

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA COMPARATIVO DE UNA  
EDIFICACIÓN EDUCATIVA CONVENCIONAL Y UNA  
CERTIFICADA CON LEED**

**Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil**

**AUTOR:**

Andrés Martín Rodríguez Álvarez

**ASESOR:**

Karin Bartl

Lima, Agosto, 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

ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA COMPARATIVO DE UNA EDIFICACIÓN EDUCATIVA CONVENCIONAL Y UNA CERTIFICADA CON LEED,


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

ANDRÉS MARTÍN RODRÍGUEZ ALVAREZ,

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 24% (excluyendo bibliografía). Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 23/05/2023. Confirmando que el porcentaje de similitud detectado es debido al trabajo de investigación del mismo alumno, por lo que no es considerado plagio ya que es del mismo autor.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, 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, 26.5.2023

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

## **RESUMEN**

El sector de la construcción es uno de los principales aportantes a las sociedades, tanto en materia económica como social. Los proyectos de edificaciones impactan de manera positiva en distintos ámbitos, como creación de empleo, comercio de materiales y desarrollo de infraestructura esencial en el desarrollo social. Sin embargo, esto trae consigo problemas medioambientales, lo cual suma al cambio climático actual. Es por esto que, cada vez se implementan más y de manera exitosa las certificaciones ambientales en edificios.

Ante esta realidad se empleó el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en el presente estudio para comparar el impacto ambiental de dos edificaciones, una convencional y una certificada con LEED. El objeto de estudio es el pabellón A de ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, la cual cuenta con esta certificación. El análisis se realizó a través del software One Click LCA, el cual permite estimar los impactos ambientales de una edificación teniendo en cuenta los materiales usados, consumos de agua y energía y tiempo de vida de la misma. El objetivo de esta comparación es demostrar que la certificación LEED permite reducir los impactos ambientales generados en las distintas etapas de vida de una edificación.

Las etapas de ciclo de vida que ofrece el software son: pre-uso (producción de materiales y transporte), uso (de energía y agua) y fin de vida. Así mismo, los impactos ambientales se definen en los siguientes indicadores ambientales: uso total de energía primaria, calentamiento global, acidificación, eutrofización, potencial agotamiento de la capa de ozono y formación de ozono en la atmósfera inferior.

Los resultados comprueban que la certificación LEED permite reducir significativamente los impactos ambientales de un proyecto de construcción en todas sus etapas. Además,

los consumos de energía y agua en la fase operativa tienen bastante influencia para obtener los resultados finales. Así mismo, se verificó que el software One Click LCA es una herramienta muy amigable al momento de realizar un estudio de ACV en una edificación.



## **ABSTRACT**

The construction sector is one of the main contributors to societies, both economically and socially. Building projects have a positive impact in different areas, such as employment generation, trade in materials and the development of essential infrastructure for social development. However, this brings with it environmental problems, which adds to the current climate change. For this reason, environmental certifications in buildings are being implemented more and more successfully.

Given this reality, Life Cycle Assessment (LCA) was used in this study to compare the environmental impact of two buildings, one conventional and one LEED certified. The object of study is the engineering building A of the Pontificia Universidad Católica del Perú, which has this certification. The analysis was carried out using the One Click LCA software, which allows estimating the environmental impacts of a building taking into account the materials used, water and energy consumption, and the building's life span. The objective of this comparison is to demonstrate that LEED certification reduces the environmental impacts generated in the different stages of a building's life.

The life cycle stages offered by the software are: pre-use (production of materials and transportation), use (of energy and water) and end-of-life. In addition, environmental impacts are defined in the following environmental indicators: total primary energy use, global warming, acidification, eutrophication, ozone depletion potential and ozone formation in the lower atmosphere.

The results prove that LEED certification significantly reduces the environmental impacts of a construction project at all stages. In addition, energy and water consumption in the operational phase have a significant influence on the final results. Furthermore, it was

verified that the One Click LCA software is a very user-friendly tool when carrying out an LCA study in a building.



## **AGRADECIMIENTO**

Primeramente, quiero agradecerle este trabajo a dios, mis padres, mis hermanas y mi familia en general, quienes siempre han estado a mi lado en todo este largo camino. Sin ellos hubiese sido más difícil lograr el objetivo.

A mis amigos con los que ingresé a la universidad y los que fui conociendo en el camino, han sido mi soporte y consejeros en todo momento, me siento muy afortunado de tenerlos.

A mi alma máter, la Pontificia Universidad Católica del Perú, donde crecí tanto personal como profesionalmente, me llevo muchas enseñanzas que me han formado para la vida.

A mi asesora, por tener la paciencia y dedicación para acompañarme en el proceso y darme su tiempo para poder culminar con éxito.

Por último, quiero dedicarle mi tesis a mi abuelita Blanca, que ahora es un ángel que me guiará por el buen camino, siempre fue una inspiración para mi y la recuerdo con mucho amor.

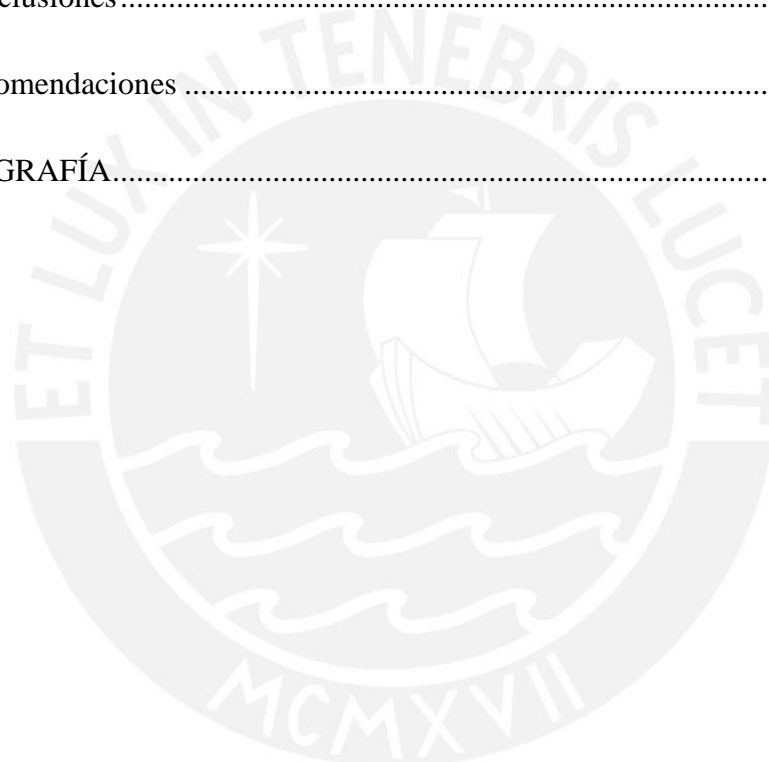
Andrés Martín Rodríguez Alvarez

# ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Hipótesis .....	4
1.2. Objetivos del estudio .....	4
1.2.1. Objetivo general .....	4
1.2.2. Objetivos específicos .....	4
2. ESTADO DEL ARTE .....	5
2.1. El sector construcción y su impacto ambiental .....	5
2.2. Construcción sostenible .....	7
2.3. Certificaciones ambientales en edificios .....	10
2.3.1. Certificación LEED .....	11
2.3.2. Sistemas de clasificación LEED .....	12
2.3.3. Estructura del sistema de clasificación .....	15
2.3.4. Niveles de certificación .....	17
2.3.5. LEED en Perú .....	18
2.4. El Análisis de Ciclo de Vida .....	19
2.4.1. Origen del LCA .....	19
2.4.2. LCA aplicado a edificaciones .....	22
2.4.3. Softwares de LCA .....	25
2.5. Evaluación de la realidad inmobiliaria peruana y su relación con la sostenibilidad ambiental .....	26

3. METODOLOGÍA .....	28
3.1. El análisis de ciclo de vida de acuerdo a las normas ISO 14040 e ISO 14044	28
3.1.1. Etapas del LCA.....	29
3.2. Utilización del software One Click LCA para el presente estudio .....	32
4. CASO DE ESTUDIO.....	38
4.1. Descripción del caso de estudio.....	38
4.2. Límites del sistema de estudio .....	41
4.3. Inventario del sistema .....	42
4.3.1. Selección de materiales .....	44
4.3.1.1. Estructura .....	45
4.3.1.2. Materiales según créditos de la edificación.....	49
4.3.1.3. Consumo de energía y agua .....	52
5. RESULTADOS.....	53
5.1. Modelamiento del edificio certificado a través del One Click LCA .....	53
5.1.1. Cuantificación de los impactos ambientales según los resultados del modelo .....	53
5.2. Modelamiento del mismo edificio, pero sin las medidas LEED, a través del One Click LCA .....	57
5.2.1. Cuantificación de los impactos ambientales según los resultados del modelo .....	57
5.3. Cuantificación de las mejoras ambientales logradas a través de la certificación LEED .....	60

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	65
6.1. Comparación de resultados con edificaciones peruanas.....	65
6.2. Comparación con edificaciones LEED.....	69
7. APLICABILIDAD DEL SOFTWARE ONE CLICK LCA EN LA REALIDAD INMOBILIARIA PERUANA .....	73
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	76
8.1. Conclusiones.....	76
8.2. Recomendaciones .....	77
9. BIBLIOGRAFÍA.....	78



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Certificados ambientales para edificaciones .....	10
Tabla 2. Tipos y alcances de proyectos para los sistemas de clasificación LEED.....	13
Tabla 3. Características del pabellón A que aportan a su certificación.....	42
Tabla 4. Créditos logrados por el pabellón A de la PUCP .....	43
Tabla 5. Equivalencias de resistencias de concreto .....	46
Tabla 6. Materiales seleccionados de la especialidad de estructuras .....	47
Tabla 7. Materiales seleccionados a partir de los créditos de la certificación.....	49
Tabla 8. Materiales elegidos dentro del software One Click LCA para el primer modelo .....	50
Tabla 9. Materiales elegidos dentro del software One Click LCA para el segundo modelo .....	51
Tabla 10. Consumos estimados del pabellón A.....	53
Tabla 11. Categorías de impacto y resultados para el edificio certificado a lo largo de su ciclo de vida.....	54
Tabla 12. Categorías de impacto y resultados para el edificio sin certificar a lo largo de su ciclo de vida .....	57
Tabla 13. Resultados del edificio certificado por indicadores y subetapas .....	62
Tabla 14. Resultados del edificio sin certificar por indicadores y subetapas .....	63
Tabla 15. Porcentajes de los resultados del modelo LEED respecto del modelo convencional para cada subetapa.....	64
Tabla 16. Comparación de ambos modelos con edificio de oficinas .....	66
Tabla 17. Comparación de ambos modelos con multifamiliares.....	68
Tabla 18. Comparación de ambos modelos con nave industrial .....	70
Tabla 19. Comparación de ambos modelos con edificio en Nueva York .....	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistemas de clasificación LEED .....	14
Figura 2. Categorías del crédito del sistema de clasificación LEED.....	17
Figura 3. Niveles del sistema de clasificación LEED .....	18
Figura 4. Flujograma metodológico .....	28
Figura 5. Etapas del LCA .....	30
Figura 6. Entradas y salidas de un sistema .....	31
Figura 7. Mi primer proyecto en One Click LCA .....	33
Figura 8. Inicio del modelado del proyecto en One Click LCA.....	34
Figura 9. Datos de entrada para el proyecto .....	35
Figura 10. Materiales de construcción como datos de entrada.....	35
Figura 11. Etapas de ciclo de vida en One Click LCA.....	36
Figura 12. Resultados del análisis .....	37
Figura 13. Emisiones durante toda la vida del proyecto .....	37
Figura 14. Ubicación del pabellón A dentro del campus PUCP .....	39
Figura 15. Aulario del Complejo de Innovación – Pabellón A .....	40
Figura 16. Etapas de ciclo de vida para el presente estudio .....	41
Figura 17. Clases de resistencia del concreto .....	45
Figura 18. Distribución de resultados por subetapas para el primer modelo .....	56
Figura 19. Distribución de resultados por subetapas para el segundo modelo.....	60
Figura 20. Impactos ambientales por categoría para ambos modelos .....	61
Figura 21. Ventajas y desventajas del One Click LCA .....	75

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, resulta erróneo pensar que la contaminación mundial es provocada, únicamente, por sectores como la industria minera o la de transporte. Dentro del grupo responsable de esta contaminación se encuentra la industria de la construcción, la cual aporta en gran porcentaje al impacto ambiental global. Mundialmente, la construcción es una de las actividades más contaminantes, se estima que un 40% de la contaminación total está relacionada directa o indirectamente a los procesos constructivos (García et al., 2020). La gran magnitud de recursos invertidos para la adquisición de materias primas, su transporte y posterior manufacturación son prueba de ello. Adicionalmente, acorde a un informe expuesto por la ONU, el sector constructivo consume un 40% de toda la energía, extrae hasta un 30% de materias primas del entorno, produce el 25% de los residuos sólidos, consume hasta el 25% de agua y por último, ocupa un 12% aproximado de la tierra (García et al., 2020).

Ahondando en el tema de los recursos para la construcción, éstos son extraídos de la naturaleza y requieren de una gran cantidad de energía, tanto para la explotación de canteras y bosques como para su posterior transformación en los productos destinados a la construcción. Como consecuencia, los residuos y las emisiones se depositan en el medio ambiente durante y al final del ciclo de vida de los productos y obras, dando lugar a emisiones a la atmósfera (Mercader et al., 2012). Entonces, está demostrado que el sector construcción genera un gran porcentaje de la contaminación, en todas sus fases de ciclo de vida.

En el Perú, como en muchos lugares del mundo, las construcciones están constituidas de elementos estructurales de concreto armado. El concreto tiene como componente principal al cemento, material clave en la industria de la construcción. Para la obtención

del cemento son necesarias altas temperaturas en grandes hornos, a través de la combustión de distintos tipos de combustible. Esto genera considerables cantidades de dióxido de carbono. Por lo tanto, el proceso de obtención de cemento es uno de los principales consumidores de energía dentro de todos los procesos industriales (Arena et al., 2002). En contraste con el impacto ambiental que puede traer la fabricación del cemento, este aporta positivamente a la economía del país, y su consumo va de la mano con los proyectos de construcción. Según el INEI (2019), el Informe Económico Trimestral del IV trimestre del 2018 menciona que, en dicho año, el sector construcción presentó un incremento de 5.42% como resultado del crecimiento del consumo interno de cemento en 4.04% y del avance físico de las obras en 9.59%. Este incremento también fue producto de la mayor demanda requerida por algunas empresas mineras como Chinalco (Junín), Las Bambas (Apuímac) y Antamina (Ancash). En el año 2019, la actividad constructiva aumentó 1.6% como debido a que se realizaron más obras privadas, destacándose la construcción de centros comerciales y las inversiones en construcción por parte de empresas mineras e hidrocarburos (INEI, 2019).

Siendo la industria de la construcción una actividad importante para el país, es necesario tener una evaluación ambiental de los procesos que la componen, tanto para la selección de materiales de construcción como para evaluar todo el proceso de los proyectos. Para ello, existen distintas herramientas que facilitan esta labor. Una de ellas es el Análisis de Ciclo de Vida (LCA por sus siglas en inglés), la cual tiene un enfoque holístico y realiza un estudio desde la extracción de materiales hasta la disposición final de desechos. Esta metodología ha sido ampliamente usada alrededor del mundo, puesto que hay una tendencia del sector de tornarse sostenible (Galeano et al., 2019). Gracias al LCA, no solo se tiene una base de datos con la cantidad de recursos utilizados y emisiones emanadas, sino que se incluye una evaluación de la contribución de estos a varias categorías de

impacto, algunas de ellas son las siguientes: cambio climático, toxicidad humana y agotamiento de la capa de ozono. Entonces, cada etapa arroja como resultado un estimado de la contribución a determinados impactos. Otra característica importante de este método es que es aceptado internacionalmente y cuenta con normas internacionales (normas ISO 14040), las cuales mejoran, pero no garantizan, la comparabilidad entre distintos estudios. Es así que, el LCA aplicado en el sector construcción se enfoca principalmente en el análisis de materiales de construcción, edificaciones y procesos o métodos de construcción (Bartl, 2014). La herramienta del LCA es de gran utilidad para evaluar procesos, por ende, puede aportar a la evaluación de procesos constructivos y ayudar con el objetivo de reducir impactos ambientales.

Así como existen metodologías como LCA para evaluar las etapas del ciclo de vida de productos o procesos y cuantificar impactos ambientales, y a la vez poder mitigar estos impactos, muchas organizaciones alrededor del mundo han establecido estándares de calidad ambiental a través de sus certificaciones. Esto ayuda a que las edificaciones tengan características de sostenibilidad ambiental. Una de estas certificaciones es la de Liderazgo en Energía y Diseño Medio Ambiental (LEED, por sus siglas en inglés). La certificación LEED es la más utilizada alrededor del mundo. Es aplicable para todo tipo de edificios y forma el marco para edificios verdes saludables, eficientes y económicos. Mundialmente, la certificación LEED es reconocida por sus logros y su liderazgo en sostenibilidad. En cuanto a sus beneficios ambientales, ayuda a reducir el consumo de energía y las emisiones de carbono. Además, los habitantes de los edificios LEED han evitado casi 4 mil millones de millas recorridas en vehículos, por las ubicaciones eficientes de los edificios. Asimismo, ayuda a la reducción de residuos, estimándose que para el 2030 los proyectos LEED habrán evitado más de 540 millones de toneladas de desechos de los vertederos (USGBC, 2020).

Cada año, la certificación LEED en Perú se va aplicando a más edificaciones y va involucrando a más profesionales que la promueven. Por ejemplo, la organización Perú Green Building Council (Perú GBC) se encuentra comprometida con el medio ambiente, a través de la sostenibilidad en la construcción. Así mismo, esta organización notificó que en el 2017 ya tenían 64 proyectos certificados con LEED, para entonces se había sumado el Colegio Roosevelt-Edificio The Commons, el cual había logrado obtener la Certificación LEED-Silver (Peru GBC, 2020).

### **1.1. Hipótesis**

Se pretende demostrar que una edificación certificada con LEED genera menos impactos ambientales respecto a una convencional

### **1.2. Objetivos del estudio**

#### **1.2.1. Objetivo general**

- Evaluar la reducción de impactos ambientales tras implementar la certificación LEED en una edificación educacional

#### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Estimar los impactos ambientales de un edificio con certificación LEED aplicando la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (LCA) y el software One Click LCA
- Modelar un edificio con las mismas funciones y dimensiones que el edificio certificado pero sin las medidas LEED y estimar sus impactos ambientales mediante el software One Click LCA
- Cuantificar las mejoras ambientales logradas a través de la certificación LEED, mediante la comparación de los dos modelos

- Evaluar la aplicabilidad del software One Click LCA en la realidad inmobiliaria peruana

## **2. ESTADO DEL ARTE**

En el presente capítulo se abordarán los conocimientos necesarios que se deben tener para poder llevar a cabo el estudio planteado. Los conceptos a desarrollar son los siguientes: el sector construcción y su impacto ambiental, construcción sostenible, la certificación LEED y el análisis de ciclo de vida.

### **2.1. El sector construcción y su impacto ambiental**

El sector constructivo cumple un papel importante en la sociedad y el crecimiento de esta. Según Ramírez (2002), los edificios son espacios donde las personas pasan gran parte de su vida, por lo que son necesarios y cada vez se presentan nuevos proyectos de construcción. En adición, la industria de la construcción es una de las principales aportantes a la economía de un país. Lamentablemente, este sector contribuye en gran proporción a la contaminación mundial, que cada vez va en ascenso y las preocupaciones se hacen mayores. Fenómenos como el cambio climático, el deterioro de la capa de ozono, la lluvia ácida, la deforestación o la pérdida de biodiversidad son ejemplos claros de como se degrada el ambiente. Así mismo, para los procesos constructivos son necesarios una gran cantidad de recursos. Las edificaciones consumen entre el 20% y el 50% de los recursos naturales, dependiendo del entorno en el que se encuentran ubicados, por lo que la construcción es un principal consumidor de este tipo de recursos (Ramírez, 2002).

Los proyectos que se realizan para que la calidad de vida de las personas mejoren tendrán impactos positivos y negativos. La construcción genera impactos ambientales en todas

sus etapas de vida y afecta a varios sistemas y factores. Por ejemplo, Enshassi et al. (2014) concluyeron que, para el caso de la Franja de Gaza donde aumentaron los proyectos de construcción, el impacto que causan al ecosistema es un asunto de importancia. Dentro de impactos adversos al ambiente se tienen: desechos, ruido, polvo, residuos sólidos, generación de tóxicos, contaminación del aire, contaminación del agua, malos olores, cambio del uso del suelo y emisiones peligrosas. Los gases de escape de los automóviles y el polvo generado por la construcción son fuentes de emisiones al aire. Estas emisiones incluyen: CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>. El ruido se emite a través de diversos equipos, compresores de aire y vehículos. Los residuos se generan en más de una etapa del ciclo de vida de una edificación. Pueden producirse durante la etapa de construcción y operación, teniendo distintos tipos de tratamiento (Enshassi et al., 2014).

Es importante mencionar el tema del consumo energético, necesario para cada una de las etapas de vida de una edificación. Esta actividad ocurre desde la obtención de materia prima hasta la etapa de operación de un edificio. En el sitio web ISTAS, donde contribuyen al progreso social y las actividades de protección del medio ambiente, señalan que la producción de energía eléctrica es una de las primeras responsables de la producción de gases de efecto invernadero, lo cual causa el cambio climático (ISTAS, 2020). El uso energético de los últimos años es ampliamente influenciado por el desarrollo económico y demográfico. Según la Proyección del uso de electricidad residencial urbano y rural en el Perú (2005-2030) mediante el software MAED\_D (Rojas y Rojas, 2009), los resultados de su estudio arrojaron que, para la proyección del uso energético en los sectores urbano y rural se tiene un aumento de uso de combustibles tradicionales de 2.942 GWa hasta 4.596 GWa. Los combustibles fósiles, fuentes principales de energía, son también los principales de causar impactos ambientales, por lo que se debe reducir su uso. Estos se encuentran disponibles en cantidad limitada a tal

grado que se deben tener consideraciones para tener un ahorro energético y reducir impactos. Como medida para aliviar la emisión de gases de efecto invernadero, existen acuerdos como el de Paris, establecido el 12 de diciembre del 2015 (Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático, 2022).

