

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**ANÁLISIS DE LA GENERACIÓN Y POTENCIAL REÚSO DE RESIDUOS DE  
EXCAVACIÓN EN LIMA (2016 – 2021)**

Tesis para obtener por el título profesional de Ingeniero Civil:

**AUTOR:**

José Antonio Herrera Maquera

**ASESOR:**

Dr. Federico Alexis Dueñas Dávila

**CO-ASESOR:**

Ing. Joaquín Mantilla Huertas

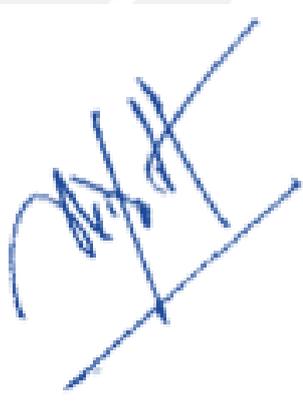
Lima, Octubre, 2023

## Informe de Similitud

Yo, Federico Alexis Dueñas Dávila docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada “ANÁLISIS DE LA GENERACIÓN Y POTENCIAL REÚSO DE RESIDUOS DE EXCAVACIÓN EN LIMA (2016 – 2021)”, del autor José Antonio Herrera Maquera, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 18 %. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software Turnitin el 02/10/2023.
- 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, 02 de octubre del 2023.

Apellidos y Nombres del Asesor: Dueñas Dávila, Federico Alexis	
DNI: 23860033	Firma: 
ORCID: <a href="https://orcid.org/0000-0002-6149-3334">https://orcid.org/0000-0002-6149-3334</a>	

## RESUMEN

En el Perú, unos de los pilares tanto del desarrollo del país como del sustento económico es la industria de la construcción y es la capital donde surgen más proyectos inmobiliarios. En consecuencia, aparece la necesidad de exponer el efecto de las actividades de la construcción sobre el ambiente. Para el análisis se tomará el caso de la Asociación de Estudios Ecológicos e Investigación Civil Sostenible, entidad que trabaja con los residuos limpios de excavación y los emplea en la formación y estabilización del talud en la Costa Verde.

Como objetivo de la presente investigación se propuso un análisis estadístico de los orígenes de los volúmenes recibidos, donde acorde al valor de los coeficientes de correlación Pearson y Spearman de valores 0.5 y 0.8 respectivamente se determinó que la distancia entre las obras y el punto de disposición es una variante decisiva que afecta al volumen enviado. En adición, se realizó un pronóstico empleando el método Lineal de Holt con la data desde finales de 2016 hasta 2021. Como resultado, el volumen a obtener en inicios del 2022 se pronosticó de 1 053 627 m<sup>3</sup>, que representa un incremento del 25% a lo acumulado. Sin embargo, se trabajó además un subregistro que indica un adicional 22% del volumen real recolectado hasta la fecha que incide en el pronóstico.

Finalmente, se aplicó un análisis de ciclo de vida a la operación de reaprovechamiento. Se determinó respecto a la categoría de cambio climático con la metodología IPCC, que 1 m<sup>3</sup> reutilizado de material de excavación emite 20.8 kg de CO<sub>2</sub> equivalente, 20% menos comparado a un tratamiento regular. Asimismo, para otras categorías ambientales dentro de la metodología ReCiPe como: agotamiento de agua, cuyo consumo se evitó en un 90% del valor inicial; ecotoxicidad terrestre, que redujo su potencial en 50%; y en toxicidad humano no carcinógena y eutrofización de agua dulce, se afectó en un 30%. Empleándose categorías *endpoint* se calculó una reducción importante de 15% en la afectación a la salud humana y de 25% en pérdida de especies.

Estos resultados resultarán de relevancia para futuros proyectos de sostenibilidad y futuras investigaciones relacionados a la ingeniería civil y el desarrollo sostenible.

**Palabras Clave**

Análisis de Ciclo de Vida, Caracterización, Categoría de impacto, Ciclo de vida, Economía circular, Flujo de material, Indicador ambiental, Pronóstico, Residuos de Construcción y Demolición, Reaprovechamiento, Residuos limpios, Reutilización.



## ABSTRACT

In Peru, one of the pillars of the country's development and economic sustenance is the construction industry, and it happens that in the capital city most real estate projects arise. Consequently, there is a need to expose and demonstrate the effect of construction activities on the environment. For the case of study, it has been chosen the case of the Asociación de Estudios Ecológicos e Investigación Civil Sostenible (ADEICS), an entity that works with clean excavation waste and employs it in the formation and stabilization of the slope on the Costa Verde.

As the objective of this research, a statistical analysis of the origins of the measurements received has been proposed, where according to the value of the Pearson and Spearman correlation coefficients of 0.5 and 0.8 respectively, it was determined that the distance between the construction sites and the disposal point is a critical variant that affects the volume sent. In addition, a forecast was performed using the Holt Linear Method with data from the final months of 2016 to the beginning of 2021. As a result, the volume projected at the beginning of 2022 was calculated to be 1 053 627 m<sup>3</sup>, which represents an increase of 25% over the accumulated volume. However, an under-recording was also worked out, indicating an additional 22% of the actual volume collected to date which affected the result.

Finally, a Life Cycle Analysis was applied to the reuse operation. It was determined for the climate change category using IPCC methodology, that 1 m<sup>3</sup> of reused excavated material emits 20.8 kg of CO<sub>2</sub> equivalent, 20% less compared to a regular treatment. Likewise, for other environmental categories within the ReCiPe methodology, such as: water depletion, its consumption was reduced to a negative value of 90%; terrestrial ecotoxicity, its potential was reduced by 50%; and the human non-carcinogenic toxicity and freshwater eutrophication were affected by 30%. Using endpoint categories, a significant reduction of 15% in the impact on human health and 25% in preservation of the ecosystem was calculated.

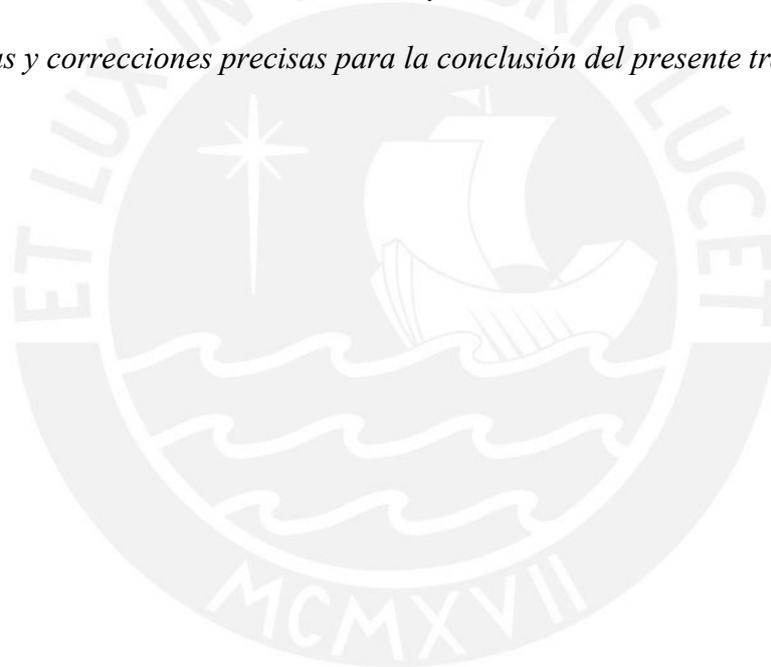
These results will be relevant for future sustainability projects and future research related to civil engineering and sustainable development.

**Keywords**

Life Cycle Analysis, Characterization, Impact category, Life cycle, Circular economy, Material flow, Environmental indicator, Forecasting, Construction and Demolition Waste, Reuse, Clean waste, Reutilization.



*En primera, agradezco a mi madre por su apoyo constante y permanente que me ha ayudado a conseguir mis objetivos personales y a quien dedico enteramente este logro. También a mi padre que ha ayudado económicamente en los estudios. Agradezco también a mis compañeros de la especialidad quienes me acompañaron a lo largo de la carrera. Finalmente agradecer a mi asesor Alexis Dueñas y demás docentes, los cuales me instruyeron con pautas, guías y correcciones precisas para la conclusión del presente trabajo.*



## ÍNDICE

1. GENERALIDADES	13
1.1. Introducción	13
1.2. Alcance y limitaciones	14
1.3. Objetivos	15
1.4. Justificación	15
1.5. Hipótesis	17
2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	18
2.1. Marco conceptual	18
2.1.1. Ambiente y entorno	18
2.1.2. Impacto ambiental y desarrollo sostenible	18
2.1.3. Residuos Sólidos	20
2.1.4. Gestión Ambiental	24
2.1.5. Gestión de los Residuos de Construcción	27
2.2. Estado del arte	28
2.2.1. Causas de generación de residuos en el sector constructivo	28
2.2.2. Caracterización de residuos en construcción	30
2.2.3. Gestión y Composición de residuos alrededor del mundo	31
2.2.4. Situación de los residuos sólidos en Perú	45
2.2.5. Evaluación de impactos con Análisis de Ciclo de Vida	53
3. METODOLOGÍA	61
3.1. Caso de estudio: Proyecto “Mejoramiento de capas y estabilización de taludes en la Costa Verde – San Miguel”	61

3.2. Análisis Origen-Destino	63
3.3. Análisis de Ciclo de Vida	66
3.4. Aplicación del ACV	68
3.4.1. Planteamiento del modelo	68
3.4.2. Inventario del Ciclo de Vida	70
3.4.3. Análisis de Impactos ambientales	72
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	78
4.1. Caracterización del material	78
4.2. Patrones de Generación	81
4.3. Proyección Potencial	87
4.4. Efecto de la distancia en la reutilización	95
4.5. Evaluación y Análisis de Impacto ambiental	99
4.5.1. Impactos en la categoría de cambio climático	99
4.5.2. Impactos asociados a factores ambientales de agua y material particulado	102
4.6. Impactos adicionales	108
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	110
5.1. Conclusiones	110
5.2. Recomendaciones	112
6. BIBLIOGRAFÍA	113
7. ANEXOS	126

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Modelo de ciclo de vida de un producto en una economía circular	25
<b>Figura 2.</b> Esquema de funcionamiento de una gestión ambiental	27
<b>Figura 3.</b> Jerarquía de procesos en la gestión de residuos sólidos.	28
<b>Figura 4.</b> Participación del rubro construcción en la contaminación ambiental.	29
<b>Figura 5.</b> Incidencia de los sectores en la generación de residuos en 2010 en Países Bajos	32
<b>Figura 6.</b> Composición de RCD para escombreras en EUA	33
<b>Figura 7.</b> Total de residuos dispuestos en siguientes usos para EUA	34
<b>Figura 8.</b> Disposición final de los RCD en USA	35
<b>Figura 9.</b> Composición de residuos obtenidos en edificaciones de Madrid.	37
<b>Figura 10.</b> Composición de residuos obtenidos de edificaciones en Bogotá	41
<b>Figura 11.</b> Generación nacional de RSM.	46
<b>Figura 12.</b> Mapa de rellenos sanitarios autorizados según DIGESA	47
<b>Figura 13.</b> Generación RSM a nivel Nacional y de Lim	49
<b>Figura 14.</b> Materiales empleados en construcción de paredes en edificaciones para un periodo 2009-2019	51
<b>Figura 15.</b> Cantidad de Inmuebles Inscritos en SUNARP de Lima Metropolitana	53
<b>Figura 16.</b> Impactos ambientales en distintas edificaciones frente a agregado natural.	56
<b>Figura 17.</b> Impactos ambientales en distintos escenarios de aprovechamiento	588
<b>Figura 18.</b> Ubicación de Proyecto de Mejora de Talud en San Miguel	62
<b>Figura 19.</b> Metodología de un Análisis de Ciclo de Vida	66
<b>Figura 20.</b> Fases de análisis en el ciclo de vida de los residuos de excavación	67
<b>Figura 21.</b> Mapa de entradas y salidas del sistema de reutilización	69
<b>Figura 22.</b> Diagrama de operaciones del proceso de reutilización	71
<b>Figura 23.</b> Esquema de caracterización de Resultados del ACV	76
<b>Figura 24.</b> Material rocoso dispuesto en el proyecto de mejoramiento	79
<b>Figura 25.</b> Material granular fino dispuesto en el proyecto de mejoramiento.	79

<b>Figura 26.</b> Composición del material dispuesto en el proyecto de mejoramiento	81
<b>Figura 27.</b> Aportes volumétricos diferenciado para cada distrito de Lima	86
<b>Figura 28.</b> Mapa de intensidades para volúmenes de excavación	85
<b>Figura 29.</b> Serie de tiempo de aportes volumétricos de residuos limpios de Lima.	86
<b>Figura 30.</b> Volumen pronosticado para Lima hacia el segundo bimestre del 2022.	91
<b>Figura 31.</b> Volumen pronosticado para Lima hacia el segundo bimestre del 2022	94
<b>Figura 32.</b> Stock de material excavado para el departamento de Lima	966
<b>Figura 33.</b> Gráfico de dispersión entre el volumen y la distancia promedio.	97
<b>Figura 34.</b> Gráfico de dispersión entre la cantidad de obras y la distancia promedio.	97
<b>Figura 35.</b> Gráfico de dispersión entre ritmo diario de llegada y la distancia promedio	98
<b>Figura 36.</b> Participación de procesos unitarios en el indicador de cambio climático	100
<b>Figura 37.</b> Resultados de dióxido de carbono emitido según IPCC 2013 GWP para 100 años.	100
<b>Figura 38.</b> Resultados de categorías ambientales por operación en reutilización	103
<b>Figura 39.</b> Participación de proceso unitario en los resultados de impacto ambiental según ReCiPe	104
<b>Figura 40.</b> Indicadores de impacto ambiental para el escenario regular	105
<b>Figura 41.</b> Comparativas de categorías de impacto ambiental según ReCiPe	106
<b>Figura 42.</b> Resultados de categorías endpoint según ReCiPe.	108

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Tipos de Residuos Sólidos.	23
<b>Tabla 2.</b> Tipos de Residuos de Construcción y Demolición.	31
<b>Tabla 3.</b> Composición de RCD para una demolición en los Países bajos.	333
<b>Tabla 4.</b> Material entregado en escombreras en EUA con la disposición final.	34
<b>Tabla 5.</b> Distribución de RCD para construcciones de Madrid, España.	37
<b>Tabla 6.</b> Volúmenes e índices de RCD generados por etapa constructiva.	38
<b>Tabla 7.</b> Clasificación de RCD generados para un caso en México	39
<b>Tabla 8.</b> Composición para residuos de construcción en Hermosillo, México.	40
<b>Tabla 9.</b> Composición para residuos de construcción en Caquetá, Colombia.	42
<b>Tabla 10.</b> Composición para residuos de construcción en la metrópolis de Chile.	43
<b>Tabla 11.</b> Composición para residuos de construcción en Brasil.	44
<b>Tabla 12.</b> Composición estimada de los residuos dispuestos a nivel nacional.	50
<b>Tabla 13.</b> Inventario empleado en el análisis de ciclo de vida por SimaPro	72
<b>Tabla 14.</b> Composición de los residuos limpios depositados de cada distrito.	80
<b>Tabla 15.</b> Características de los residuos limpios depositados de cada distrito Limeño	82
<b>Tabla 16.</b> Aporte en volumen de residuos de excavación de cada distrito Limeño	83
<b>Tabla 17.</b> Volúmenes de material de excavación para el periodo 2017-2021	88
<b>Tabla 18.</b> Volúmenes de material del periodo 2017-2021 con pronóstico hacia 2022.	90
<b>Tabla 19.</b> Volúmenes reales de material de excavación del periodo 2017-2021 con pronóstico hacia el 2022	92
<b>Tabla 20.</b> Volúmenes reales de material de excavación del periodo 2017-2021 con pronóstico hacia el 2022.	93
<b>Tabla 21.</b> Resultados para las 3 áreas de protección según ReCiPe 2016	107

# 1. GENERALIDADES

## 1.1. Introducción

En la última década, el control de impacto ambiental y la búsqueda de un desarrollo sostenible son temas cuya relevancia se ha visto aumentada significativamente debido a los graves efectos observables como el aumento de la temperatura mundial, la aparición frecuente de huracanes, la deglaciación y la extinción de variadas especies. Por lo cual, cada país ha tomado cartas en el asunto teniendo reuniones internacionales y estableciendo metas globales, como las mencionadas en el “Acuerdo de París” o los Objetivos de Desarrollo Sostenible, para tratar de mitigar estos impactos y poder medir estos cambios a fin de crear límites. En el Perú como ejemplo, uno de los hitos que acompaña estos objetivos fue la creación del Plan Nacional de Acción Ambiental – PLANAA, el cual define los objetivos nacionales en cuanto al manejo de residuos y a la correcta gestión de recursos naturales. A partir de la relevancia del daño ambiental, se deberá entender cómo este asunto involucra a todas las actividades y gestiones dentro de una nación y qué medidas se deberán establecer para estimar su incidencia.

Entonces, siendo el sector construcción uno de los pilares de la economía peruana que representa hasta el 5.8 % del PBI nacional hasta fechas actuales (Instituto Nacional de Estadística e Informática – INEI, 2022), es necesario establecer la participación de este rubro en el marco del cambio climático, tanto a nivel macro como nacional. A nivel global, se estima que el sector construcción es quién genera más del 50% de residuos (World Resource Institute, 2016) y quién más consume de los recursos mundiales empleando un 40% de arenas y piedras, 25% de la madera virgen, 16% del agua y 35% de energía (Roodman y Lenssen, 1995, como se citó en Corzo, 2016). Este consumo exagerado podría deberse a un mal planteo arquitectónico, una inadecuada elección de materiales y, sobre todo, a una errónea gestión de residuos sólidos (Miranda, 2016); por ende, se debe promover una estrategia de desarrollo sostenible para la construcción que tome en cuenta un menor uso de recursos, así como un

manejo adecuado de los Residuos de Construcción y Demolición (en adelante referidos como RCD). Se debe mencionar entonces, que el principal problema de los RCD proviene principalmente por la creciente cantidad generada en las obras y por la inapropiada gestión que se le da frecuentemente (Gómez, 2020).

Por otro lado, así como los RCD presentan una elevada amenaza ambiental, también poseen un muy alto potencial de reutilización, los cuales han sido explorados en diversos países debido a sus altos volúmenes de producción. Por mencionar algunos, los residuos de concreto suelen emplearse como material base para pavimentos o como reemplazo al agregado natural en la fabricación de hormigón, los residuos cerámicos suelen emplearse como materia prima para bloques o mampostería mediante su trituración o transformación bajo calor, y los residuos de excavación como fuente alternativa al agregado natural obtenido de canteras o incluso como materia de fabricación de ladrillos y bloques (Chica y Beltrán, 2018).

La presente tesis busca realizar un análisis de las tasas de generación de los residuos previamente mencionados, centrándose en los de tipo residuos limpios de excavación, basándose en los datos recogidos y mediciones obtenidas sobre el aporte en volumen de material excavado proveniente de distintas construcciones de la región de Lima Metropolitana. Asimismo, se establecerá una caracterización de los residuos encontrados y se generará la ratio conforme a la magnitud de la edificación que se realizará mediante métodos de estadística y probabilística.

## **1.2. Alcance y limitaciones**

Si bien el impacto de la construcción presenta diferentes etapas de estudio y análisis, sea desde la extracción de los recursos hasta el uso del producto final del proyecto, el propósito de la presente es realizar un análisis en la etapa previa a la de construcción, basado solo en los residuos generados en ella, centralmente en lo respecto al residuo o restante del material excavado para estructurar los cimientos o pisos subterráneos. Los datos a emplear parten de

una muestra aleatoria, y puesto que es de carácter cuantitativo el análisis, los resultados podrán emplearse en proyectos de similar envergadura o metodologías similares. Asimismo, el periodo de análisis se limita al comprendido entre el inicio de emisión de las constancias hasta la fecha de solicitud de los mismos para el análisis de los datos.

### **1.3. Objetivos**

#### **Objetivo general**

Contribuir a la mejora de gestión de residuos sólidos obtenidos en construcción y demolición mediante la evaluación de impacto ambiental de la generación y del reúso de sólidos de excavación en infraestructura pública, a fin de reducir el grado de contaminación

A la par se cuenta con objetivos específicos como:

- Caracterizar los residuos en construcción según su origen distrital y estimar los volúmenes generados de RCD en proyectos de Lima para el periodo comprendido entre 2016 y 2021 y determinar su correlación.
- Estimar la tasa de generación de residuos de excavación para un periodo futuro mediante un método probabilístico.
- Modelar el impacto ambiental del proceso mediante la aplicación de un análisis de ciclo de vida usando el software SimaPro y la base de datos Ecoinvent.

### **1.4. Justificación**

Se establece que la huella ambiental (entendida como el impacto ambiental perjudicial de un producto en lo largo de su ciclo de vida) del sector construcción es una de las más notorias y destructivas frente a otras actividades humanas, y es evidente la relación directa que presenta el desarrollo urbano con el crecimiento demográfico y social. Esta afirmación puede verse explicada en las altas tasas de generación de residuos que presentan países de alto nivel de ingreso per cápita, como muestra el estudio del Banco Mundial (Kaza et al, 2018) dónde

México, Chile y Brasil se encuentran entre los primeros productores de residuos sólidos siendo los que más expansión urbana han conseguido también.

Entonces se puede partir del crecimiento demográfico que se observa en el distrito limeño para inferir el incremento venidero en la construcción de edificaciones, por ejemplo, hacia el 2020 el INEI estimó que la capital continúa su crecimiento poblacional y llegaría a contener a 9.7 millones de habitantes que representa casi el tercio de la población nacional lo que promovería la construcción de viviendas. Lo expuesto se materializó con el boom de la construcción alrededor del año 2017 y con la alta demanda insatisfecha de viviendas en Lima registrada en los últimos años, como muestra el estudio realizado por el Ministerio de Vivienda y Construcción (2018) donde a nivel nacional se detectó una demanda potencial nacional de 900 mil viviendas y sólo en Lima de casi 580 mil.

