353.

Cano Lagos, H. et al (2015). Mejora de la productividad utilizando el sistema de tabiquería con ladrillo sílico calcáreo aplicado al edificio multifamiliar José Gonzales. Maestría. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.

Cáceres Cebrecos, A. (2016). Análisis de ciclo de vida comparativo de edificaciones multifamiliares en Lima. Licenciatura. Pontificia Universidad Católica del Perú.

Cagiao Villar, J. (2010). Huella ecológica del cemento. Cálculo de la huella ecológica de una industria cementera y propuesta de medidas de ingeniería sostenible destinadas a su reducción, 31-32.

Casaverde Río (1995). El terremoto de Ancash y el alud aluvión del nevado Huascarán. Recuperado de: <http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc1992/doc1992-contenido.pdf>

Cerdan, C., Gazulla, C., Raugei, M., Martinez, E. y Fullana-i-Palmer, P. (2009). Proposal for new quantitative eco-design indicators: a first case study. *Journal of Cleaner Production*, 17(18), 1638–1643.

Chau, C.K., Leung, T.M., & Ng, W.Y. (2015). A review on life cycle assessment, life cycle energy assessment and life cycle carbon emissions assessment on buildings, *Applied Energy*, 143, 395–413.

Corzo Remigio, S. (2016). Análisis de ciclo de vida de una vivienda unifamiliar en Huancayo. Licenciatura. Pontificia Universidad Católica del Perú.

Colangelo, F., Navarro, T. G., Farina, I. y Petrillo, A. (2020). Comparative LCA of concrete with recycled aggregates: a circular economy mindset in Europe. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(9), 1790–1804.

Cuevas, A. (2012). Estado del arte sobre el análisis de ciclo de vida en la construcción de vivienda potencial de aplicación en Colombia. Universidad Piloto de Colombia, 1–93.

Ding, G. K. (2008). Sustainable construction—The role of environmental assessment tools. *Journal of Environmental Management*, 86(3), 451–464.

EELA (2013). Estudio de análisis de ciclo de vida de ladrillos y bloques de concreto. San Jerónimo – Cusco.

Environmental Protection Agency (2006). Lyfe cycle assesment: principles and practice. Recuperado de: https://www.epa.gov/nrmrl/std/lca/pdfs/chapter1_frontmatter_lca101.pdf

El Peruano (2015). Anexo del Decreto Supremo que aprueba el Procedimiento para la entrega de Módulos Temporales de Vivienda en casos de declaratoria de estado de emergencia o en situación de emergencia. Recuperado de: <https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/anexo-del-decreto-supremo-que-aprueba-el-procedimiento-para-anexo-ds-n-012-2015-vivienda-1274347-1/>

Exitosa Noticias (2021). Terremoto en Pisco 2007: alcalde provincial pide a presidente Pedro Castillo terminar reconstrucción. Recuperado de: <https://exitosanoticias.pe/v1/terremoto-en-pisco-2007-alcalde-provincial-pide-a-presidente-pedro-castillo-terminar-reconstruccion/>

Evangelista, P. P. A., Kiperstok, A., Torres, E. A. y Gonçalves, J. P. (2018). Environmental performance analysis of residential buildings in Brazil using life cycle assessment (LCA). *Construction and Building Materials*, 169, 748–761.

Finnveden, G., Hauschild, M. Z., Ekvall, T., Guinée, J., Heijungs, R., Hellweg, S (2009). Recent developments in Life Cycle Assessment. *Journal of Environmental Management*, 91(1), 1–21.

Galindo, Jeison & Silva, Harold (2016). Impactos ambientales producidos por el uso de maquinaria en el sector de la construcción. Universidad Católica de Colombia. Recuperado de: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/12566/4/IMPACTOS%20AMBIENTALES%20PR>

[ODUCIDOS%20POR%20EL%20USO%20DE%20MAQUINARIA%20EN%20EL%20SECTOR%20DE%20LA%20CONSTRUCCI%C3%93N.pdf](#)

García Torres, S. (2015). Evaluación ambiental durante el ciclo de vida de una vivienda unifamiliar. Licenciatura. Pontificia Universidad Católica del Perú.