Otro factor a considerar son los residuos generados durante el ciclo de vida de una edificación. La generación de residuos de construcción y demolición (RCD) se dan mayormente en la etapa de construcción y demolición, poseen connotaciones ambientales y económicas importantes. Los RCD pueden variar según la actividad generadora, ya sea construcción, demolición o renovación de edificaciones. Algunos impactos ambientales que traen los residuos de construcción afectan al suelo, el paisaje y contaminan el agua y aire (Mercante, 2008). Es por esto que se debe tener un registro de volúmenes y proporciones de estos residuos, para poder planificar su manejo y control. Para esto, se usan algunas metodologías como cuantificar la cantidad de RCD por m<sup>2</sup> de superficie construida o la cantidad y tipo de materiales que ingresan a obra, para poder hacer un balance entrada materiales-salida de residuos (Llamas et al., 2010). El reciclaje de RCD se ha convertido en una actividad cada vez más consolidada en lugares como Japón, Holanda, Dinamarca, Austria, Suiza, Alemania y España que poseen leyes reclamando el uso de materiales reciclados en construcción (Chávez y Guarín, 2014).

## **2.2. Construcción sostenible**

Los nuevos retos de la industria de la construcción van más allá de la implementación de nuevas tecnologías para que los procesos sean más efectivos. Hoy en día, la disminución del impacto ambiental es un punto resaltante a tratar. Es por ello que nace el concepto de construcción sostenible, el cual busca un equilibrio entre los procesos constructivos y el ambiente.

Para poder entender bien lo que implica la construcción sostenible, el concepto de desarrollo sostenible debe ser claro. El desarrollo sostenible tiene como finalidad mejorar la calidad de vida humana. Este tipo de desarrollo satisface las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades (Huerta et al., 2010). A nivel mundial, las sociedades valoran cada vez más que sus actividades se realicen con un enfoque sostenible, ya que este factor es considerado esencial para las necesidades que se tienen a largo plazo. Así mismo, este enfoque puede ayudar a componer la explotación irresponsable de recursos que ha provocado cambios lesivos en el planeta. Por fortuna, muchos países han entablado esfuerzos por promover la sostenibilidad en sus entornos y actividades (Ordóñez y Osma, 2010). Los procesos constructivos han tomado parte de esta iniciativa, fomentando en muchos proyectos la sostenibilidad ambiental a través de todo su ciclo de vida. Debe existir entonces un triple objetivo estratégico de acuerdo al desarrollo sostenible que involucra: ambiente, sociedad y economía social (Rodríguez y Fernández, 2010).

Según USEPA (2000), uno de los primeros escenarios importantes internacionales donde se llevó a cabo un debate sobre el resguardo ambiental, crecimiento y desarrollo económico fue la “Conferencia de las Naciones Unidas de 1972 sobre Medioambiente Humano”, llevada a cabo en Estocolmo (citado por Corzo, 2016). Así mismo, en esta conferencia fueron establecidas de manera formal las bases que permitieron plantear posteriormente el Informe Brundtland de 1987. Este informe fue expuesto a las Naciones Unidas (ONU), en el cual se plantea de manera oficial el concepto de desarrollo sostenible (Brundtland, 1987).

Según Casado (1996), la construcción sostenible debería denominarse la construcción del futuro, puede definirse como aquella que tiene especial consideración por el ambiente y que implica un uso sostenible de la energía (citado por Alavedra et al, 1997). Esto implica,

además, un consumo eficaz de agua, recursos y materiales que no dañen el ambiente. La expresión “construcción sostenible” abarca, aparte de los edificios propiamente dichos, el entorno y la forma en que se integran las ciudades (Ramírez, 2002). Se sabe que el uso indiscriminado del espacio agota los recursos, daña los paisajes y aumenta la vulnerabilidad de los establecimientos humanos. Además, la obtención de recursos de manera indiferente tiene un impacto negativo en el ambiente. Los recursos no renovables, como minerales y combustibles fósiles, no son infinitos y el manejo de recursos renovables, como por ejemplo la madera, provoca efectos indeseables sobre el medio natural, como el agotamiento de los recursos hídricos (Acosta, 2009).

Actualmente, se emplean residuos y subproductos industriales como alternativas de materia prima para la elaboración de materiales de construcción, lo cual da paso a un enfoque amigable con el ambiente (Acevedo et al., 2012). Algunos residuos de construcción y demolición como el concreto, agregados, maderas, yeso, ladrillos, metal, vidrio, entre otros, pueden ser reciclados y utilizados como aditivos para la manufactura de nuevos productos en vez de usar materias primas naturales (Leyva et al., 2017).

Según Susunaga (2014), al implementar sistemas que favorezcan a la sostenibilidad en la construcción se logran ventajas que favorezcan al ambiente y a su prevalencia. Así mismo, esto ayuda a mejorar la calidad de vida de las personas y el espacio que habitan. Algunas ventajas que se pueden llegar a lograr son el ahorro de energía, agua y mejoramiento en disposición de desechos, reducción de costos operativos, comodidad visual y térmica generando un ambiente agradable para las personas, mejoras en la calidad de aire, etc. Diversos estudios demuestran que los costos de construcción para lograr todas estas ventajas son mayores que en edificaciones tradicionales, pero estos se compensan con el ahorro durante la etapa de uso, evidenciado en menores costos y mayor valor de los edificios (Susunaga, 2014).

### 2.3. Certificaciones ambientales en edificios

Alrededor del mundo, frente a la problemática del impacto del sector construcción al ambiente y la idea de una construcción sostenible, varias organizaciones han establecido estándares de calidad a través de sus certificaciones. Estas certificaciones internacionales son herramientas útiles que pueden asegurar que los proyectos se desarrollen acorde a lineamientos sostenibles (Perú GBC, 2023). Algunas de las más importantes se describen en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Certificados ambientales para edificaciones*

CERTIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
<b>LEED</b>	Leadership in Energy and Environmental Design es el sistema de clasificación de edificios verdes más utilizado en todo el mundo. Es aplicable a todo tipo de edificios y forma el marco para edificios ecológicos saludables, eficientes y económicos (USGBC, <a href="https://www.usgbc.org/leed/benefits-leed">https://www.usgbc.org/leed/benefits-leed</a> )
<b>DGNB</b>	Es el consejo alemán de construcción sostenible, el cual fue fundado en 2007 por 16 iniciadores portadores de una variedad de antecedentes especializados en la industria de la construcción. La finalidad era promover la construcción sostenible a futuro (DGNB, <a href="https://www.dgnb.de/en/">https://www.dgnb.de/en/</a> )
<b>HQE</b>	Es uno de los estándares de sostenibilidad constructiva más completos alrededor del mundo. Valora eficiencia energética, ambiente, salud, confort, etc. Abarca viviendas y edificios públicos o privados (BBVA, <a href="https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/certificacion-hqe-sostenibilidad-de-la-construccion-en-todos-los-sentidos/">https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/certificacion-hqe-sostenibilidad-de-la-construccion-en-todos-los-sentidos/</a> )
<b>CASBEE</b>	Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency es un método para evaluar el desempeño ambiental de los edificios y el entorno construido. Esta certificación fue desarrollada por un comité de investigación establecido en 2001 conformada por grupos establecidos por el Consorcio de Construcción Sostenible de Japón (JSBC) (IBEC, <a href="http://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/index.htm">http://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/index.htm</a> )

<b>CERTIFICACIÓN</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>BREEAM</b>	Building Research Establishment Environmental Methodology es un método de evaluación y certificación de la sostenibilidad de edificaciones, cuenta con más de 20 años en el mercado y más de 575.000 edificios certificados en 85 países. Su primera versión fue en el año 1990 (BREEAM, <a href="http://www.breeam.es/">http://www.breeam.es/</a> ).

*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

Cada una de las certificaciones posee categorías, las cuales se diferencian por los puntajes asignados a cada edificación, dependiendo de los créditos logrados. Al ser programas voluntarios, se espera que en los próximos años se implementen más en los proyectos venideros en Perú y en América Latina.

### **2.3.1. Certificación LEED**

La certificación LEED es uno de los programas de certificación de edificios verdes más aceptados y populares alrededor del mundo. LEED es acrónimo de Leadership in Energy and Environmental Design, que en español significa Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental. LEED permite el diseño, construcción, operación y el mantenimiento de edificios para lograr diseños eficientes en recursos, más saludables y beneficiosas para las edificaciones que se certifiquen (Perú GBC, 2023).

Este programa de certificación fue desarrollado por el Consejo de la Construcción Ecológica de los Estados Unidos (U.S. Green Building Council, USGBC). El USGBC es una organización sin fines de lucro que está conformada por distintos líderes pertenecientes a diversos sectores de la industria de la construcción, el cual promueve lugares más responsables con el medio ambiente, así como rentables. Así mismo, busca transformar la construcción tradicional y convertirla en sostenible, reducir el impacto ambiental, apoyando el desarrollo social para que mejore la calidad de vida de la gente (El Salvador Green Building Council, 2020).

Son muchas las características que llevan a que LEED sea una alternativa eficiente para implementar una ideología ecoamigable. La certificación LEED, mediante la creación y ejecución de un modelo de edificación ecológica, promueve e impulsa la construcción sostenible y prácticas de desarrollo colectivo. La base técnica de esta certificación son sus juicios de desempeño, instrumentos, estándares existentes y crecientes. El sistema de calificación de LEED consta de referencias de construcción y vecindario rigurosos, pero conseguibles, que determinan la edificación ecológica en todo el mundo (U.S. Green Building Council, 2017). Así mismo, se comprueba que las edificaciones certificadas con LEED presentan beneficios que se muestran en distintas fases de vida de las mismas. Los edificios con certificación LEED reducen el consumo de energía entre un 30% y un 70%, el consumo de agua entre un 30% y un 50%, los costes de residuos entre un 50% y un 90% y las emisiones de dióxido de carbono en aproximadamente 35%, todo esto en comparación con los edificios convencionales (Huerta et al., 2010). Muchas son las razones por las cuales se debería impulsar la certificación LEED. El contexto actual necesita de un desarrollo de la construcción de manera sustentable.

### **2.3.2. Sistemas de clasificación LEED**

Según el Consejo de Construcción Verde Español (Spain GBC, 2020), el Método de Clasificación de Edificios Sostenibles LEED es un sistema estándar internacional y voluntario, el cual se basa en el consenso y criterios de mercado para construir edificios y renovarlos de manera sostenible y con alta eficiencia. Es posible aplicar LEED en cada una de las etapas del ciclo de vida de una edificación. Los sistemas de clasificación y sus respectivas guías referenciales integrales ofrecen a las personas mejores alternativas para la toma de decisiones en sus proyectos a través de un proceso colaborativo. Esto trata de asegurar que los sistemas de la edificación trabajen de manera conjunta y eficaz. Mediante un consenso continuo, se estiman constantemente y se renuevan periódicamente los

sistemas de clasificación, adaptando nuevas tecnologías, políticas y respondiendo a las variaciones del entorno edificado (U.S. Green Building Council, 2009). Según el USGBC, los sistemas de clasificación LEED abarcan los tipos y alcances de proyectos mostrados en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Tipos y alcances de proyectos para los sistemas de clasificación LEED*

<b>Sistema de clasificación LEED</b>	<b>Descripción</b>
<b>LEED para nuevas obras o renovaciones importantes</b>	Aquí se incluyen además aplicaciones para: escuelas, comercio minorista, hotelería, centros de datos, almacenes y centros de distribución y atención médica.
<b>LEED para diseño de interiores y construcción</b>	Para proyectos completos que comprenden acondicionamiento interior, que incluye interiores comerciales. Así mismo, incluye aplicaciones para retail y espacios como hoteles, moteles y posadas.
<b>LEED para operaciones y mantenimiento de edificios existentes</b>	Aplicado a edificios existentes que están siendo mejorados o tienen poca o ninguna construcción. También incluye aplicaciones para escuelas, comercio minorista, hotelería, centros de datos, almacenes y centros de distribución.
<b>LEED para el desarrollo de un vecindario</b>	Dirigido a nuevos proyectos de desarrollo de terrenos o proyectos de reurbanización que contienen usos residenciales, usos no residenciales o una combinación. Los proyectos pueden estar en cualquier etapa del proceso de desarrollo, desde la planificación conceptual hasta la construcción.
<b>LEED para hogares</b>	Comprende hogares multifamiliares, multifamiliares de baja altura (uno a tres pisos) o multifamiliares de mediana altura (cuatro a seis pisos).
<b>LEED para retails</b>	Aplicado a edificios utilizados para ventas al por menor (tiendas minoristas) de productos de consumo. Incluye áreas de servicio al cliente y áreas de preparación o almacenamiento que respaldan el servicio al cliente.

<b>Sistema de clasificación LEED</b>	<b>Descripción</b>
<b>LEED para escuelas</b>	Aplicado a edificios formados por espacios de aprendizaje básicos y auxiliares. Brinda herramientas para resolver problemas como la acústica del aula, la iluminación natural y las vistas.
<b>LEED para atención médica</b>	Esta clasificación se centra en los hospitales que operan las veinticuatro horas del día, los siete días de la semana, que brinden atención a hospitalizados, incluida atención aguda y a largo plazo.
<b>LEED para fachadas y estructura</b>	Destinado a edificios que son de nueva construcción o pretenden hacer renovaciones considerables en la fachada. Esta clasificación es apropiada para usar si más del 40% del área bruta del piso está incompleta al momento de la certificación.

*Nota.* Fuente: USGBC (2009)

El desarrollo de la clasificación anterior se resume en la Figura 1, la cual muestra los distintos tipos de edificaciones que abordan LEED.

**Figura 1**

*Sistemas de clasificación LEED*



*Nota.* Fuente: U.S. Green Building Council 2009

### 2.3.3. Estructura del sistema de clasificación

El método de clasificación LEED consta de prerrequisitos y créditos. Para poder alcanzar con la certificación LEED, se necesita alcanzar todos los prerrequisitos y lograr una mínima cantidad de créditos. Según el USGBC (2009), LEED se organiza, por lo general, según los siguientes conceptos amplios:

**Sitios sustentables:** Los créditos de LEED que estipulan sitios sustentables rechazan el desarrollo de superficies previamente no desarrolladas y el agravio a ecosistemas y la corriente de agua, fomentan las elecciones inteligentes en cuanto a transporte y control de la contaminación ligada con la construcción.

**Agua:** La finalidad de los créditos que comprenden la eficacia de agua es promocionar un mejor uso de la misma, en el interior y exterior del edificio. Se usan mecanismos, accesorios y piezas más competentes para alcanzar una reducción en el uso de agua.

**Energía:** El uso de energía incluye distintas estrategias abordadas por LEED, incluido el comisionamiento; algunas de ellas son el control del uso de la energía, la eficiencia en cuanto al diseño y construcción, los dispositivos usados y el consumo de fuentes puras y renovables de energía.

**Materiales y recursos:** Los productos y materiales elegidos, creados y llevados de manera sostenible son promovidos por estos créditos. Así mismo, impulsan el aprovechamiento y disminución de desechos, así como el reciclado.

**Calidad ambiental interior:** Los créditos LEED promueven estrategias con fines de mejora de la calidad del aire de los interiores de las edificaciones, brindan acceso a iluminación natural y la mejora sonora.

**Concientización y educación:** El aprovechamiento de las características de un edificio ecológico y la comprensión acerca de estas son puntos importantes que deben tener claro los residentes del recinto.

**Innovación:** LEED fomenta la innovación en todo el diseño y la operación, otorgando puntos de bonificación por mejorar el rendimiento del edificio. Los créditos en esta categoría también se pueden obtener a través de programas educativos que comparten información sobre edificios ecológicos con los residentes y la comunidad.

Así mismo, se tienen tres categorías de clasificación para LEED para desarrollo de vecindario (LEED for Neighborhood Development), las cuales se detallan a continuación:

**Ubicación y conexiones inteligentes:** La idea de esta sección es orientar acerca del lugar de construcción del proyecto, promoviendo la elección de lugares con servicios y transporte público existente.

**Patrón y diseño del vecindario:** La presente sección pretende desarrollar espacios transitables, activos, que contengan áreas de múltiples usos y que se encuentren unidos con la comunidad más amplia.

**Infraestructura y edificios ecológicos:** Esta sección pretende mejorar el ambiente natural, centrandose sus acciones en la disminución del deterioro ambiental relacionado a la construcción y operación de edificios dentro de los vecindarios.

La Figura 2 presenta los créditos de calificación LEED para diferentes categorías (GBC Brasil, 2020).

**Figura 2**

*Categorías del crédito del sistema de clasificación LEED*



*Nota.* Fuente: Adaptado de GBC Brasil (2020)

### 2.3.4. Niveles de certificación

Los sistemas de clasificación LEED poseen por lo general 100 puntos principales. Adicionalmente, seis puntos pertenecientes a la sección de Innovación y cuatro puntos de Prioridad Regional, teniendo un total de 110 puntos. La escala siguiente establece el nivel de certificación de proyectos comerciales: Certificado (de 40 a 49 puntos), Plata (de 50 a 59 puntos), Oro (de 60 a 79 puntos) y Platino (más de 80 puntos). Para el caso de hogares (LEED for Homes) los niveles de certificación LEED varían levemente, debido a que la escala de este sistema de clasificación es de 125 puntos, sumándole 11 puntos por Innovación. Los niveles mencionados se muestran en la Figura 3.

### Figura 3

#### *Niveles del sistema de clasificación LEED*



*Nota.* Fuente: Adaptado de GBC Brasil (2020)

#### **2.3.5. LEED en Perú**

En los últimos años, la certificación LEED viene siendo una herramienta muy utilizada en la industria de la construcción peruana (Perú GBC, 2020). El crecimiento de este sector ha llevado a distintos profesionales y empresas a involucrarse con una idea de desarrollo y construcción sostenibles, por lo que esta certificación es una buena opción para poder adoptar un enfoque ecoamigable. Un ejemplo de ello es el Peru Green Building Council (Peru GBC), organización sin fines de lucro, cuyo objetivo es promover los principios de la construcción y el desarrollo sostenible. Así mismo, posee políticas y gestiones públicas o privadas que ayudan a que la industria de la construcción tenga un enfoque sustentable y una correcta responsabilidad social (Perú GBC, 2020). Esta organización brinda capacitaciones y cursos sobre la certificación LEED, además, promueve su uso.

La certificación LEED es la “madrina” de las certificaciones en el Perú. Para el año 2022, en Perú se tenían cerca de 150 proyectos certificados con el sistema LEED (Productos y Soluciones, 2023). Muchas empresas han mostrado interés por LEED a través de la certificación de sus oficinas. Las grandes corporaciones consideran a LEED como la nueva ISO para oficinas sostenibles (Mayer, 2020). Algunos proyectos certificados con

LEED son el hotel Westin de Lima, la nueva sede del Banco de la Nación, la Universidad Tecnológica del Perú (UTECH) y la torre de Interbank (Gestión, 06 de agosto de 2019).

## **2.4. El Análisis de Ciclo de Vida**

El LCA es una metodología ampliamente usada en muchos sectores en todo el mundo. Se puede aplicar a productos simples como una fruta o un vegetal, como también a un sistema complejo como la construcción de un edificio multifamiliar o de una planta de tratamiento de residuos sólidos. Según Chacón (2008), en teoría, el LCA es un método de análisis que considera y realiza una interpretación de los impactos ambientales potenciales de un producto o servicio a lo largo de todo su ciclo de vida. Para realizar un LCA, se necesita recopilar y evaluar todas las entradas, salidas y estimar los impactos ambientales potenciales de un sistema, teniendo en cuenta los límites determinados para éste. En el análisis está incluido la extracción de materias primas, la producción, el transporte, la distribución, el uso y la disposición final. Gracias al análisis detallado y determinación de impactos ambientales que se pueden lograr al realizar un LCA es que resulta ser una herramienta muy beneficiosa para estudiar procesos como los constructivos.

### **2.4.1. Origen del LCA**

La idea del LCA fue concebida alrededor de 1960. En ese entonces la degradación ambiental y, en particular, el acceso limitado a los recursos empezó a ser un tema de preocupación. Este método de evaluación se inició en Estados Unidos y luego fue tomando lugar en el norte de Europa. Los primeros métodos podrían caracterizarse como una contabilidad de materiales y energía, los cuales fueron inspirados por la contabilidad de un flujo de materiales. Los primeros años del LCA fueron marcados por las preocupaciones acerca del cambio que sufrirían los métodos con respecto a las

preocupaciones del público. Con el pasar de los años, se dio principal atención a los residuos sólidos, por ser considerado problemático. Esto se reflejó en Estados Unidos, puesto que los rellenos sanitarios eran dominantes de la gestión de residuos (Hauschild et al., 2018).

Uno de los primeros trabajos realizados en LCA fue ejecutado por Harold Smith, en 1963. Smith era gerente general de un proyecto realizado para la estación de generación nuclear de Douglas Point, en Canadá. Su trabajo fue presentado en la Conferencia Mundial de Energía, y abarcaba los frutos de su cálculo de los requisitos de energía acumulada para la producción de productos químicos (AGA, 2010). Así mismo, entre 1960 y 1970 se realizó otro trabajo pionero utilizando el concepto de ciclo de vida, el cual buscó determinar requerimientos de energía de algunos métodos y procedimientos, así como analizar los efectos ambientales producto del consumo energético. En 1969, Harry E. Teasley de Coca-Cola Company mandó a realizar un estudio al Midwest Research Envases (MRI), con la finalidad de conocer el alcance de los impactos energéticos, materiales y ambientales asociados al ciclo de vida de los envases, desde la obtención de la materia prima hasta la disposición final (Chacón, 2008). Cabe señalar que MRI se refiere a los estudios que cuantifican los recursos y las emisiones del desarrollo de productos como Análisis de Perfiles Ambientales y de Recursos (REPA por sus siglas en inglés) (EPA, 2006). En adición, el U. S. Environmental Protection Agency (EPA), en sus inicios, se interesó en las metodologías de ciclo de vida, con el fin de evaluar desperdicios de productos de corrientes (impulsados por el público y su preocupación por los vertederos). Así mismo, era una herramienta útil para el estudio de la eficiencia energética, impulsado por la crisis petrolera/energética, a principios de los años setenta (Reed, 2012).

Las contribuciones que se dieron durante los años setenta con respecto al LCA fueron publicadas en el *Journal Energy Policy* entre 1974 y 1975. En 1975, William Franklin creó conjuntamente con Marge Franklin una de las principales compañías en LCA en Estados Unidos, la firma Franklin Associates. Esta empresa realizó alrededor de 60 estudios de LCA, dirigidas primeramente a empresas privadas. Hacia el año 1971, la academia de Estados Unidos estudió el LCA independientemente; universidades como la de Illinois (dirigido por el profesor Bruce Hannon) y la de Stanford fueron líderes al respecto. Los estudios realizados eran principalmente de estudiantes de ingeniería que se interesaban por temas ligados con la ecología. Las dos universidades fijaron sus estudios en temas de consumo de energía para botellas de bebidas . En 1973, se desarrolló en Estados Unidos el primer software sobre LCA, una empresa cliente de MRI fue la que lo financió. Este primer modelo de software, como es entendido, presentaba algunos errores por modificar para una correcta lectura de data (Chacón, 2008).