Además, en esta región, por ejemplo, se concentra la mayor inversión pública y privada orientada a la infraestructura y esto es claramente visible, debido a que solo en lo que va del 2020 se encuentran en ejecución 2 megaproyectos, tales como la Línea 2 del Metro y la ampliación del Aeropuerto Jorge Chávez y aún en edificación más de 1000 proyectos inmobiliarios, como indica el presidente de CAPECO, Humberto Martínez (El Peruano, 2020). Entonces, un punto desde el cual se puede realizar un análisis preciso y confiable de la gestión de los RCD será la región de Lima, debido a su mayor incidencia en el área de la construcción de edificaciones.

Continuando a lo expuesto, si bien Lima es quién más atestigua el ascenso del rubro constructivo y su beneficio económico, es también quien más sufre las consecuencias. Esto a partir de las diferentes denuncias realizadas en los municipios debido a la presencia exagerada cantidad de residuos de construcción en playas de varios distritos tales como, Chorrillos o Callao, y en los botaderos informales de la Lima Metropolitana (Diario Correo, 2016). Tras el estudio del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental - OEFA (2016), se indica que

las principales causas del fallo parten del desinterés de los municipios por el plan de manejo de residuos, de los pocos espacios de relleno sanitario, de la proliferación de botaderos informales y de la escasa o nula segregación en las fuentes de producción, por ende, en la investigación se busca mostrar cuales son los volúmenes generados y su deficiencia en el aprovechamiento del potencial reciclable presente en ellos.

## **1.5. Hipótesis**

### **Hipótesis General**

La estimación de volúmenes y la correspondiente evaluación de impactos de residuos de construcción en un proyecto de sostenibilidad contribuyen a la mejora de gestión de residuos sólidos, lo cual involucra a su vez una reducción y reutilización de los mismos.

### **Hipótesis específicas**

- Los residuos de construcción estarían caracterizados como residuos inertes de excavaciones, restos de madera, restos metálicos, residuos orgánicos y residuos peligrosos. Entre estos residuos predominan los del grupo reutilizable que representan más del 50% de todos los residuos.
- Con base en las ratios halladas con la información recolectada podrá estimarse el estado de la generación de RCD para un rango futuro mediante un modelo probabilístico.
- El impacto ambiental de los RCD puede estimarse empleando metodologías conocidas, tal como un análisis de ciclo de vida.
- El impacto ambiental de la vida de un RCD se verá reducido ante la implementación de un proceso de reutilización.

## 2. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Marco conceptual

#### 2.1.1. *Ambiente y entorno*

La importancia que merece el ambiente puede deducirse de su propia definición, la cual empíricamente ha estado vigente desde el inicio de la evolución. Como explica el análisis realizado por Navia y Tamayo (2020), el término ambiente hace referencia al entorno natural y al grupo de organismos vivos y abióticos que rodean a cualquier otro organismo o grupo de ellos. Para el ser humano representa el territorio y clima donde satisface todas sus necesidades básicas, donde el equilibrio entre el soporte de vida, el bienestar de especies que la cohabitan y la colaboración activa garantiza su supervivencia. En tiempos actuales, debido a la masiva intervención del ser humano, puede incluso emplearse la expresión ambiente construido que usa la misma idea para el entorno fabricado por el hombre y el desarrollo de la vida consecuente.

Además, dentro del medio existen elementos interdependientes conocidos como ecosistemas, que representan el conjunto dinámico entre una comunidad y el medio como la misma unidad funcional. Este término es válido también para la zona o ecosistema urbano, tópico principal de la investigación.

#### 2.1.2. *Impacto ambiental y desarrollo sostenible*

En cada ecosistema, hay un factor de adaptabilidad que ha permitido a través del tiempo que el ser humano consuma sus recursos sin alterar gravemente su estructura. Sin embargo, debido a la aparición de la industria, al acelerado crecimiento demográfico de los últimos años y a una errada gestión en el aprovechamiento de recursos naturales; el equilibrio y factor resiliente del ecosistema se han visto perjudicados (Sone, 2018).

La interacción entre el hombre y su ecosistema produce lo que se define como impacto ambiental y refiere al conjunto de incidencias, de consecuencia positiva o negativa, que

produce en el medio cualquier actividad o instalación humana. Entonces, cualquier proceso de transformación repercute o impacta al medio, desde que explota materia prima del mismo para su conversión en bien o servicio hasta que lo dispone a un cliente que lo consume y desecha (Acción RSE, 2007). Actualmente, la serie de cambios provocados por las generaciones anteriores han desembocado en una problemática medioambiental tan relevante que los líderes en gobiernos y empresas han orientado sus objetivos hacia la reducción del impacto negativo, para lo cual surge la necesidad de estrategias de desarrollo sostenible al entender al sistema ambiental como la única fuente de recursos e impulso (Accinelli y De la Fuente, 2013).

Según lo explicado anteriormente, el ambiente y desarrollo sostenible se han convertido en grandes preocupaciones para las instituciones mundiales, siendo la conservación y protección de tal objeto de tratados internacionales, políticas urbanas e investigaciones, lo cual se puede apreciar en las agendas climáticas nacionales y los foros internacionales en localidades latinoamericanas o los objetivos mundiales de desarrollo sostenible los cuales contienen también asuntos sociales y económicos (De la Peña y Vincés, 2020). Como explica el reporte de las Naciones Unidas, se ha vuelto el mayor desafío de la sociedad y requiere una acción inmediata, asegurar que las futuras generaciones puedan sustentarse de los recursos del planeta, de lo contrario, la inacción causará un daño irremediable al ambiente (Frischknecht et al, 2016).

Sobre este tipo de iniciativas puede afirmarse que empiezan a tomar fuerza alrededor de los años 70, cuando se convocó a la Conferencia de Estocolmo para tratar posiciones comunes ante problemas ambientales. A partir de esta fecha aparecerían recurrentemente los términos de “desarrollo sustentable” y “gestión sostenible” en las distintas conferencias gubernamentales, entendiendo a la primera referencia como un proceso de cambio donde la obtención de recursos, la intención de inversiones, la dirección de los desarrollos tecnológicos y cambios políticos suceden en armonía y buscan mejorar el potencial actual y futuro para

satisfacer las propias necesidades (Diem, 2020); mientras la segunda, al sistema que emplean las instituciones u organismos para mejorar su desempeño en las áreas social, económica y ambiental de forma estratégica y coherente al desarrollo sostenible que le permitan poseer ventajas competitivas (Páez, 2018).

### **2.1.3. Residuos Sólidos**

Al hablar de impactos ambientales y degeneración del ecosistema, uno de los tópicos más comunes a tratar es la generación y tratamiento de residuos. En primer lugar, etimológicamente el vocablo proviene del latín *residuum* y este describe al material restante que permanece sin utilidad luego de ser empleado para alguna labor o proceso de transformación y puede, en su mayoría, ser reaprovechado. La normativa peruana, entonces con una definición similar, conceptúa a los residuos sólidos como “aquellas sustancias, productos o subproductos en estado sólido o semisólido de los que su generador dispone, o está obligado a disponer, en virtud de lo establecido en la normatividad nacional o de los riesgos que causan a la salud y el ambiente, para ser manejados a través de un sistema priorizando su valorización y disposición final” (Ley N°1278 – Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, 2016).

Desde otra perspectiva, se desprende que el concepto de un residuo no es permanente y sufre afectaciones producidas por: el paso del tiempo, el avance de la tecnología y el cambio de exigencias sociales. Además, se debe mencionar que sucede un largo periodo de tiempo entre la generación de un residuo, independientemente de su fuente particular o industrial, y el momento en el que adquiere la forma conceptual (Avanzini De Rojas, 2003, como cita en Cortés, 2018). Los distintos perjuicios que derivan de la generación de residuos afectan en varias áreas del desarrollo humano tales como: el sector económico, el sector de salud y el sector ambiental.

En el primer aspecto, el costo proviene de la recolección de estos residuos y la segregación durante el proceso en que pasan del ámbito urbano a los puntos de acopio o

vertederos o el costo agregado a la limpieza de fuentes primarias de obtención, como parcelas o lagos. En el segundo sector, el efecto que tienen los residuos se manifiesta en la proliferación de enfermedades entéricas principalmente cuando se encuentran en botaderos a cielo abierto, así como en los recursos hídricos cuando generan reacciones en las fuentes de consumo humano (Rondón et al., 2016). En último lugar, los efectos negativos ambientales que generan los residuos los explica el Ministerio de Ambiente (MINAM, 2011) en base a los recursos naturales que ellos son capaces de afectar.

En primer lugar, se tiene al recurso hídrico. Por un lado, las escorrentías superficiales pueden contaminarse con materia inerte proveniente de los residuos lo cual afecta directamente a la vida marina de los mismos o los animales que la emplean como fuente bebible e incluso pueden también ocasionar taponamientos en el curso libre del agua, que se agrava en épocas de aumento de caudal donde podría causar desbordes. Por otro lado, surge la aparición de lixiviados, que refiere al líquido tóxico percolado entre los residuos producto de la humedad y la lluvia que arrastra partículas de los mismos y al contacto con el suelo, lo atraviesa hasta alcanzar los cursos subterráneos y, en consecuencia, logra llegar en un punto al flujo superficial.

En segundo lugar, se cuenta al recurso suelo. Este es el recurso más afectado, pues la mayoría de puntos actuales de deposición se da sobre terrenos baldíos. Como se mencionó, la aparición de lixiviados genera que la microfauna de insectos o bacterias en el terreno desaparezcan, y en caso de tener cercas producción agrícola esto impide que las plantas se desarrollen con normalidad y evita que el suelo recupere sus nutrientes, lo que termina con ellas. Además, la acumulación de desechos puede atraer a los animales carroñeros y plagas de insectos.

En tercer lugar, se cuenta el medio aéreo. Durante la descomposición de los residuos, se generan distintos gases y olores nocivos al medio, por ejemplo, el metano ( $\text{CH}_4$ ), vapor de agua

y el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) los cuales están directamente involucrados en el cambio climático, por lo que se conoce a este subgrupo como gases de efecto invernadero, debido a que promueven el aumento de temperatura. Si bien al final de su ciclo debieran ser incinerados para evitar su larga descomposición, este proceso también implica generación de dióxido o monóxido además de un costo adicional a la población (MINAM, 2011).

Por último, el paisaje como recurso visual toma relevancia en el asunto puesto que la incorrecta disposición, además de arruinar la estética de cualquier paisaje, tiene efectos en la salud. Esto se debe a que existe una dinámica entre la belleza y el comportamiento, es decir, la calidad visual tiene efectos fisiológicos en el individuo. De esta manera, al presenciar un ambiente conglomerado de residuos, desordenado y con ausencia de flora, es decir, sin armonía visual, el individuo común podría generar estrés y desánimo, lo que reduce en gran manera su bienestar y salud (Fuentes y Argüello, 2015).

Dentro los residuos sólidos existen, según la normativa peruana (MINAM a través de la OEFA, 2014) y en Latinoamérica en general, ocho grandes grupos que se establecen a partir de la fuente de origen. De los que se muestran a continuación, las tres primeras categorías son responsabilidad de la gestión municipal y las cinco últimas categorías, donde se encuentra la de interés, designan su disposición final a responsabilidad de las organizaciones que los generan debido a su mayor riesgo sanitario. Los mencionados son tal como se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1**

Tipos de Residuos Sólidos.

<b>Tipos de Residuo</b>	<b>Definición</b>
a) Residuos domiciliarios	Comprende a todo tipo de residuos que genera la población común desde sus viviendas o edificios multifamiliares, y se colocan a disposición por los mismos propietarios. Coloquialmente se le aplica el nombre de “basura” e incluye muy diversos materiales.
b) R. comerciales	Son aquellos generados en la prestación de servicios o locales comerciales, sean de recreación, de comida, de hospedaje o de oficinas.
c) R. de limpieza de espacios públicos	Son el grupo de residuos obtenidos de la limpieza de vías pública, todo aquello dispuestos en las veredas, calzadas o plazas y que el servicio de barrido obtiene.
d) R. de establecimientos de salud	El conjunto de material desecho en instalaciones de salud, desde atención médica hasta la investigación, abarca entre los más comunes laboratorios, hospitales y consultorios. Es el más propenso a contener agentes químicos o patógenos en cantidades considerables.
e) R. industriales	Cualquier residuo generado en una actividad del sector secundario de la economía, la industria, que procedan del proceso de transformación de cualquier empresa que se identifique a sí misma como industrial o semi-industrial y ponga a disposición los que denomine como desechos.
f) R. agropecuarios	Que procedan de la agricultura, ganadería o silvicultura. Al ser de fuente orgánica este tipo de residuos suele aprovecharse en su propio campo de generación como comida de animales, fuente de abonado o como materia de biogás.
g) R. de actividades especiales	Los generados en infraestructuras de gran envergadura que buscan prestar ciertos servicios públicos o privados, al ser de grandes dimensiones conllevan un alto riesgo en su tratamiento.
h) R. de actividades de construcción	La categoría de residuos de construcción la provee el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2013), y sigue a los RCD como todo residuo que además de cumplir con le definición expuesta previamente, tiene como punto generador las actividades o procesos de construcción, rehabilitación, restauración, remodelación o demolición de edificaciones e infraestructura. Dentro de este grupo, así como en los 7 restantes, se pueden encontrar 2 categorías relevantes: residuos peligrosos y residuos no peligrosos o reutilizables.

Nota: Son ocho los grandes grupos de residuos según origen y de gestión municipal y privada seccionado según su sector de origen. Tomado de OEFA, 2014.

Cabe resaltar que los lineamientos establecidos por el Ministerio de Vivienda y Construcción para el tratamiento de los residuos del sector se expusieron mediante: el Decreto Supremo N°003-2013-Vivienda, donde se brinda el reglamento para la gestión y manejo de

residuos sólidos incluyendo un artículo que aclara respecto a los RCD; el DS N°019-2016-Vivienda para detallar puntos importantes dentro del concepto de gestión de residuo; y, finalmente el Decreto Supremo N°002-2022 que reestructuraba la normativa previa. Mientras que la ley N°27314 y los decretos legislativos N°1278 y N°1501 fueron dictados para la gestión y definición de residuos sólidos en general, tanto municipales como no municipales.

#### ***2.1.4. Gestión Ambiental***

Previamente se presentó una breve definición de lo que refiere a gestión sostenible, y este es un concepto que viene de la mano, si no incluida, en gestión ambiental. Esta área de la gestión se entiende como el grupo de medidas y métodos que reduce el efecto que tiene las prácticas de alguna institución u organismo en el ambiente, de esta forma permite también estimar el impacto de cada actividad sobre el medio y documentar su avance y cumplimiento de objetivos. Para ejecutar un sistema de gestión ambiental la organización debe conocer en primer lugar cómo afecta su rubro en el entorno y establecer un programa que establezca los logros a alcanzar y las herramientas a emplear para el correcto tratamiento de los residuos de construcción desde su generación hasta su disposición en los puntos de aprovechamiento, de esta forma la organización muestra además su compromiso con el ambiente (Nuevas Normas ISO, 2017).

Este principio se guía del lineamiento novedoso de economía circular pues se rige bajo la propuesta de: reducción, reutilización y reciclaje y lo que busca principalmente es la eliminación de “basura” y puntos de vertedero, sino que el elemento siempre esté disponible para alguna función a lo largo de su ciclo vital (Parlamento Europeo, 2015). La aplicación al ámbito constructivo puede interpretarse como una reducción tanto del material dispuesto en el diseño como de la merma generada por fallos en la ejecución, una reutilización de los mismos residuos para fines constructivos o el reciclaje de los mismos para su empleo en otras áreas.

## Figura 1

Modelo de ciclo de vida de un producto en una economía circular



Nota: El gráfico muestra las seis etapas de la vida de un producto comercial en un gráfico circular debido a que el producto no termina, si no que se transforma. Tomado de Parlamento Europeo, 2015.

La Figura 1 muestra el ciclo de vida propuesto por una economía circular, en este mismo cualquier producto parte desde su concepción, su producción y distribución hasta el consumo, seguido de lo cual se da la recolección y luego de pasar un proceso de reciclado, funciona como fuente de otro futuro producto. De esta forma se reduce el consumo de materias primas y se disminuye al mínimo el desecho residual. Según Villoria y Del Río (2014), este tipo de sistemas de gestión también debe cumplir con la organización del ciclo de mejora continua, entonces las etapas consecutivas y secuenciales que debe presentar al ser implementado en una empresa, sea el caso de una orientada al diseño o construcción, son básicamente cuatro.

En primer lugar, se encuentra la fase de Planificar (*Plan*). Aquí el área administrativa y líder de la empresa debe comunicar las políticas ambientales que se aplicarán en las actividades a fin de completar las metas propuestas y cumplir con la normativa vigente. Antes debe haberse hecho una evaluación de impactos ambientales que genera, desde lo cual se traza el plan de acción. En este punto se define el programa ambiental donde se indican los medios

y los responsables de las diferentes ramas en el calendario, y se debe asegurar que todos los participantes involucrados lo conozcan y comprendan.

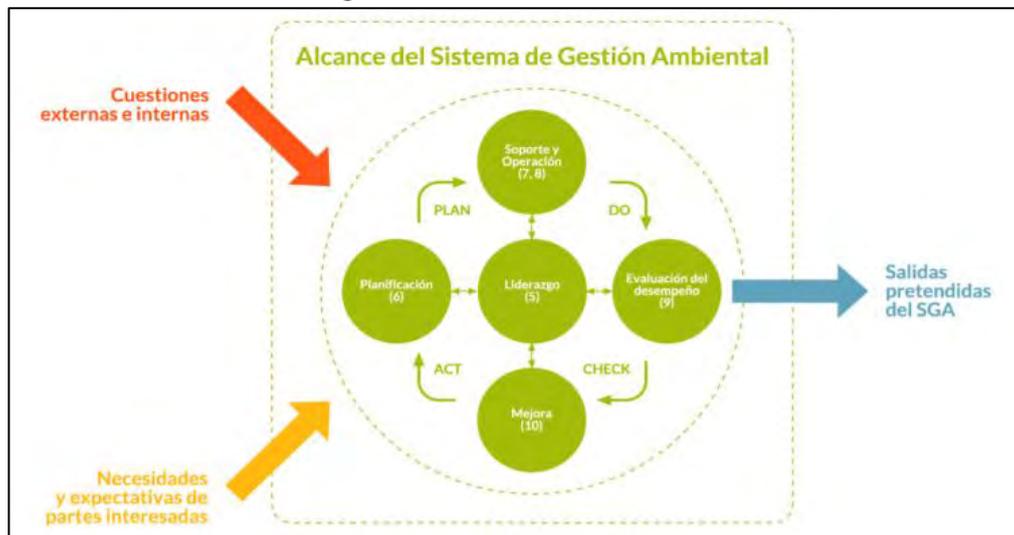
En siguiente puesto, está la fase del Hacer (*Do*), la cual abarca la ejecución de lo planeado. Dentro de la organización se emitirán los respectivos documentos o manuales que indique y describa cómo mediante el trabajo realizado se alcanzará lo propuesto en lo planificado, esto permite llevar los objetivos generales de la empresa a tareas particulares dentro de cada área,

En tercer lugar, se coloca la fase para Verificar (*Check*). Cuando ya se pone en práctica las actividades del organismo, se debe comprobar que los parámetros o exigencias expuestas se estén cumpliendo. Por esto mismo, el administrativo cuenta con un sistema de supervisión, que inspecciona cada área y revisa si los criterios ambientales están presentes.

Cómo último paso de la implementación de un sistema de gestión ambiental, se tiene el Tomar acción (*Act*). Después de la verificación, se conoce cómo actuar frente a alguna discordancia en las actividades. Una vez detectada se debe hacer un análisis de su aparición hasta encontrar la solución óptima y mitigar el impacto ambiental, además permite medir la eficacia del programa de gestión y la competencia de los miembros (Villoria y Del Río, 2014). La Figura 2 muestra el esquema explicado en párrafos anteriores y cómo la secuencia circular permite siempre obtener como resultado una mejora continua.

**Figura 2**

Esquema de funcionamiento de una gestión ambiental



Nota: Se muestra una correcta gestión ambiental con las 4 fases requeridas donde ingresan las cuestiones y necesidades que se tratarán en el esquema y como salida estarán los resultados pretendidos. Tomado de Nueva norma ISO 14001, 2015.

### **2.1.5. Gestión de los Residuos de Construcción**

En particular, para mostrar la gestión correcta de residuos de construcción se debe mencionar el manejo correcto de los residuos sólidos en general. La Figura 3, además de mostrar como cumple con el modelo de economía circular antes propuesto, indica los procesos de manejo de residuos sólidos desde el más deseado que se refiere a la minimización de residuos en su generación que incide incluso en su desaparición, hasta la opción más perjudicial que presenta a los puntos de acopio controlados. Estos mismos son los lineamientos que rigen el Plan Nacional de Gestión Integral de residuos Sólidos 2016 – 2024 (MINAM, 2016) y basándose en dicha figura la secuencia de importancia sería: 1) Evitar o reducir al mínimo el origen de residuos; 2) Reutilizar los residuos en su misma área de producción; 3) Recuperar el valor de los residuos empleándolo como fuentes alternativas de energía, o como elementos reciclados para diferentes productos; y 4) Entregar los residuos en vertederos.

**Figura 3**

Jerarquía de procesos en la gestión de residuos sólidos.



Nota: La pirámide muestra en su pico la reducción como la opción más preferible, opuesto al vertedero en control. Tomado de Hoornweg y Bhada-Tata, 2012.