González Madariaga, F., Gómez Gómez, J. y Rosa Sierra, L. (2018) Placas constructivas de menor impacto ambiental. Avances de investigación. RChD: creación y pensamiento, 3(5), 1-12.

Guerra Jesús, B. (2021). Análisis del ciclo de vida de una vivienda unifamiliar de bambú. Bachiller. Pontificia Universidad Católica del Perú.

Hernández H., Cobo A., Martínez I. (2019). Análisis de ciclo de vida en viviendas: un caso que contrasta muro de albañilería con muro de madera en una vivienda social, 11-12.

Huberman, N., & Pearlmutter, D. (2008). A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert. *Energy and Buildings*, 40(5), 837–848.

INDECI (2011). Impacto socioeconómico y ambiental del sismo del 15 de agosto de 2007. Recuperado de: <http://bvpad.indeci.gob.pe/doc/pdf/esp/doc1742/doc1742-contenido.pdf>

ISO 14006:2011 (2011). Environmental management systems - Guidelines for incorporating ecodesign. International Standard Organization.

ISO 14040:2006 (2006). Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. International Standard Organization.

INDECI (2007). Compendio Estadístico de prevención y atención de desastres 2007. Recuperado de: [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/71A58D4A0EB5113B05257E7E0061BA B8/\\$FILE/1_pdfsam_5_desatres.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/71A58D4A0EB5113B05257E7E0061BA B8/$FILE/1_pdfsam_5_desatres.pdf)

Jarre C., Howland J., Guerrero M., Brito S. (2017). Impacto de la utilización de puzolanas naturales ecuatorianas, 3-4. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/230930752.pdf>

Kylili, A., Ilic, M. y Fokaides, P. A. (2017). Whole-building Life Cycle Assessment (LCA) of a passive house of the sub-tropical climatic zone. *Resources, Conservation and Recycling*, 116, 169–177.

Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K.-H., Haberl, H. y Fischer-Kowalski, M. (2009). Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics*, 68(10), 2696–2705.

Kua, H. W., & Wong, C. L. (2012). Analysing the life cycle greenhouse gas emission and energy consumption of a multi-storied commercial building in Singapore from an extended system boundary perspective. *Energy and Buildings*, 51, 6–14.

- Lawrence, M. (2015). Reducing the Environmental Impact of Construction by Using Renewable Materials. *Journal of Renewable Materials*, 3(3), 163–174.
- Lévano U., Flores C., Fuentes C., Cabrel C. (2013). Impacto socio ambiental en la ciudad de Pisco después del terremoto. Recuperado de: <http://revistas.unfv.edu.pe/index.php/RCV/article/view/17/17>
- Lu, H. R., El Hanandeh, A., & Gilbert, B. P. (2017). A comparative life cycle study of alternative materials for Australian multi-storey apartment building frame constructions: Environmental and economic perspective. *Journal of Cleaner Production*, 166, 458–473.
- Marques, B., Tadeu, A., de Brito, J., & Almeida, J. (2017). A Perspective on the Development of Sustainable Construction Products: An Eco-Design Approach. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 12(02), 304–314.
- Nehdi, M. L. y Yassine, A. (2020). Mitigating Portland Cement CO2 Emissions Using Alkali-Activated Materials: System Dynamics Model. *Materials*, 13(20), 4685. <https://doi.org/10.3390/ma13204685>
- Monahan, J., & Powell, J. (2011). An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework. *Energy and Buildings*, 43(1), 179–188.
- Muñoz, C., Zaror, C., Saelzer, G., & Cuchí, A. (2012). Estudio del flujo energético en el ciclo de vida de una vivienda y su implicancia en las emisiones de gases de efecto invernadero, durante la fase de construcción Caso Estudio: Vivienda Tipología Social. Región del Biobío, Chile. *Revista de la construcción*, 11(3), 125–145.
- Muñoz, I., Cifrian, E., Andrés, A., Miguel, G. S., Ruiz, D. y Viguri, J. R. (2018). Analysis of environmental benefits associated with the incorporation of Waelz slag into fired bricks using LCA. *Construction and Building Materials*, 168, 178–186.
- Ortiz-Rodríguez, O., Castells, F., & Sonnemann, G. (2010). Life cycle assessment of two dwellings: One in Spain, a developed country, and one in Colombia, a country under development. *Science of The Total Environment*, 408(12), 2435–2443.
- PERU21 (2019). Han pasado 12 años y aún falta mucho por hacer tras terremoto en Pisco. Recuperado de: <https://peru21.pe/peru/han-pasado-12-anos-falta-terremoto-pisco-480616-noticia/>
- Perú Construye (2021). Sistema drywall: construcciones rápidas, seguras y eficientes. Recuperado de: <https://peruconstruye.net/2019/12/04/sistema-drywall-construcciones-rapidas-seguras-y-eficientes/>
- Porhinčák, M., Eštoková, A., & Vilčeková, S. (2011). *Comparison of environmental impact of building materials of three residential buildings. Pollack Periodica*, 6(3), 53–62.