Lo que motivó a la realización de las REPA fue la crisis del petróleo en los años setenta, una de estas investigaciones fue encargada a la EPA (Hunt, 1974). Pasada la crisis, se empezó a tomar interés en la eliminación de los residuos sólidos. Durante ese periodo, se tenía interés en explorar la elaboración de productos, introduciendo el ciclo de vida como concepto. El LCA continuó desarrollándose, a pesar de que no se tenía una aprobación general sobre su enfoque (EPA, 2006). Es así que en el año 1990, la Sociedad de Toxicología Ambiental y Química (SETAC por sus siglas en inglés) realizó un taller en Estados Unidos. Profesionales de diferentes países participaron en el evento, con el objetivo de mejorar la metodología LCA (Curran, 1993). Es entonces cuando se establece el término de “Análisis de Ciclo de Vida”, además de sus partes como inventario, análisis de impactos e identificación de oportunidades para contribuir a la reducción de impactos.. La SETAC estableció un “Código de Prácticas”, conjuntamente con sus representantes

en Europa, a través de talleres realizados en 1991, 1992 y 1993. Gracias a estos talleres es que se sentaron varias bases para la metodología del LCA (SETAC, 1994).

Años siguientes, la metodología del LCA no se encontraba estandarizada, por ello, algunas empresas que utilizaban esta herramienta para comercializar sus productos abusaban de su uso. Es por esto que, el comité de gestión ambiental de la Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés) anunció en el año 1997 la ISO 14044, denominada “Environmental management-Life Cycle assessment-Principles and framework”. La idea de publicar esta norma fue estandarizar el LCA, que se definió como un método de gestión ambiental diseñado para evaluar los impactos potenciales asociados con un producto. Las partes de esta norma fueron escritas en las siguientes: ISO 14041, ISO 14042 e ISO 14043 (ISO, 1997). En el año 2006, el contexto normativo del LCA se sustituye por las normas ISO 14040, Análisis de Ciclo de Vida: Principios y marco de referencia e ISO 14044, Análisis de Ciclo de Vida: Requisitos y directrices. La norma ISO 14044 sustituyó a las normas ISO 14041, 14042 y 14043 (Haya, 2016).

#### **2.4.2. LCA aplicado a edificaciones**

LCA es una de varias técnicas de gestión ambiental, como evaluación de riesgos, evaluación de desempeño ambiental, auditoría ambiental y evaluación de impacto ambiental, y podría no ser la técnica más apropiada para usar en todos los casos. LCA no siempre incluye los aspectos económico y social de un producto, pero el enfoque de ciclo de vida y las metodologías descritas en la norma internacional ISO 14040 puede ser aplicado a estos otros aspectos (ISO, 2006a).

Al ser la construcción un proceso complejo, en el cual se evidencian distintos impactos ambientales negativos, el LCA es una opción muy conveniente para estudiar cada parte de estos procesos y poder identificar y evaluar estos impactos. Según Curran (2012), el

enfoque de ciclo de vida es un tipo de “pensamiento sistémico” que está siendo ampliamente usado en el sector construcción y los productos que son parte de este, con el fin de que las bases de datos y las herramientas que impulsan un análisis completo de productos o procesos se vuelvan más disponibles. El LCA provee una guía eficiente para identificar mejoras en los procesos de construcción y reducir el impacto ambiental, además de proponer mejoras en las prácticas constructivas del sector mencionado. El LCA ha sido aplicado al sector construcción por más de 20 años, y se puede emplear en productos específicos, ensambles (con los materiales requeridos para una función específica) y edificaciones enteras (incluyendo los materiales y etapas de todo el ciclo de vida). El LCA permite hacer mejoras y facilita los procesos de tomas de decisiones en cuanto a diseños, procesos y tecnologías constructivas (Cuevas, 2012).

Mayormente, los casos de estudios de LCA que han sido aplicados a edificaciones han puesto énfasis en los usos de agua, energía y emisiones que genera durante el ciclo de vida del mismo. Por otro lado, también se han aplicado a los materiales o productos de construcción, con el fin de poder mejorar las etapas de ciclo de vida (reducción de impactos ambientales). Las fases de estudio también varían de acuerdo a cada proyecto, algunos casos consideran desde el transporte de materiales, construcción y demolición, y otros, incluyen la fase de reciclado de materiales luego del fin de vida. Para el caso de materiales de construcción, también pueden variar las fases que se incluyen en cada estudio. Esto beneficia a la comunidad científica, ya que apertura nuevas líneas de investigación y comparación, propiciando el diseño de novedosos sistemas constructivos que hagan a las edificaciones sostenibles (Bedoya et al., 2014).

LCA ha sido aplicado a edificaciones en distintos estudios alrededor del mundo. En el año 2018, se realizó un estudio de LCA a un edificio de oficinas certificado por LEED. Se realizó una comparación del mismo edificio con otras seis versiones similares,

cambiando materiales estructurales y revestimiento. De ello se dedujo que, en la región de Quebec (Canadá), donde más del 90% de la electricidad se origina de fuentes renovables, los impactos ambientales consecuentes de la producción de materiales resultaron mayores (>50%) en comparación con los del consumo energético (Anand et al., 2018). En el caso de Perú, un estudio de tesis realizado en el 2014 por la ingeniera Samy García Torres, titulado “Evaluación ambiental durante el ciclo de vida de una vivienda unifamiliar”, utilizó como herramienta el LCA para estudiar una vivienda localizada en el distrito de San Isidro, Lima, durante todo su ciclo de vida. Para ese estudio se utilizó el software *Athena Impact Estimator for buildings* (The ATHENA Institute, 2003), instrumento de manejo fácil para analizar viviendas. Dentro de los resultados se obtuvo, por ejemplo, que la etapa de mayor consumo de energía primaria fue la operacional, con un valor igual a 2 850 000 MJ (García, 2014). Por otro lado, un estudio denominado “Evaluación ambiental basado en el análisis del ciclo de vida (ACV) en la fase de construcción de una edificación en Cataluña” (Castells et al., 2010) utilizó la herramienta del LCA para evaluar los impactos ambientales de la fase constructiva en función de los materiales de construcción, transporte, energía y gestión de residuos. Dentro de los resultados más relevantes está el consumo final de energía primaria, igual a  $5.04 \times 10^3$  MJ/m<sup>2</sup>, el total de impacto ambiental del cambio climático fue de  $8.40 \times 10^2$  kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>2</sup> y el consumo de energía total fue de  $2.88 \times 10^4$  M. El LCA se puede aplicar a cualquier etapa de ciclo de vida de un edificio, como se comprueba en los ejemplos descritos. Es una herramienta útil al momento de evaluar impactos por cada etapa, en el presente estudio se utilizará el software One Click LCA, que basa su metodología en los lineamientos del LCA.

### 2.4.3. Softwares de LCA

Los estudios de LCA pueden llegar a necesitar una base de datos extensa, además de tener varios procesos que se deben analizar para llegar a un resultado final. Es por eso que con el paso de los años, se han implementado diferentes softwares que ayudan a estimar los impactos de productos y procesos de manera sencilla, teniendo en cuenta el enfoque del LCA.

Usualmente, los procesos estudiados con LCA tienen muchos flujos de entradas y salidas, y todos estos procesos necesitan estar conectados para calcular un balance entre ellos. Al ser el LCA una metodología tan compleja, la cual mide impactos a través de varios indicadores, muchas veces se necesita una ayuda extra para realizar este análisis. Actualmente, muchos softwares simplifican estos procesos al momento de realizar cálculos, utilizando sus propias bases de datos y usando una metodología determinada (Cortés, 2010).

Dentro de los softwares principales aplicados al LCA se encuentran GaBi y SimaPro. Gabi fue desarrollado por Thinkstep (Sphera, 2021), y SimaPro fue desarrollado por Pré Sustainability (SimaPro, 2021). Para el caso de edificaciones, SimaPro es una herramienta muy útil, puesto que se puede utilizar para diferentes campos de la ingeniería (Fuentes, 2020). Así mismo, los softwares Athena Impact Estimator for Buildings, desarrollado por Athena Sustainable Materials Institute (Athena Sustainable Materials Institute, 2021) y KieranTimberlake's *Tally*, desarrollada por KieranTimberlake (KieranTimberlakes, 2021) permiten el análisis de edificios enteros. Estas tres herramientas siguen los cuatro pasos de un estudio de LCA establecido por las normas ISO 14040 e ISO 14044 (Al-Ghamdi y Bilec, 2016) y permiten evaluar el LCA de edificios.

## **2.5. Evaluación de la realidad inmobiliaria peruana y su relación con la sostenibilidad ambiental**

El sector inmobiliario peruano es uno de los principales aportantes a la economía del país. Por ejemplo, en el año 2019, la Asociación de Empresas Inmobiliarias (ASEI) indicó que la inversión de nuevos proyectos inmobiliarios aumentarían para el año 2020 en más del 10%. Un 39% de empresas inmobiliarias consideraron que el precio de venta de viviendas crecerían hasta en un 2.5% entre enero y junio de 2020, según el estudio donde participaron las inmobiliarias afiliadas al gremio. Así mismo, los afiliados consideraron que, según su desempeño en el año 2019, estimaron terminar el año con más de 15000 unidades vendidas en Lima Metropolitana (El Comercio, 27 de diciembre de 2019).

Es entonces que, según lo que se ha ido desarrollando durante el presente estudio, conforme el sector avance, este debería tener soluciones frente a la contaminación ambiental. Por ejemplo, a nivel doméstico, el sector de vivienda de Perú es uno de los mayores consumidores de electricidad. Este consumo eléctrico conlleva al aumento de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Por esta razón, las edificaciones verdes son una prometedora alternativa para volver al sector sostenible, en cuanto al ámbito ambiental (El Comercio, 11 de septiembre de 2019). Cada vez más se incorporan a la industria de la construcción certificados como LEED y, además, herramientas de análisis de ciclo de vida para evaluar las distintas etapas de este tipo de proyectos.

Distintas asociaciones y organizaciones peruanas buscan esta sostenibilidad y desarrollo eco amigable. Según El Comercio (2019), una de ellas es la Red Regenerativa, plataforma de profesionales líderes en el campo del desarrollo urbano sostenible en el Perú. Héctor Miranda, gerente general de Red Regenerativa, explica que las viviendas verdes permiten que el dueño de la edificación ahorre costos, puesto que se gasta menos agua y electricidad. Existe también un mejor manejo en cuanto a los residuos sólidos. Así mismo,

aumenta la concentración o productividad de sus habitantes. Según Red Regenerativa, en Lima existen aproximadamente 180 edificios certificados como sostenibles, siendo LEED uno de los certificados más sugeridos. Otra organización que impulsa este tipo de desarrollo es el Perú Building Council (Perú GBC). GBC Perú tiene como objetivo promover la reducción de carbono a través de los edificios verdes. Para Francesca Mayer, Coordinadora Ejecutiva del Perú GBC, la mejor manera de construir los edificios ecológicos es integrar a todas las partes desde un inicio, generando sinergias positivas y ahorros de costos (El Comercio, 11 de septiembre de 2019). Uno de los proyectos impulsados por el gobierno peruano es “Mi vivienda verde”. Este programa promueve y facilita el acceso a viviendas que incluyan criterios de sostenibilidad en su diseño y construcción. El fondo del gobierno “Mi Vivienda” brinda un bono verde de hasta un 4% del valor de la subvención total (El Economista, 12 de diciembre de 2019).

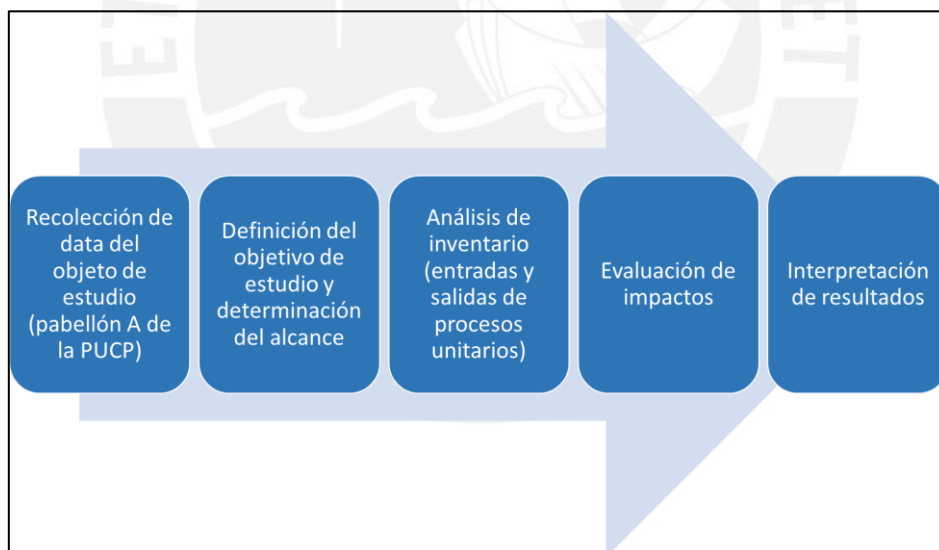
El hecho de hacer que la construcción sea una industria sostenible es todavía un reto que en distintas regiones del tercer mundo se está desarrollando. Existe la necesidad de incentivar y despertar el interés en aspectos relevantes de la aplicación de prácticas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente entre los gobiernos, profesionales, centros académicos y público en general. Como ejemplo se tienen a las grandes empresas constructoras, las cuales deben aceptar un proceso gradual en cuanto a la revolución de los paradigmas constructivos hacia diseños bioclimáticos en los sistemas arquitectónicos. Así mismo, las universidades y centros de investigación son de igual forma un gran potencial para el desarrollo y la promoción de tecnologías y materiales apropiados para el rubro constructivo. Su aporte puede ir más allá de las investigaciones que realicen, la educación en el ámbito de sostenibilidad es clave para formar profesionales que impulsen esta idea (Miranda et al., 2018).

### 3. METODOLOGÍA

La presente tesis tiene como objeto de estudio a una edificación educativa del campus PUCP, el Pabellón A – Aulario del Complejo de Innovación Académica. Esta edificación contiene ambientes destinados a la realización de clases de distintas facultades, además de eventos y cuenta con un área común usada como comedor. Para cumplir con los objetivos estipulados, se utilizará el método del LCA y a la vez el Software One Click LCA. Tanto el LCA como el software tienen conceptos y pasos a seguir en las normas ISO 14040 e ISO 14044. El acápite siguiente describe el proceso de un LCA de acuerdo a estas normas. En la Figura 4, se representan los pasos a seguir para realizar este estudio.

**Figura 4**

*Flujograma metodológico*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia en base a ISO 14040

#### 3.1. El análisis de ciclo de vida acorde a las normas ISO 14040 e ISO 14044

El Análisis de Ciclo de Vida es una metodología que ha sido estandarizada por ISO (International Organization for Standardization). Conforme la norma ISO 14040, el LCA aborda aspectos ambientales y los posibles impactos que se pueden dar en estos, a lo largo

del ciclo de vida de un producto. La norma incluye dentro del término “producto” a los servicios, por ejemplo, la construcción de edificaciones. La evaluación del estudio va desde la obtención de materia prima a través de la producción, el uso, el tratamiento final de la vida útil, el reciclaje y por último la eliminación final, por lo es conocido como “de la cuna a la tumba”.

A través del LCA, se elabora un inventario de las entradas y salidas de un sistema, para luego evaluar los impactos potenciales asociados a estas entradas y salidas. Como siguiente paso, se hace una interpretación de resultados de las fases del inventario y de los impactos relacionados con los objetivos de estudio (ISO, 2006a). La norma cubre dos tipos de estudio: el Análisis de ciclo de vida (LCA) y el Análisis del inventario del ciclo de vida (LCI), en el segundo caso se excluye la etapa de evaluación de impacto. En general, ambos tipos de estudios se pueden utilizar como parte de un proceso mayor de decisión integral (ISO, 2006a).

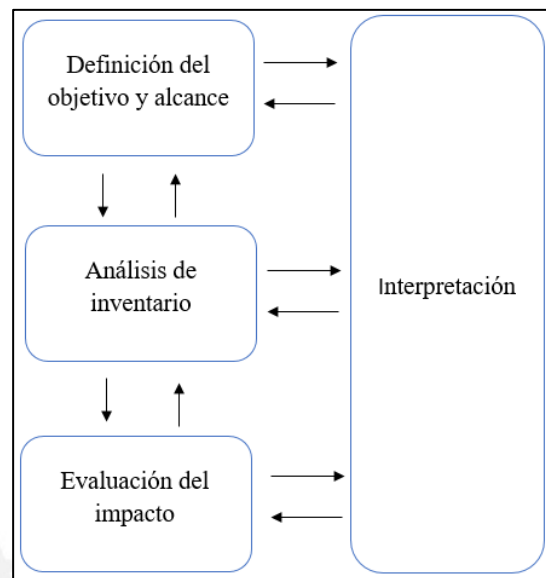
Adicionalmente a la norma ISO 14040, la norma ISO 14044 es indispensable para la aplicación de la misma, puesto que brinda los requisitos necesarios a tener en cuenta (ISO, 2006a).

### **3.1.1. Etapas del LCA**

Los estudios de LCA comprenden cuatro etapas: la definición del objeto y el alcance, el análisis de inventario, la evaluación de impactos y finalmente la interpretación de resultados. Las etapas del LCA se aprecian en la Figura 5, y se identifica que la fase de interpretación se encuentra presente de inicio a fin, puesto que se debe hacer un análisis detallado de cada fase para poder llegar a un resultado final.

## Figura 5

### Etapas del LCA



*Nota.* Fuente: Adaptado de ISO 14040:2006

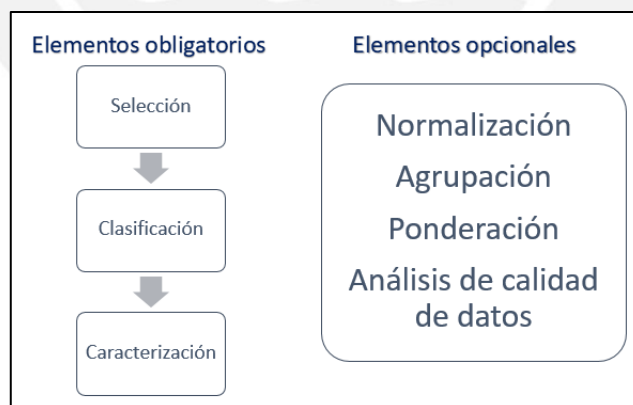
**Definición del objetivo y alcance:** Por ser la primera etapa de estudio, es muy importante para que el estudio se desarrolle de manera clara y eficaz. La finalidad de un LCA establece la aplicación prevista, los motivos por los cuales se realizará el estudio, el público esperado, al cual se le mostrarán las conclusiones y si estas estarán destinadas a ser usadas en afirmaciones de comparación destinadas a ser reveladas al público. Por otra parte, el alcance debe estar claramente definido para garantizar que la amplitud, profundidad y detalle de la investigación sean compatibles y suficientes para poder lograr los objetivos planteados (ISO, 2006a). El alcance aborda un elemento importante denominado la unidad funcional, la cual es la medida de la función del sistema de estudio, cuyo propósito principal es proporcionar una referencia de cómo se relacionan las entradas y salidas (ISO, 2006a). Para el presente caso de estudio, la unidad funcional será igual a “un metro cuadrado construido” y el alcance comprenderá las etapas de pre uso y uso.

**Análisis de inventario:** Supone una compilación de datos y métodos de cálculo para poder medir entradas y salidas relevantes para un sistema de un producto. El procedimiento de ejecutar un análisis de inventario resulta ser iterativo. Esto se debe a que, a medida que se van recopilando los datos y se conoce más sobre el sistema, se identifican nuevos requisitos o limitaciones en cuanto a los procesos de recolección de información, para que el fin del estudio pueda lograrse (ISO, 2006a).

**Evaluación del impacto de ciclo de vida (LCIA):** Según la ISO 14044, la evaluación del impacto ambiental es una fase del LCA que intenta comprender y evaluar el alcance y la importancia de los impactos ambientales durante el ciclo de vida de un producto. Esta fase consiste en la compilación de resultados de indicadores para diferentes categorías de impacto, que en conjunto representan el perfil LCIA del sistema del producto. Así mismo, la norma incluye elementos obligatorios y opcionales (ver Figura 6) (ISO, 2006b).

**Figura 6**

*Entradas y salidas de un sistema*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Interpretación de resultados:** La interpretación es aquella fase del LCA en la que los resultados obtenidos en la fase del inventario y el impacto obtenido en la evaluación se consideran en conjunto, o para los estudios del LCI solo el análisis del inventario. Esta

fase debe proporcionar resultados que sean consistentes con el objetivo y alcance estipulados, además de permitir llegar a conclusiones, explicar limitaciones y facilitar recomendaciones (ISO, 2006a).

Esta interpretación también está destinada a proporcionar un sistema fácilmente entendible, completo y consistente para poder presentar los fines del LCA, a partir del objetivo y la definición del alcance de estudio. Esta fase puede involucrar un proceso iterativo de revisión del alcance del LCA, además de la naturaleza y calidad de los datos incluidos de manera consistente con los objetivos de la investigación. Los resultados de la etapa de interpretación deben mostrar los resultados del elemento de evaluación (ISO, 2006a).

### **3.2. Utilización del software One Click LCA para el presente estudio**

Con el objeto de aplicar el análisis de ciclo de vida al presente caso de estudio, se usará el software One Click LCA, el cual fue desarrollado por Bionova Ltd (Design Builder, 2021). Este software posibilita al usuario calcular los impactos del ciclo de vida de la edificación estudiada en las categorías de impacto estándar y hacer una comparación de estos impactos con una construcción de línea base comparable (Aleksandrova et al., 2018). Así mismo, One Click LCA permite obtener el costo de ciclo de vida junto con la evaluación de ciclo de vida, con lo cual se pueden reducir costos e impactos ambientales del proyecto modelado (Are et al., 2019).

One Click LCA integra datos de la mayoría de plataformas EPD (Declaración ambiental de un producto) disponibles en todo el mundo. Estas EPD incluyen descripciones técnicas detalladas sobre productos de construcción, las cuales, para el caso de la UE cumplen con la norma EN 15804 y para el caso de América del Norte cumplen lo estandarizado en ISO 14040/14044. Para casos de uso en regiones donde aún no está disponible una base

de datos de LCA de construcción local completa disponible, se puede usar un método de compensación local para localizar los datos para conseguir resultados que coincidan con las condiciones de producción locales (One Click LCA, 2021).