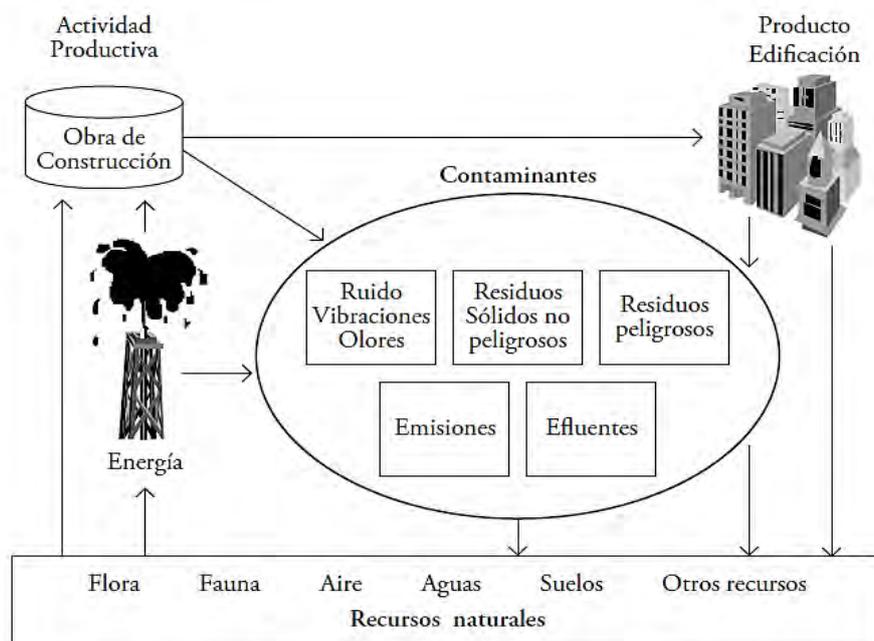
## 2.2. Estado del arte

### 2.2.1. Causas de generación de residuos en el sector constructivo

Dentro del sector constructivo los impactos ambientales son muy variados, además de los residuos que generan su incidencia en el impacto ecológico se manifiesta en todo lo largo de un proceso constructivo, así como muestra la Figura 4.

**Figura 4**

Participación del rubro construcción en la contaminación ambiental.



Nota: La participación de las construcciones en los efectos ambientales, como el uso de recursos y la emisión de contaminantes. Tomado de Valdivia, 2009.

Sin embargo, enfocándose únicamente en la generación y origen de los residuos de obra, las causas de su aparición se pueden agrupar en cuatro grupos basándose en sus atributos como muestra la evaluación en Costa Rica realizada por Abarca Guerrero (2017), donde se distinguen diferentes causas para las fases secuenciales.

En este primer ítem está el diseño, donde se encuentran las siguientes causas: productos de obra que no cuentan con medidas estándares, modificaciones del diseño durante la construcción, falta de conocimiento sobre el tamaño de piezas disponibles, así como de disponibilidad o costo de materiales, una excesiva complejidad en planimetría, omisión de información en los planos y selección de materiales inadecuados.

En un segundo aspecto está el proceso constructivo, donde inciden la mayoría de errores de compra en cantidad de productos, empleo de materiales equivocados, imposibilidad de compras al por menor, y materiales recibidos son distintos a los especificados asimismo los

errores por parte de los trabajadores que generan elementos mal hechos e inducen a su demolición y rehacer los elementos.

Respecto a la administración y gestión de los materiales dispuestos en campo, las fallas comunes suceden por parte de terceros distribuidores como materiales que llegan fuera de empaque, daños que sufre el material en el trayecto a obra, actitud indiferente de los distribuidores y falta de conciencia ambiental en los mismos. Asimismo, se coloca en este aspecto los incidentes naturales o alteraciones de clima.

Finalmente, respecto a la ejecución de obra, las causas de este siguiente aspecto pueden ser: errores de maestro de obra en el empleo de materiales, poca claridad de materiales requeridos, retrasos en la ejecución de partidas, acciones negligentes de los obreros que causan accidentes y equipos con mal funcionamiento. En este punto se puede introducir también los residuos inevitables, como los resultantes del movimiento de tierras, demolición de preexistentes o limpieza de terreno que son obras preliminares de la construcción.

De todo este análisis, se concluye que la etapa más involucrada en la generación de residuos es la etapa de diseño y la segunda más importante es la práctica de este. De esta forma también se deja en evidencia que la minimización de residuos se puede planear antes de la ejecución de edificaciones y así también, los agentes participantes en la generación son todos los involucrados desde los ingenieros en la etapa de diseño, los constructores en trabajo práctico y los distribuidores al entregar los productos, por lo que la conciencia ambiental debe estar presente en todos los activos.

### ***2.2.2. Caracterización de residuos en construcción***

Para conocer el tipo de residuos a encontrar en una obra, el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2022) elaboró en principio una lista de residuos sólidos generales, a partir de lo cual se estableció la lista de residuos de construcción y demolición como muestra la siguiente Tabla 2. Esta misma servirá de guía para los siguientes acápite

puesto que comprende la caracterización más completa y cabe resaltar que el presente estudio se enfocará en el grupo A, como se indica, referente a residuos excedentes de remoción.

**Tabla 2**

Tipos de Residuos de Construcción y Demolición.

<b>A. Excedente de Remoción</b>
1. Pétreos
2. Arenas
3. Tierras
<b>B. Excedente de Obra y Escombros</b>
1. Concretos y derivados
2. Maderas y derivados
3. Metalicos: cobre, bronce latón, aluminio, plomo, zinc, hierro, acero, estaño, metales mezclados y cables y derivados
4. Plásticos y derivados
5. Materiales cerámicos
6. Asfaltos y derivados
<b>C. Otros Residuos Similares a Municipales</b>
1. Papeles y cartones
2. Vidrios y plásticos
3. Metales
4. Orgánicos
5. Peligrosos reciclables: aceites usados y baterías
<b>D. Peligrosos y potencialmente peligrosos</b>
1. Restos de madera tratada. Envases de removedores de pinturas, aerosoles, removedores de grasa, adhesivos, solventes, preservantes, pinturas, pesticidas, contrachapados de madera, colas, lacas. Restos de tubos de fluorescentes, transformadores, condensadores, etc. Restos de PVC, Restos de planchas de fibrocemento con asbesto, pisos de vinilo asbesto, paneles divisores de asbestos.

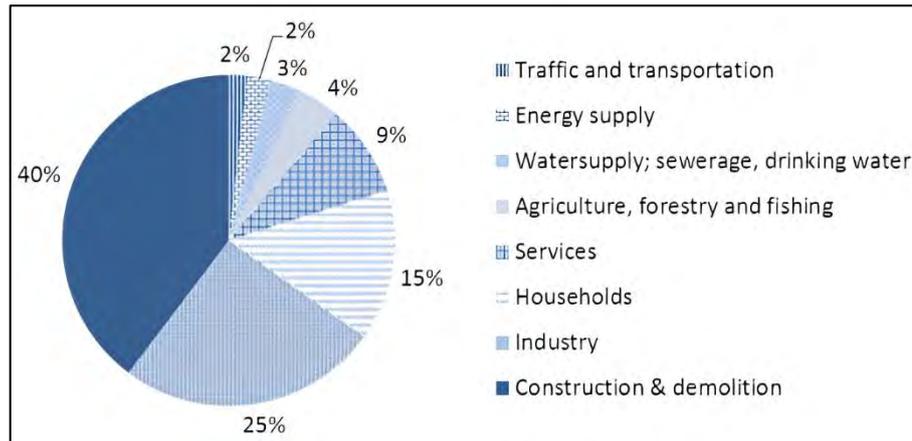
Nota: Cuadro de clasificación para los residuos de construcción y demolición para Perú con origen según etapa constructiva. Adaptado de Decreto Supremo 002-2022-Vivienda, 2022.

### **2.2.3. Gestión y Composición de residuos alrededor del mundo**

Acorde a la tesis realizada por Mulders (2013) sobre los Países Bajos, gracias a un análisis de una entidad gubernamental se obtuvo la Figura 5 que indica las diferentes fuentes de origen para la producción total de residuos sólidos.

**Figura 5**

Incidencia de los sectores en la generación total de residuos en el 2010 en Países Bajos



Nota: Según el peso se estimó las fuentes por sector de los residuos generados en los Países Bajos de donde se determinó un 40% atribuible a construcción. Tomado de Mulders, 2013.

Se aprecia entonces que un 40% de los residuos generados provienen del sector constructivo, seguido en un 25% por la industria y otro 15% por los residuos domiciliarios. En base a este conocimiento y al potencial que se conoce de los residuos de construcción, el investigador decidió realizar una tesis que aborda el estudio en un caso de demolición de una edificación con el fin de estimar cuánto porcentaje se podía reutilizar o valorizar en base a fuentes de energía. Como resultados obtuvo la Tabla 3, y como se puede observar que el material predominante en los residuos son restos de concreto y materiales pétreos, lo cuales conforman un 64.02% seguido de residuos metálicos con un 12.88% a los que cede el máximo valor reutilizable. En un análisis posterior (Chunbo et al, 2020) se expresa que en esta nación el porcentaje de aprovechamiento de residuos de construcción es de un admirable 95% debido a la presencia y política de escombreras. Aquí el principal uso luego de tratamiento se destina a bases de carreteras y un menor porcentaje a agregados de concreto, pero aún se continúa trabajando en variadas innovaciones tecnológicas para el reciclaje del concreto.

**Tabla 3**

Composición de RCD para una demolición en los Países bajos.

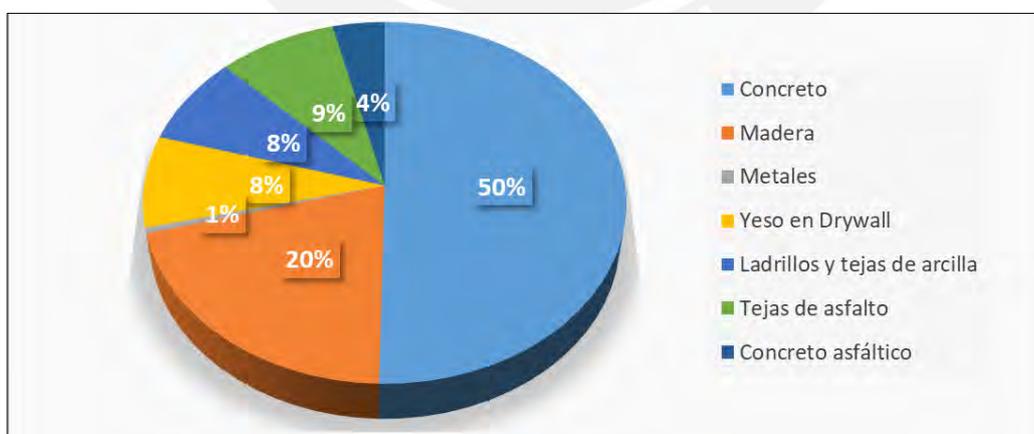
<b>Fracción</b>	<b>% de RCD</b>
Concreto, material pétreo y de albañilería	64.02%
Metales	12.88%
Residuo de separación	9.35%
Madera	6.10%
Vidrio	0.32%
Plástico	0.76%
Papel	0.22%
Material de aislamiento	0.07%
Asbestos	1.42%
Residuos mixtos	0.49%

Nota: Se muestran los porcentajes para los residuos de demolición de varios proyectos de los países, donde se determinó la mayoría como inerte. Tomado de Mulders, 2013.

Por otro lado, según un reporte de Estados Unidos de la Oficina de Conservación y Recuperación de Recursos (EPA, 2020) muestra en base a los registros de varias de las más de 1500 escombreras alrededor de todo el país, cuanto peso en toneladas fue recogido en tales y en qué cantidades se distinguían residuos de: concreto, madera, yeso, metal, ladrillos, tejas y pavimento asfáltico. De los datos recogidos se obtuvo el gráfico de la Figura 6.

**Figura 6**

Composición de RCD para escombreras en EUA



Nota: El gráfico circular muestra la composición principal de los RCD para Estados Unidos, donde resaltan el concreto como material inerte, y la madera. Tomado de EPA, 2020.

En dicho reporte se indica que hacia el 2015 se registró la reutilización (*next use*) que se les darían a los residuos de construcción una vez tratados, como muestra la Tabla 4, con los cinco principales destinos: compost orgánico, productos de manufactura, agregados de concreto, combustibles y recuperación de suelos. Del mismo se concluye que el metal tiene el mayor reaprovechamiento donde más del 80% fue reutilizable, mientras tanto, el yeso en drywall solo tuvo un 12% aprovechable, disponiéndose el resto en escombreras. Entonces:

**Tabla 4**

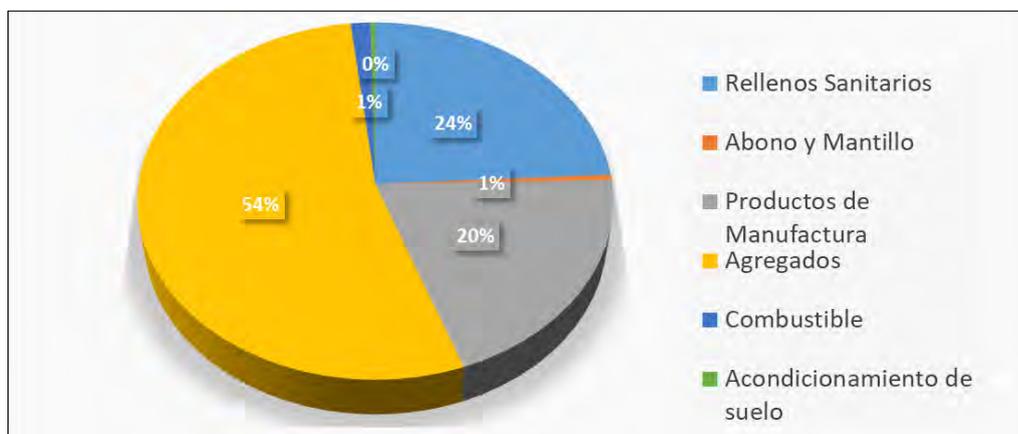
Material entregado en escombreras en EUA con la disposición final.

Tipo de Material en RCD	Rellenos Sanitarios	Uso Siguiete				
		Abono y Mantillo	Productos de Manufactura	Agregados	Combustible	Acondicionamiento de suelo
Concreto	66,535,034	-	30,962,635	284,260,331	-	-
Madera	27,053,922	2,611,131	1,296,159	-	7,988,787	-
Yeso	10,803,717	-	234,675	-	-	2,003,608
Metal	670,495	-	3,784,505	-	-	-
Ladrillo/Tejas	10,587,745	-	-	1,559,255	-	-
Tejas de asfalto	11,491,724	-	1,931,000	80,045	22,231	-
Pavimentos de asfalto	5,042,361	-	70,347,585	7,769,079	-	-
<b>Totales (m3)</b>	<b>132,184,998</b>	<b>2,611,131</b>	<b>108,556,559</b>	<b>293,668,710</b>	<b>8,011,018</b>	<b>2,003,608</b>

Nota: Se muestran las cantidades totales de residuos de construcción según su tipo y según su destino de proceso para reaprovechamiento además de los rellenos sanitarios. Tomado de EPA, 2020.

**Figura 7**

Total de residuos dispuestos en siguientes usos para EUA

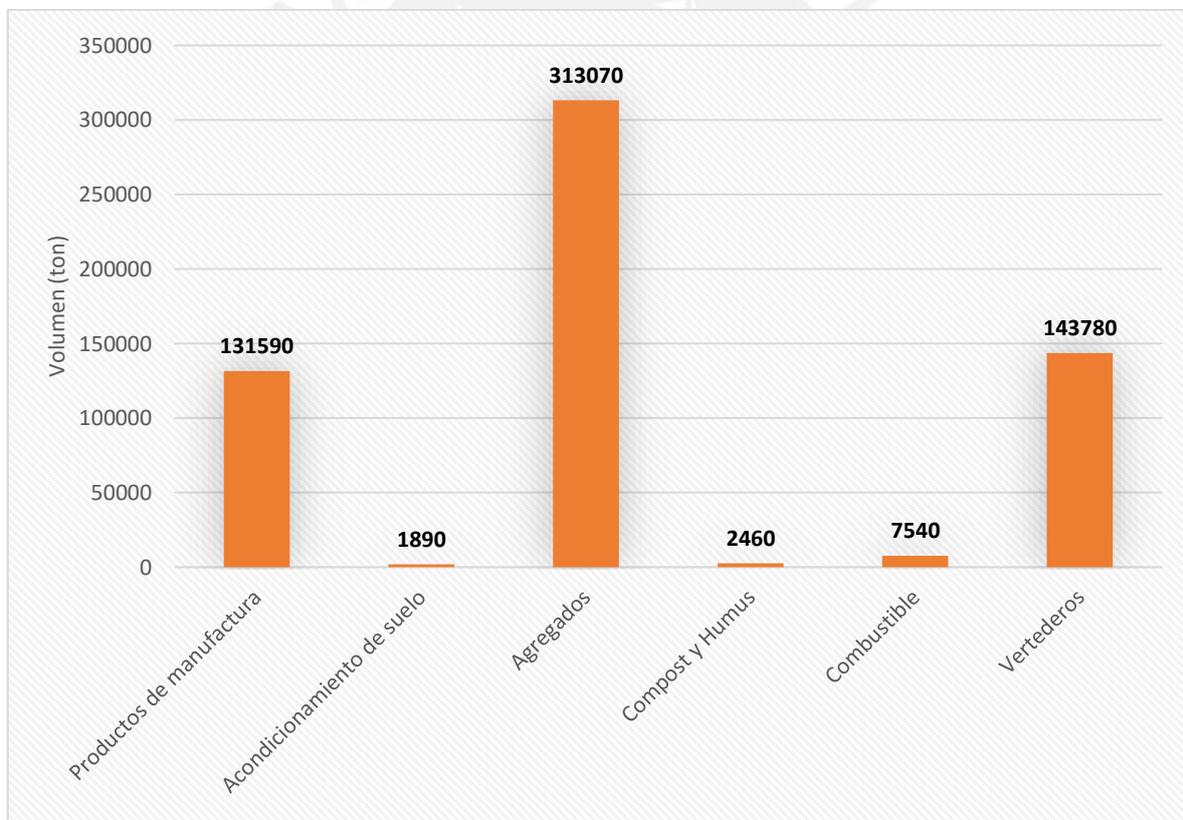


Nota: Gráfico circular que muestra el destino final de los productos que alcanzaron ser reutilizados, sea en agregados, rellenos o productos. Tomado de EPA, 2020.

De lo mostrado también en la Figura 7 se puede comprobar que en Estados Unidos también hay un porcentaje cerca del 80% de los RCD que son aprovechados en diferentes sectores productivos, destinando casi la mitad en agregados del concreto y un quinto de lo generado en productos de manufactura. Así también se muestra cómo ciertos productos requieren de un tipo específico de residuo, por ejemplo, para el compost y mantos orgánicos, así como en acondicionamiento de suelos, se dispone únicamente madera, mientras que para productos de manufactura ningún proveniente de la arcilla puede ser empleado y para el valor combustible solo se emplea madera y tejas de asfalto.

**Figura 8**

Disposición final de los RCD en USA



Nota: Las barras muestran las cantidades reaprovechadas para el 2018 en USA, siendo el destino más próspero el agregado de concreto. Tomado de EPA, 2020.

Sobre años siguientes, la EPA (Agencia de Protección Ambiental o EPA por sus siglas en inglés, 2020) presentó en el 2018 un reporte de los destinos y reúsos de un total de 600 330

000 toneladas de residuos de construcción generados y registrados por la entidad, así se muestra en la Figura 8. Como puede apreciarse aún el principal destino continúa siendo como agregados de concreto con poco más del 50%, remarcando así el alto potencial reutilizable de los residuos pétreos, y siendo el porcentaje reaprovechable cerca del 80% total generado. En este contexto, se menciona que la normativa y fiscalizaciones de la nación son quienes promoverían principalmente este alto índice de sostenibilidad.

En España, fue realizado un estudio por Villoria, Del Río y Porras (2012), donde se pudo estimar la tasa de generación de residuos en construcción empleando la información de distintas construcciones en Madrid. Lo que se buscaba era encontrar la proporción de residuos producidos según la clasificación de residuos y según la etapa constructiva en la que se encontraban puesto que la información detallada para estimar tales residuos no se encontraba en cantidad y no se contaba con análisis de caso similares, lo cual continúa siendo una realidad para varios países. Para este propósito, se analizó más de 300 departamentos residenciales que ocupaban un área construida de aproximadamente veinte mil metros cuadrados, buscando que sean edificios pequeños o medianos (entre 2 y 6 pisos de altura) cuyos registros indicaban un periodo de construcción entre 2007 y 2009. En primer lugar, diferenció las etapas constructivas de cada edificación sin contar con las obras preliminares, ni la etapa de demolición, esto a fin de contar con únicamente el material residual que desprende de las actividades que emplean el mismo material fuente.

Finalmente, luego de estudiar los registros y partidas de cada edificación estimó que de lo analizado: el área total construida era de 13 546.5 m<sup>2</sup> y el volumen total de residuos obtenidos de 1009.96 m<sup>3</sup> con lo que la tasa de generación de podía expresar como 0.0746 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> construido. Asimismo, la caracterización de residuos por volumen se puede mostrar en el siguiente cuadro, Tabla 5, así como un gráfico porcentual en la Figura 9.

**Tabla 5**

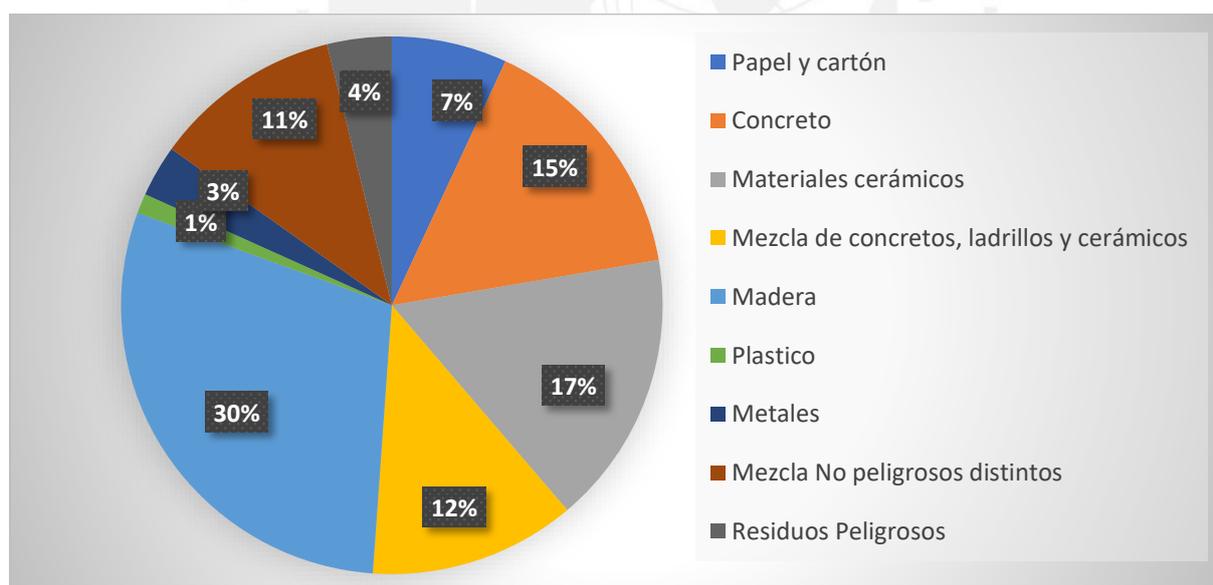
Distribución de RCD para construcciones de Madrid, España.