PREDES (2013). Sistematización de la experiencia del componente Viviendas Temporales del PROYECTO FOCAPREE. Recuperado de:

<https://www.care.org.pe/wp-content/uploads/2015/06/Sistematizacion-de-la-experiencia-del-componente-Viviendas-Temporales-del-PROYECTO-FOCAPREE1.pdf>

Quijorna, Natalia (2013). Incorporación de escoria Waelz al sector cerámico: ejemplo práctico de ecología industrial. Universidad de Cantabria. Departamento de Ingeniería Química y Química Inorgánica. 380 p.

Robayo-Salazar, R., Mejía-Arcila, J., Mejía de Gutiérrez, R. y Martínez, E. (2018). Life cycle assessment (LCA) of an alkali-activated binary concrete based on natural volcanic pozzolan: A comparative analysis to OPC concrete. *Construction and Building Materials*, 176, 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.017>

Roche, P. (2010). Calculating greenhouse gas emissions for buildings: analysis of the performance of several carbon coating tools in different climates. *Informes de la construcción*, 62(517), 61–80.

Rosselló-Batle, B., Moià, A., Cladera, A., & Martínez, V. (2010). Energy use, CO₂ emissions and waste throughout the life cycle of a sample of hotels in the Balearic Islands. *Energy and Buildings*, 42(4), 547–558.

San-José Lombera, J., & Garrucho Aprea, I. (2010). A system approach to the environmental analysis of industrial buildings. *Building and Environment*, 45(3), 673–683.

Smirnova, E. y Larionova, Y. (2020). Problem of environmental safety during construction (analysis of construction impact on environment). *E3S Web of Conferences*, 164, 07006.

Szabó, L., Hidalgo, I., Ciscar, J. C. y Soria, A. (2006). CO₂ emission trading within the European Union and Annex B countries: the cement industry case. *Energy Policy*, 34(1), 72–87. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2004.06.003>

Sole, J. (2013). Datos disponibles para el ACV de productos y edificios. Recuperado de: <https://www.construction21.org/espana/community/pg/pages/view/534/>

Soust-Verdaguer, B., Llatas, C., García-Martínez, A. y Gómez de Cózar, J. C. (2018). BIM-Based LCA Method to Analyze Envelope Alternatives of Single-Family Houses: Case Study in Uruguay. *Journal of Architectural Engineering*, 24(3), 05018002.

Wadel, G. (2010). Sustainability in industrialised architecture: closing the materials cycle. *Informes de la Construcción*, 62, 37–51. Recuperado de:

<http://informesdeconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdeconstruccion/article/view/806/892>

Yu, D., Tan, H., & Ruan, Y. (2011). A future bamboo-structure residential building prototype in China: Life cycle assessment of energy use and carbon emission. *Energy and Buildings*, 43(10), 2638–2646.

Zalusky H., Kwok, A., Rivera I., Rasmussen, L., McKay H. (2021). Whole Building Life Cycle Assessment of a mass timber building structure. Recuperado de:

http://tallwoodinstitute.org/sites/twi/files/MTC2019_Whole%20Building%20Life%20Cycle%20Assessment%20of%20%20Mass%20Timber%20Building%20Structure_Zalusky%20et%20al.pdf