Los materiales de construcción usados para la edificación de estudio deben agregarse al software como datos de entrada. Así mismo, se deben incluir las distintas estructuras presentes. Los tipos de materiales y estructuras que se incluyen son los siguientes: cimentaciones y subestructura, estructuras verticales y fachadas (incluidos muros externos, fachadas, columnas y estructuras verticales, muros internos y estructuras no portantes), estructuras horizontales: vigas, pisos y techos (losas de piso, techos, cubiertas de techos), además de otras estructuras y materiales, incluyendo escaleras ventanas y puertas. Los materiales que conforman la estructura requieren la siguiente información: cantidad (y tamaño si corresponde), transporte (distancia del lugar de abastecimiento y el lugar del proyecto, además de la forma de transporte, que puede ser camión, volquete, una combinación de ambos, etc.), así mismo, se requiere la vida útil del edificio (30-50 años, etc.) (Aleksandrova et al. 2018).

Para iniciar el proyecto, se necesita estar registrado en la página de One Click LCA. Una vez allí, como lo muestra la Figura 7 se debe iniciar un proyecto nuevo.

## Figura 7

### *Mi primer proyecto en One Click LCA*

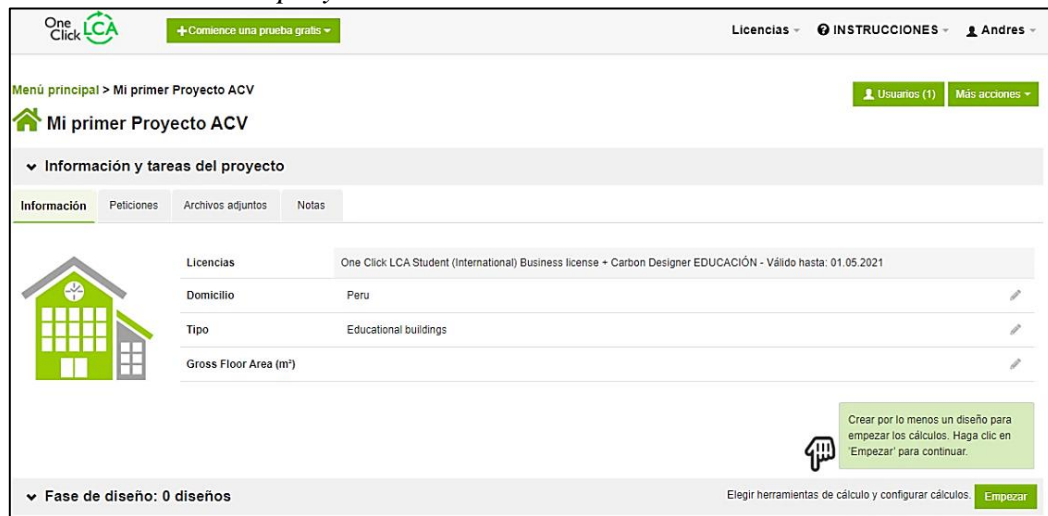


*Nota.* Fuente: One Click LCA

Luego de empezar por primera vez con el proyecto, se abre una interfaz donde se encuentra la información genérica del proyecto, mostrado en la Figura 8. En esta parte de la página se pueden modificar los datos generales del mismo, añadir archivos útiles para el análisis que se hará y además se puede compartir el proyecto con otras personas para que sean parte de este.

**Figura 8**

*Inicio del modelado del proyecto en One Click LCA*

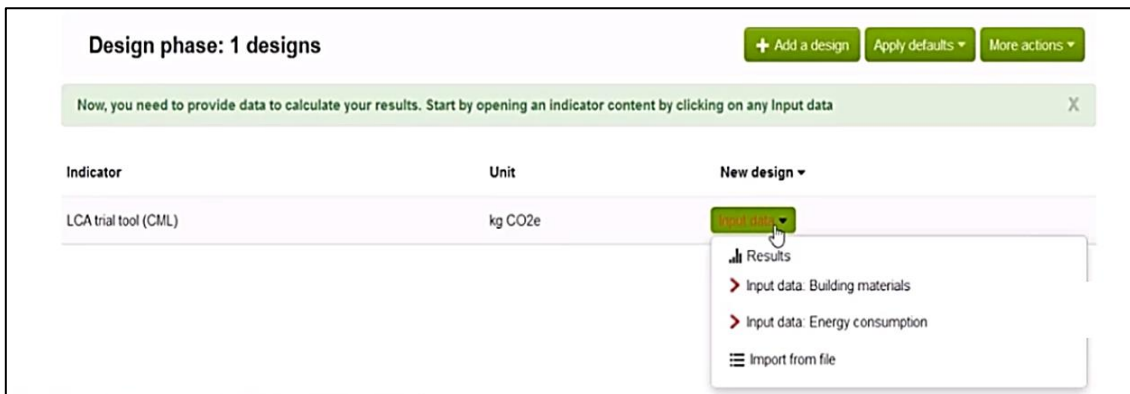


*Nota.* Fuente: One Click LCA

Para poder proceder con la adición de materiales de las distintas estructuras ya mencionadas anteriormente, se selecciona la opción de datos de entrada, donde se desglosan varias alternativas como datos de entrada: materiales de construcción, la energía consumida o los resultados. Se observa esta pestaña en la Figura 9.

**Figura 9**

*Datos de entrada para el proyecto*

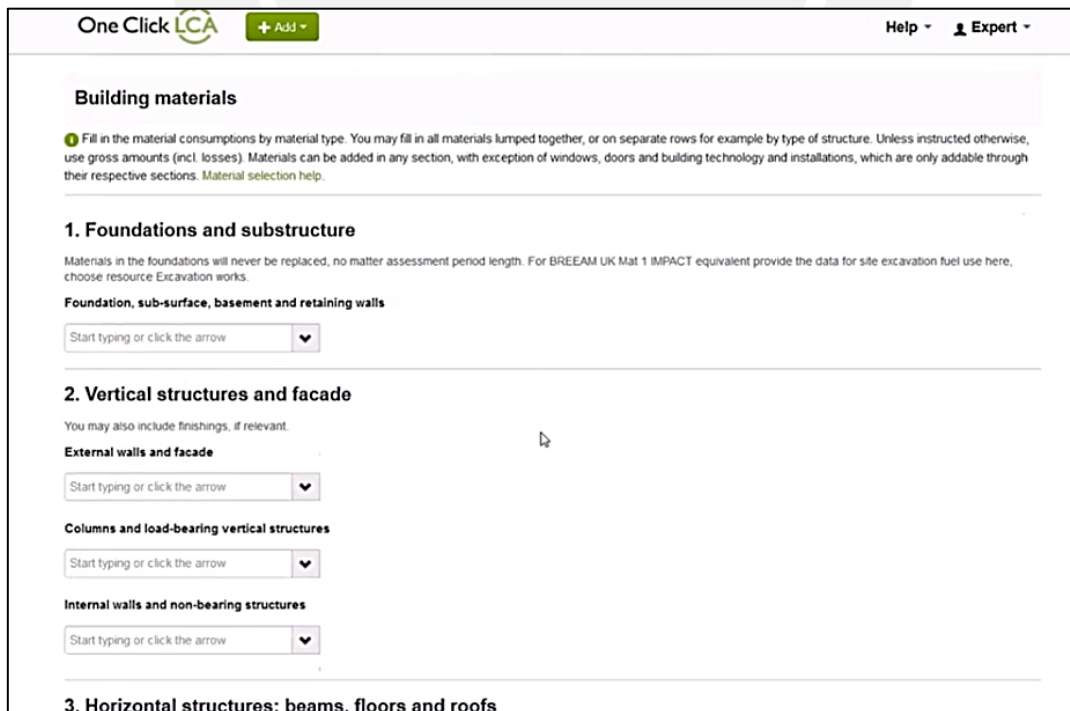


*Nota.* Fuente: One Click LCA

Al seleccionar, por ejemplo, la opción de materiales de construcción, se abre una página para añadir los distintos materiales que participan y sus características, ya mencionadas anteriormente. Esta sección se muestra en la Figura 10.

**Figura 10**

*Materiales de construcción como datos de entrada*

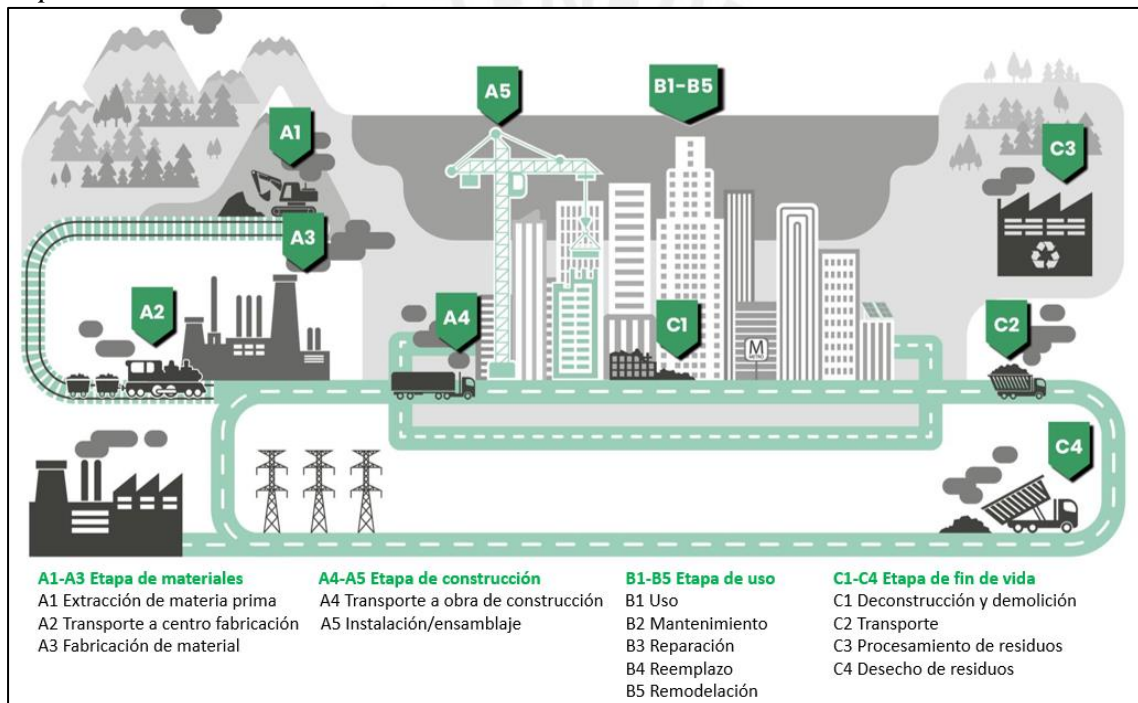


*Nota.* Fuente: One Click LCA

Así como se tiene la opción de ingresar los materiales de construcción, también se tienen las opciones para ingresar los consumos de energía y agua anuales, escenario de obra (que incluye características de la fase de construcción), superficie de construcción y periodo de cálculo. Los resultados obtenidos se muestran en tablas y gráficas, los cuales se muestran para cada etapa considerada por el software e indicadores ambientales. Las etapas de ciclo de vida presentes en el One Click LCA se muestran en la Figura 11.

**Figura 11**

*Etapas de ciclo de vida en One Click LCA*



*Nota.* Fuente: One Click LCA

La Figura 12 muestra un ejemplo de resultados. Entre los indicadores incluidos se encuentran el calentamiento global, acidificación, eutrofización, entre otros.

**Figura 12**

*Resultados del análisis*

**LCA trial tool with limited information**

\* Trial tools do not enable access to all features. Features with restricted access include benchmarking, detailed analyses and hotspot view, source listing, report generation as well as the data import from Building Information Models, Excel and other data sources.

Sector	Global warming kg CO2e	Acidification kg SO2e	Eutrophication kg PO4e	Ozone depletion potential TRIAL*	Formation of ozone of lower atmosphere TRIAL*	Depletion of nonrenewable energy TRIAL*
A1-A3 Construction Materials	4,23E4	1,79E2	1,48E1	0E0	0E0	0E0
A4 Transportation to site	4,32E1	2,03E-1	4,33E-2	0E0	0E0	0E0
B1-B5 Maintenance and material replacement	3,62E4	1,65E2	1,3E1	0E0	0E0	0E0
B6 Energy use						Hide empty
C1-C4 Deconstruction	2,95E2	1,03E0	2,25E-1	0E0	0E0	0E0
<b>Total</b>	<b>7,89E4</b>	<b>3,45E2</b>	<b>2,8E1</b>	<b>0E0</b>	<b>0E0</b>	<b>0E0</b>
	Show graph	Show graph	Show graph	Show graph	Show graph	Show graph

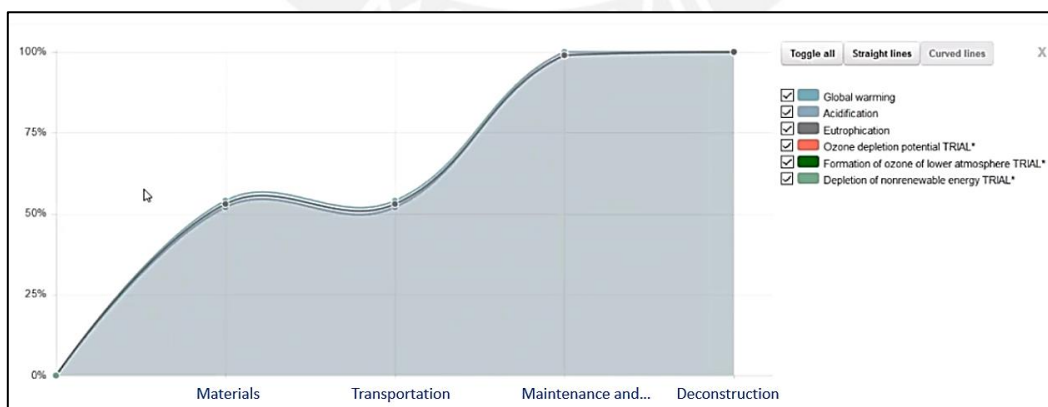
\* Please note, Only acidification and eutrophication represent actual data, all other data is mocked up by mass of materials in this trial application.

Nota. Fuente: One Click LCA

En la Figura 13 se tiene un ejemplo de una gráfica que resulta del análisis realizado en el software, donde se muestra las emisiones generadas a lo largo de todo el ciclo de vida del proyecto. Los resultados muestran en porcentajes la cantidad de emisiones por cada dato de entrada. Con esto se puede identificar que material o recurso genera más impacto.

**Figura 13**

*Emisiones durante toda la vida del proyecto*



Nota. Fuente: One Click LCA

## **4. CASO DE ESTUDIO**

Dentro del entorno peruano, son cada vez más las edificaciones que obtienen certificaciones internacionales, tales como LEED. Un claro ejemplo son las universidades que se suman a esta iniciativa, construyendo edificios dentro de sus campus con miras a certificaciones que garanticen la sostenibilidad ambiental durante su construcción y ciclo de vida. A lo largo de los últimos años, se vienen implementando nuevos espacios académicos certificados con LEED en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Algunos de ellos son el Complejo de Innovación Académica, la Nueva Biblioteca, el Edificio de Derecho y el Complejo Centenario (Clima de Cambios PUCP, 2023).

### **4.1. Descripción del caso de estudio**

Para el presente estudio se eligió el Aulario del Complejo de Innovación Académica-Pabellón A, certificado con LEED. Está ubicado dentro del campus PUCP, como se muestra en la Figura 14, en el punto 1. La edificación cuenta con distintos ambientes, incluidos: salones para clase, baños, un auditorio, zona de almacenamiento, recepción y estacionamientos en los sótanos.

## Figura 14

### Ubicación del pabellón A dentro del campus PUCP



*Nota.* Fuente: PUCP

Los trabajos de construcción del nuevo pabellón, conjuntamente con el Complejo de Innovación Académica (CIA) iniciaron en junio de 2013 y finalizaron en junio del 2014. La idea de estas nuevas construcciones era de proporcionar espacios académicos más modernos para la comunidad universitaria, así como incluir ambientes para interactuar entre estudiantes o docentes fuera de clases, teniendo una idea similar a la del edificio llamado “Tinkuy”. El Aulario alcanzó la certificación LEED en el nivel Oro en la categoría Nueva Construcción, el grado más alto alcanzado por un edificio dentro de una universidad en el Perú (PuntoEdu, 2015). La certificación fue otorgada a la edificación el 09 de marzo de 2015. El edificio educativo permite el máximo aprovechamiento de la luz natural en cada espacio (54 aulas y 6 zonas de descanso en total), llegando a ahorrar un 52% en el consumo eléctrico. Además, el edificio proporciona ventilación natural en las aulas, baños, áreas de descanso y pasillos, lo que ayuda a evitar la utilización de aire acondicionado. Se llega a ahorrar hasta un 42% del consumo de agua por la colocación de accesorios que posibilitan la eficiencia del mismo. Como dato adicional, el

65% de los materiales empleados en los acabados para la construcción del edificio son de madera certificada FSC (Clima de Cambios PUCP, 2021). En la Figura 15 se muestra una vista panorámica del edificio.

**Figura 15**

*Aulario del Complejo de Innovación - Pabellón A*



*Nota.* Fuente: Punto Edu PUCP

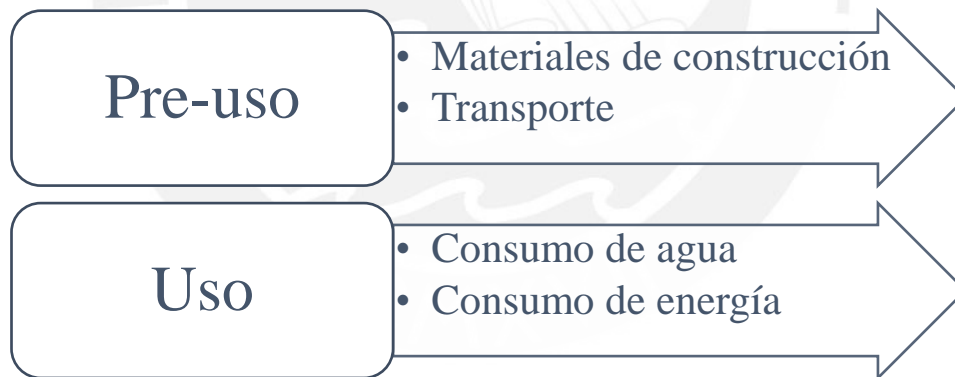
El área construida del aulario es de 17 800m<sup>2</sup>, mientras que el área total del sitio dentro del límite del proyecto LEED es de 4 084.45 m<sup>2</sup>, siendo los ambientes usados para distintos fines como: clases, ponencias, conferencias, comedor, talleres, etc. Sus 54 modernas aulas están equipadas con tecnología avanzada para que las actividades sean trabajadas de la mejor manera (Fosca, 2014). El sistema estructural está formado por un sistema dual tipo II, el cual combina muros estructurales con columnas. La arquitectura fue diseñada de tal manera que el nuevo espacio revolucionó el aprendizaje hacia los alumnos, haciéndolo más tecnológico. La información referente al objeto de estudio se recolectaron de documentos que detallan la certificación del pabellón, así como de la valorización del mismo, usando los metrados detallados allí.

## 4.2. Límites del sistema de estudio

Para realizar el estudio de análisis de ciclo de vida, se deben establecer límites del sistema, los cuales ayudarán a definir los procesos unitarios que se incluirán en el procedimiento. Para el presente caso, se están considerando las etapas de pre-uso y uso, que a su vez tienen subetapas de acuerdo al software. Las etapas consideradas incluyen lo siguiente: pre uso (materiales de construcción y transporte) y uso (consumos de agua y energía). En este caso, se está obviando la etapa de fin de vida. Un punto importante a mencionar es que tampoco se está considerando la etapa de construcción, puesto que no se tienen datos de entrada de consumos de energía y agua en la obra ni tampoco residuos generados por la misma. En la figura 16 se muestran las etapas incluidas en el presente estudio.

**Figura 16**

*Etapas de ciclo de vida para el presente estudio*



*Nota.* Fuente: propia

Para el sistema elegido, se debe resaltar que habrá un flujo de entrada, dado por energía y recursos utilizados, y un flujo de salida, que son los desechos provocados y las emisiones al aire.

### 4.3. Inventario del sistema

El inventario del sistema se realizó, para cada una de las etapas, considerando la valorización de obra, donde se pueden identificar los metrados realizados en las distintas especialidades, como arquitectura, estructuras, instalaciones eléctricas, instalaciones sanitarias, etc. Así mismo, se consideraron los créditos logrados por la edificación, que involucran utilización de materiales especiales que ayudan a que el proyecto tenga la certificación LEED. De esta manera, se tiene una diferencia marcada con respecto a una edificación convencional. Con respecto al presente proyecto, se evaluó como edificio nuevo, por lo que se calificó usando LEED para nuevas construcciones y renovación mayor (LEED NC). Para la etapa de uso, se consideraron los consumos de agua y energía del campus y así, tener el consumo estimado para el pabellón.

En la Tabla 3 se muestran las características del edificio certificado con LEED que nos permiten identificar los materiales del primer modelo y la Tabla 4 resume los créditos seleccionados para poder realizar el inventario.