Tipo de RCD	Volumen (m3)	Ratio por metro construido (m3/m2)
Papel y cartón	66.02	4.87E-03
Concreto	147.53	1.09E-02
Materiales cerámicos	157.81	1.16E-02
Mezcla de concretos, ladrillos y cerámicos	118.11	8.72E-03
Madera	282.16	2.08E-02
Plástico	11.33	8.36E-04
Metales	29.65	2.19E-03
Mezcla No peligrosos distintos	107.93	7.97E-03
Residuos Peligrosos	36.9	2.72E-03

Nota: Los volúmenes predominantes comprenden a la madera y los pétreos. Tomado de Villoria, Del Río y Porras, 2012.

**Figura 9**

Composición de residuos obtenidos en construcción de edificaciones en Madrid.



Nota: Gráfico circular de composición de los residuos de construcción en España, predominan los residuos de madera, concreto y materiales cerámicos. Tomado de Villoria, Del Río y Porras, 2012.

De la misma forma en la siguiente Tabla 6, se puede ver en forma secuencial, la cantidad de desechos que pueden ir generándose en el paso a paso de la etapa constructiva desde el movimiento de tierras hasta la última etapa de acabados con decorado de jardinería:

**Tabla 6**

Volúmenes e índices de RCD generados por etapa constructiva.

<b>Secuencia</b>	<b>Etapas Constructiva</b>	<b>Volumen de RCD (m3)</b>	<b>Ratio por metro construido (m3/m2)</b>
1	Movimiento de tierras y estructuras	289.39	2.14E-02
2	Muros externos, internos y techos	465.05	3.43E-02
3	Carpintería	4.53	3.34E-04
4	Electricidad y comunicaciones	79.04	5.83E-03
5	Aire acondicionado	0.09	6.64E-06
6	Plomería	15.88	1.17E-03
7	Calefacción	104.76	7.73E-03
8	Protección contra incendios	0.02	1.11E-06
9	Energía Solar	0.01	7.38E-07
10	Elevadores	23.13	1.71E-03
11	Colocación de vidrios	0.63	4.65E-05
12	Acabados	25.24	1.86E-03
13	Jardinería y amoblado	2.22	1.64E-04

Nota: Se muestran los volúmenes generados en ciertas residencias de España, donde en movimiento de tierras y la construcción de muros la ratio es mayor. Tomado de Villoria, Del Río y Porras, 2012.

Cómo se puede concluir de ambos cuadros, hay una definida relación entre el área construida y el volumen generado de residuos. Respecto a su composición, como se puede apreciar el elemento más presente en volumen es la madera con un 30%, seguido de un casi 30% compuesto de materiales inertes entre concreto y cerámicos y continuando con un importante 12% de residuos peligrosos. De la Tabla 6 por otra parte, puede observarse que el mayor ratio generado se presenta en la etapa de albañilería, seguido de las partidas de estructuras y excavaciones, y terminando en acabados que en un gráfico de avance versus tiempo mostraría una curvatura convexa hacia arriba en la segunda etapa principal.

Asimismo, otra investigación fue realizada en torno a los RCD para España pero a la provincia de Almería (Garzón y Sánchez, 2013). En ella además de caracterizar a los residuos se enfoca en la propuesta de nuevos puntos de disposición señalando la importancia de contar con distintos puntos cercanos que además faciliten la implementación de tratamientos al

material de llegada para poder obtener nuevos materiales o la segregación en el punto para obtener más áridos. De este modo se logra además una más eficiente gestión que reduce el gasto y el impacto del transporte.

Respecto a México, en la tesis realizada por Martel (2008) se realizó una caracterización de RCD para cuatro obras que constituían un total de 22 800 m<sup>2</sup> de área construida: tres en la Ciudad de México y uno en el Estado de México. De los resultados por peso promedio para los casos analizados se obtuvo la Tabla 7:

**Tabla 7**

Clasificación de RCD generados para un caso en México

<b>Tipo de RCD</b>	<b>Cantidad (Ton)</b>	<b>Porcentaje</b>
Escombros	3202.30	65.2%
Madera	903.20	18.4%
Residuos de oficina	193.30	3.9%
Metales	209.30	4.3%
Marmol	184.60	3.8%
Concreto	144.70	2.9%
Drywall	48.00	1.0%
Plastico	10.50	0.2%
Vidrio	10.40	0.2%
Peligrosos	4.50	0.1%
Otros	3.30	0.1%
<b>Total</b>	<b>4914.10</b>	<b>100.0%</b>

Nota: Clasificación de RCD para viviendas en México. Tomado de Martel, 2008.

De la tabla mostrada se determina que el mayor aporte (65%) proviene de los escombros, que refiere en este estudio a todos los trozos de concreto, pétreos y maderas que sobraron de los procesos constructivos. Asimismo, los siguientes aportes con de la madera en 18% y de concreto con 4%. En la tesis se indica además que la cantidad de RCD generado no tomó en consideración los residuos de excavación que ascendían a las 320 000 toneladas y representaban casi el 98% del total, a pesar de haberse empleado un porcentaje como relleno para la obra.

En otro estudio realizado en la ciudad de Hermosillo, México (Miranda et al, 2016) se analizó la cantidad de residuos generados para un lote donde se construyeron doce viviendas unifamiliares de 42 m<sup>2</sup> cada una. Los residuos fueron agrupados en: concreto, generado por la fabricación o demolición de elementos de concreto; mortero; block, como el residuo de la tabiquería en la zona; poliducto, referente al plástico obtenido de restos de tuberías; y cartón y papel. Con lo dispuesto segregado y registrados en pesos se obtuvo la Tabla 8:

**Tabla 8**

Composición para residuos de construcción en Hermosillo, México.

Tipo de RCD	Cantidad (Kg)	Cantidad (Kg/vivienda)	Unidad de medida de referencia	Unidad Equivalente/Vivienda	Volumen de mampostería generado
Blocks	2302.4	191.9	10.50 Kg/pza	18.0 pza	16.87 m <sup>3</sup> de muro
Concreto	3211.3	267.6	2200.00 Kg/m <sup>3</sup>	0.1 m <sup>3</sup>	14.6 m <sup>2</sup> de piso con e=10cm
Mortero	3215.9	268.0	2150.00 Kg/m <sup>3</sup>	0.1 m <sup>3</sup>	99.7 m <sup>2</sup> enjarre con e=1.5cm
Papel/Cartón	211.7	17.6	1.00 unidad	17.6 Kg	-
Poliducto	26.4	2.2	0.25 Kg/m	9.0 m	1.056 rollos de 100m
<b>Total</b>	<b>8967.7</b>	<b>747.3</b>			

Nota: Se muestra el peso de tipo de RCD generado en la construcción de viviendas, se diferencia por unidad y volumen potencial de ladrillo reaprovechado. Tomado de Miranda et al (2016).

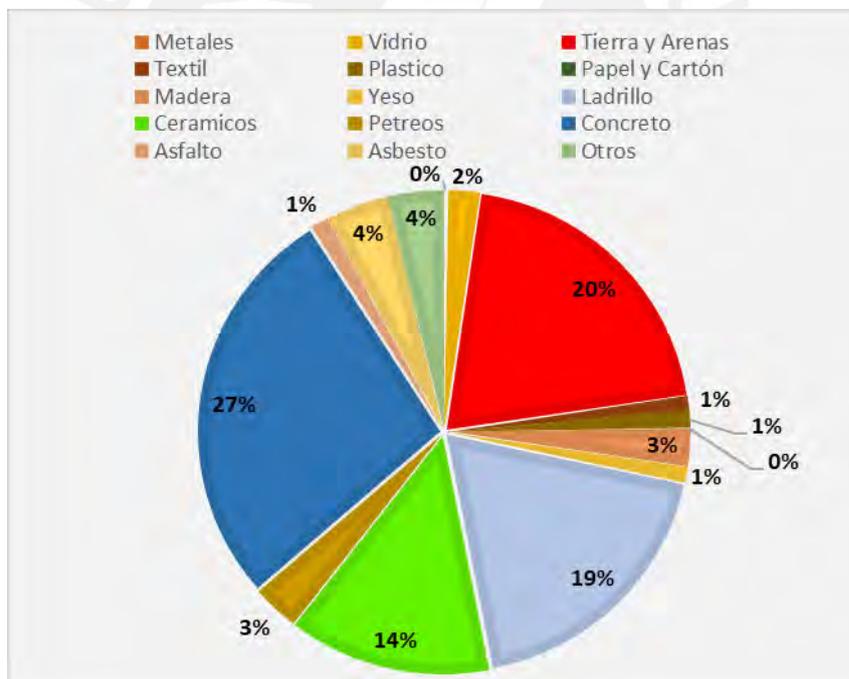
De lo presentado se concluye que el material con mayor presencia para el caso son los restos de concreto y mortero, representando más del 70% del total de residuos. De la misma forma en la tabla 8 puede apreciarse cómo se define un valor de reaprovechamiento para cada tipo de residuos, generando un equivalente en componentes de mampostería según sea la unidad de medida que puede transformarse. Para el caso de papel y cartón al no haber medidas de conversión a ladrillos de este material lo más cercano para revalorizar fue el costo de venderlo para reciclaje. En conclusión, se muestra que los restos de albañilería son los que mayor provecho pueden devolver, seguidos por el concreto y mortero, así también, se estima que económicamente el valor potencial que poseen es de 300 dólares americanos.

En cuanto a Colombia, varios estudios respecto de los residuos de construcción se han realizado mostrando principalmente la composición de los RCD y su capacidad de reutilización

(Marín 2019, Chávez et al 2014, Pinzón y Cortez 2018, Jiménez et al 2019, Robayo et al 2015, Chica y Beltrán 2018, Suárez et al 2019) dicho país además, ha desarrollado normativa que permite el progreso para su gestión adecuada y reaprovechamiento considerando que la producción diaria de tales residuos puede llegar a 100 000 toneladas, que equivale a 3 veces sus residuos municipales (Suárez, 2018). Dentro de los distintos escritos, aquel realizado por la Universidad Nueva Granada (Chávez et al, 2014) analizó los RCD provenientes de más de 130 edificaciones en la ciudad de Bogotá que juntaban una masa total de casi 1800 toneladas equivalentes a un volumen de 1912 m<sup>3</sup>. Como resultado de esta caracterización se obtuvo el gráfico mostrado en la Figura 10.

**Figura 10**

Composición de residuos obtenidos en construcción de edificaciones en Bogotá



Nota: Tomado de Chávez et ál, 2014.

Del gráfico en la Figura 10, se puede apreciar que el 80% del volumen total está compuesto principalmente por restos de concreto, tierra y arenas, ladrillos y cerámicos. Si bien el artículo no especifica si se consideran todas las etapas constructivas, los residuos de excavación se pueden considerar dentro del grupo “tierra y arenas”.

En una época más actual, Marin (2019) realizaría una tesis en la que analizaría tanto la composición de los residuos para un proyecto de institución en Caquetá, obteniendo el resultado en peso de los RCD generados como se muestra en la Tabla 9:

**Tabla 9**

Composición para residuos de construcción en Caquetá, Colombia.

<b>Etapas Constructivas</b>	<b>Cantidad de RCD (Ton)</b>	<b>Contribución (%)</b>
Preliminares	400.60	29.0%
Excavaciones	744.40	53.9%
Cimentaciones	85.00	6.2%
Estructura	83.00	6.0%
Mampostería	32.70	2.4%
Acabados	13.10	0.9%
Obras exteriores	21.90	1.6%
<b>TOTAL</b>	<b>1380.70</b>	<b>100.0%</b>

Nota: Tomado de Marín, 2018.

De este resultado, se puede mostrar que el aporte en peso de residuos de un 29% proviene de las demoliciones, mientras que 54% proviene del material excavado. Sin embargo, esta cantidad no termina en una disposición final en su totalidad puesto que un porcentaje considerable se emplea como relleno para el mismo proyecto, como se menciona en el estudio. Finalmente, este concuerda al resultado de una encuesta realizada en Tolima, Colombia donde el 30% de un grupo de involucrados en el ámbito de la construcción considera que en las etapas preliminares y de excavación se genera la mayor cantidad de residuos (Pinzón y Cortes, 2018).

En el país vecino de Chile se realizó un estudio para la región metropolitana de cuantificación mediante el uso de ratios en un análisis de caso (Bravo et al, 2019). El mismo tenía como objetivo principal, además de la medición de volumen, determinar el costo monetario de la gestión de los RCD para una edificación residencial de 21 pisos con un área construida de 2495 m<sup>2</sup>. Como resultado se obtuvo la clasificación mostrada en la Tabla 10.

**Tabla 10**

Composición para residuos de construcción en la metrópolis de Chile.

<b>Tipo de RCD</b>	<b>Cantidad (m3)</b>	<b>Porcentaje %</b>
Metales	1231.90	50.3%
Hormigón, ladrillo y cerámicos	507.90	20.7%
Yeso	389.84	15.9%
Madera	177.04	7.2%
Material de aislamiento	76.57	3.1%
Tejas y cerámicos	27.05	1.1%
Mezclados	12.14	0.5%
Hierro y Acero	10.05	0.4%
Pinturas y Resinas	6.32	0.3%
Tierra y agregados	5.14	0.2%
Plástico	4.60	0.2%
Hormigón	1.34	0.1%
Otros	1.08	0.0%
<b>TOTAL</b>	<b>2450.97</b>	<b>100.0%</b>

Nota: Tomado de Bravo et al, 2019.

Del resultado se observa que el principal residuo esperado en edificaciones es del grupo Metales con un aporte del 50%, seguido en cantidad por Ladrillos y cerámicos con un 20% y los materiales de yeso con un 15%. En este mismo estudio se indica que no se consideró los residuos de excavación debido a que si bien tienen un aporte considerable, esa partida fue tercerizada a una subcontrata que se encargaría de su disposición final. Como indicador final, el estudio muestra que el costo de gestión por m<sup>3</sup> de RCD equivale a casi 10\$, que equivalía en su totalidad al 1.2% del presupuesto total para el proyecto.

Respecto a Brasil, en la tesis doctoral realizada por Soares (2016), se intentó aproximar la composición de los residuos de construcción para el estado brasileño empleando el método de flujo de materiales y ratios de desperdicio en obra. Se analizaron 4 clases de edificaciones: unifamiliares simples y multifamiliares de 4, 8 y 16 pisos. Conociendo la cantidad de materiales empleados a partir de los metrados, se estimó una ratio, designada por expertos, de residuos para cada elemento considerado; con lo que finalmente se obtuvo la Tabla 11.

**Tabla 11**

Composición para residuos de construcción en Brasil.

<b>Tipo de RCD</b>	<b>MFB-4 (Kg)</b>	<b>MFB-8 (Kg)</b>	<b>MFB-16 (Kg)</b>	<b>Promedio Porcentual</b>
Concreto	55.79	51.16	52.48	63.02%
Metales	1.06	1.07	1.16	1.31%
Cemento	6.38	4.87	2.81	5.35%
Agregados	27.01	20.36	11.35	22.30%
Ceramicos	5.07	2.40	1.36	3.27%
Plastico	0.05	0.03	0.04	0.05%
Vidrio	0.11	0.04	0.05	0.08%
Madera	2.06	2.01	2.12	2.46%
Piedra	0.22	0.35	0.39	0.39%
Limos	1.97	1.41	0.79	1.58%
Fibra de cemento	0.34	0.14	0.08	0.21%
<b>Total</b>	<b>100.07</b>	<b>83.83</b>	<b>72.60</b>	<b>100.00%</b>

Nota: Composición en peso de los residuos de construcción para edificaciones en Brasil. Se divide en tipo de edificio multifamiliar para 4, 8 y 16 pisos en los cuales predominan los restos de concreto seguido de los agregados. Tomado de Soares, 2016.

Sobre la tabla puede advertirse que poco más del 60% de residuos provienen de restos de concreto, y luego un 22% de arenas y piedras, mientras que teóricamente el resto de materiales no supera el 5% en aporte. Se debe indicar que en el presente estudio no se menciona el volumen de excavaciones por lo que su cálculo es muy variado y no hay una ratio establecida.

Cambiando al enfoque más particular del presente análisis, en cuanto a estudios centrados en únicamente los residuos inertes obtenidos en construcción no se encontró mucha literatura. Por un lado, se analizó la revisión literaria hecha por Magnusson y otros ingenieros (2015), la cual revela la importancia de la reutilización. El estudio muestra que en la región inglesa se tiene un porcentaje de reciclaje sobre los RCD del 31.7%, mientras que la región italiana cuenta con un 23%, así como que en Alemania respecto solo a los materiales de excavación se ha logrado un 8.5%. Se pretende aquí mostrar además de las cantidades aprovechadas, las cantidades empleadas como material de cantera, esto a fin de mostrar cuánto de ese material

que se empleará de agregado pudo haberse obtenido con lo generado en el movimiento de tierras, sea para la misma construcción, otras obras o dispuesto a tratarse para agregado. También señala el impacto ambiental evitado en la categoría de cambio climático, valor que se comparará en capítulos siguientes.

Finalmente en cuanto a las cantidades de material producido se menciona en una revista del continente europeo sobre desarrollo sostenible (Hale et al, 2021) el análisis sobre cuánta reutilización empleaba este sector. En este se remarca el hecho de que reutilizar en lugar de enviar los residuos limpios a vertederos además de resultar un ahorro en gastos de construcción, también ayuda a preservar los estados de los vertederos, reduce el uso de transporte y reduce el impacto ambiental. Por ejemplo, para el caso de Noruega durante el 2017 se calculó unas 3 000 000 de toneladas de terreno cuyo 80% pasó casi en totalidad a un vertedero, mientras que Portugal ese mismo año con más de 300 000 toneladas se alcanzó un óptimo grado de reciclaje mayor al 80%. Para el caso de Eslovenia también se obtuvo un porcentaje de reciclaje cercano al nulo a pesar de coleccionar más de 2 000 000 de toneladas en tal año, mientras que en Suecia se determinó un porcentaje de reciclado de material de excavación cercano al 50% para los más de cuatro millones de toneladas generadas en el 2014 y 2016. Incluso en Francia durante el 2015 se reportó casi 8 000 000 toneladas producidas pero no se informó cuánto de ese material hubo sido reaprovechado. La tesis mostrará cuánto se ha podido coleccionar por año en Lima para poder comparar los resultados.

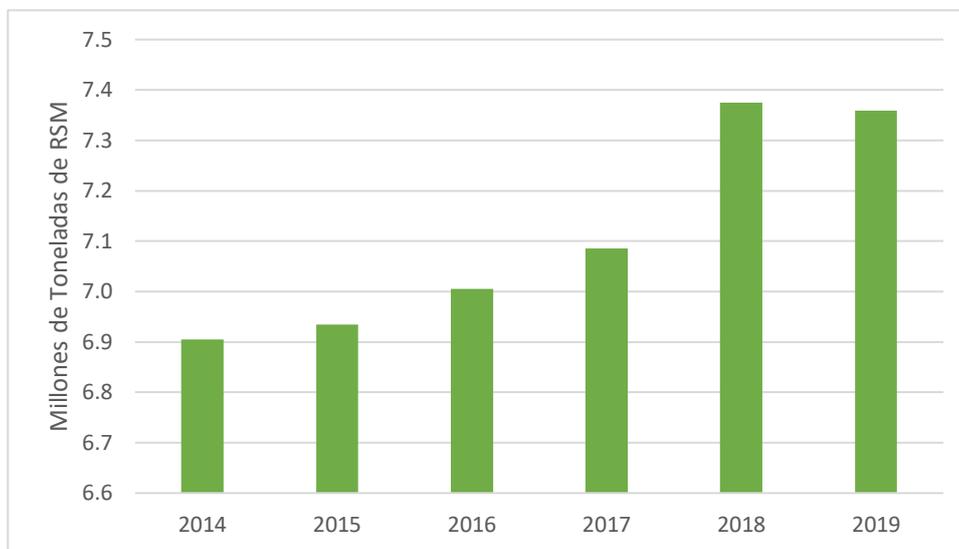
#### ***2.2.4. Situación de los residuos sólidos en Perú***

La situación en Perú sobre los residuos sólidos es aún una problemática que continúa en vías de mejora desde la última década. Por ejemplo, la generación de residuos sólidos municipales (RSM) únicamente del año 2019 fue de 7.36 millones de toneladas o un estimado de 20 toneladas por día como informa el reporte del SINIA (MINAM, 2020), además como muestra la Figura 11, entonces la cantidad de RSM generados ha ido en incremento durante los

últimos cinco años registrados mientras que las gestiones municipales no se han potenciado al mismo nivel.

**Figura 11**

Generación nacional de RSM.



Nota: Las barras representan el incremento en los millones de toneladas de residuos municipales en el Perú durante el periodo 2014-2019. Tomado de Ministerio del Ambiente, 2020.

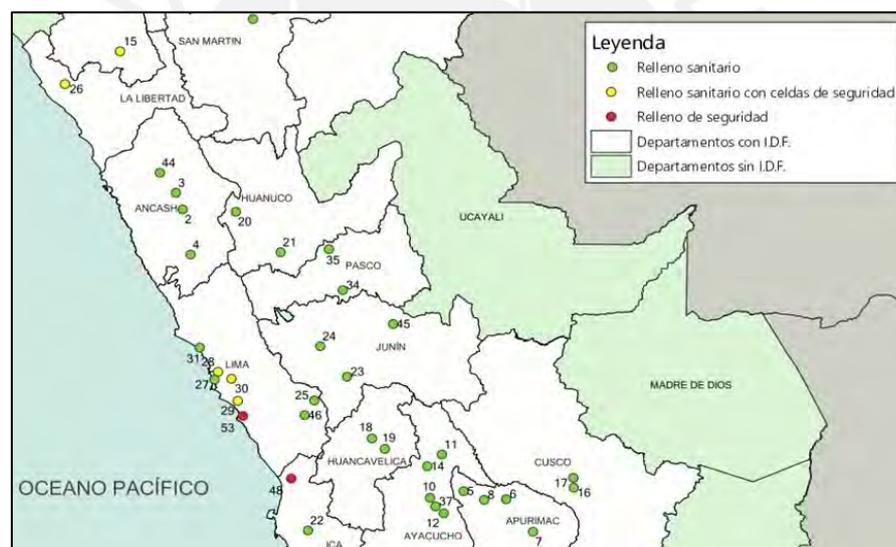
En el año 2009, aparece el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental como ente fiscalizador que asegura el cumplimiento de la legislación ambiental y garantiza las funciones de supervisión, control y sanción de personas jurídicas o naturales y entidades públicas o privadas según la Ley del Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental (*Ley N° 29325 emitida el 1 de marzo de 2009*). Este ente regulador ha emitido distintos reportes sobre la gestión actual de los residuos, y algunos de los puntos que recalca sobre las principales fallas en la gestión de residuos (OEFA, 2014) se mencionan en los siguientes párrafos.

Por un lado, la falta de rellenos sanitarios a nivel nacional. Para el volumen de desechos que el país genera la cantidad de puntos adecuados de deposición es aún menor a la demandada. Si bien comparado a los reportes del 2010 donde se menciona la presencia de 10 rellenos

sanitarios en todo el país, se puede percibir un avance al contar según la plataforma virtual de DIGESA con 54 rellenos sanitarios a la fecha de estudio (diciembre de 2021) como muestra el mapa del Anexo 6, sin embargo; aún en Lima solo hay 8 rellenos sanitarios en funcionamiento lo cual sigue siendo muy bajo tomando en cuenta que, del volumen generado en residuos, más del 40% es producido y dispuesto en la capital. Así también, junto con el paso de los años la generación de RSM ha ido incrementando a nivel local a un ritmo poco mayor que a nivel nacional, esto debido a la mayor densidad demográfica en incremento también lo que coincide con la ya mencionada aparición de puntos informales de disposición.

**Figura 12**

Mapa de rellenos sanitarios autorizados según DIGESA



Nota: El mapa se completa en el Anexo 6. En él se aprecian los 54 puntos de disposición sanitaria autorizados, donde solo en Lima se ubican 8: 4 rellenos sanitarios, 4 con celdas de seguridad y 1 relleno de seguridad. Tomado de Dirección General de Gestión de Residuos Sólidos, 2020.

De igual forma, hay una falta de escombreras. Para el caso de residuos de construcción los puntos adecuados de acopio se conocen como escombreras, y pese a la cantidad de construcciones que se llevan a cabo en el Perú no existe aún ninguna ni en la capital. Esto genera que los residuos de obra se depositen en puntos ilegales cuya zonificación es nociva,

pues suele rondar cerca de ríos o playas, lo cual se ve presenta en los diferentes reclamos de las municipalidades por los desechos en las costas, como el caso de Chorrillos (MINAM, 2018). Cabe resaltar que para implementar una escombrera se deben tomar una serie de consideraciones, como indica Actis (2009): distancia de transporte desde el punto origen a la escombrera; el volumen de capacidad necesario, las alteraciones posibles en el medio natural y las restricciones ecológicas de la zona.

Por otro lado, viene ocurriendo una proliferación de botaderos, se refiere a las zonas de deposición de residuos que actúan ilegal e informalmente sin ningún tipo de control y generan focos infecciosos para la salud de los habitantes y el ambiente, como suelen tener residuos de gestión municipal, es deber de los mismos restringir el paso y clausurarlos. Asimismo, se evidencia una falta de segregación en la fuente, quiere decir que al generarse los residuos estos deben separarse según su clasificación potencial y de esta forma determinar cuánto valor energético y vida útil aún poseen (Diario Correo, 2016). Esta discriminación en la fuente debe efectuarse por los propietarios y aplica tanto para empresas como personas naturales, su ausencia indica el bajo nivel de cultura ambiental está presente en las partes.

Ante estos efectos, los 3 niveles de gobierno debieran tomar acción y definir las medidas necesarias, además de trabajar en conjunto con los entes municipales que trabajan y regulan a nivel local. El fin de las medidas que se deben establecer incluye la creación de infraestructuras de aprovechamiento de residuos, de forma tal que el reciclaje sea un tema exigido por las autoridades, así como incluir una correcta capacitación entre las empresas prestadoras de servicios de residuos, el registro debido de ellas y un detallado de sus operaciones. Siendo estos puntos los definidos en los lineamientos del reglamento para la gestión de RCD según los últimos decretos dictados (DS N°002-2022).

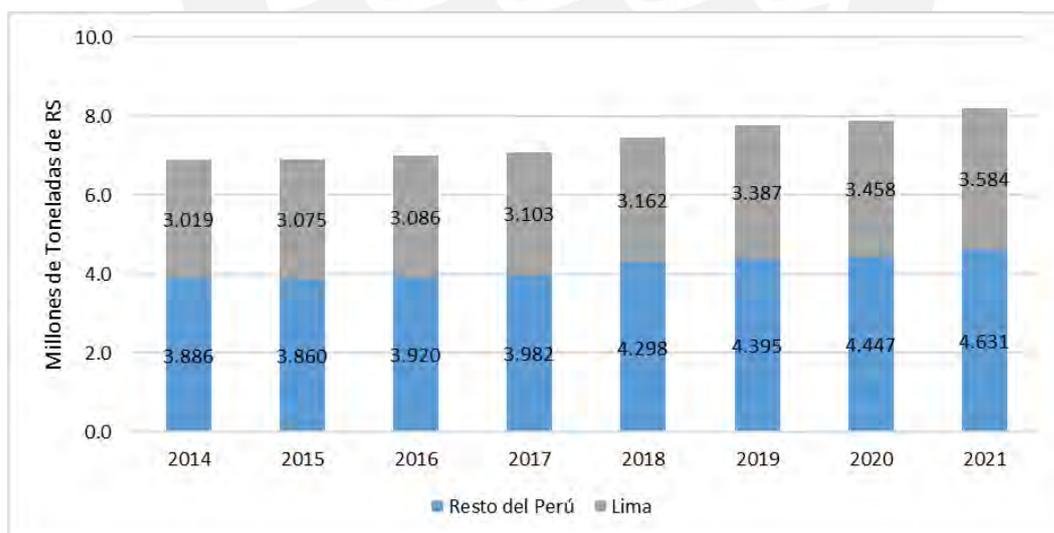
Respecto a la región de Lima, la situación es bastante representativa del grave estado al que se puede llegar. En contexto, acorde a datos del INEI (2022) la capital ocupa un territorio

de 34 828 kilómetros<sup>2</sup> con una cantidad de 9'485,405 habitantes, convirtiéndola en la ciudad más concurrida del país con una densidad poblacional de 272 Hab/km<sup>2</sup> y que además enfrenta una alta tasa de crecimiento anual de 154 073 habitantes incluida la tasa de natalidad y mortalidad, y la de inmigración.

Debido a esto que la mayor cantidad de residuos se genera en la provincia de Lima y la que mayor huella ambiental posee, como lo muestra el reporte del MINAM (2020). Así la zona metropolitana ha llegado al consumo de 1.8 hectáreas globales por habitante y generado, solamente durante el 2019, hasta 3.15 millones de toneladas de residuos que representa más del 90% de la región. Lo cual se traduce a una generación per cápita de 0.91 Kg/Hab/Día y se traduce en un gasto municipal de 85.7 millones de soles para dicho año. En la Figura 13 se puede ver además como el volumen de residuos sólidos generados en la capital es cerca del 40% nacional durante los últimos años, lo que remarca la importancia de su representatividad.

**Figura 13**

Generación RSM a nivel Nacional y de Lima.



Nota: Las barras presentan los millones de residuos generados en Perú diferenciando a Lima durante el periodo 2014 al 2021. Se aprecia el incremento desmedido. Tomado de MINAM, 2020.

La Figura 13 también muestra que en la capital es donde más irregularidades en la gestión de los residuos se presentan, así lo prueba la cantidad de denuncias efectuadas. En el 2018 se

registraron más de 405 denuncias, el 2019 casi 300 y durante el 2020 un total de 1138 denuncias ante la OEFA, de las cuales el 5% (alrededor de 50) son del tópico constructivo. Varias de ellas expedidas por las municipalidades de diferentes distritos limeños que indican la aparición de puntos de vertederos ilegales en zonas urbanas o cercanas a la periferia (MINAM, 2020).

Si bien en Perú no hay un registro detallado de la composición de residuos sólidos para estimar cuánto porcentaje de ello pertenece a obras de construcción, sin embargo, puede aproximarse viendo la composición de los residuos registrados en el cuarto, quinto y sexto informe del MINAM sobre residuos sólidos municipales y no municipales, los cuales se organizan en la Tabla 12:

**Tabla 12**

Composición estimada de los residuos dispuestos a nivel nacional.

<b>Material</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>
Orgánicos	50.20%	48.90%	50.90%	50.40%
Plásticos	8.10%	9.90%	10.10%	6.10%
Peligrosos	7.90%	6.60%	8.50%	10.80%
Inerte	5.70%	4.50%	7.10%	8.10%
Bolsas o similar	4.80%	3.00%	4.80%	4.40%
Papel	4.00%	5.20%	4.70%	4.00%
Madera	2.10%	2.90%	3.40%	3.00%
Cartón	3.80%	3.80%	3.20%	3.50%
Vidrio	3.10%	3.90%	3.20%	3.10%
Metales	2.60%	3.20%	2.80%	2.60%
Textiles	1.30%	1.50%	1.80%	1.60%
Cauchos	1.10%	1.10%	1.60%	1.30%
Huesos	1.80%	1.70%	0.80%	-
Tetrapacks	0.70%	0.50%	0.50%	0.80%
Electrónicos	1.60%	2.30%	0.30%	0.50%

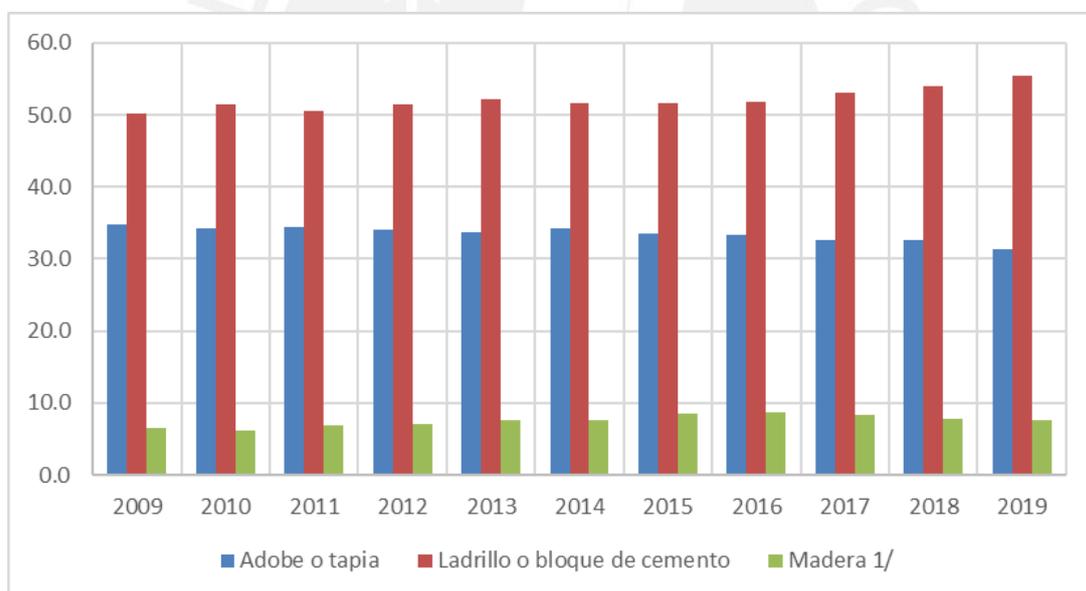
Nota: Muestra la composición estimada por el MINAM para los residuos sólidos en el 2012, 2011, 2012 y 2013. Tomado de MINAM, 2014.

Se aprecia que el componente de inertes cual contiene tanto escombros como elementos inertes (tierra y piedras) oscila alrededor del 6.2% y que presenta una variación ascendente desde el año 2010 lo que indicaría una mayor producción de elementos constructivos, a

excepción del año 2011 dónde la disminución pudo deberse a la afectación económica que surgió ese año. De los mencionados informes del MINAM (2014), se puede estimar además la participación del sector construcción en base a la producción de residuos indicada para cada subsector económico, siendo el subsector de pesca y salud los de mayor aportación, mientras que para el sector de Vivienda, una intervención de 1.6% aproximadamente, basándose principalmente en los reportes municipales. Asimismo, una forma de estimar la composición de los residuos es analizar las fuentes de origen. Como muestran los datos estadísticos del sector de Vivienda (INEI, 2022) los materiales empleados en construcción de paredes, pisos y techos como se observa de las siguiente Figura 14.

**Figura 14**

Materiales empleados en construcción de paredes en edificaciones para un periodo 2009-2019



Nota: Las barras muestran de forma porcentual los 3 distintos materiales registrados para la construcción de paredes en Perú. Tomado de INEI, 2020.

Como se muestra el material más empleado para la construcción de muros es el ladrillo o concreto representado un 55% de los materiales empleados, seguido por el adobe y tapia, que son materiales naturales provenientes de la arcilla y arena del suelo mismo y representan un

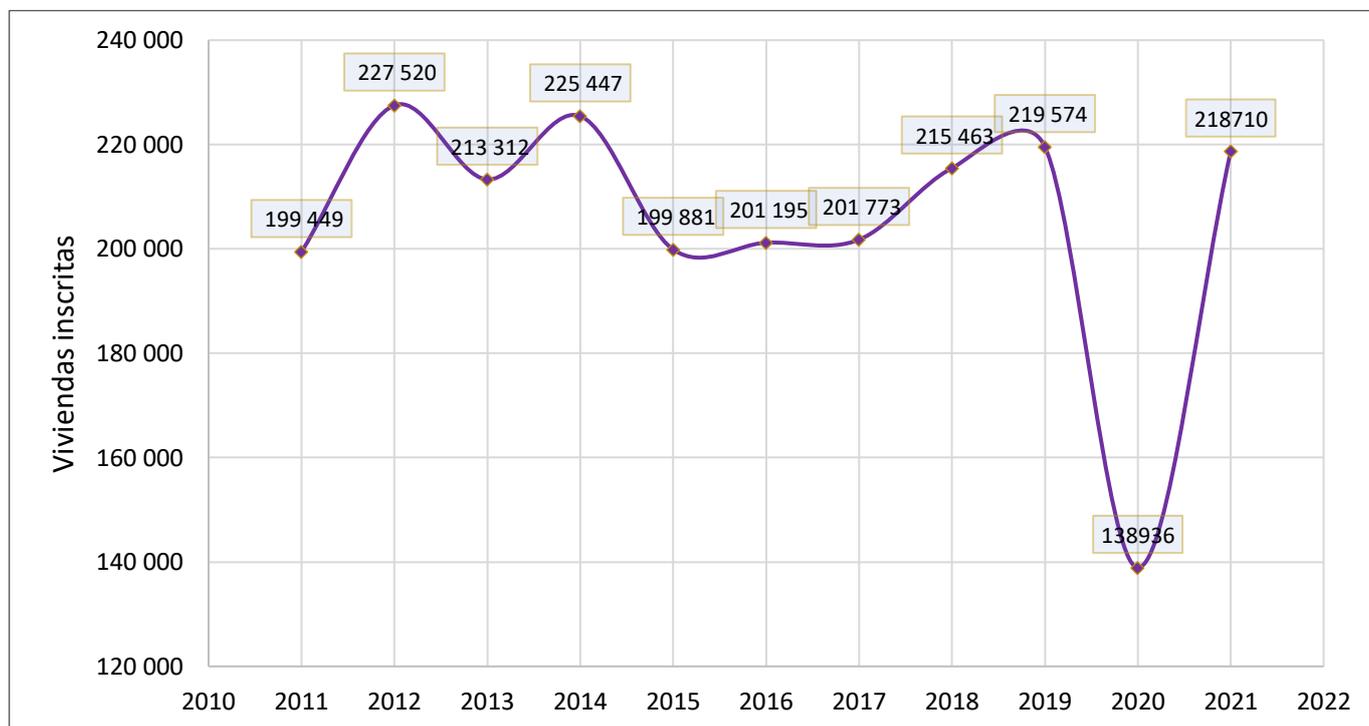
31% de los materiales comunes, teniendo mayor aparición en zonas rurales; sin embargo, como muestra la figura 14, el uso de materiales arcillosos se encuentra en disminución desde el 2009 reduciendo su uso en 3.4% hasta el 2019, mientras los materiales de albañilería y madera se encuentran en ascenso, con un aumento de 5.4% y 1.1% respectivamente.

Asimismo, con el reporte de viviendas inscritas en la Superintendencia Nacional de Registros Públicos (INEI, 2022), tal como muestra el gráfico lineal de la Figura 15, se puede aproximar cómo en la región Lima Metropolitana hay una cantidad casi constante que bordea los 250 000 de nuevas edificaciones que se inscriben anualmente. Se conoce además que en el periodo entre 2018 y 2019 el índice de consumo de cemento que sirve de indicador principal del crecimiento del sector construcción presentó un incremento del 2.3% (Diario Gestión, 2019), lo cual puede reforzar la idea del crecimiento urbano que se presenta en la capital y concientizar sobre la cantidad de residuos que su desarrollo producirá, los cuales deberán tener una correcta gestión para evitar caer en las fallas previamente expuestas. De lo presentado se concluye, además, que los materiales inertes productos del cemento, pétreos, madera y granulares son los materiales más empleados en las construcciones comunes, los mismos que presentan un elevado potencial de reciclaje y reutilización, como menciona Sánchez Luyo (2019), quien indica que los materiales inertes pueden ser empleados en rellenos de carreteras y aún poseen un adecuado desempeño como agregados del concreto.

Finalmente, como concluye igualmente Carbajal (2018) luego de un estudio sobre la situación de los residuos y su gestión, para la gran magnitud de residuos que se produce la gestión es aún incipiente. Si bien se tienen pasos firmes mediante las regulaciones normativas estas aún no alcanzan un óptimo. Son necesarias mayores mediciones sobre los ratios generados de RCD en Lima a fin de determinar su potencial de reaprovechamiento para promover su inversión privada y que las municipalidades elaboren planes de mejora para su disposición.

**Figura 15**

Cantidad de Inmuebles Inscritos en SUNARP de Lima Metropolitana



Nota: El gráfico de línea muestra la cantidad de viviendas inscritas donde se ve una ligera tendencia ascendente en los últimos diez años, salvo por el punto mínimo de la pandemia en 2020. Tomado de INEI, 2022.

### **2.2.5. Evaluación de impactos con Análisis de Ciclo de Vida**

Como indica el Ministerio de Economía y Finanzas (2020), “una evaluación de impacto permite medir el efecto causal directamente atribuible a una intervención sobre los resultados a los que se espera llegar por su implementación”. esto quiere decir que se mide el cambio o efecto de la condición de vida del alrededor a partir del objeto evaluado. Basándose en ciertos criterios establecidos por el investigador, puede elaborarse una evaluación de impactos tomando como aspecto: el ámbito social, que mide el efecto de los residuos en el entorno público que los rodean en todo su tratamiento; el ámbito económico, que mide el costo de su

recolección y valor reaprovechado; y el ámbito ambiental, que mide cualitativamente la contaminación en los recursos naturales o la energía consumida (Khoshand et al, 2020). Sin embargo, para elaborar un análisis preciso de todo el proceso que atraviesan los residuos limpios de excavación se ha decidido optar por la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, puesto que presenta un horizonte más amplio al analizar todas las etapas presentes en el ciclo de los residuos de excavación.

En primer lugar, un análisis del ciclo de vida (ACV, o por sus siglas en inglés LCA) es una herramienta de evaluación orientada al tema ambiental, económico o social que permite valorar cuantitativamente el nivel y rango de impactos durante el completo ciclo de vida de un sistema o producto que será el objeto de estudio, por lo que permite desglosar sus fases de existencia desde su obtención de materia prima hasta su disposición final (Botejara et al, 2022).

Se debe mencionar que, en cuanto a la aplicación del ACV sobre el sector constructivo, Mesa, Fúquene y Maury (2021) realizaron una revisión literaria para ver su avance a través de la última década en el mundo. En este artículo se analiza 150 de estos escritos sobre análisis ambientales aplicado al reciclaje y reutilización de los RCD, por ejemplo, como agregado. Como resultado se aprecia, que en el último lustro hubo un incremento considerable en la cantidad de artículos llegando a casi 40 redactados por año. Asimismo, las regiones que más aportaron han sido Europa y Asia, mientras que Sudamérica muestra un mínimo aporte a través de Brasil y Colombia. La mayoría de redacciones se enfocaban en mejoras al manejo de final de vida de productos empleados y generados en la construcción, y definían a los indicadores de calentamiento global, acidificación y eutrofización entre los más importantes para el área académica. La falta de este tipo de estudios en Sudamérica, revela la importancia de esta tesis.