**Tabla 3**

*Características del pabellón A que aportan a su certificación*

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>EFICIENCIA DEL AGUA</b>	Reducción del consumo de agua en los accesorios, siendo 42% en el presente proyecto
<b>ENERGÍA Y ATMÓSFERA</b>	Diseño orientado a optimización del uso energético, con iluminación de calidad y reducida densidad de potencia. Se usa además ventilación y acondicionamiento natural
<b>MATERIALES Y RECURSOS</b>	Se consideran materiales de producción local. Los impactos ambientales asociados con el transporte de materiales de construcción pesados son considerables, por lo que más del 30% de materiales usados fueron fabricados en Perú

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
<b>CALIDAD AMBIENTAL INTERIOR</b>	Se consideran materiales como adhesivos, selladores, pinturas y revestimientos para construcción y acabados con cero o muy poca emisión de gases compuestos orgánicos volátiles (COV)
<b>INNOVACIÓN EN DISEÑO</b>	El proyecto posee un diseño ejemplar por los créditos de Maximizar el Espacio Abierto (Maximize Open Space)

*Nota.* Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4**

*Créditos logrados por el pabellón A de la PUCP*

<b>Crédito</b>	<b>Descripción</b>
EA1: Optimización del rendimiento de la energía	Se obtiene al lograr niveles crecientes del desempeño de energía más allá del estándar del prerrequisito, con el fin de reducir los impactos ambientales y económicos relacionados con el uso excesivo de energía.
EA4: Gestión mejorada de refrigerantes	Para lograr los créditos en esta categoría, se confirmó que el edificio cuenta con un equipo HVAC&R que cumple con el máximo umbral descrito en el crédito obtenido. Los sistemas de extinción de incendios en el edificio del proyecto no utilizan sustancias que agotan la capa de ozono (CFC, HCFC o halones).
EA6: Energía ecológica	A través de este crédito, se alienta el desarrollo y uso de tecnologías de energía renovable de red sin provocar ningún tipo de contaminación. Para el proyecto, la empresa Carbon Solutions brinda energía ecológica suficiente para obtener el crédito.
IDc1.1 y 1.2: Innovación en diseño	El proyecto cumple con los requisitos de desempeño ejemplar, que consiste en superar el nivel de desempeño que se requiere en un crédito LEED para nuevas construcciones. Para estos casos se consideraron la reducción del consumo de agua y la optimización de la energía.
IEQ 4.1: Adhesivos y selladores	Busca reducir la cantidad de contaminantes del aire interior que tengan mal olor, que sean irritantes y/o perjudiciales para el confort y el bienestar de los instaladores y ocupantes. Para el caso del proyecto, se usaron materiales con bajo contenido de COV (compuestos orgánicos volátiles)
IEQ 4.2: Pinturas y revestimientos	Busca reducir la cantidad de contaminantes del aire interior que tengan mal olor, que sean irritantes y/o perjudiciales para el confort y el bienestar de los instaladores. Para el presente caso, se usaron materiales con bajo contenido de COV.

<b>Crédito</b>	<b>Descripción</b>
IEQ 6.1: Controlabilidad de los sistemas de encendido	Crédito que proporciona un alto nivel del control de los sistemas de iluminación por parte de los ocupantes individuales o grupos en espacios para varios ocupantes (aulas o salas de conferencias). Promueve productividad, confort y bienestar de los ocupantes.
Prerrequisito WE 1: Reducción del uso del agua en un 20%	Busca aumentar la eficiencia del agua dentro de las edificaciones, con el fin de disminuir la carga de suministro de agua municipal y sistemas de aguas residuales.
WE 3: Reducción del uso de agua	El presente crédito se logra con una reducción del uso del agua entre el 30% y 40%. Se cuenta con un porcentaje de reducción del uso de agua en todos los accesorios igual al 43%, de acuerdo a una comparación entre el volumen anual total calculado de uso de agua de artefactos referenciales versus el volumen anual total calculado del uso del agua de los rendimientos de los artefactos.
MR 5: Materiales regionales	Crédito cuyo objetivo es aumentar la demanda de materiales y productos en el edificio que se extraen y fabrican dentro de la región de emplazamiento. Con esto se busca apoyar el uso de recursos autóctonos y además se reducen los impactos ambientales que se generan por el transporte de materiales. Para el presente caso, como se indicó anteriormente, los materiales o productos extraídos, recolectados o recuperados, así como fabricados provienen de un radio de 500 millas alrededor del sitio del proyecto.
MR 7: Madera certificada	Crédito cuyo objetivo es promover el uso de materiales renovables para la gestión forestal responsable con el medio ambiente. El presente proyecto cuenta con madera certificada por el Consejo de Administración Forestal (FSC por sus siglas en inglés).

*Nota.* Fuente: Scorecard Aulario

#### **4.3.1. Selección de materiales**

Para la selección de materiales se tiene en cuenta las características descritas anteriormente. En primer lugar, se muestran los materiales elegidos para la partida de estructuras a partir de la valorización de obra. Seguidamente, los materiales seleccionados a partir de los créditos obtenidos por la edificación. Por último, se tienen los consumos

de agua y energía del pabellón. Para la elección de materiales se toman en cuenta las consideraciones presentadas en el One Click LCA.

#### 4.3.1.1. Estructura

Para la especialidad de estructuras, se consideraron todas las cantidades de concreto y acero. El software One Click LCA presenta algunas consideraciones para la entrada de datos que permitirán obtener los resultados necesario, las cuales se presentan a continuación:

##### I. Selección de recursos de concreto

Para el caso de entradas de datos de concreto, se tienen resistencias definidas por el software para cada tipo de concreto disponible. En la Figura 17 se presentan las resistencias del concreto que ofrece One Click LCA.

**Figura 17**

*Clases de resistencia del concreto*

Tipo de hormigón	Clase de fuerza	Usado generalmente para:
C20 / GEN 3	20 Newton (mPa) / 28 días de fuerza	Cimentaciones para grandes muros, garajes, casas y ampliaciones
C25 / ST 2	25 Newton (mPa) / 28 días de fuerza	Zapatas, cimentaciones y bases reforzadas para casas y ampliaciones
C30 / PAV1 / ST 3	30 Newton (mPa) / 28 días de fuerza	Construcción de pavimento, pavimentación de perreras externas y posiciones duras reforzadas
C35 / PAV2	35 Newton (mPa) / 28 días de fuerza	Cimentaciones de balsa, pilotes, losas y pasos externos, y bases reforzadas para edificios comerciales
C40	40 Newton (mPa) / 28 días de fuerza	Construcción de vigas estructurales y de soporte zapatas y cimientos, obras viales

*Nota.* Fuente: One Click LCA

Para el presente proyecto, se tienen resistencias para el concreto de 210, 280 y 350 kg/cm<sup>2</sup>, por lo que es necesaria una aproximación a los datos disponibles para poder hacer los cálculos. En la Tabla 5 se aprecian las resistencias usadas en el software, a partir de las equivalencias realizadas con las resistencias empleadas en el pabellón A.

**Tabla 5**

*Equivalencia de resistencias de concreto*

<b>Resistencias de concreto del pabellón A</b>	<b>Resistencias equivalentes en el One Click LCA</b>
Concreto f'c = 210 kg/cm <sup>2</sup>	C20/GEN 3
Concreto f'c = 280 kg/cm <sup>2</sup>	C25/ST 2
Concreto f'c = 350 kg/cm <sup>2</sup>	C35/PAV 2

Nota. Fuente: propia

Se usaron las resistencias aproximadas, puesto que ninguna resistencia disponible era igual a las resistencias reales del concreto usado en el proyecto. Para el concreto premezclado elegido, se estimó una distancia aproximada de 21 km, desde la planta de concreto premezclado Unicon ubicada en la Antigua Panamericana Sur 15803 hasta la Pontificia Universidad Católica del Perú, ubicada en la Av. Universitaria 1801, San Miguel.

## **II. Selección de recursos metálicos**

### **Acero**

Para el caso del acero, los impactos ambientales dependerán del grado de este, usado en el concreto como refuerzo. Se debe tener el tipo correcto de acero y la cantidad pertinente para tener un resultado razonable. Desde el punto de vista del impacto ambiental, existen tres tipos principales de acero de refuerzo en el concreto: acero de refuerzo con acero reciclado, acero de alta resistencia y acero inoxidable. Para otros usos del acero, algunas

opciones son: acero galvanizado en caliente, acero laminado en caliente o acero conformado en frío.

Para el caso del acero, como proveedor se eligió a Aceros Arequipa, que cuenta con su planta procesadora en la Panamericana Sur Km. 240, provincia de Pisco, departamento de Ica, teniendo como destino final también la PUCP. La distancia estimada es de 240 km. Se muestra en la Tabla 6 los materiales seleccionados para la especialidad de estructuras del presente estudio.

**Tabla 6**

*Materiales seleccionados para la especialidad de estructuras*

<b>ESTRUCTURAS</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>CANTIDAD (m3)</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>CANTIDAD (kg)</b>
Cimentación muros	Concreto+pedra grande	47.71	Acero de refuerzo	3 52.97
	Concreto f'c=280 kg/cm <sup>2</sup>	130.82		
Cimentación columnas	Concreto+pedra grande	21.87	Acero de refuerzo	25 277.95
	Concreto f'c=280 kg/cm <sup>2</sup>	440.94	Acero de refuerzo fy=4200	735.71
	Concreto f'c=280 kg/cm <sup>2</sup>	8.53	kg/cm <sup>2</sup>	
Losa sin refuerzo	Concreto f'c=210 kg/cm <sup>2</sup>	474.9	Acero de refuerzo	50 469.8
Columnas	Concreto f'c=280 kg/cm <sup>2</sup>	213.9		
Placas (muros de contención)	Concreto f'c=280 kg/cm <sup>2</sup>	1 202.43	Acero de refuerzo	84 868.78
Losas macizas (techo 1° sótano)	Concreto f'c=210 kg/cm <sup>2</sup>	1 055.1	Acero de refuerzo	91 434.3

<b>ESTRUCTURAS</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>CANTIDAD (m3)</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>CANTIDAD (kg)</b>
Losas macizas (nivel de aislamiento)	Concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$	68.43	Acero de refuerzo	9 937.15
Losas postensadas	Concreto $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$	1 406.6	Acero de refuerzo	6 8226.7
Cámara de bombeo	Concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$	7	Acero de refuerzo $f_y=4200$ $\text{kg/cm}^2$	490
Trampas de grasas	Concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$	1.4	Acero de refuerzo $f_y=4200$ $\text{kg/cm}^2$	98
Ductería enterrada- Monóxido	Concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$	146.41	Acero de refuerzo $f_y=4200$ $\text{kg/cm}^2$	8 784.71
Columnas	Concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$	302.9	Acero de refuerzo	9 0872.9
	Concreto $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$	138.2		
Placas (sector 1)	Concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$	36.52	Acero de refuerzo	2 921.6
Refuerzo sector 1	Concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$	1 165.9	Acero de refuerzo	106 198
Losas macizas (inc. Vigas)	Concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$	518.43	Acero de refuerzo	35 255.15
Escaleras de concreto	Concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$	173.8	Acero de refuerzo $f_y=4200$ $\text{kg/cm}^2$	1 5421.21

*Nota.* Fuente: Adaptado de valorización del aulario

Los materiales de la especialidad de estructuras son los mismos para ambos modelos.

### 4.3.1.2. Materiales según créditos de la edificación

Los materiales seleccionados y descritos en la Tabla 7 tienen como base los créditos logrados por el pabellón A, conjuntamente con la valorización.

**Tabla 7**

*Materiales seleccionados a partir de los créditos de la certificación*

<b>CRÉDITO</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>		<b>CANTIDAD</b>	
<b>EAc4</b>	Gas refrigerante R410a (tipo de equipo: aire acondicionado o bomba de calor)		12 unidades	
	Gas refrigerante R407c (tipo de equipo: aire acondicionado empaquetado o bomba de calor)		1 unidad	
	Gas refrigerante R410a (tipo de equipo: aire acondicionado o bomba de calor)		2 unidades	
<b>IEQ 4.1</b>	Adhesivos y selladores para piso	Pegamento blanco	12 256.2 kg	
		Fragua premium	7 660.13 kg	
		Sellador de porcelanato	27 576.45 lt	
	Adhesivos y selladores para otros elementos	Adhesivos de construcción multiusos, marca CELIMA	Pegamento gris	4 682.08 kg
		Adhesivos de construcción multiusos, marca CELIMA	Pegamento en pasta	4 682.08 kg
		Adhesivos de construcción multiusos, MICROCEMENTO	Primer T-CON	16 855.47 lt
<b>IEQ 4.2</b>	Pintura, revestimiento o imprimador plano para interiores	CPP	Imprimante	551.28 lt
		CELIMA	Primer acrílico	187.28 lt
		VENCEDOR	Látex acrílico	561.68 lt
<b>WEp1</b>	Accesorios para baño	Válvula de fluxómetro para inodoro de alta eficiencia abierta sin retención-1.28gpf marca TOTO	95 unidades	
		Inodoro con fluxómetro incorporado marca TOTO	95 unidades	
		Urinario de alta eficiencia de 1/8GPF marca TOTO	41 unidades	
<b>MRc7</b>	Tarima flotante de madera shihuahuaco (código FSC w11.7)		290 m2	
	13 puertas simples, 1 puerta dobley paneles con 20 marcos (puertas código FSC W11.1)			
	22 puertas de 1.00x2.10m, 1 puerta de 0.60x2.40m y 50 puertas de 1.20x2.80m (código FSC W11.1)			

*Nota.* Fuente: Adaptación propia

Muchas de las cantidades de los materiales de la figura anterior se hallaron a partir de los rendimientos de cada uno de ellos y el metrado de la valorización. Como ya se ha mencionado anteriormente, para los materiales seleccionados, se tuvieron que elegir dentro del programa One Click LCA aquellos disponibles y de características similares a los de la Tabla 7. En la Tabla 8, se detallan los materiales de entrada que se usaron, seleccionados a partir de la lista preliminar, con sus respectivos materiales modelo que se usaron dentro del software.

**Tabla 8**

*Materiales elegidos dentro del software One Click LCA para el primer modelo*

<b>MATERIALES ORIGINALES</b>		<b>MATERIALES ELEGIDOS DENTRO DEL ONE CLICK</b>	
Gas refrigerante R410a (tipo de equipo: aire acondicionado o bomba de calor)		Bomba de calor de aire, 2,2 kW, R410A	
Adhesivos y selladores para piso	Adhesivos para baldosas de cerámica, marca CELIMA	Pegamento blanco	Adhesivo cementoso para baldosas y piedras cerámicas blanco, Keraquick Maxi S1 (MAPEI)
		Fragua premium	Adhesivo cementoso para baldosas y piedras cerámicas blanco, Keraquick Maxi S1 (MAPEI)
		Sellador de porcelanato	Adhesivo cementoso para baldosas y piedras cerámicas blanco, Keraquick Maxi S1 (MAPEI)
Adhesivos y selladores para otros elementos	Adhesivos de construcción multiusos, marca CELIMA	Pegamento gris Pegamento en pasta	Adhesivo cementoso para baldosas y piedras cerámicas gris, Keraquick Maxi S1 (MAPEI)
	Adhesivos de construcción multiusos, MICROCEMENTO	Primer T-CON	Adhesivos para sellado de construcciones. Fabricante: DBC/IVK/Vdl
Pintura, revestimiento o imprimador plano para interiores	CPP	Imprimante	Pintura de bajo contenido de compuestos orgánicos volátiles (COV) (AkzoNobel)
	CELIMA	Primer acrílico	Pintura de bajo contenido de compuestos orgánicos volátiles (COV) (AkzoNobel)
	VENCEDOR	Látex acrílico	Pintura de bajo contenido de compuestos orgánicos volátiles (COV) (AkzoNobel)

Accesorios para baño	Inodoro con fluxómetro incorporado marca TOTO	Artículos sanitarios de cerámica vítrea, inodoro con fluxómetro (Kholer Co.)
	Urinario de alta eficiencia de 1/8GPF marca TOTO	Artículos sanitarios de cerámica vítrea, urinario con fluxómetro (Tecnología de Agua LIXIL)

*Nota.* Fuente: Adaptación propia

Cabe resaltar que el tiempo de vida del edificio se consideró igual a 50 años, dato que será considerado para el cálculo de resultados. Para el caso de la edificación convencional, se emplearon los materiales mostrados en la Tabla 9.

**Tabla 9**

*Materiales elegidos dentro del software One Click LCA para el segundo modelo*

<b>MATERIALES PARA EDIFICIO SIN CERTIFICAR</b>		<b>MATERIALES ELEGIDOS DENTRO DEL ONE CLICK</b>	
	Gas refrigerante 134A		Bomba de calor de aire de 5.24 kW
Adhesivos y selladores para piso	Adhesivos para baldosas de cerámica, marca TOPEX	Pegamento blanco	Adhesivo para baldosas, media alemana, clase A, a base de dispersión
		Fragua premium	Adhesivo para baldosas, media alemana, clase A, a base de dispersión
		Sellador de porcelanato	Adhesivo para baldosas, media alemana, clase A, a base de dispersión
Adhesivos y selladores para otros elementos	Adhesivos de construcción multiusos, marca TOPEX	Pegamento gris	Adhesivo para baldosas, media alemana, clase A, a base de dispersión
		Pegamento en pasta	
Pintura, revestimiento o imprimador plano para interiores	Adhesivos de construcción multiusos, MICROCEMENTO	Primer T-CON	Adhesivo para baldosas, media alemana, clase A, a base de dispersión
		MAJESTAD	Pintura acrílica, resistente a UV, para uso interior y exterior.
		CHEMA	Acabado para uso en superficies exteriores de madera. Marca Dulux Trade
	CPP	Látex acrílico	Acabado para uso en superficies exteriores de madera. Marca Dulux Trade
Accesorios para baño	Inodoro convencional marca TRÉBOL		Kit WC de acero (con mecanismo y asiento)

---

Urinario convencional marca  
TRÉBOL

Sanitarios de cerámica vítrea:  
urinario con fluxómetro. Urinario  
Pintbrook serie 6002

---

*Nota.* Fuente: Adaptación propia

Para el caso de la misma edificación pero sin las medidas LEED, se tomaron como base la lista de los mismos materiales usados. Sin embargo, se escogió dentro de la base de datos del One Click LCA materiales que no presenten características eco-amigables, como materiales con emisiones de COV o artefactos con mayores flujos de salida (para el caso de los aparatos sanitarios) que los materiales del edificio LEED.

#### **4.3.1.3. Consumo de energía y agua**

Los consumos de agua y energía para el pabellón A son valores estimados, puesto que no se tienen disponibles estos datos exactos. Para esta estimación, se trabaja con los datos brindados por el portal web de Clima de Cambios PUCP(2020), estos datos pertenecen a los consumos de agua y energía de todo el campus en el año 2016. Para el caso de agua, se tienen los datos del consumo humano para ese año en m<sup>3</sup>; mientras que para el caso de energía, se tiene el consumo en kWh. Para estimar el consumo del pabellón A, primero se tomará en cuenta las áreas construidas del pabellón y del campus y así tener una proporción de áreas entre ambos datos. El área construida del campus, considerando área construida por edificios y por casetas es 204 006 m<sup>2</sup> (PUCP, 2020). Segundo, se tendrá el consumo del modelo sin certificar usando el porcentaje mencionado, el cual se aplicará a los datos de consumos totales. Para el modelo certificado, se toman como base los datos mencionados anteriormente de ahorro energético del 52% y ahorro de consumo de agua del 42%, con lo cual se hallan los consumos estimados del mismo. En la Tabla 10 se presentan las áreas mencionadas con el porcentaje que representa el área construida del pabellón A y los consumos de ambos modelos.

**Tabla 10***Consumos estimados del pabellón A*

	Campus	Pabellón A	
		Certificado	Sin certificación
Área construida (m <sup>2</sup> )	204 006	17 800	
% de área del pabellón A respecto al campus		8.7	
Consumo de energía en el 2016 o (KWh)	9 230 112.4	388 107.8	808 558
Consumo de agua en el 2016 (m <sup>3</sup> )	164 894	8 377.9	14 445

*Nota.* Fuente: Elaboración propia

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Modelamiento del edificio certificado a través del One Click LCA

Para el caso del edificio certificado, en el capítulo anterior se describieron los materiales y recursos de energía y agua elegidos como datos de entrada para el modelamiento. Estos datos, como ya se mencionó anteriormente, hacen que el edificio cumpla con los créditos requeridos para lograr la certificación LEED.

#### 5.1.1. Cuantificación de los impactos ambientales según los resultados del modelo

Según el resultado del análisis de ciclo de vida elaborado por One Click LCA, se tienen datos obtenidos para distintas categorías de impacto con sus respectivos valores totales y por metro cuadrado de área construida, los cuales se presentan en la Tabla 11.

**Tabla 11**

*Categorías de impacto y resultados para el edificio certificado a lo largo de su ciclo de vida*

<b>Categorías y cantidades</b>	<b>TOTAL</b>	<b>Total por m<sup>2</sup> construido</b>
<b>Uso total de energía primaria (MJ)</b>	$1.95 \times 10^8$	$1.09 \times 10^4$
<b>Calentamiento global (kg CO<sub>2</sub> eq)</b>	$9.78 \times 10^6$	$5.5 \times 10^2$
<b>Acidificación (kg SO<sub>2</sub> eq)</b>	$2.33 \times 10^4$	$0.013 \times 10^2$
<b>Eutrofización (kg PO<sub>4</sub> eq)</b>	$4.29 \times 10^3$	$0.0024 \times 10^2$
<b>Potencial de agotamiento de la capa de ozono (kg CFC-11 eq)</b>	$9.02 \times 10^{-1}$	$5.07 \times 10^{-5}$
<b>Formación de ozono en la atmósfera inferior (kg Ethenee)</b>	$1.57 \times 10^3$	$8.8 \times 10^{-2}$

*Nota.* Fuente: Elaboración propia

Como primer indicador ambiental se tiene el consumo de energía primaria, cuyo valor obtenido es de  $1.95 \times 10^8$  MJ. Los resultados muestran que la etapa de energía operativa es la que más aporta a este indicador, con un porcentaje de 81.4%. Seguidamente, con un porcentaje de 14.9%, se tiene la etapa de producción de materiales. Por último, las etapas que menos aportan son las de consumo de agua y transporte de materiales, con porcentajes de 1.3% y 0.6% respectivamente. Así mismo, se tiene el resultado por metro cuadrado construido, equivalente a  $1.09 \times 10^4$  MJ. Uno de los materiales que más demanda consumo de energía es el cemento, como se mencionó en la introducción; esta energía es utilizada para producir altas temperaturas que calientan la caliza (aprox. 1500 °C) (Bullis, 2012).

Como segundo indicador ambiental se tiene el potencial de calentamiento global. Para el presente proyecto, se tiene un valor total de  $9.78 \times 10^6$  kg de CO<sub>2</sub> equivalente. La etapa que más aporta a este indicador es la energía operativa, con un porcentaje de 68.5%.

Seguidamente, se tiene la etapa de producción de materiales, la cual aporta 28.1%. El consumo de agua durante la etapa de uso aporta un total de 1.3%. Por último, la etapa de transporte de materiales un 0.7%. El resultado por metro cuadrado construido equivale a  $5.5 \times 10^2$  kg de CO<sub>2</sub>.

Como tercer indicador ambiental se tiene la acidificación, cuyo valor para el presente proyecto es de  $2.33 \times 10^4$  kg de SO<sub>2</sub> equivalente. Los resultados evidencian que la etapa de energía operativa es la que más aporta a este indicador, con un porcentaje de 60.1%. Seguidamente, con un porcentaje de 34.5%, se tiene la etapa de producción de materiales. Por último, las etapas que menos aportan son las de consumo de agua y transporte de materiales, con porcentajes de 2.9% y 0.5% respectivamente. Así mismo, se tiene el resultado por metro cuadrado construido, equivalente a  $0.013 \times 10^2$  kg SO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>.