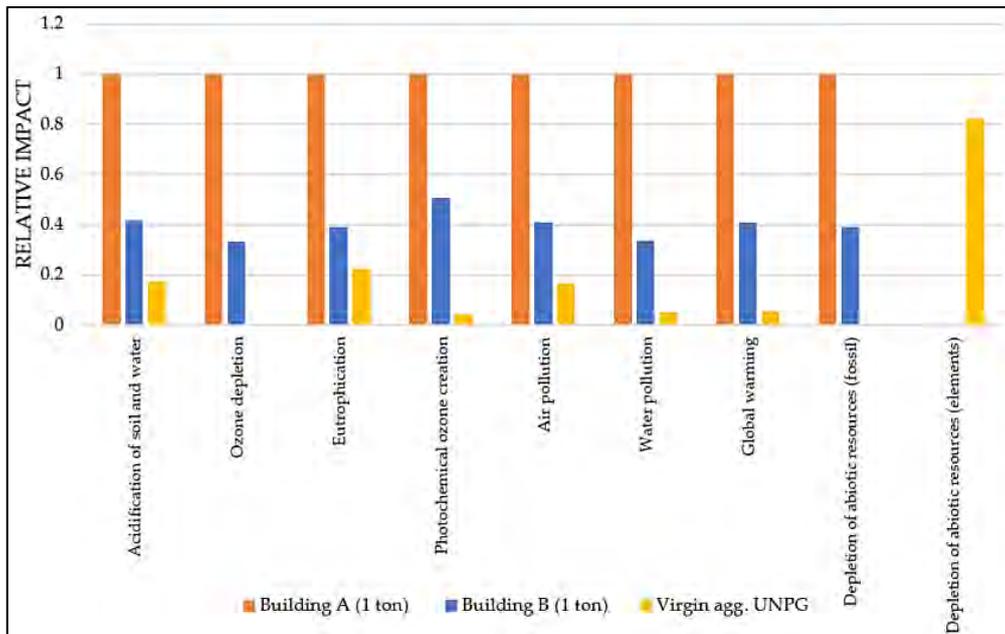
Para tener una aproximación a la realidad de los valores a obtener en esta investigación se realizó una revisión bibliográfica sobre algunos estudios que emplearon la metodología del ACV para analizar el impacto de cambio climático y demás categorías de impacto dentro del

sector constructivo. Un artículo presentado en una conferencia en Dinamarca sobre ACV en construcción (Zanni et al., 2018), presentó un estudio sobre el impacto ambiental aplicando cambios sobre la gestión del material residual de obra en su fin y sobre su reutilización como agregado. En el mismo se menciona que cambiando la gestión final podría mejorar el desempeño ambiental incluso en más del 75%. Por otro lado, el uso de RCD como agregado llega a reducir hasta un promedio de 20% en la mayoría de las categorías analizadas, aunque presenta un valor no favorable para el agotamiento de capa de ozono. Se menciona además que estos valores mejoran si se emplea cenizas de concreto reciclado en lugar de cemento, al referirse a que se debieran infundir aún más procesos de reaprovechamiento.

Por mencionar un caso reciente, realizado para edificaciones en Francia, un estudio determinaba que, en el reaprovechamiento de residuos de concreto como agregado, por cada tonelada reaprovechada el indicador de impacto climático podría variar entre 45 y 18.8 Kg de CO<sub>2</sub>-eq, donde el uso de combustible en transporte y maquinaria representaba más de la mitad de lo generado (Lachat et al., 2021). En dicho estudio se analizaron dos edificaciones, de diferente magnitud con diferente locación y con diferentes gestiones de residuo, así con cada una se trabajaron dos unidades funcionales para el análisis. Se comparó ambos casos frente a los agregados naturales, para concluir como depende el impacto en su totalidad de la magnitud de edificio, de la localización y la gestión, tal como muestra la Figura 16. Así, para los demás impactos de concreto reciclado dentro de las edificaciones analizadas se tuvo que para la acidificación el valor puede variar entre 0.24 y 0.10 Kg de SO<sub>2</sub>-eq, mientras para el agotamiento de ozono valores entre 7.9 y 2.6 mg de CFC-11-eq.

**Figura 16**

Impactos ambientales en distintas edificaciones frente a agregado natural.



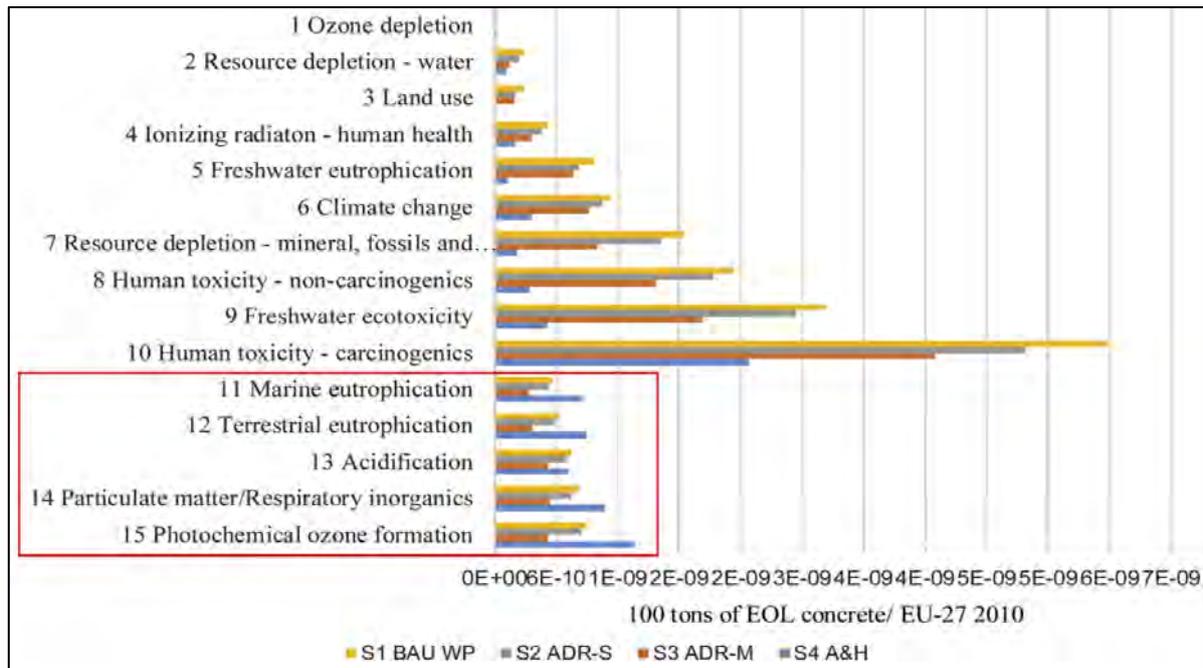
Nota: El gráfico de barras compara las magnitudes de cada edificación normalizando cada categoría ambiental para el estudio realizado en Francia. Tomado de Lachat et al, 2021.

En adición, otro artículo hace una comparativa entre el manejo tradicional de los RCD para su disposición en la base de carreteras versus la innovación de su fin de vida para aprovechamiento en la obtención de clínker (Guignot et al, 2015). Así se determinaba que con el reciclado para generar cemento podía disminuirse la huella del cambio climático entre 92 y 103 Kg de CO<sub>2</sub>-eq por cada tonelada de cemento producido. Cabe resaltar que en el estudio se consideran diferentes escenarios en los cuales se menciona reiteradas veces que el transporte es un factor muy importante para los cálculos pues representaba cerca al 50% de resultados. Se mostraba también resultados en otras dos categorías de interés. Por mencionar la categoría de acidificación terrestre cuya reducción podría llegar entre 0.27 y 0.34 Kg de SO<sub>2</sub>-eq y la categoría de agotamiento fósil, que se reducía entre 9.2 y 11.5 Kg de oil-eq.

Igualmente, otro artículo (Zhang et al., 2019) muestra el impacto ambiental para tres diferentes tecnologías de reutilización de residuos de concreto entre los RCD. Respecto al cambio climático se advierte que por cada tonelada de concreto tratado se puede generar desde 51.5 Kg de CO<sub>2</sub>-eq, en un escenario más realista, hasta 16.3 Kg de CO<sub>2</sub>-eq en un escenario optimista que considera una mayor producción en la granulometría del agregado producido en reemplazo de la obtención de material natural, valor similar al del presente estudio. Respecto al artículo mencionado, se mostraban los resultados para distintas categorías de impacto ambiental. Así, se indicaba que en el escenario de reaprovechamiento total donde se incluía mayor tratamiento de los residuos ciertos indicadores mostraban un mejor desempeño. Tales como agotamiento de capa de ozono, que reducía su valor en 50%, el agotamiento de agua que reducía en 90%, los indicadores de toxicidad que reducían sus valores a menos del 40% original o la eutrofización de agua dulce que pasaba de 0.007 a 0.001 Kg de P-eq, mientras que otras categorías mostraban un incremento en sus impactos como acidificación, que bordeaba un valor constante o la categoría de eutrofización de agua marina que aumentaba en 2.4 Kg de N-eq. Así lo muestra completo el gráfico de la Figura 17, en el cual se ven las variaciones entre cada uno de los cuatro escenarios analizados.

**Figura 17**

Impactos ambientales en distintos escenarios de aprovechamiento



Nota: El gráfico de barras compara las magnitudes normalizadas de cada categoría ambiental para el estudio realizado en Países Bajos, se resalta aquellas en las que un escenario de reciclaje ha resultado desfavorable. Tomado de Zhang et al, 2019.

Así también, en la tesis realizada por el Ing. Gómez (2020) se realizó un estudio con ACV para una tonelada de RCD frente a distintos escenarios de reciclaje en Colombia. En este se determinó que al implementar un proceso de reciclaje al tratamiento final se generaba 1.36 Kg de CO<sub>2</sub>-eq por cada unidad funcional, dato menor en comparación al presente debido a menores distancia en el transporte. Además, se consideró solo como inerte a un porcentaje muy menor de la unidad funcional, ya que al considerar reciclar los no inertes el valor aumentaba a 6.1 Kg de CO<sub>2</sub>-eq.

Según otro estudio realizado en Brasil sobre un ACV comparativo (Paula et al. 2021) entre el uso de un concreto preparado con agregados reciclados y uno de agregados naturales se determinó que la distancia de transporte de estos materiales es determinante. Al ingresar los

datos de transporte en el inventario, la variación de emisión de CO<sub>2</sub> podía verse incluso aumentada, se tenía un promedio de 302 Kg de CO<sub>2</sub>-eq, pero cuando se consideraba el uso de reciclados podía llegarse a una reducción de 296 Kg de CO<sub>2</sub>-eq por cada metro cúbico de concreto producido o aumentarse a 325 Kg cuando se excedía cierta distancia del origen de los agregados. Además de los análisis ambientales, aquí se veían las propiedades mecánicas de este nuevo concreto que resultaban similares al concreto usual, llegando a la conclusión de que generaban también un beneficio económico.

Acorde a otro artículo realizado sobre China por el autor antes mencionado (Zhang et al., 2018), un país donde no es difundido el reciclaje de concreto, se ve un claro aporte a la reducción de gases de efecto invernadero al emplear distintas prácticas de la economía circular. Ya sea en la fabricación de ladrillos, reúso de agregado en sitio, reciclaje de agregado para prefabricados o para uso estructural, todas estas prácticas tienen un impacto ambiental positivo. Se estableció una reducción del 5% en emisiones considerando un escenario óptimo donde se recicla el total del material inerte en los RCD y se trabajan para poder ser empleados en el casco estructural. En magnitud esta reducción fue equivalente a 106 K ton de CO<sub>2</sub>-eq evitado en el transcurso de ese año para la ciudad de Chongqing.

Asimismo, un estudio similar analizado en la tesis de Corzo (2016) muestra que, en el ciclo de vida de una vivienda familiar en Huancayo, el indicador de calentamiento global toma un valor de 974 Kg de CO<sub>2</sub>-eq por cada metro cuadrado de área construida. Este valor se produce en la etapa de manufactura y construcción, donde la obtención de los materiales tiene mayor incidencia, que representa el 43% del impacto total y la fase de final de vida de la vivienda apenas un 3%. El valor obtenido es enorme comparado al resultado de otro estudio de similar análisis. En este segundo estudio se estimaba un impacto generado de 25 Kg de CO<sub>2</sub>-eq por metro cuadrado para la construcción de una casa familiar de dos pisos en España, como lo muestra el estudio de Zabalza (2009).

Mientras tanto, un estudio realizado por Cáceres (2016) para la ciudad de Lima, revelaba la emisión de 2131 Kg de CO<sub>2</sub>-eq por metro construido para edificios multifamiliares donde el 50% de ese valor correspondía a la etapa de construcción y el siguiente 50% se producía en el uso del inmueble. Esta considerable variación en valores muestra el efecto que puede tener el inventario y la metodología empleada puesto que cada autor hubo escogido tanto diferentes enfoques, como datos de entrada. Así también, se debiera mencionar el trabajo de Forsythe y Ding (2014) en el cual evaluaron en base a bibliografía mediante el análisis de ciclo de vida el proceso de excavación en obras de construcción sobre más de 50 edificaciones. Ellos concluyeron que en promedio por metro cuadrado de área construida se podía emitir 265 Kg de CO<sub>2</sub>-eq, pero este valor podría cambiar dependiendo al tipo de suelo y a la pendiente de trabajo por lo que el valor mínimo llegaba a 72 mientras el máximo hasta 2395 Kg de CO<sub>2</sub>-eq.

Por otro lado, se revisó material del grupo PELCAN quienes son expertos que realizan investigaciones del rubro ambiental con metodologías como la del ACV dentro del territorio nacional. Ellos realizaron un análisis de ciclo de vida para rellenos sanitarios en Lima, Cusco e Iquitos (Ziegler et al., 2019). En dicho estudio, se empleó como unidad funcional 1 tonelada de residuos dispuestos, siendo en Lima donde se recibía casi 2 000 toneladas diarias y se asume que en composición casi un 3% era de residuo inerte como en este caso. Así, en los rellenos se generan entre 892 y 945 Kg de CO<sub>2</sub>-eq por cada tonelada rellena, valor nada minúsculo considerando el trabajo diario realizado en ese mismo punto.

### 3. METODOLOGÍA

La metodología empleada se puede considerar con enfoque del tipo cuantitativo puesto que se partirá de los datos obtenidos de registros colectados sobre los cuales se emplearán estrategias probabilísticas muestrales a fin de obtener correlaciones entre los datos particulares de cada grupo y pronosticar su generación para un inmediato futuro. En el presente proyecto, basándose en el plan de gestión de residuos sólidos, se realizó una evaluación de impactos empleando el método de análisis de vida y siguiendo los lineamientos basados en lo encontrado en bibliografía.

#### **3.1. Caso de estudio: Proyecto “Mejoramiento de capas y estabilización de taludes en la Costa Verde – San Miguel”**

Como principal fuente de datos se solicitó el registro completo de volúmenes provenientes de obras de construcción a la Asociación De Estudios Ecológicos e Investigación Civil Sostenible (ADEICS). La misma que trabaja bajo el enfoque de economía circular y toma como guía los objetivos de desarrollo sostenible cuya finalidad son la generación de nuevos espacios públicos de uso recreativo, social o cultural y un manejo sostenible de los recursos naturales dentro del país (ADEICS, 2015).

Uno de los proyectos que ha tomado cargo la asociación es la de mejora de capas y taludes del acantilado de la Costa Verde en el distrito de San Miguel en coordinación con la Municipalidad local. Este plan, que toma inicio en noviembre del 2016, se lleva a cabo mediante la compactación y estabilización de las capas de tierra y taludes en la zona mostrada en la Figura 18, que comprende a toda la zona de la Costa Verde que pertenece al distrito de San Miguel. Lo cual se logra mediante métodos de compactación para lo cual emplea como material de relleno la tierra limpia generada en las excavaciones de las distintas construcciones en Lima y maquinaria pesada.

**Figura 18**

Ubicación de Proyecto de Mejora de Talud en San Miguel



Nota: La zona delimitada en verde delimita la zona actual de ADEICS donde se ha empleado el material limpio para la estabilización de talud y generación de espacio. Tomado de Google Earth, 2021.

Como resultado de esta operación se planea generar aproximadamente 280 000 m<sup>2</sup> de nuevo suelo, destinado para áreas recreativas que mejoren el paisaje del distrito. Tal como ya se ha logrado en gran parte de la zona donde se ha habilitado un área de eventos, un área de convenciones, un centro de juegos, así como un parque público.

Sobre los documentos obtenidos, se conoce el volumen entregado por distintos proyectos de construcción que decidieron emplear el punto de disposición de la asociación encargada para los residuos limpios y reaprovechamiento hacia el relleno de talud. En tales se indica los siguientes datos para volumen recogido: datos de procedencia, que indican información sobre el distrito de origen de la muestra, la empresa constructora que tiene a cargo la obra y la dirección de procedencia; datos del traslado, tales como la fecha de inicio de disposición y fecha de término de traslados que abarcan desde el inicio del 2017 y el segundo bimestre del 2021, la distancia estimada entre el proyecto y el punto de descarga, así como la cantidad de

viajes realizados; y, datos propios del suelo: principalmente su volumen y composición. A partir de estos datos se puede obtener una caracterización apropiada y un gráfico que muestre el incremento de volúmenes en el tiempo, como se muestran en el Anexo 1 y el Anexo 3 donde ya se han ordenado los datos de volumen distinguido por bimestre.

### **3.2. Análisis Origen-Destino**

La movilidad de los residuos representa también un factor importante en el caso de estudio por lo cual se pretende elaborar un mapa de intensidades y una matriz origen-destino. Esto será posible debido a que se cuenta con los datos de origen por distrito de la llegada de 1660 obras, así como la cantidad de viajes realizados por cada proyecto alrededor de todo Lima desde noviembre de 2016 hasta abril de 2021 para veintiocho de los 43 distritos de la provincia limeña además del aporte de la Provincia regional del Callao, teniéndose en cuenta que todos los viajes tenían como destino el punto de descarga en el Circuito de Playas 77 – San Miguel.

Esta forma de análisis se mostrará a través de un mapa de intensidades, similar a la metodología empleada en el estudio de transporte urbano en Bogotá (Amézquita et al, 2018), considerando que en este caso todos los puntos de salida tienen un mismo destino que es el punto de mejora del talud. Además, se explicará con datos probabilísticos si es existente la relación entre la magnitud del volumen dispuesto y la lejanía de su punto de origen al punto de disposición.

Se mostrará, además, en un gráfico el flujo de materiales proveniente de la actividad de excavación para las construcciones del departamento de Lima, para el mismo fin se emplearán los volúmenes excavados y se colocará en el diagrama delimitado. Esta será una aplicación directa del concepto de stock de materiales como herramienta gráfica comprendida en el concepto un análisis de flujo de materiales, donde se grafica en un delimitado espacio de análisis el proceso que atraviesa determinado elemento desde su punto de partida en extracción hacia los diferentes destinos finales luego de su empleo como parte de alguna actividad humana

(Rowe, 2020). Asimismo, se detallará mediante estadística descriptiva el aporte realizado por los diferentes distritos durante el período de tiempo que ha funcionado el proyecto.

Una vez que se discrimine la cantidad de material aportada por cada obra se considerará el total generado a nivel de departamento (considerando en el grupo a la provincia de Callao) lo que permitirá elaborar una gráfica del acumulado total de material excavado. En este punto se aplicará el Método Exponencial Lineal de Holt, el cual permite establecer una serie de variables y fórmulas para estimar una cantidad futura basándose en datos reales para un periodo racional de tiempo, considerando que existe una tendencia lineal ascendente que no cuenta con parámetros de estacionalidad.

Para iniciar con el pronóstico de la serie de tiempo, se debe resaltar cuáles son los principales componentes en cualquier serie de tiempo. Los cuatro componentes que definen a una serie de tiempo según Brownlee (2017) son: el nivel, que representa al valor promedio de la serie; la tendencia, que indica el valor propenso de crecimiento o decrecimiento y puede ser lineal o exponencial y demás no lineales; la estacionalidad, que indica la repetición de ciclos; y la irregularidad, que refiere a cambios aleatorios por factores externos. Asimismo, el análisis del presente estudio seguirá un modelo aditivo, que a diferencia del modelo multiplicativo que relaciona los componentes mediante un producto, este define al valor contenido “ $y(t)$ ” para un periodo de tiempo “ $t$ ” como la suma de los valores de cada componente:

$$Y(t) = Nivel + Tendencia + Estacionalidad + Irregularidad$$

El Método de Suavizamiento Exponencial Doble o Método de Holt (Betancourt, 2016) entonces permite analizar en una serie los componentes de nivel y tendencia, para lo cual define dos constantes:  $\alpha$  y  $\beta$ , definiendo la primera como la constante de atenuación para el promedio de los datos y a la segunda como la constante de atenuación de estimación de la tendencia. El valor de ambas será variable hasta optimizar al mínimo el error elegido. Las fórmulas entonces a emplear para la variable a pronosticar serán:

$$\text{Forecast}(t) = u + v * p$$

$$u = \alpha * y(t - 1) + (1 - \alpha) * (u_{t-1} + v_{t-1})$$

$$v = \beta * (u_t - u_{t-1}) + (1 - \beta) * (v_{t-1})$$

$$\rightarrow u_1 = y(1) \text{ y } v_1 = 0, \text{ y siempre } 0 < \alpha, \beta < 1$$

Donde:  $u$  = valor promedio suavizado

$v$  = tendencia del periodo “t”

Forecast = pronóstico para el periodo “t”

$y(t)$  = valor real del periodo “t”

Entonces con ayuda del complemento de *Real Statistics* en Microsoft Excel, se trabajó los valores obtenidos de la serie de tiempo para los valores de  $\alpha = 0.7$  y  $\beta = 0.95$  que optimizaban los valores de error empleados según (Adhikari y Agrawal, 2013):

- a) Error Absoluto Promedio: o *Mean Absolute Error* (MAE), refiere al promedio de todos los valores absolutos de errores como diferencia entre los valores reales y los pronosticados. Fue el valor que se optimizó para hallar los adecuados valores de  $\alpha$  y  $\beta$ .

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |e_t|$$

- b) Error Cuadrado Medio: o *Mean Squared Error* (MSE), refiere al promedio de todos los errores cuadrados entre los valores reales y los pronosticados.

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t^2$$

- c) Error Absoluto Porcentual Medio: o *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), refiere al promedio del error absoluto entre valores real y pronosticado expresado como un porcentaje de este último para cada periodo. Un valor recomendado es de 10% o menor.

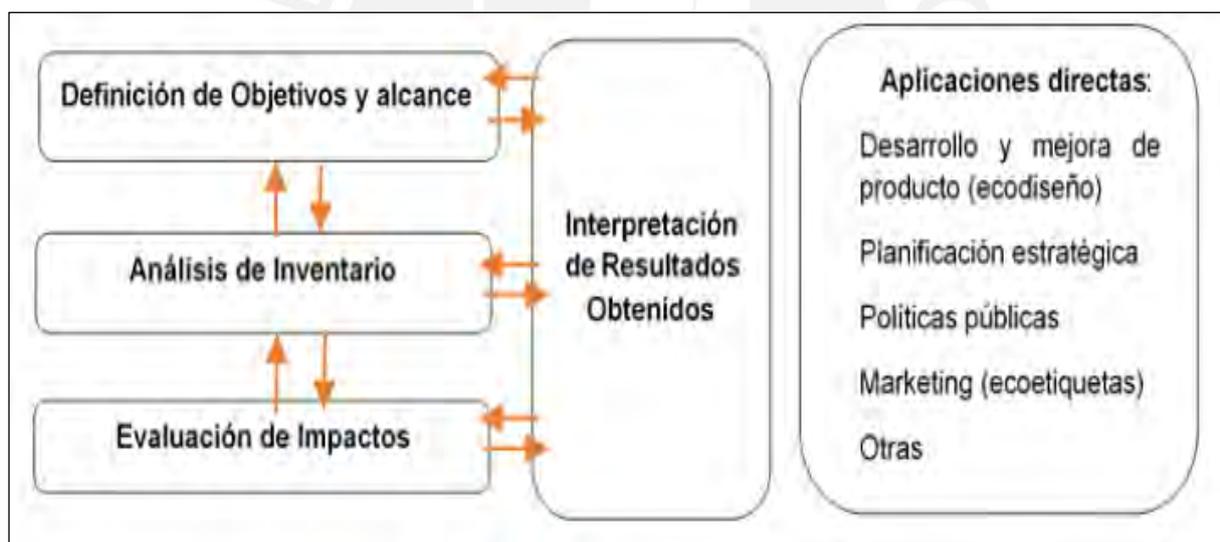
$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{e_t}{y_t} \right| \times 100$$

### 3.3. Análisis de Ciclo de Vida

La aplicación de una metodología ACV se ve normada según la ISO 14040 (Organización Internacional de Normalización [ISO], 2006) por una serie de fases como muestra la Figura 19, en la cual puede observarse como hay un proceso iterativo entre tales, pero el método inicia con la definición de objetivos y alcances, donde se define el método y unidad funcional, continúa a el análisis de inventario, donde se detallan los procesos y recursos involucrados, y concluye en la evaluación de impactos, que refiere a la medición cuantitativa, mientras que en paralelo y finalmente se interpretan los resultados de impacto ambiental (Eurofins, 2021).

Figura 19

Metodología de un Análisis de Ciclo de Vida.



Nota: El esquema del proceso para realizar un ACV se explica mediante cuatro fases de definición, análisis, evaluación e interpretación, pero interconexión entre todas. Tomado de ISO 14040, 2006.

En la actual investigación, la utilización del ACV como estrategia está dirigido al proceso de reutilización del material natural excavado para mejora de talud y para las fases vitales se enfocó tres procesos principales: obtención, transporte y disposición del residuo. En consideración se tomará el tipo de residuo generado, la ubicación, el tipo de operación, las

tecnologías y maquinarias involucradas, entre otros. Así además, se apoyó en el software SimaPro, que a su vez se sirve del inventario de entradas para impactos y categorías de impacto ambiental Ecoinvent.

### Figura 20

Fases de análisis en el ciclo de vida de los residuos de excavación



Nota: Se aclaran los tres procesos unitarios a emplear en el ACV. Elaboración propia.

Como se aprecia en la Figura 20, son tres las principales fases que se analizarán respecto a los residuos de excavación, desde tales se obtendrán las operaciones unitarias e inventario de ciclo de vida, donde se detallará tanto en la maquinaria empleada en ellos, como en los insumos participantes. El caso de estudio ya se describió anteriormente, este será el Proyecto de mejora de salud de la Costanera que toma inicio en noviembre del 2016 abarcando un área en desarrollo de aproximadamente 275 000 metros cuadrados, punto en el cual se han depositado a fecha de mayo del 2021 un total de 7.08 millones de metros cúbicos de residuos de excavación.

### 3.4. Aplicación del ACV

Para esta sección se dividirán dos etapas la del proceso de planteamiento del modelo, donde se definirán los parámetros con los que se trabajará, que conllevará a la evaluación del impacto, que muestra los resultados de definir el modelo en el software SimaPro y describir los resultados. Se debe mencionar que se usó como guía las definiciones y pautas descritas para el proyecto EcoRae (2014), donde expertos desarrollaron un ACV para residuos electrónicos.

#### 3.4.1. Planteamiento del modelo

**Con respecto a los objetivos y alcance.** La investigación presente tiene como objetivo principal cuantificar los impactos ambientales de los volúmenes de suelo excavado producidos en distritos de Lima Metropolitana desde la cuna hasta su reutilización en la mejora de salud, para lo cual se vale de la herramienta del análisis de ciclo de vida.

El alcance del presente análisis, como se explicó previamente, comprende las tres etapas del ciclo de vida del material reutilizado: su obtención, su transporte al punto de disposición y su reutilización. Todo el proceso tiene el enfoque hacia los volúmenes excavados por lo que su límite de sistema rige en: todo volumen generado en construcciones de Lima que han depositado sus residuos en el punto de disposición de San miguel durante el período 2016 hasta el 2021.

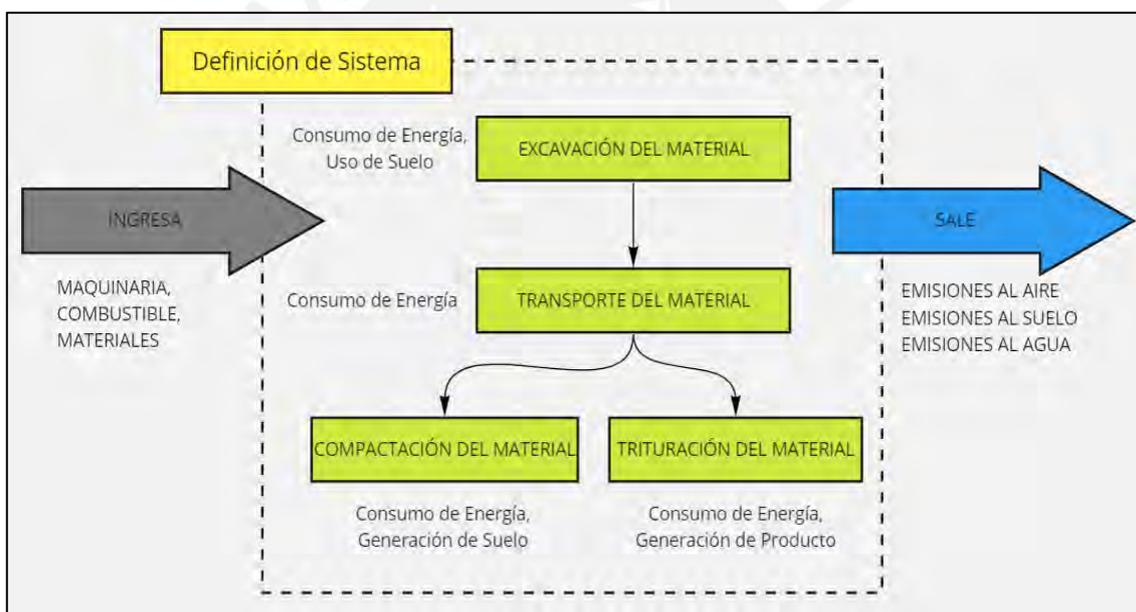
La unidad funcional del sistema se define como una referencia del sistema sobre la cual puedan normalizarse todos los datos de entrada y salida del sistema (Verán y Vásquez, 2017). Por consecuencia, debido a que el proceso de reutilización gira entorno al aprovechamiento de los volúmenes generados se considera trabajar la unidad funcional como: *1 m<sup>3</sup> de residuo de excavación.*

Respecto a los límites del sistema, concerniente al límite geográfico del sistema se cuentan con las zonas limítrofes que contiene la provincia de Lima Metropolitana y respecto al límite temporal se refiere al periodo de data registrada de enero del 2017 a la fecha del estudio

de mayo del 2021. Los límites y procesos unitarios del sistema, que ya fueron presentados, se muestran en la Figura 21. En la misma se ve que los datos de entrada comprenden al combustible, recursos y maquinaria, mientras que, los datos de salida para el reúso de 1 m<sup>3</sup> de material limpio son las emisiones al ambiente. Se puede además hablar del término “*cradle to cradle*” traducido como de la cuna a la cuna, puesto que se analiza desde el punto de extracción de la materia prima hasta su destino como fuente prima para un nuevo proceso, en este caso como nuevo suelo urbano o nuevo agregado de construcción, sin considerar residuos añadidos (González, 2016).

**Figura 21**

Mapa de entradas y salidas del sistema de reutilización



Nota: En el diagrama se aprecia como ingreso a la maquinaria y la mano de obra, y el empleo de recursos, mientras las salidas son las afectaciones como los gases y el agotamiento, durante lo cual ocurre un consumo de energía. Elaboración propia.

Sobre la recolección de data, la fuente de información primaria respectiva fue un representante de la asociación ADEICS respecto al proceso que se realiza en el proyecto de mejora y sobre los equipamientos participantes a fin de poder realizar el inventario. Asimismo, se complementó con revisión bibliográfica los datos de consumo, especificaciones de

maquinaria y demás información que no se encuentre a disposición, pero sea requerida para el estudio de impactos ambientales.

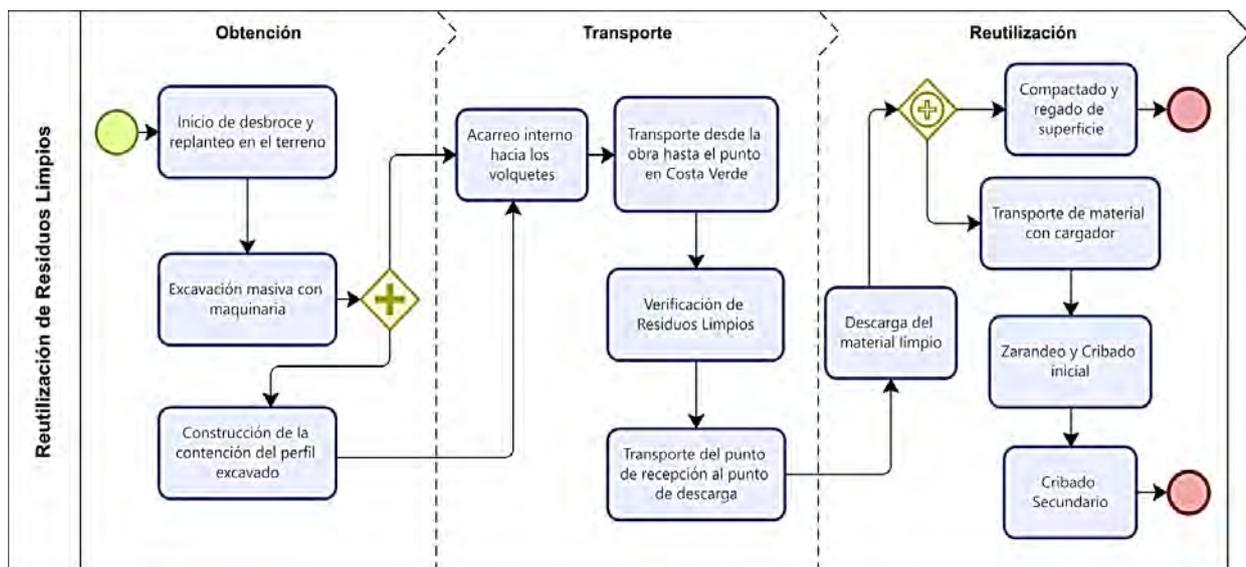
Respecto a las suposiciones y limitaciones, las suposiciones principales refieren al manejo de material de excavación respecto a su etapa de obtención mediante excavación en obras, debido a que no todos los tipos de edificación se rigen a un modelo único y que los volúmenes aportados desde distintos puntos venían en diferentes magnitudes por lo que, para propósitos de esta investigación, se idealizó una construcción de edificación multifamiliar: que produjese el volumen de limpios por día y por obra con valor igual al promedio ponderado calculado del registro; que emplease distintas maquinarias acorde a la magnitud y envergadura de una edificación mediana; y que, para el soporte de terreno luego de la excavación, en un 50% de los casos se emplease muros anclados. Este último punto, resulta importante de considerar puesto que toda excavación debe emplear algún método de contención independiente de si se procederá a construir o no la edificación. Asimismo, los recursos empleados en la oficina de la asociación no fueron considerados ya que se trató de estimar lo relacionado directamente al proceso de reutilización donde participe el residuo.

#### ***3.4.2. Inventario del Ciclo de Vida***

Respecto a los insumos ingresados al software que se encontraban registrados en la base Ecoinvent, estos fueron obtenidos de la maquinaria y recursos empleados directamente en el ciclo del residuo de excavación el cual sigue el diagrama mostrado en la Figura 22. En él, el inicio de las actividades es marcado con un punto verde y los destinos finales del proceso son marcados con un punto rojo; además, se muestra las sub-operaciones dentro de cada una de las tres etapas en el ciclo de vida.

Figura 22

Diagrama de operaciones del proceso de reutilización



Nota: Divido en sus tres operaciones unitarias, el diagrama muestra el proceso generalizado de la admisión y empleo del material limpio, desde su generación hasta su disposición. Elaboración propia.

Entonces la lista de ingresos al sistema de ciclo de vida obtenidos de la base de Ecoinvent (dentro del software SimaPro) son aquellos mostrados en la Tabla 13. En las columnas finales se remarcan en qué procesos unitarios han sido empleados los elementos. Asimismo, debe recalarse que se optó por el elemento *Allocation at the point of substitution* (APOS, asignación en punto de sustitución) en S (system) y no U (unit) debido a que la diferencia está en el modelamiento de los insumos. Con el modelo U se consideran todas las entradas y se muestran en el diagrama de árbol mientras que el modelo en S se considera como un único ingreso lo que permite que el procesamiento en el software sea más rápido. Esta opción no afecta al resultado numérico. Asimismo, las cantidades detalladas diferenciadas para cada operación unitaria del proceso de lo ingresado al inventario se muestra en el Anexo 2, ya normalizado para la unidad funcional de 1 metro cúbico.

**Tabla 13**

Inventario empleado en el análisis de ciclo de vida por SimaPro

Elementos del Inventario	Excavación	Transporte	Reutilización
Gypsum, mineral {RoW}  gypsum quarry operation   APOS, S	•		
Building machine {RoW}  production   APOS, S	•	•	•
Concrete, 30-32MPa {RoW}  concrete production 30-32MPa   APOS, S	•		
Cross-laminated timber {RoW}  cross-laminated timber production   APOS, S	•		
Reinforcing steel {RoW}  production   APOS, S	•		
Diesel {PE}  diesel production, petroleum refinery operation   APOS, S	•		•
Diesel, burned in building machine {GLO}  market for   APOS, S	•		•
Hydraulic digger {RoW}  production   APOS, S	•		
Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 {RoW}  transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4   APOS, S		•	
Tap water {PE}  tap water production, direct filtration treatment   APOS, S		•	
Industrial machine, heavy, unspecified {RoW}  production   APOS, S			•
Conveyor belt {RoW}  production   APOS, S			•
Diesel-electric generating set, 18.5kW {GLO}  production   APOS, S			•
Gravel, round {RoW}  gravel and sand quarry operation   APOS, S			•
Sand {RoW}  gravel and quarry operation   APOS, S			•
Synthetic rubber {RoW}  production   APOS, S			•

Nota: Los productos empleados en el software provienen del inventario en la base de datos establecida Ecoinvent v3.7.1, y su cantidad fue determinada. Elaboración propia.

### **3.4.3. Análisis de Impactos ambientales**

Para determinar el resultado de los impactos ambientales que conllevan las operaciones que involucran al ciclo de vida de los residuos de excavación, se emplearán dos metodologías de evaluación de impacto adecuadas para las categorías a cuantificar. Por un lado, se empleará aquella más empleada para determinar la huella de carbono, la definida por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) 2013 por presentar

factores de caracterización más actualizados (Verán y Vasquez, 2017), mientras que para el resto de categorías se empleará la metodología ReCiPe 2016. Asimismo, se mostrarán los resultados en dos niveles del mecanismo ambiental basados en su nivel de afectación: para el punto intermedio (*midpoint*), donde se ve su efecto directo al medio; así como como para el punto final (*endpoint*), donde se ve su efecto en la población, para lo cual se empleará nuevamente la metodología ReCiPe 2016.

Como determinante y para elaborar comparaciones se definirán dos escenarios alternativos en la vida del residuo de excavación: el primero representa el proceso empleado en ADEICS, donde se considera excavación, transporte al punto de aprovechamiento y la reutilización del material excavado; mientras que, en un segundo escenario, no se cuenta con esa operación unitaria de reutilización y además se trabaja una distancia de transporte 1.6 veces mayor que el primer escenario debido a la distancia promedio de los demás puntos de disposición en Lima además de ADEICS.

En primer lugar, se definirá cuáles son las categorías de impacto seleccionadas junto a los indicadores correspondientes considerando los estudios realizados por diferentes expertos en la materia de análisis de ciclo de vida (Gloria, Lippiatt y Cooper , 2007 citado en Jang et al, 2022, Song et al, 2020, y Mikosch et al, 2022) donde se indica según la opinión de expertos en ACV cuáles se consideran los impactos más importantes debido a su relevancia en el cambio actual. Los seleccionados son siete y los que se describirán en los resultados.

Cambio Climático: se refiere a la cualidad de variabilidad en el clima, orientado principalmente al aumento de temperatura cercano a la superficie de la tierra debido al aumento de emisiones de gases de efecto invernadero por las actividades antrópicas. El indicador en este sector será el potencial de calentamiento global el cual mide el peso de los gases que aumentan y los pondera para generar la unidad de medida como kilogramo de dióxido de carbono

equivalente (kg CO<sub>2</sub> eq), puesto que es el más relevante (EPA, 2022). El horizonte manejado para este impacto será de 100 años porque es el más empleado en estudios similares.

Formación de material particulado fino: se refiere a las partículas sólidas y gotas líquidas suspendidas en el aire que se puede o no observar a simple vista y que causan problemas graves de salud. Para el impacto referido se medirá como indicador el peso de las partículas inhalables finas de diámetro 2.5 micrómetros a menos, las cuales pueden ser producidas desde una fuente directa como la tierra o por medio de reacciones en la atmósfera. La unidad de medida será el kilogramo de partículas de 2,5 micrómetros equivalente (kg PM<sub>2.5</sub> eq) que considera dentro partículas de sustancias químicas, polvo o metales (EPA, 2022).

Acidificación: se entiende como la pérdida de la capacidad neutralizante del suelo y del agua haciéndola más ácida al disminuir el nivel de pH. Esto sucede gracias al regreso a la vegetación en superficie de ácidos, amoniacos, óxidos de azufre y nitrógenos emitidos a la atmósfera, lo cual provoca que su afectación se de en lugares generalmente alejados de su punto de origen. El indicador será el potencial de acidificación el cual emplea como unidad el kilogramo de dióxido de azufre equivalente (kg SO<sub>2</sub> eq) (EPA, 2022).

Reducción de capa de ozono: refiere a los efectos negativos hacia la capacidad de la ozonósfera de proteger la superficie de las radiaciones ultravioletas solares, enfocado principalmente a los compuestos cloro-fluoro-carbonados producidos principalmente en aerosoles y refrigerantes. Su indicador es el potencial de agotamiento de capa de ozono que emplea como unidad el kilogramo de triclorofluorometano, (kg CFC-11 eq) (EPA, 2022).

Agotamiento de recursos: se refiere directamente al uso de recursos naturales para la fabricación de diversos productos. Como indicador se divide en dos: agotamiento de fósiles, que analiza la energía excedente para obtener combustible fósil por lo que su unidad es el kilogramo de petróleo equivalente (kg oil-eq); y agotamiento de agua, que se basa en el

consumo de agua en el ciclo de vida del inventario empleado por lo que su unidad es el metro cúbico de agua usada ( $m^3$ ).

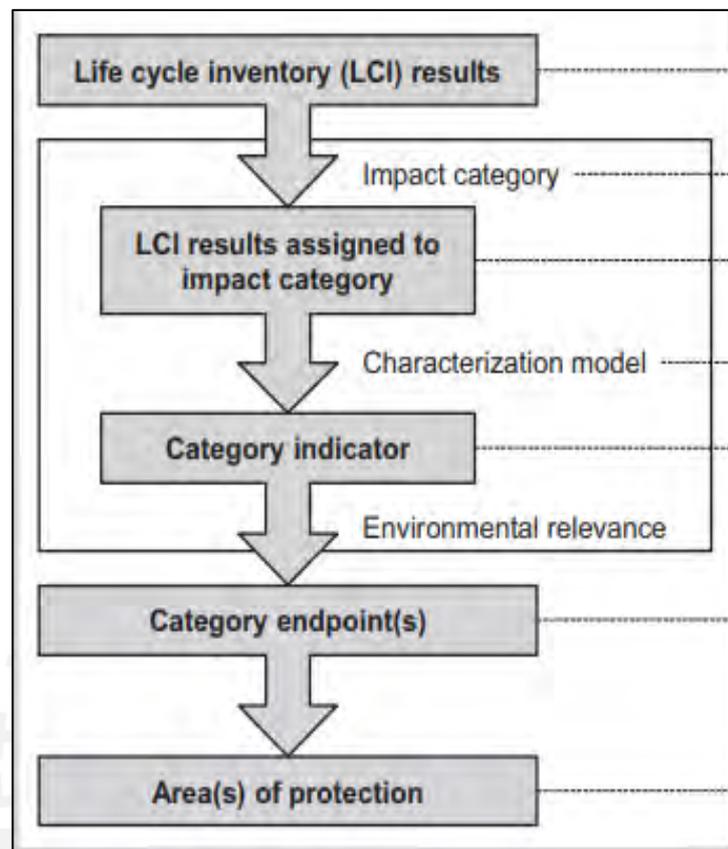
Toxicidad humana: refiere al efecto nocivo de las sustancias tóxicas emitidas al ambiente que afectan sobre la salud de la población humana, las cuales se absorben del aire o de los alimentos. Tales exposiciones tendrán o no incidencia en la aparición de enfermedades no cancerígenas y elevar el riesgo de cáncer, por lo cual se definen dos indicadores de toxicidad humana cancerígena y No cancerígena. La unidad funcional de esta categoría será un kilogramo de 1.4 diclorobenceno (kg 1,4-DCB) cual es abundante en insecticidas, medicamentos y tintes.