Como cuarto indicador ambiental se tiene la eutrofización. Para el presente proyecto, se tiene un valor total de  $4.29 \times 10^3$  kg de PO<sub>4</sub> equivalente. La etapa que más aporta a este indicador es la energía operativa, con un porcentaje de 59.7%. Seguidamente, se tiene la etapa de producción de materiales, con un aporte de 28.9%. El consumo de agua durante la etapa de uso aporta un total de 7.8%. Por último, la etapa de transporte de materiales aporta un 1.0%. El resultado por metro cuadrado construido equivale a  $0.0024 \times 10^2$  kg PO<sub>4</sub> eq/m<sup>2</sup>.

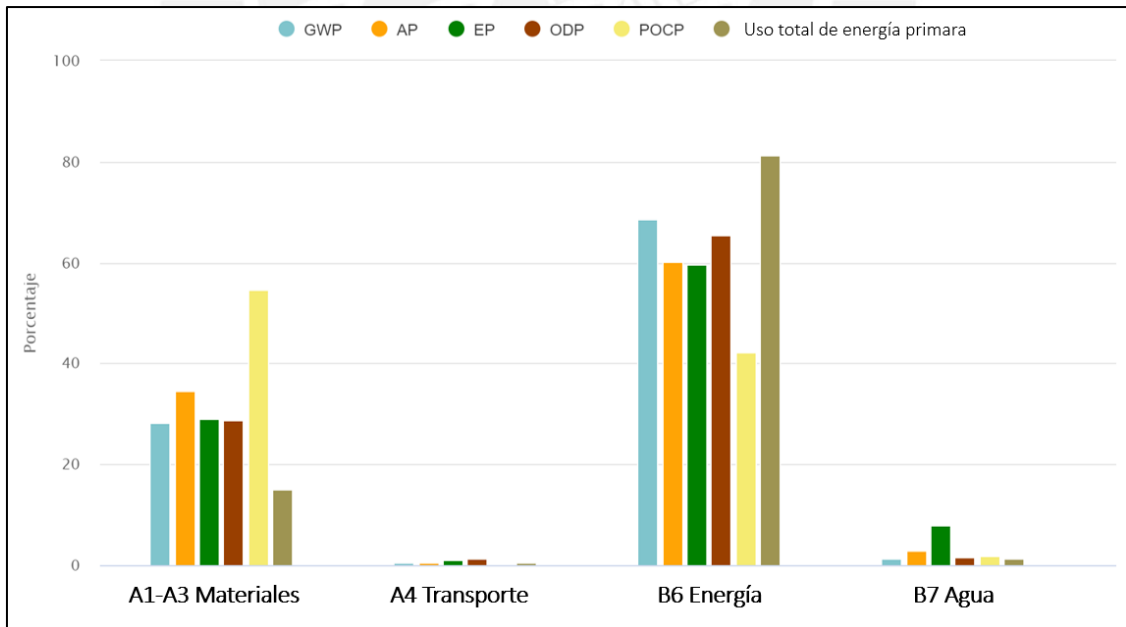
El quinto indicador ambiental comprende el potencial de agotamiento de la capa de ozono. El resultado indica un valor total de  $9.02 \times 10^{-1}$  kg CFC-11 equivalente. Para este caso, la etapa que más aporta al indicador es la energía operativa en la etapa de uso, con un porcentaje de 65.5%. La etapa de producción de materiales aporta 28.9%. Por último, las etapas de consumo de agua en la etapa de uso y transporte de materiales son las que aportan menos porcentajes, con 1.5% y 1.2% respectivamente. El valor por metro cuadrado construido es igual a  $5.07 \times 10^{-5}$  kg CFC-11 eq/m<sup>2</sup>.

Por último, se tiene el indicador ambiental correspondiente a la formación de ozono en la atmósfera inferior. El resultado muestra un valor total de  $1.57 \times 10^3$  kg Ethenee equivalente. Para este caso, la etapa que más aporta al indicador es la de la producción de materiales, con un porcentaje de 42.2%. Seguidamente, la etapa de energía operativa aporta un valor de 54.6%. Por último, las etapas de consumo de agua en la etapa de uso y transporte de materiales son las que aportan menos porcentajes, con 1.9% y 0.3% respectivamente. El valor por metro cuadrado construido es igual a  $8.8 \times 10^{-2}$  kg Ethenee equivalente.

En la Figura 18 se tiene un resumen de los resultados para cada una de las subetapas que tiene el software, las dos primeras pertenecientes a la etapa de pre-uso y las dos siguientes a la etapa de uso.

**Figura 18**

*Distribución de resultados por subetapas para el primer modelo*



*Nota.* GWP: potencial de calentamiento global, AP: Acidificación, EP: Eutrofización, ODP: Potencial agotamiento de la capa de ozono y POCP: Formación de ozono en la atmósfera inferior. Fuente: One Click LCA

## 5.2. Modelamiento del mismo edificio, pero sin las medidas LEED, a través del One Click LCA

De la misma manera que el primer modelo, se ingresó en el One Click LCA los materiales anteriormente descritos para la edificación convencional, así como los datos de consumos.

### 5.2.1. Cuantificación de los impactos ambientales según los resultados del modelo

A partir del análisis de ciclo de vida elaborado por One Click LCA, se obtienen resultados para las distintas categorías de impacto con sus respectivos valores, los cuales se presentan en la Tabla 12.

**Tabla 12**

*Categorías de impacto y resultados para el edificio sin certificar a lo largo de su ciclo de vida*

<b>Categorías y cantidades</b>	<b>TOTAL</b>	<b>Total por m<sup>2</sup> construido</b>
<b>Uso total de energía primaria (MJ)</b>	$4.39 \times 10^8$	$2.46 \times 10^4$
<b>Calentamiento global (kg CO<sub>2</sub> eq)</b>	$2.92 \times 10^7$	$1.64 \times 10^3$
<b>Acidificación (kg SO<sub>2</sub> eq)</b>	$1.57 \times 10^5$	$0.088 \times 10^2$
<b>Eutrofización (kg PO<sub>4</sub> eq)</b>	$2.14 \times 10^4$	$0.012 \times 10^2$

<b>Categorías y cantidades</b>	<b>TOTAL</b>	<b>Total por m<sup>2</sup> construido</b>
<b>Potencial de agotamiento de la capa de ozono (kg CFC-11 eq)</b>	0.019×10 <sup>2</sup>	1.04×10 <sup>-4</sup>
<b>Formación de ozono en la atmósfera inferior (kg Ethenee)</b>	8.03×10 <sup>3</sup>	4.51×10 <sup>-1</sup>

*Nota.* Fuente: Elaboración propia

Como primer indicador ambiental se tiene el consumo de energía primaria, cuyo valor obtenido es de  $4.39 \times 10^8$  MJ. Los resultados muestran que la etapa de energía operativa es la que más aporta a este indicador, con un porcentaje de 90.4%. Seguidamente, con un porcentaje de 7.4%, se tiene la etapa de producción de materiales. Por último, las etapas que menos aportan son las de consumo de agua y transporte de materiales, con porcentajes de 1.0% y 0.3% respectivamente. Así mismo, se tiene el resultado por metro cuadrado construido, equivalente a  $2.46 \times 10^4$  MJ.

Como segundo indicador ambiental se tiene el potencial de calentamiento global. Para el presente proyecto, se tiene un valor total de  $2.92 \times 10^7$  kg de CO<sub>2</sub> equivalente. La etapa que más aporta a este indicador es la energía operativa, con un porcentaje de 88.6%. Seguidamente, se tiene la etapa de producción de materiales, la cual aporta 9.9%. El consumo de agua durante la etapa de uso aporta un total de 0.7%. Por último, la etapa de transporte de materiales un 0.2%. El resultado por metro cuadrado construido equivale a  $1.64 \times 10^3$  kg de CO<sub>2</sub>.

Como tercer indicador ambiental se tiene la acidificación, cuyo valor para el presente proyecto es de  $1.57 \times 10^5$  kg de SO<sub>2</sub> equivalente. Los resultados evidencian que la etapa de producción de materiales es la que más aporta a este indicador, con un porcentaje de 92.6%. Seguidamente, con un porcentaje de 6.3%, se tiene la etapa de energía operativa. Por último, las etapas que menos aportan son las de consumo de agua y transporte de

materiales, con porcentajes de 0.7% y 0.1% respectivamente. Así mismo, se tiene el resultado por metro cuadrado construido, equivalente a  $0.088 \times 10^2$  kg SO<sub>2</sub> eq/m<sup>2</sup>.

Como cuarto indicador ambiental se tiene la eutrofización. Para el presente proyecto, se tiene un valor total de  $2.14 \times 10^4$  kg de PO<sub>4</sub> equivalente. La etapa que más aporta a este indicador es la energía operativa, con un porcentaje de 89.2%. Seguidamente, se tiene la etapa de producción de materiales, con un aporte de 7.3%. El consumo de agua durante la etapa de uso aporta un total de 2.8%. Por último, la etapa de transporte de materiales aporta un 0.2%. El resultado por metro cuadrado construido equivale a  $0.012 \times 10^2$  kg PO<sub>4</sub> eq/m<sup>2</sup>.

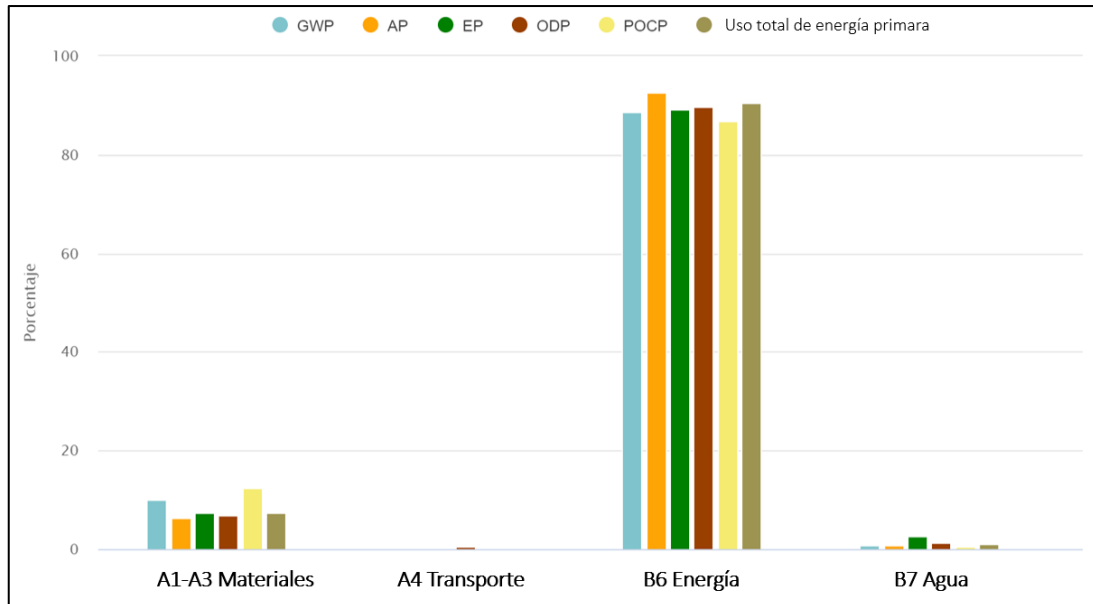
El quinto indicador ambiental comprende el potencial de agotamiento de la capa de ozono. El resultado indica un valor total de  $0.019 \times 10^2$  kg CFC-11 equivalente. Para este caso, la etapa que más aporta al indicador es la energía operativa en la etapa de uso, con un porcentaje de 89.7%. La etapa de producción de materiales aporta 7.0%. Por último, las etapas de consumo de agua en la etapa de uso y transporte de materiales son las que aportan menos porcentajes, con 1.3% y 0.6% respectivamente. El valor por metro cuadrado construido es igual a  $1.04 \times 10^{-4}$  kg CFC-11 eq/m<sup>2</sup>.

Por último, se tiene el indicador ambiental correspondiente a la formación de ozono en la atmósfera inferior. El resultado muestra un valor total de  $8.03 \times 10^3$  kg Ethenee equivalente. Para este caso, la etapa que más aporta al indicador es la energía operativa, con un porcentaje de 86.7%. Seguidamente, la etapa de producción de materiales aporta un valor de 12.4%. Por último, las etapas de consumo de agua en la etapa de uso y transporte de materiales son las que aportan menos porcentajes, con 0.7% y 0.1% respectivamente. El valor por metro cuadrado construido es igual a  $4.51 \times 10^{-1}$  kg Ethenee equivalente.

En la Figura 19 se tiene un resumen de los resultados para cada una de las subetapas que presenta el software.

**Figura 19**

*Distribución de resultados por subetapas para el segundo modelo*



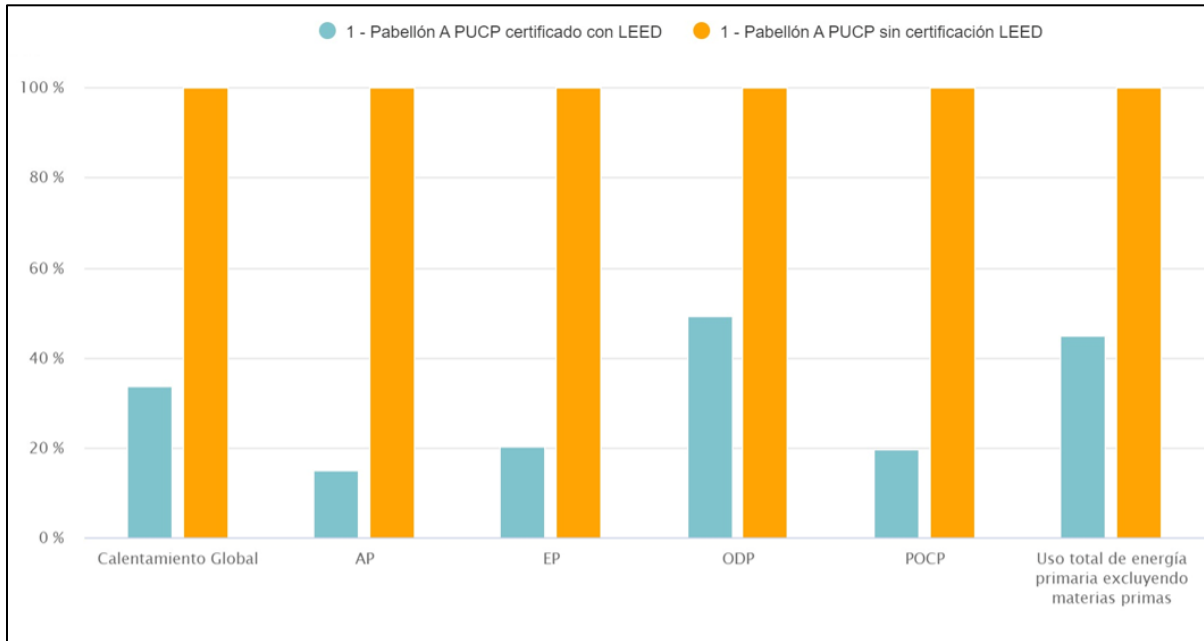
*Nota.* GWP: potencial de calentamiento global, AP: Acidificación, EP: Eutrofización, ODP: Potencial agotamiento de la capa de ozono y POCP: Formación de ozono en la atmósfera inferior. Fuente: One Click LCA

### **5.3. Cuantificación de las mejoras ambientales logradas a través de la certificación LEED**

Según lo descrito en los capítulos anteriores, se tienen los impactos ambientales por cada categoría para cada uno de los dos modelos. Se verifica, según los resultados, que la edificación LEED genera menor impacto ambiental respecto al modelo convencional. En la Figura 20 se evidencia la diferencia en cuanto a los impactos ambientales obtenidos:

**Figura 20**

*Impactos ambientales por categoría para ambos modelos*



*Nota.* GWP: potencial de calentamiento global, AP: Acidificación, EP: Eutrofización, ODP: Potencial agotamiento de la capa de ozono y POCP: Formación de ozono en la atmósfera inferior. Fuente: One Click LCA

Se demuestra que los impactos ambientales del edificio certificado se reducen, en la mayoría de casos, en valores menores al 50% respecto de los impactos del modelo convencional. Estos resultados se puede apreciar, aparte de los resultados totales y por m<sup>2</sup> construido, en las subetapas de ciclo de vida de cada modelo. En la Tabla 13 se puede apreciar los resultados del edificio certificado por indicador ambiental y por subetapas de ciclo de vida, junto con el total y por metro cuadrado ya mostrado anteriormente.

**Tabla 13***Resultados del edificio certificado por indicadores y subetapas*

EDIFICIO CERTIFICADO CON LEED						
Indicadores/ Subetapas de ciclo de vida	Materiales	Transporte	Energía	Agua	TOTAL	RESULTADO /m <sup>2</sup>
Calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> eq)	2.79×10 <sup>4</sup>	6.51×10 <sup>4</sup>	6.8×10 <sup>5</sup>	1.26×10 <sup>5</sup>	9.78×10 <sup>6</sup>	5.5×10 <sup>2</sup>
Acidificación (kg SO <sub>2</sub> eq)	8.2×10 <sup>3</sup>	1.25×10 <sup>2</sup>	1.43×10 <sup>4</sup>	6.8×10 <sup>2</sup>	2.33×10 <sup>4</sup>	1.31
Eutrofización (kg PO <sub>4</sub> eq)	1.27×10 <sup>3</sup>	0.43×10 <sup>2</sup>	2.63×10 <sup>3</sup>	3.44×10 <sup>2</sup>	4.29×10 <sup>3</sup>	0.241
Potencial agotamiento de la capa de ozono (kg CFC-11 eq)	2.68×10 <sup>-1</sup>	1.13×10 <sup>-2</sup>	6.09×10 <sup>-1</sup>	1.37×10 <sup>-2</sup>	9.02×10 <sup>-1</sup>	5.07×10 <sup>-5</sup>
Formación de ozono en la atmósfera inferior (kg Ethenee)	8.66×10 <sup>2</sup>	0.06×10 <sup>2</sup>	6.7×10 <sup>2</sup>	0.31×10 <sup>2</sup>	1.57×10 <sup>3</sup>	8.8×10 <sup>-2</sup>
Uso total de energía primaria (MJ)	2.96×10 <sup>7</sup>	1.12×10 <sup>6</sup>	1.62×10 <sup>8</sup>	2.66×10 <sup>6</sup>	1.95×10 <sup>8</sup>	1.09×10 <sup>4</sup>

*Nota.* Fuente: Elaboración propia

De igual forma que la tabla anterior, en la Tabla 14 se tienen los resultados del edificio sin certificar por indicador ambiental y por subetapas de ciclo de vida, junto con el total y por metro cuadrado.

**Tabla 14***Resultados del edificio sin certificar por indicadores y subetapas*

EDIFICIO CERTIFICADO SIN CERTIFICACIÓN LEED						
Indicadores/ Subetapas de ciclo de vida	Materiales	Transporte	Energía	Agua	TOTAL	RESULTADO /m <sup>2</sup>
Calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> eq)	2.92×10 <sup>6</sup>	6.77×10 <sup>4</sup>	2.6×10 <sup>7</sup>	2.17×10 <sup>5</sup>	2.92×10 <sup>7</sup>	1.64×10 <sup>3</sup>
Acidificación (kg SO <sub>2</sub> eq)	9.92×10 <sup>3</sup>	1.29×10 <sup>2</sup>	1.46×10 <sup>5</sup>	1.17×10 <sup>3</sup>	1.57×10 <sup>5</sup>	0.09×10 <sup>2</sup>
Eutrofización (kg PO <sub>4</sub> eq)	1.58×10 <sup>3</sup>	0.45×10 <sup>2</sup>	1.92×10 <sup>4</sup>	0.59×10 <sup>3</sup>	2.14×10 <sup>4</sup>	0.012×10 <sup>2</sup>
Potencial agotamiento de la capa de ozono (kg CFC-11 eq)	1.32×10 <sup>-1</sup>	1.17×10 <sup>-2</sup>	0.17×10 <sup>-1</sup>	2.37×10 <sup>-2</sup>	0.19×10 <sup>-1</sup>	1.04×10 <sup>-4</sup>
Formación de ozono en la atósfera inferior (kg Ethenee)	9.99×10 <sup>2</sup>	0.055×10 <sup>2</sup>	6.97×10 <sup>3</sup>	0.53×10 <sup>3</sup>	8.03×10 <sup>3</sup>	4.51×10 <sup>-1</sup>
Uso total de energía primaria (MJ)	3.29×10 <sup>7</sup>	1.16×10 <sup>6</sup>	4×10 <sup>8</sup>	4.58×10 <sup>6</sup>	4.39×10 <sup>8</sup>	2.46×10 <sup>4</sup>

*Nota.* Fuente: Elaboración propia

Para ambos modelos de estudio, el consumo de energía en la etapa de uso es la subetapa que más aporta a cada uno de los indicadores, seguido por la producción de materiales. El consumo de agua y el transporte de materiales a la construcción son las que menos aportan al valor final. Esto se debe a que para la etapa de uso se está considerando como dato de entrada los consumos energéticos estimados y son valores altos respecto a los demás. En la Tabla 15 se calcularon los porcentajes que representan los resultados por indicador y subetapa del modelo certificado respecto al modelo convencional. Se tomaron los resultados del modelo convencional como el 100%.

**Tabla 15**

*Porcentajes de los resultados del modelo LEED respecto del modelo convencional para cada subetapa*

Indicadores/Subetapas	Materiales	Transporte	Energía	Agua	TOTAL
Calentamiento global (kg CO <sub>2</sub> eq)	95.5	96.2	26.2	58.1	33.5
Acidificación (kg SO <sub>2</sub> eq)	82.7	96.9	9.8	58.1	14.8
Eutrofización (kg PO <sub>4</sub> eq)	80.4	94.0	13.7	57.9	20.0
Potencial agotamiento de la capa de ozono (kg CFC-11 eq)	203.0	96.6	36.0	57.8	48.6
Formación de ozono en la atmósfera inferior (kg Ethenee)	86.7	100.0	9.6	58.0	19.6
Uso total de energía primaria (MJ)	90.0	96.6	40.5	58.1	44.5

*Nota.* Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que los resultados por indicador para los consumos de agua y energía en la etapa operativa son los que tienen mayor porcentaje de variación en ambos modelos. Por ejemplo, para el indicador de calentamiento global generado por el consumo energético del modelo certificado representa un 26.2% respecto del modelo convencional. Para las etapas de producción de productos de construcción y transporte de los mismos la diferencia es menor. Por ejemplo, la acidificación generada por el transporte a la construcción del modelo certificado representa un 96.9% respecto del modelo convencional. En el caso del transporte a la construcción los valores deben ser

prácticamente los mismos, puesto que las distancias de movilidad de materiales se han considerado iguales. Para el caso del potencial agotamiento de la capa de ozono, el valor para la producción de materiales resulta mayor en el caso del edificio LEED. Esto se da por el refrigerante elegido para cada uno de los modelos. En el caso del modelo LEED, el refrigerante R-410A seleccionado, según el One Click LCA, posee un impacto ambiental mayor comparado con el refrigerante elegido para el modelo convencional. Esto hace que el resultado de impacto sea mayor para el caso LEED, puesto que estos materiales son los responsables directos de esta categoría de impacto.

## **6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

En los capítulos anteriores se tiene la comparativa de los modelos descritos en el presente trabajo. En el presente capítulo, se realizará una discusión de estos resultados obtenidos, a través de la comparación con otros estudios similares. Cabe resaltar que, en casos externos, se han usado otros tipos de softwares, pero tomando como base la metodología del LCA. Se pueden encontrar variaciones significativas en los resultados, sin embargo, esta comparación ayudará a buscar la veracidad de los datos obtenidos.

### **6.1. Comparación de resultados con edificaciones peruanas**

En primer lugar, se muestra en la Tabla 16 la comparación de resultados del estudio de tesis de la ingeniera Vania Calle (2019), denominado “Análisis de Ciclo de Vida de un Edificio de Oficinas en Lima (Perú)” (en adelante “Oficinas”) la cual es una edificación convencional ubicada en Surquillo-Lima, con los modelos del presente estudio. En esta primera comparación, se tienen dos tipos de edificaciones con diferentes tipos de uso. Las oficinas tendrán espacios más “activos” durante la mayor parte del día comparado con un edificio educacional, que tendrá espacios “muertos” en momentos determinados.

**Tabla 16***Comparación de ambos modelos con edificio de oficinas*

<b>Categorías y cantidades</b>	<b>TOTAL POR M<sup>2</sup> CONSTRUIDO</b>		
	<b>Oficinas</b>	<b>Edificio LEED</b>	<b>Edificio convencional</b>
<b>Uso total de energía primaria (MJ)</b>	$3.46 \times 10^4$	$1.09 \times 10^4$	$2.64 \times 10^4$
<b>Calentamiento global (kg de CO<sub>2</sub> eq)</b>	$1.71 \times 10^3$	$5.5 \times 10^2$	$1.64 \times 10^3$
<b>Acidificación (kg de SO<sub>2</sub> eq)</b>	$0.42 \times 10^{-1}$	$0.013 \times 10^2$	$0.088 \times 10^2$
<b>Eutrofización (kg de PO<sub>4</sub> eq)</b>	$0.22 \times 10$	$2.41 \times 10^{-1}$	$0.12 \times 10$
<b>Potencial de agotamiento de la capa de ozono (kg CFC-11 eq)</b>	$1.55 \times 10^{-4}$	$5.07 \times 10^{-5}$	$1.04 \times 10^{-4}$

*Nota.* Fuente: Elaboración propia

El primer indicador a comparar es el de uso total de energía primaria, se observa que el edificio de oficinas tiene mayor valor total por metro cuadrado construido. Las diferencias de valores se deben a los distintos tipos de usos de los edificios mostrados; además, el área construida del edificio de oficinas es 6440 m<sup>2</sup>, equivalente al 36% del área construida del pabellón A, por lo que el valor por m<sup>2</sup> es mayor. En cuanto a la comparación por etapas de ciclo de vida, el edificio de oficinas consume más energía primaria en la etapa de uso, con un valor igual a 85%, mientras que la etapa de pre-uso equivale al 15%. De igual manera, para el caso de los modelos del presente estudio, los valores más altos se encuentran en la etapa de uso, con porcentajes dentro del rango 82-92%, y en la etapa de

pre-uso se encuentran valores entre 15-17%. Para los tres casos, el consumo energético es la subetapa que más aporta a este indicador, lo cual incluye el uso de equipos electrónicos, iluminación y sistema HVAC. En segundo lugar se tiene la producción de concreto y acero en la etapa de pre uso, materiales que tienen mayores cantidades en las estructuras de los tres modelos.

Para el caso de los valores de calentamiento global, los valores por metro cuadrado del edificio de oficinas son muy cercanos a los del modelo convencional, mientras que el modelo LEED tiene un resultado mucho menor. Para el caso de la comparación por etapas de ciclo de vida, el edificio de oficinas tiene un impacto del 73% en la etapa de uso y de 26.7% en la etapa de pre-uso. Para el caso de los modelos del presente estudio, la etapa de uso tiene impactos que se encuentran entre el 69-89% y la de pre-uso entre 10-28%. Para los tres casos, el consumo energético en la etapa de uso es lo que aporta más a este indicador y en la etapa de pre uso predomina la producción de materiales de construcción, especialmente el concreto y el acero.

Para el caso de los demás indicadores ambientales, los valores por metro cuadrado del edificio de oficinas se asemejan más al edificio convencional. Los resultados del edificio LEED son mucho menores a los otros dos modelos.

A continuación, la Tabla 17 muestra una comparación de resultados con el estudio de Ana Cáceres (2016), cuyo trabajo de tesis se denomina “Análisis de Ciclo de Vida comparativo de Edificaciones Multifamiliares en Lima” (en adelante “Multifamimliar Surco” y “Multifamimliar San Isidro”) los cuales son edificios de vivienda ubicados en Lima, con los modelos del presente estudio. Para este caso, se realizan los LCAs de dos edificaciones tipo multifamiliares en dos distritos diferentes de Lima. En esta segunda comparación también se tienen edificaciones con distintos tipos de usos. Por un lado se tienen las habitacionales, por el otro las educacionales.

**Tabla 17***Comparación de ambos modelos con multifamiliares*

<b>Categorías y cantidades</b>	<b>TOTAL POR M<sup>2</sup> CONSTRUIDO</b>			
	<b>Multifamiliar Surco</b>	<b>Multifamiliar San Isidro</b>	<b>Edificio LEED</b>	<b>Edificio convencional</b>
<b>Uso total de energía primaria (MJ)</b>	$2.53 \times 10^4$	$2.36 \times 10^4$	$1.09 \times 10^4$	$2.64 \times 10^4$
<b>Calentamiento global (kg de CO<sub>2</sub> eq)</b>	$2.14 \times 10^3$	$2.33 \times 10^3$	$5.5 \times 10^2$	$1.64 \times 10^3$
<b>Acidificación (kg de SO<sub>2</sub> eq)</b>	$1.33 \times 10^2$	$0.12 \times 10^2$	$0.013 \times 10^2$	$0.088 \times 10^2$
<b>Eutrofización (kg de PO<sub>4</sub> eq)</b>	$0.077 \times 10^2$	$0.055 \times 10^2$	$2.41 \times 10^{-1}$	$0.12 \times 10$
<b>Potencial de agotamiento de la capa de ozono (kg CFC-11 eq)</b>	$9.23 \times 10^{-5}$	$8.99 \times 10^{-5}$	$5.07 \times 10^{-5}$	$1.04 \times 10^{-4}$

*Nota.* Fuente: Elaboración propia

El primer indicador a comparar es el uso de energía primaria, el cual tiene valores similares para ambos multifamiliares y para el modelo convencional, el valor del edificio certificado es menor. En cuanto a las etapas de ciclo de vida, el multifamiliar ubicado en Surco tiene mayor porcentaje de energía primaria consumida en la etapa de uso, con un valor equivalente al 51%, mientras que la etapa de pre-uso es equivalente al 48%. El multifamiliar de San Isidro tiene el mayor porcentaje en la etapa de pre-uso, siendo igual al 60% y la etapa de uso igual al 40%. El área de los departamentos del Multifamiliar de San Isidro equivalen a 5 veces el área de los departamentos del Multifamiliar de Surco. Esto hace que el consumo eléctrico por metro cuadrado del segundo Multifamiliar sea menor, por lo que los impactos en la etapa de uso son menores. Los valores de los modelos del presente estudio en la etapa de pre-uso están entre el 7-15% y en la etapa de uso entre

82-92%. Los resultados de los modelos del presente estudio son mayores en la etapa de uso por la diferencia de magnitudes de consumo de electricidad y agua frente a los materiales de construcción seleccionados.

Para el caso del calentamiento global, ambos multifamiliares presentan valores similares de impacto ambiental, un poco alejados del valor del modelo convencional. Para el caso del multifamiliar en Surco, el mayor porcentaje está en la etapa de pre-uso, igual a 51.2%, mientras que la etapa de uso es igual al 47.3%. En cuanto al multifamiliar de San Isidro, la etapa de pre-uso es igual al 66.9%, mientras que la de uso es igual al 32.8%. En el caso de los modelos del presente estudio, los valores de pre-uso se encuentran entre el 10-28%, mientras que el uso entre el 69-89%. Para el caso de los multifamiliares, los mayores valores están en el pre uso por la cantidad de energía primaria utilizada en la manufactura de materiales.

Para la acidificación, el valor del primer multifamiliar destaca por ser mucho más alto que el resto. En el caso de la eutrofización, los valores de los multifamiliares son más altos que de los modelos del presente estudio y en el del potencial de agotamiento de la capa de ozono, los valores de ambos multifamiliares son parecidos al del edificio certificado, dejando al modelo convencional con el mayor valor.

## **6.2. Comparación con edificaciones LEED**

En este capítulo, se comparará los resultados con los de un proyecto certificado con LEED. Para el primer caso, se tiene el estudio realizado por Alina Vigovskaya, Olga Aleksandrova y Boris Bulgakov en el 2018, al aplicar el LCA a través de One Click LCA a una nave industrial en Rusia. Respecto a esta primera comparación, mostrada en la Tabla 18, se tienen edificaciones con distintos usos y muy marcados, puesto que una nave

industrial es un tipo de edificación muy diferente a un edificio educacional. La nave industrial se caracteriza únicamente por su gran armadura como estructura, mientras que los modelos del presente estudio son edificaciones de concreto armado y muchos componentes más, como ya se ha descrito anteriormente.

**Tabla 18**

*Comparación de ambos modelos con nave industrial*

Categorías y cantidades	TOTAL POR M <sup>2</sup> CONSTRUIDO		
	Nave industrial	Edificio LEED	Edificio convencional
Uso total de energía primaria (MJ)	$4.35 \times 10^3$	$1.09 \times 10^4$	$2.64 \times 10^4$
Calentamiento global (kg de CO <sub>2</sub> eq)	$3.3 \times 10^2$	$5.5 \times 10^2$	$1.64 \times 10^3$
Acidificación (kg de SO <sub>2</sub> eq)	$0.0067 \times 10^2$	$0.013 \times 10^2$	$0.088 \times 10^2$
Eutrofización (kg de PO <sub>4</sub> eq)	$2.74 \times 10^{-1}$	$2.41 \times 10^{-1}$	$0.12 \times 10$
Potencial de agotamiento de la capa de ozono (kg CFC-11 eq)	$2.17 \times 10^{-3}$	$5.07 \times 10^{-5}$	$1.04 \times 10^{-4}$

*Nota.* Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, para el caso del uso total de energía primaria, el valor de la nave industrial es menor en comparación a los modelos del presente estudio, teniendo un porcentaje de 39.88% respecto al modelo LEED y 16.46% respecto al modelo convencional. Cabe resaltar que la nave industrial solo considera las energías no renovables, mientras que el presente modelo incluye también las renovables para el valor final. Para el caso del calentamiento global, el valor final también es menor respecto al

modelo certificado. El valor de la nave equivale al 60% del modelo LEED y al 20% del modelo convencional. Para el caso de la acidificación, el valor de la nave industrial equivale al 50.92% del modelo LEED y al 7.55% del modelo convencional. En el caso de la eutrofización los valores de la nave industrial y el modelo certificado son cercanos, es 13.69% mayor que este y equivale al 22.83% del modelo convencional . Finalmente para el potencial de agotamiento de la capa de ozono, el valor del modelo LEED equivale al 23.33% de la nave industrial y el modelo convencional equivale al 47.86% del mismo. Con los resultados obtenidos se puede comprobar lo descrito al inicio, las naves industriales son recintos mucho más simples respecto a una edificación educacional, por lo que los impactos son menores.

En la Tabla 19 se tiene la comparación con un edificio construido en la ciudad de Nueva York (en adelante edificio NY). Cabe resaltar que, para el edificio NY, el primer indicador de consumo de energía primaria solo incluye energía no renovable, mientras que el presente estudio incluye energía renovable. Así mismo, la etapa de uso del edificio NY incluye solamente la reparación y sustitución de materiales del mismo. En este caso también se tienen edificaciones con distintos tipos de usos, siendo el de Nueva York de oficinas y los del presente estudio educacionales.

**Tabla 19***Comparación de ambos modelos con edificio en Nueva York*

<b>Categorías y cantidades</b>	<b>TOTAL POR M<sup>2</sup> CONSTRUIDO</b>		
	<b>Edificio Nueva York</b>	<b>Edificio LEED</b>	<b>Edificio convencional</b>
<b>Uso total de energía primaria (MJ)</b>	$5.09 \times 10^3$	$1.09 \times 10^4$	$2.64 \times 10^4$
<b>Calentamiento global kg de CO<sub>2</sub> eq</b>	$4.61 \times 10^2$	$5.5 \times 10^2$	$1.64 \times 10^3$
<b>Acidificación kg de SO<sub>2</sub> eq</b>	$0.021 \times 10^2$	$0.013 \times 10^2$	$0.088 \times 10^2$
<b>Eutrofización kg de PO<sub>4</sub> eq</b>	$4.37 \times 10^{-1}$	$2.41 \times 10^{-1}$	$0.12 \times 10$
<b>Potencial de agotamiento de la capa de ozono (kg CFC-11 eq)</b>	$1.74 \times 10^{-4}$	$5.07 \times 10^{-5}$	$1.04 \times 10^{-4}$

*Nota.* Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, el uso de energía no renovable del edificio NY equivale al 46.67% respecto del modelo LEED, mientras que respecto al modelo convencional equivale al 19.27% . Esto se debe a que el edificio NY solo incluye energía no renovable, mientras que los otros incluyen también energía renovable. Así mismo, el modelo del edificio NY no incluye como dato de entrada la energía consumida en la etapa de uso ni tampoco el consumo de agua, solamente los materiales usados en el mismo. Para el caso del calentamiento global, el edificio NY equivale al 83.99% respecto del modelo LEED y 28.13% respecto del convencional. Así mismo, en el caso del edificio NY resalta que el mayor porcentaje de calentamiento global está en la etapa de pre-uso, mientras que de los modelos del presente estudio están en la etapa de uso. Otro punto a considerar es que en el edificio NY se presentan como datos de entrada distintos tipos de materiales, de los cuales, los que más aportan al presente indicador son la producción de ventanas de marcos

de aluminio, el concreto, y el acero. Esto demuestra que el vidrio es un material que aporta de manera significativa a los impactos ambientales en la etapa de pre-uso de una edificación, casi al mismo nivel que los impactos generados por el concreto y el acero. En cuanto a la acidificación, el edificio LEED equivale al 61.59% del edificio NY, y este equivale al 24.09% del edificio convencional. Para el caso de la eutrofización, el modelo LEED equivale al 55.15% del edificio NY, y este equivale al 36.42% del modelo convencional. Finalmente, para el caso del agotamiento de la capa de ozono, el modelo LEED equivale al 29.17% del edificio NY, mientras que el modelo convencional equivale al 59.84% del mismo.

Para las dos comparaciones correspondientes a la nave industrial y al edificio de Nueva York se tienen resultados variados en cuanto a los porcentajes, teniendo casos donde los valores del modelo LEED y convencional son mayores a los edificios a comparar y viceversa. Para todos los casos del capítulo 6.2 se utilizó el software One Click LCA, teniendo variación en el resultado referente al uso energético y no teniendo el consumo de agua para la nave industrial y para el edificio de Nueva York.

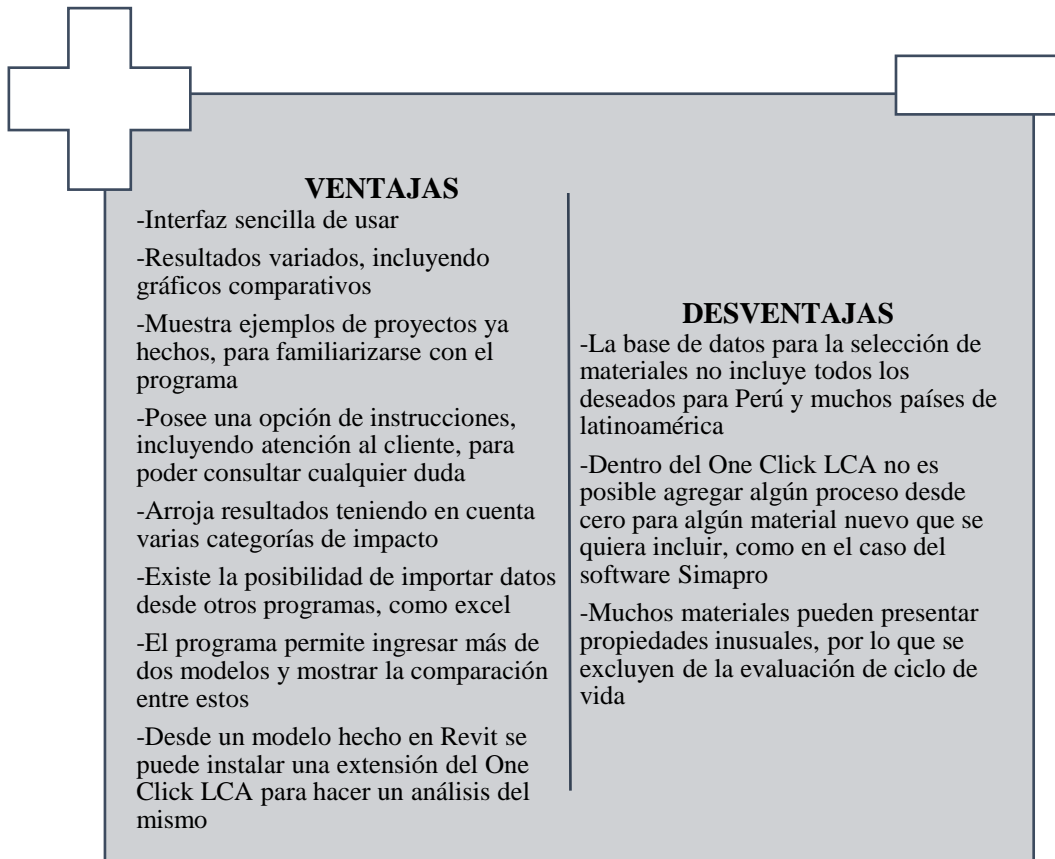
## **7. APLICABILIDAD DEL SOFTWARE ONE CLICK LCA EN LA REALIDAD INMOBILIARIA PERUANA**

El sector construcción está cada vez más comprometido con la sostenibilidad ambiental. Esto lleva a que se analicen los procesos constructivos en cada una de sus etapas de inicio a fin, usando herramientas como el Análisis de Ciclo de Vida (LCA). Para aplicar esta metodología a los procesos constructivos de forma manual, se necesitaría mucho tiempo y detalles. Es por esto que el uso de softwares especializados en LCA hacen la tarea más simple y permiten obtener resultados de manera rápida. Existen en la actualidad muchos softwares que usan la metodología del LCA, algunos de ellos son: Simapro, GaBi, UMBERTO, entre otros.

El caso de edificaciones es un caso especial, puesto que representa un proceso especial y con características únicas. En ese sentido, la lista de softwares para su aplicación se reduce. Uno de los softwares dedicados a este rubro es BEES. BEES (por sus siglas en inglés de Building for Environmental and Economic Sustainability) posee un enfoque automatizado, capaz de medir la evaluación del ciclo de vida, así como el desempeño ambiental y económico de un producto de construcción. Este software analiza todas las etapas de la vida de un producto, incluyendo adquisición, fabricación, transporte, instalación, uso, reciclaje y gestión de residuos de materias primas (Green Building Solutions, 2021). Para el presente estudio, como ya se ha mencionado anteriormente, se ha usado el software One Click LCA. Este software, también especializado para edificaciones, presenta una interfaz amigable y fácil de usar, sin embargo, al momento de modelar, presenta algunas desventajas. En la Figura 21 se analizan algunas ventajas y desventajas del software One Click LCA.

**Figura 21**

*Ventajas y desventajas del One Click LCA*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia

Para los proyectos de construcción nuevos, luego de tenerlos diseños definidos y los metrados, se puede realizar una evaluación de ciclo de vida gracias a One Click LCA. Se procederían a ingresar los datos que el programa requiere para su análisis y se realizaría una interpretación de resultados, observando en qué tipo de materiales se puede hacer un cambio para que la edificación sea más sostenible. Así mismo, para edificaciones ya construidas se podría hacer el mismo tipo de evaluación, teniendo como datos adicionales consumos de agua y energía. Esto podría ser una ventaja si es que alguna edificación aspira a ciertas certificaciones como LEED, puesto que podría ayudar a ver qué materiales y recursos logran la puntuación necesaria para la certificación.

## **8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **8.1. Conclusiones**

Se demostró que la edificación certificada con LEED garantiza la reducción de impactos ambientales frente a una edificación convencional. Esto se logró comparando los dos modelos seleccionados a través de sus resultados finales.

Se estimaron los impactos ambientales del edificio certificado con LEED aplicando el Análisis de Ciclo de Vida (LCA) a través del software One Click LCA. Se obtuvieron resultados a partir de los datos de entrada propuestos, los cuales se mostraron a través de categorías de impacto ambiental.

Se logró modelar un edificio con las mismas funciones y dimensiones que el edificio certificado, pero sin las medidas LEED, obteniendo de la misma manera que el primer modelo los impactos ambientales para cada etapa de ciclo de vida y para varias categorías de impacto ambiental.

Al realizar la comparación de ambos modelos, a través del software, se logró cuantificar las mejoras ambientales al aplicar la certificación LEED. Uno de los apartados del One Click LCA es la distinción de los modelos empleados a través de valores finales y gráficos comparativos.

El software One Click LCA es una herramienta muy útil para realizar el LCA de una edificación. Gracias a su interfaz amigable y fácil de usar, es una buena alternativa para poder estimar los impactos ambientales de un edificio. Sin embargo, la base de datos que posee no involucra muchos EPDs de materiales usados en Perú, lo cual dificulta el modelado. Para poder realizarlo, se pueden elegir materiales con características parecidas

a los que se tienen como datos, puesto que la base de datos de One Click LCA es extensa y en su mayoría se tienen las fichas técnicas de estos.

## **8.2. Recomendaciones**

Se recomienda incentivar certificaciones como LEED para edificios nuevos, puesto que garantizan la reducción de impactos ambientales. Esto fomentaría a que el sector de la construcción sea cada vez más amigable con el ambiente.

Así mismo, se recomienda el uso del Análisis de Ciclo de Vida (LCA) para los casos de evaluación ambiental en edificaciones. Es una herramienta que ha demostrado ser muy beneficiosa con fines ambientales, incluso si se quieren evaluar solo algunas etapas, es de mucha utilidad.

Una buena práctica al momento de realizar los estudios previos de los proyectos de construcción es realizar un LCA del mismo teniendo en cuenta los recursos y consumos estimados que se tendrán, Así, se pueden obtener los impactos ambientales de las etapas elegidas y se podría optimizar en la elección de materiales ecoamigables.

Por último, se recomienda el uso del software One Click LCA para poder evaluar el impacto ambiental de distintas edificaciones. Incluso, como en el caso del presente estudio, es muy útil al momento de comparar dos modelos correspondientes a una misma edificación, teniendo una certificada y la otra sin certificar.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, H., Ramírez, D. y Vásquez A. (2012). Sostenibilidad Actualidad Y Necesidad En El Sector De La Construcción En Colombia. *Revista Gestión y Ambiente*, 15 (1), 105-118. <https://www.redalyc.org/pdf/1694/169424101009.pdf>
- Acosta, D. (2009). Arquitectura y construcción sostenibles: conceptos, problemas y estrategias. *Revista de arquitectura*, (4), 14-23. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=341630313002>
- Alavedra, P., Domínguez, J., Gonzalo, E. y Sierra, J. (1997). La construcción sostenible; el estado de la cuestión. *Revistas CSIC*, 49 (451), 41-47. <https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/936/1018>
- Al-Ghamdi, Sami G. y Bilec, M. (2016). Green Building Rating Systems and Whole-Building Life Cycle Assessment: Comparative Study of the Existing Assessment Tools. *Journal of Architectural Engineering*, 23 (1) [https://www.researchgate.net/publication/305217139\\_Green\\_Building\\_Rating\\_Systems\\_and\\_Whole-Building\\_Life\\_Cycle\\_Assessment\\_Comparative\\_Study\\_of\\_the\\_Existing\\_Assessment\\_Tools](https://www.researchgate.net/publication/305217139_Green_Building_Rating_Systems_and_Whole-Building_Life_Cycle_Assessment_Comparative_Study_of_the_Existing_Assessment_Tools)
- Aleksandrova, O., Bulgakov, B. y Vigovskaya, A. (2018). Life Cycle Assessment (LCA) of a LEED Certified Building. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 365 (2). [https://www.researchgate.net/publication/325706029\\_Life\\_Cycle\\_Assessment\\_LCA\\_of\\_a\\_LEED\\_certified\\_building](https://www.researchgate.net/publication/325706029_Life_Cycle_Assessment_LCA_of_a_LEED_certified_building)

- Anand, C., Lessard, Y., Blanchet, P., Frenette, C., y Amor, B. (2018). LEED v4: Where Are We Now? Critical Assessment through the LCA of an Office Building Using a Low Impact Energy Consumption Mix. *Journal of Industrial Ecology*, 22 (5), 1105-1116.  
[https://www.researchgate.net/publication/317086432\\_LEED\\_v4\\_Where\\_Are\\_We\\_Now\\_Critical\\_Assessment\\_Through\\_the\\_LCA\\_of\\_an\\_Office\\_Building\\_Using\\_a\\_Low\\_Impact\\_Energy\\_Consumption\\_Mix](https://www.researchgate.net/publication/317086432_LEED_v4_Where_Are_We_Now_Critical_Assessment_Through_the_LCA_of_an_Office_Building_Using_a_Low_Impact_Energy_Consumption_Mix)
- Are, J., Eriksson, O., Petrovic, B., Wallhagen, O. y Zhang X. (2019). Life Cycle Assessment of Building Materials for a Single-family House in Sweden. *Energy Procedia*, 158, 3547-3552.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610219309579>
- Arena, A., Correa E. & de Rosa C. (2002). Perfil Ambiental Del Cemento Pórtland Producido En La Región Oeste Argentina, Según La Metodología Del Ipcc. *Avances en energías renovables y medio ambiente*, 6, (1).  
[http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/80190/Documento\\_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/80190/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Athena Sustainable Materials Institute. (2021). *Impact Estimator for Buildings brinda a arquitectos, ingenieros y analistas acceso a datos de inventario de ciclo de vida avanzados sin necesidad de conocimientos avanzados*. Recuperado de <http://www.athenasmi.org/our-software-data/impact-estimator/>
- Bartl, K. (2014). El Análisis de Ciclo de Vida En El Sector de Construcción. *Revista Civilízate* (4), 46-48.  
<https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/civilizate/article/view/10146/10583>
- BBVA. (2021). *Certificación HQE: sostenibilidad de la construcción en todos los*

*sentidos*. Recuperado de <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/certificacion-hqe-sostenibilidad-de-la-construccion-en-todos-los-sentidos/>

Bedoya, C., Carabaño, R. y Ruíz, D. (2014). *La Metodología Del Análisis de Ciclo de Vida Para La Evaluación Del Impacto Ambiental En El Sector de La Construcción: El Estado Del Arte*. Congreso Internacional Sobre Investigación En Construcción Y Tecnología Arquitectónicas. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. [https://www.researchgate.net/publication/263357247\\_La\\_metodologia\\_del\\_analisis\\_de\\_ciclo\\_de\\_vida\\_para\\_la\\_evaluacion\\_del\\_impacto\\_ambiental\\_en\\_el\\_sector\\_de\\_la\\_construccion\\_Estado\\_del\\_arte](https://www.researchgate.net/publication/263357247_La_metodologia_del_analisis_de_ciclo_de_vida_para_la_evaluacion_del_impacto_ambiental_en_el_sector_de_la_construccion_Estado_del_arte)

BREEAM ES. (2020). *BREEAM ES*. Recuperado de <http://www.breeam.es/>

Brundtland, G. (1987). *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. [Artículo PDF]. <http://www.ask-force.org/web/Sustainability/Brundtland-Our-Common-Future-1987-2008.pdf>

Bullis, K. (17 de mayo de 2012). *Un nuevo método para fabricar cemento podría reducir las emisiones de dióxido de carbono*. MIT Technology Review. Recuperado de <https://www.technologyreview.es/s/2731/un-nuevo-metodo-para-fabricar-cemento-podria-reducir-las-emisiones-de-dioxido-de-carbono>

Cáceres, A. (2016). *Análisis de Ciclo de Vida comparativo de Edificaciones Multifamiliares en Lima*. [Tesis de licenciatura]. Repositorio de Tesis PUCP.

Calle, V. (2019). *Análisis de Ciclo de Vida de un Edificio de Oficinas en Lima (Perú)*. [Tesis de licenciatura]. Repositorio de Tesis PUCP.

Castells, F., Ortiz, O. y Pasqualino, J. (2010). *Evaluación Ambiental Basado En El Análisis Del Ciclo de Vida (ACV) En La Fase de Construcción de Una Edificación*

En Cataluña. *Afinidad*, 67 (547), 175-181.

<https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/269139/356707>

Chacón, J. (2008). Historia Ampliada y Comentada Del Análisis de Ciclo de Vida ( ACV ). *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, (72), 37-70.  
<http://blog.pucp.edu.pe/blog/wp-content/uploads/sites/122/2009/07/Historia-ACV.pdf>

Chávez, A. y Guarín, N. (2014). Gestión, logística y operación de la unidad de reciclaje de residuos de construcción y demolición. *Revista Ingeniería Industrial*, 13 (2), 7-18. <https://revistas.ubiobio.cl/index.php/RI/article/view/89/3238>

Clima de cambios PUCP. (2021). *Certificación LEED*. PUCP. Recuperado de <https://www.pucp.edu.pe/climadecambios/la-pucp-frente-al-cambio-climatico/medidas-dentro-del-campus/certificacion-leed/>

Clima de cambios PUCP. (2020). *Consumo de recursos*. PUCP. Recuperado de <https://www.pucp.edu.pe/climadecambios/la-pucp-frente-al-cambio-climatico/medidas-dentro-del-campus/consumo-de-recursos/>

Cortés, M. (20 de octubre de 2010). *El Análisis de Ciclo de Vida y sus principales softwares como herramientas de cálculo*. INESEM. Recuperado de <https://www.inesem.es/revistadigital/gestion-integrada/el-analisis-de-ciclo-de-vida-y-sus-principales-softwares-como-herramientas-de-calculo/>

Corzo, S. (2016). *Análisis de Ciclo de Vida de una vivienda unifamiliar en Huancayo*. [Tesis de licenciatura]. Repositorio de Tesis PUCP.

Cuevas, A. (2012). *Estado del arte sobre el Análisis de Ciclo de Vida en la construcción de vivienda: potencial de aplicación en Colombia*. [Tesis de licenciatura].

<http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/762/00000438.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Curran, M. (1993). *EPA's Lyfe Cycle Methodology: Guidelines for Use in Development of Packing*. [Archivo PDF].  
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100OPHA.PDF?Dockey=P100OPHA.PDF>

Curran, M. A. (2012). *Life Cycle Assessment Handbook: A Guide for Environmentally Sustainable Products*. Scrivener Publishing LLC.  
<https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=emXjDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR19&dq=Life+Cycle+Assessment+Handbook:+A+Guide+for+Environmentally+Sustainable+Products&ots=LQnsOTc2v&sig=8ViOxJcifNIs10vMPDe0QxmXFw0#v=onepage&q&f=false>

DGNB. (2020). DGBN *Deutsche Gesellschaft fur Nachhaltiges Bauen German Sustainable Building Council*. Recuperado de <https://www.dgnb.de/en/>

Design Builder (2021). *One Click LCA - Building Life-Cycle Assessment*. Recuperado de <https://designbuilder.co.uk/software/one-click-lca-building-life-cycle-assessment>

El Comercio (11 de septiembre de 2019). Edificios verdes: La clave para ahorrar agua y luz. <https://especial.elcomercio.pe/perusostenible/edificios-verdes-la-clave-para-ahorrar-agua-y-luz/>

El Comercio (27 de diciembre de 2019). ASEI: inmobiliarias estiman que el precio de viviendas crecerá hasta 2.5% en el primer semestre del 2020.  
<https://elcomercio.pe/economia/peru/inmobiliarias-estiman-que-precio-de-viviendas-crecera-hasta-25-en-primer-semester-de-2020-nndc-noticia/?ref=ecr>

El Economista (12 de diciembre de 2019). "Mi vivienda verde" de Perú, ejemplo de

solución sostenible en la COP25. <https://www.economista.es/mercados-eAmperu/noticias/10251263/12/19/Mi-Vivienda-Verde-de-Peru-ejemplo-de-solucion-sostenible-en-la-COP25.html>

El Salvador Green Bc. (2020). *El Salvador Green Building Council*. Recuperado de <https://worldgbc.org/gbc/el-salvador-green-building-council/>

Enshassi, A., Kochendoerfer, B. y Rizq, E. (2014). An Evaluation of Environmental Impacts of Construction Projects. *Revista Ingeniería de Construcción*, 29 (3), 234-254. [https://scielo.conicyt.cl/pdf/ric/v29n3/en\\_art02.pdf](https://scielo.conicyt.cl/pdf/ric/v29n3/en_art02.pdf)

EPA. (2006). *Life Cycle Assessment: Principles and Practice*. [Archivo PDF]. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1000L86.PDF?Dockey=P1000L86.PDF>

Fosca (2014). *Centro de Innovación Académica PUCP 2014*. Slideshare. Recuperado de <https://es.slideshare.net/cfosca/centro-de-innovacin-acadmica-pucp-2014>

Fuentes (2020). *Aplicación de análisis de ciclo de vida para un edificio residencial con criterios de sustentabilidad*. [Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional]. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/28847/Fuentes%20Col%c3%adn%20Irais.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

GBC Brasil. (2020). *GBC Brasil: Home*. Recuperado de <https://www.gbcbrazil.org.br/wp-content/uploads/2017/09/Compreenda-o-LEED-1.pdf>

García, S. (2014). *Evaluación ambiental durante el ciclo de vida de una vivienda unifamiliar*. [Tesis de licenciatura]. Repositorio de Tesis PUCP.

García, J., Quito, J. y Perdomo, J. (2020). *Análisis de la huella de carbono en la construcción y su impacto sobre el ambiente* [Archivo PDF].

[https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/16031/2/2020\\_Analisis\\_huell\\_a\\_carbono.pdf](https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/16031/2/2020_Analisis_huell_a_carbono.pdf)

Galeano, E., González K. y Pérez, L. (2019). Análisis Del Ciclo de Vida de Un Edificio Residencial En Colombia. *Inventum*, 14 (27), 3-14.  
<https://revistas.uniminuto.edu/index.php/Inventum/article/view/2196/1962>

Gestión. (06 de agosto de 2019). Edificios inteligentes: 8 proyectos ubicados en Lima.  
<https://gestion.pe/especial/zonalounge/tecnologia/fotos-edificios-inteligentes-8-proyectos-ubicados-lima-noticia-1994498>

Green Building Solutions. (2021). *Building for Environmental and Economic Sustainability (BEES)*. Recuperado de <https://www.greenbuildingsolutions.org/life-cycle-assessment/bees-national-institute-of-standards-and-technology/>

Haya (2016). *Análisis de Ciclo de Vida*. [Archivo PDF].  
[file:///C:/Users/51977/Downloads/teoria\\_acv\\_migma1.pdf](file:///C:/Users/51977/Downloads/teoria_acv_migma1.pdf)

Hauschild, M., Rosenbaum, R. y Olsen, S. (2018). *Lyfe Cycle Assessment: Theory and Practice*. Suiza: Springer. <https://link.springer.com/>

Huerta, M., Otero, M., Pastor, A., Portela, J. y Viguera, J. (2010). *La Certificación LEED, Como Cumplir Con Un Conjunto de Normas Para La Sostenibilidad En El Proyecto de Ingeniería*. XVII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Cádiz, España.  
[https://iacolingenieros.com/wp-content/uploads/2016/09/Certificacion\\_LEED.pdf](https://iacolingenieros.com/wp-content/uploads/2016/09/Certificacion_LEED.pdf)

Hunt, R. (1974). *Resource and Environmental profile analysis of nine beverage container alternatives*. Environmental protection agency.  
<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/9100M5VS.PDF?Dockey=9100M5VS.PDF>

IBEC. (2020). *CASBEE Comprehensive Assessment System for Built Environment*

*Efficiency*. IBEC. Recuperado de  
<http://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/index.htm>

Instituto Nacional de Estadística e Informática (2019). *Perú: Informe Económico Trimestral*. IV trimestre 2018.  
[https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones\\_digitales/Est/Lib1649/libro.pdf](https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1649/libro.pdf)

ISO. (1997). *ISO 14044: Environmental Management-Lyfe Cycle Assessment-Principles and framework*. [Archivo PDF].  
<https://web.stanford.edu/class/cee214/Readings/ISOLCA.pdf>

ISO. (2006a). *14040: Environmental Management–Life Cycle Assessment—Principles and Framework*. Recuperado de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>

ISO. (2006b). *ISO 14044 Enviro Mgmt LCA Requirements and Guidelines*. Recuperado de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es>

ISTAS (2020). *Problema ambiental del consumo de energía*. ISTAS. Recuperado de <https://istas.net/istas/guias-interactivas/ahorro-y-eficiencia-energetica/problema-ambiental-del-consumo-de-energia>

KieranTimberlake (2021). *Tally avanza hacia la construcción de transparencia*. Recuperado de <https://kierantimberlake.com/updates/tally-is-moving>

Leyva, J., Sánchez, J. y Sarabia, A. (2017). Uso de nutrientes tecnológicos como materia prima en la fabricación de materiales de construcción en el paradigma de la economía circular. *Resouestas*, 22 (1), 6-16.  
<file:///C:/Users/51977/Downloads/Dialnet->

UsoDeNutrientesTecnologicosComoMateriaPrimaEnLaFab-5848293.pdf

Llamas, S., Martinengo, P., Mercante, I., Poncio, F. y Rojo, J. (2010). Aspectos ambientales de obras civiles de edificación, gestión de residuos de construcción. 3° Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Centro Universitario, Mendoza, Argentina.

Mayer, F. (2020). *El crecimiento de las certificaciones de construcción sostenible en Perú*. Dossier. Recuperado de <https://dossierdearquitectura.com/post/el-crecimiento-de-las-certificaciones-de-construccion-sostenible-en-el-peru-5e16472d1f051>

Mercader, M., Olivares, M. y Ramírez, A. (2012). Modelo de Cuantificación de Las Emisiones de CO2 Producidas En Edificación Derivadas de Los Recursos Materiales Consumidos En Su Ejecución. *Informes de la Construcción*, 64 (527), 401-414. <https://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/2184/2492>

Mercante, I. (2008). *La Gestión de Residuos En Obras de Edificación: Un Desafío Hacia La Producción Limpia*. I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Castellón, España. <https://docplayer.es/12708780-La-gestion-de-residuos-en-obras-de-edificacion-un-desafio-hacia-la-produccion-limpia.html>

Miranda, Neira y Valdivia. (2018). La construcción sostenible en Perú. *Economía & Sociedad*, 95, 38-40. [http://www.cies.org.pe/sites/default/files/files/articulos/economiaysociedad/la\\_construccion\\_sostenible\\_en\\_el\\_peru.pdf](http://www.cies.org.pe/sites/default/files/files/articulos/economiaysociedad/la_construccion_sostenible_en_el_peru.pdf)

Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (2022). *¿Qué es el acuerdo de París?*. UNFCCC. Recuperado de <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris->

agreement/que-es-el-acuerdo-de-paris

One Click LCA (2021). *What data is available in One Click LCA?*. Recuperado de <https://www.oneclicklca.com/support/faq-and-guidance/documentation/database/>

One Click LCA. (2021). *One Click LCA: World's fastest Building Life Cycle Assessment software*. Recuperado de <https://www.oneclicklca.com/>

Ordóñez, G. y Osma, G. (2010). Desarrollo Sostenible En Edificaciones. *Revista UIS Ingenierías*, 9 (1), 103-121. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/1060>

Peru GBC. (2023). *CERTIFICACIONES*. Peru GBC. Recuperado de <https://www.perugbc.org.pe/site/certificaciones>

Peru GBC. (2020). *Certificaciones*. PERU GREEN BUILDING COUNCIL-Consejo Peruano de Construcción Verde. Recuperado de <https://www.perugbc.org.pe/site/>

Productos y Soluciones. (21 de julio de 2022). *Situación de la Construcción Sostenible en el Perú*. Recuperado de <https://revista-ps.costosperu.com/gestion-de-la-construccion/situacion-de-la-construccion-sostenible-en-el-peru/>

PUCP. (2017). *Ciencia, innovación y tecnología*. Recuperado de <http://convencion.pucp.edu.pe/ciencia-innovacion-tecnologia/sobre-el-evento/lugar-del-evento/>

PUCP. (2020). *Datos administrativos*. Recuperado de <https://www.pucp.edu.pe/la-universidad/nuestra-universidad/pucp-cifras/datos-administrativos/?seccion=2datos-fisicos>

PuntoEdu, PUCP. (2015). *Complejo de Innovación Académica recibe Certificación LEED*. PUCP. Recuperado de <https://puntoedu.pucp.edu.pe/videos/video-complejo->

de-innovacion-academica-recibe-certificacion-leed/

PuntoEdu, PUCP. (2013). *Se construirá biblioteca y aulario para Ciencias, Ingeniería y Arquitectura*. PUCP. Recuperado de <https://puntoedu.pucp.edu.pe/noticias/se-construira-biblioteca-y-aulario-para-ciencias-ingenieria-y-arquitectura/>

Ramírez, A. (2002). La construcción sostenible. *Física y Sociedad*, 13, 13-33.  
[https://www.academia.edu/7173813/La\\_construccion\\_sostenible](https://www.academia.edu/7173813/La_construccion_sostenible)

Reed, D. (2012). *Life-Cycle Assessment in Government Policy in the United States*.  
Recuperado de [https://trace.tennessee.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2502&context=utk\\_graddis](https://trace.tennessee.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2502&context=utk_graddis)

Rodríguez, F. y Gonzalo F. (2010). Ingeniería Sostenible: Nuevos Objetivos En Los Proyectos de Construcción. *Revista Ingeniería de Construcción*, 25 (2), 147-160.  
[https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-50732010000200001&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-50732010000200001&script=sci_arttext)

Rojas, O. y Rojas, J. (2009). Proyección del consumo de energía residencial en el Perú (2005-2030) mediante el software MAED\_D. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*, 12 (2), 50-60.  
[https://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtual/Publicaciones/indata/v12\\_n2/pdf/a07v12n2.pdf](https://sisbib.unmsm.edu.pe/BibVirtual/Publicaciones/indata/v12_n2/pdf/a07v12n2.pdf)

SETAC. (1994). Lyfe Cycle Assessment: A New Way of Thinking. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 13 (6), 853-854.  
<https://setac.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/etc.5620130601>

SimaPro (2021). *Acerca de SimaPro*. Recuperado de <https://simapro.com/about/>

Software-Sphera (2021). *Sphera*. Recuperado de <https://gabi.sphera.com/international/index/>

SPAIN GBC (2020). *Sistemas de clasificación*. SGBC. Recuperado de <http://www.spaingbc.org/web/sistemas-clasificacion.php#:~:text=El%20Sistema%20de%20Clasificaci%C3%B3n%20de,e edificios%20sostenibles%20de%20alta%20eficiencia.>

Susunaga, J. (2014). Construcción sostenible, una alternativa para la edificación de viviendas de interés social. Recuperado de <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/1727>

Universitat Rovira I Virgili. (2010). *Grupo de Análisis y Gestión Ambiental*. AGA. Recuperado de <https://etseq2.urv.cat/aga/Investigacion/LCA.htm>

USGBC. (2020). *Beneficios de LEED*. Recuperado de <https://www.usgbc.org/leed/benefits-leed>

USGBC. (2009). *Guía de estudio de LEED AP Diseño y Construcción de Edificios del USGBC (USGBC LEED AP Building Design + Construction Study Guide)*. [Archivo PDF]. [http://www.spaingbc.org/files/BD+C\\_StudyGuide-ES.pdf](http://www.spaingbc.org/files/BD+C_StudyGuide-ES.pdf)

USGBC (2020) Why LEED. <https://www.usgbc.org/leed/why-leed>

U.S. Green Building Council. (2009). *Guía de Conceptos Básicos de Edificios Verdes y LEED (Core Concepts and LEED Guide)*. Vol. 2. [Archivo PDF]. [http://www.spaingbc.org/files/Core%20Concepts%20Guide\\_ES.pdf](http://www.spaingbc.org/files/Core%20Concepts%20Guide_ES.pdf)