Ecotoxicidad: se refiere a las consecuencias negativas de todas las sustancias químicas con efecto directo sobre un ecosistema. Estas afectarán a los organismos naturales, cambiando así la estructura y función del ecosistema en una escala que depende de las condiciones ambientales, el periodo de emisión y las características de la sustancia. Para su medición se emplearán tres indicadores según el ecosistema que afecta: potencial de ecotoxicidad marina, de agua dulce y terrestre. La unidad funcional para todos será de un kilogramo de 1.4 diclorobenceno (kg 1,4-DCB) al igual que para toxicidad humana (EPA, 2022).

Eutrofización: refiere al enriquecimiento desmedido de nutrientes por algas en el medio acuático debido a la contaminación del agua ya sea por elementos en el aire o en los ríos. Debido al alcance que tiene este impacto, su potencial se divide en dos indicadores: uno para eutrofización en agua dulce que emplea como unidad el kilogramo de fósforo equivalente (kg P eq), y el segundo como eutrofización marina que emplea el kilogramo de nitrógeno equivalente (kg N eq) (EPA, 2022).

**Figura 23**

Esquema de caracterización de Resultados del ACV



Nota: El esquema muestra como parte de los resultados del ACV hasta una categoría endpoint, atravesando primero una asignación de categoría ambiental. Tomado de Raymond et ál, 2020.

En adición, seguido a los impactos de punto medio como muestra la Figura 23 por medio de valores ponderados para las categorías *midpoint* dentro de la perspectiva jerárquica (H) aún se determinará el efecto que tiene sobre las áreas de protección, que es la manera como analiza la participación de las categorías de impacto media hacia su daño potencial sobre el ecosistema y la sociedad humana. Estos valores ponderados son conocidos como factores de caracterización y en el presente caso, se definen en la metodología ReCiPe empleada. Las tres áreas de protección que se describen en el *endpoint* se mencionan a continuación.

El primer punto es de Salud humana. Emplea de medida el *DALY* (Disability Adjusted Life Years per affected Person en inglés) que refiere a años de vida ajustados por capacidad por persona, es decir, emplea como medida en años el tiempo perdido para una persona debido a una enfermedad, discapacidad o muerte. El segundo punto es la Calidad de ecosistema. Emplea como medida *especies.year* y representa la cantidad potenciales de especies que se verían desaparecidos debido a una tasa baja de reproducción, muerte o inmigraciones. El tercero y último con los Recursos naturales. Emplea como unidad algún costo monetario, sea USD2013, con esto pretende medir el costo que llevaría reponer la energía requerida para cubrir un recurso en caso este se agote (Fernandez, 2018).



## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los volúmenes de material y periodos a trabajar en el siguiente acápite se desprenden del Anexo 1, a partir del cual se realizan los cálculos respectivos para obtener los resultados que aquí se mostrarán. Se iniciará con una descripción cualitativa y estadística del material para luego finalizar con los pronósticos respectivos y el análisis de impactos ambientales.

### 4.1. Caracterización del material

Según lo mostrado en campo y discutido con el ingeniero encargado del proyecto, al punto de acopio llegaron principalmente dos tipos de material limpio, distinguidos principalmente por su granulometría en la obra misma de origen. Primero se cuenta con el material rocoso que comprende las gravas y bolones, es decir, todo material a partir de un diámetro de 3/8" y diámetros máximos de 16". Usual forma de canto rodado y bajo nivel de fractura debido a su origen aluvial, como se ve en la Figura 24. En seguida se considera al granular fino y arcilloso, donde toda partícula de suelo que tiene un diámetro de 5 mm o menos está en este grupo, se incluye tanto las arenas gruesas, arenas finas, limos y arcillas como muestra la Figura 25. Finalmente, se observan los rellenos o arena eólica, donde el primer término refiere a material tratado de tamaño similar a la arena gruesa, por lo que generalmente su volumen se ven incluido dentro del segundo grupo; mientras que, la arena eólica hace referente a los finos que debido a su diámetro muy reducido se elevaba como polvo ante la descarga de los volquetes. Entonces, partiendo de los datos obtenidos en el registro brindado por la propia asociación y lo discutido con el ingeniero a cargo, se logró discriminar los tipos de material de cantos rodados proveniente del lecho aluvial del Río Rímac y predominantes respecto de cada distrito como se aprecia en la Tabla 14.

**Figura 24**

Material rocoso dispuesto en el proyecto de mejoramiento



Nota: Se aprecia el material rocoso de mayor tamaño. Elaboración Propia.

**Figura 25**

Material granular fino dispuesto en el proyecto de mejoramiento.



Nota: Se aprecia en la fotografía el material fino, es más granular a diferencia del rocoso donde se pueden diferenciar los diámetros. Elaboración propia.

**Tabla 14**

Composición de los residuos limpios depositados de cada distrito.

<b>Distrito</b>	<b>Rocoso</b>	<b>Granular fino y arcilloso</b>	<b>Rellenos</b>	<b>Arena Eólica</b>	<b>No identificada</b>
ATE	X	X			-
BARRANCO		X			-
BREÑA	X				-
CALLAO		X			-
CERCADO DE LIMA	X				4.2%
CHORRILLOS	X		X		-
COMAS	X				-
INDEPENDENCIA	X				-
JESÚS MARÍA	X				-
LA MOLINA	X	X	X		-
LA VICTORIA	X				-
LINCE	X				-
LURIGANCHO	X	X			-
LURIN		X		X	-
MAGDALENA DEL MAR	X				7.7%
MIRAFLORES	X				0.2%
PUEBLO LIBRE	X				-
PUENTE PIEDRA	X	X		X	-
SAN BORJA	X				5.8%
SAN ISIDRO	X				3.1%
SAN JUAN DE LURIGANCHO		X	X	X	-
SAN JUAN DE MIRAFLORES	X	X		X	-
SAN LUIS	X				-
SAN MARTÍN DE PORRES	X				-
SAN MIGUEL	X	X			-
SANTA ANITA	X				-
SANTIAGO DE SURCO	X				-
SURQUILLO	X				-
VILLA EL SALVADOR		X	X	X	-

Nota: Se discrimina el material en volumen de cada distrito que se ha recibido en el proyecto donde se indica el tipo según tamaño. Elaboración propia.

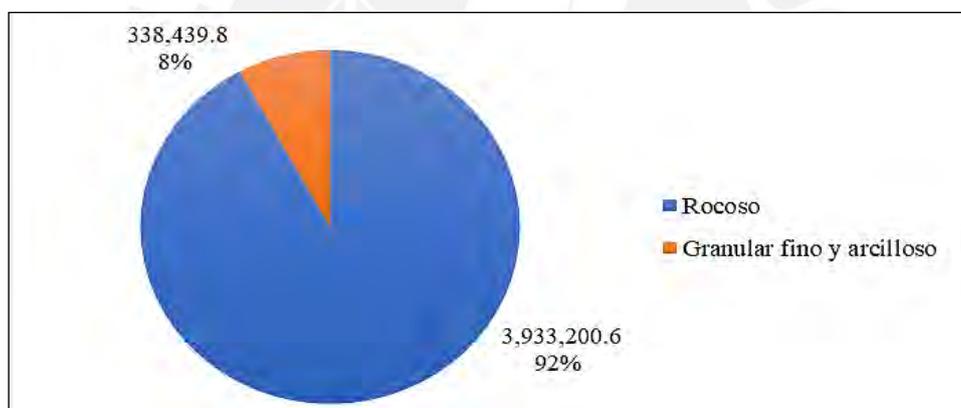
Del cuadro se concluye que el material predominante obtenido en las excavaciones para las distintas construcciones de Lima es del tipo rocoso presente en veinticuatro de los veintinueve distritos que han aportado, seguido de material granular fino y arcilloso presente solo en diez distritos de los estudiados. En adición, se cuenta también con cierta cantidad de material de relleno en cuatro distritos y arenas eólicas en cinco distritos con mucha menor proporción. Asimismo, se rescata que, debido a la reciente llegada del material al momento de análisis, un porcentaje alrededor del 4% en los distritos de Cercado de Lima, Magdalena,

Miraflores, San Borja y San Isidro es de material aún no identificado, aunque se puede inferir que será de tipo rocoso debido al material abundante en tales zonas.

A fin de estimar los volúmenes, el ingeniero indicó en base a ensayos granulométricos realizados que en promedio cuando hay presencia de ambos materiales en el volquete, el material rocoso compone el 70% de dicho volumen y el otro 30% es de material fino. Entonces podría afirmarse que en el volumen total recolectado de 4 271 640 m<sup>3</sup> (metros cúbicos), el material rocoso está presente en un volumen de 3 933 200 m<sup>3</sup> mientras que el material fino cuenta un volumen de 338 440 m<sup>3</sup>. La Figura 26 muestra el porcentaje de cada material respecto del total certificado.

**Figura 26**

Composición del material dispuesto en el proyecto de mejoramiento



Nota: El 90% en composición es material rocoso, apto para el compactado y estabilización de talud.

Elaboración propia.

#### **4.2. Patrones de Generación**

Continuando al capítulo previo, del registro completo se cuenta también con la cantidad precisa de obras que han optado por el servicio y para cada obra la distancia promedio entre la misma y el punto de disposición en el sitio de reutilización, la cantidad de viajes realizados para toda su disposición de material y cuántos días se emplearon para todos los viajes mencionados. La Tabla 15 muestra en manera conjunta para cada distrito la cantidad total de

algunos parámetros mencionados como una sumatoria de los datos brindados por la asociación, excepto por: la distancia promedio entre origen y destino, que se calculó como el promedio ponderado entre todas las distancias hacia las obras y la cantidad de viajes; y, el recorrido total que es la sumatoria del producto entre la distancia promedio de cada obra con la respectiva cantidad de viajes realizados desde ahí.

**Tabla 15**

Características de los residuos limpios depositados desde cada distrito Limeño

DISTRITO	Nº Obras Analizadas	Nº Viajes Realizados	Distancia Promedio (Km)	Recorridos totales (Km)	Duración de Traslado (Días)
ATE	3	38	17.9	484	75
BARRANCO	74	5984	11.7	46782.6	1723
BREÑA	27	2358	9.0	21223.8	898
CALLAO	11	959	10.0	8747.1	298
CERCADO	78	7740	11.4	76725.9	1491
CHORRILLOS	19	4137	18.4	68430.9	688
COMAS	14	980	23.1	10692.9	478
INDEPENDENCIA	2	62	14.3	390.6	8
JESUS MARIA	112	15709	8.0	101126.6	2498
LA MOLINA	8	493	17.1	7830.4	166
LA VICTORIA	29	3986	12.4	43642.3	750
LINCE	60	7653	9.7	69676.2	1209
LURIGANCHO	1	10	34.7	347	30
LURIN	2	134	31.0	4154	44
MAGDALENA	61	7956	6.5	37571.1	1895
MIRAFLORES	394	49356	7.5	419663.7	10076
PUEBLO LIBRE	97	6726	6.3	23443.7	2484
PUENTE PIEDRA	1	105	26.2	2751	63
SAN BORJA	81	5168	14.5	53659.4	1912
SAN ISIDRO	334	37847	9.6	301870.3	7031
SAN JUAN DE LURIGANCHO	2	131	18.9	2344.6	139
SAN JUAN DE MIRAFLORES	5	861	23.5	21930.2	287
SAN LUIS	16	11268	13.2	151652	395
SAN MARTIN DE PORRES	4	182	13.6	2567.1	49
SAN MIGUEL	98	13534	4.7	58246.7	2441
SANTA ANITA	3	86	23.5	2021	26
SURCO	55	6678	16.0	98039.6	1764
SURQUILLO	56	7120	15.8	111129.2	1530
VILLA EL SALVADOR	17	3709	26.7	99741.8	363

Nota: Se muestran los datos certificados para los veintinueve distritos aportantes con el volumen entregado, las obras, la cantidad de viajes, la distancia al punto y el periodo. Elaboración propia.

Tratando de manera apartada y ordenada la información en volumen de llegada como se aprecia en la Tabla 16, se puede hallar el aporte en porcentaje de cada distrito respecto del conjunto total que representa el volumen generado en Lima desde finales de 2016 hasta mediados del año 2021.

**Tabla 16**

Aporte en volumen de residuos de excavación de cada distrito Limeño

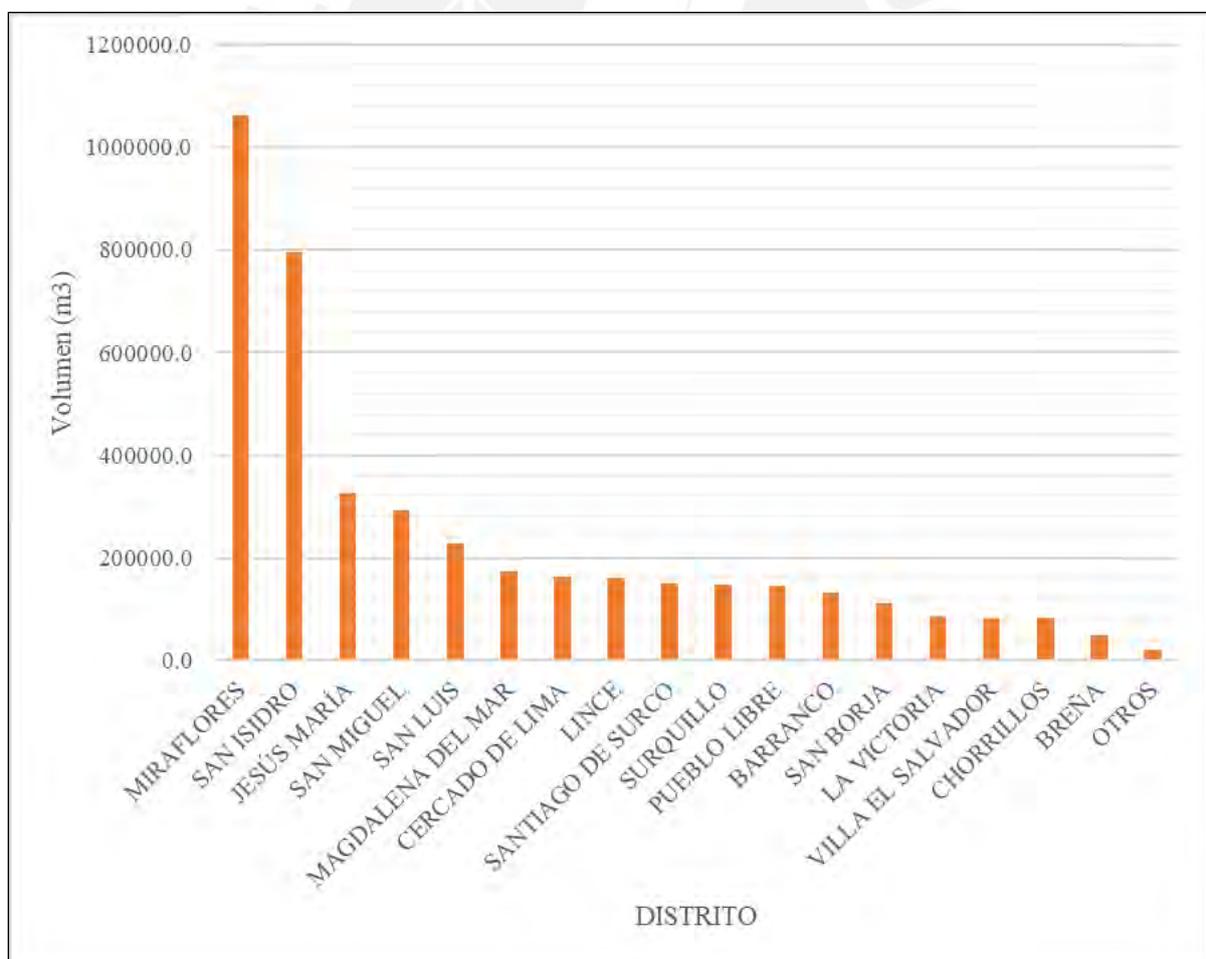
<b>Distrito</b>	<b>Volumen (m3)</b>	<b>Participación (%)</b>
MIRAFLORES	1063280.4	24.89%
SAN ISIDRO	794220.3	18.59%
JESÚS MARÍA	326433.2	7.64%
SAN MIGUEL	292292.0	6.84%
SAN LUIS	227621.6	5.33%
MAGDALENA DEL MAR	172299.0	4.03%
CERCADO DE LIMA	163451.5	3.83%
LINCE	159918.6	3.74%
SANTIAGO DE SURCO	149634.0	3.50%
SURQUILLO	147984.5	3.46%
PUEBLO LIBRE	145398.0	3.40%
BARRANCO	131501.1	3.08%
SAN BORJA	111914.7	2.62%
LA VICTORIA	85571.5	2.00%
VILLA EL SALVADOR	83819.0	1.96%
CHORRILLOS	83130.0	1.95%
BREÑA	48428.0	1.13%
CALLAO	20613.0	0.48%
COMAS	20533.0	0.48%
SAN JUAN DE MIRAFLORES	18572.0	0.43%
LA MOLINA	9943.0	0.23%
SAN MARTÍN DE PORRES	3364.0	0.08%
LURIN	3018.0	0.07%
SAN JUAN DE LURIGANCHO	2280.0	0.05%
PUENTE PIEDRA	2144.0	0.05%
SANTA ANITA	1926.0	0.05%
INDEPENDENCIA	1272.0	0.03%
ATE	878.0	0.02%
LURIGANCHO	200.0	0.00%
<b>Total general</b>	<b>4,271,640.39</b>	<b>100.00%</b>

Nota: Se muestra los volúmenes y el porcentaje que representan del total recolectado en el periodo de estudio donde Miraflores aporta casi el 25%. Elaboración Propia.

Como se puede apreciar en la Tabla 15, casi un cuarto del volumen empleado para el mejoramiento del talud en San Miguel proviene de obras ubicadas en el distrito de Miraflores. Seguido a ello, casi un 20% del volumen generado proviene de obras en el distrito de San Isidro, luego de lo cual los distritos que generan un volumen comprendido entre 10% y 5% del aporte general son Jesús María, San Luis y San Miguel. Finalmente, el resto de veinticuatro distritos completan el total donde aquellos distritos con un volumen generado de material que componen menos del 0.05% recolectado son Independencia, Lurigancho y Ate, que refieren a una cantidad menor a 1500 m<sup>3</sup> de residuos. Asimismo, se puede elaborar un gráfico de barras que muestre diferenciadamente el aporte de cada distrito como se muestra en la Figura 27.

**Figura 27**

Aportes volumétricos de residuos de excavación diferenciado para cada distrito de Lima

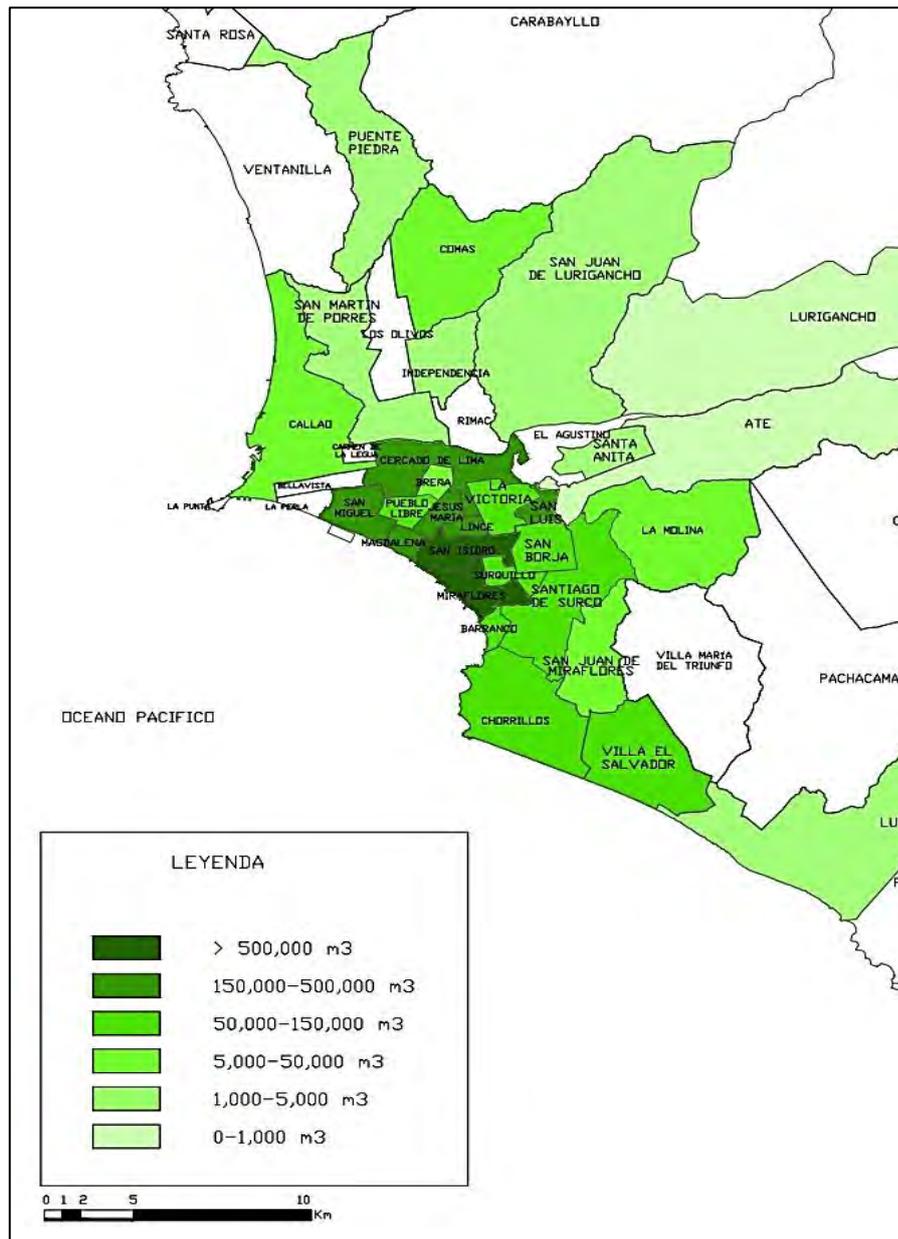


Nota: El gráfico de barras presenta los volúmenes durante el periodo 2016-2021. Elaboración Propia.

De igual modo, de la Tabla 15 se percibe una relación lineal entre número de viajes y volumen generado siendo el cociente entre estos valores un valor dentro del rango de 20 a 23 m<sup>3</sup> de material por viaje que refiere a la capacidad máxima del volquete de traslado. Entonces, para la elaboración del mapa de intensidades se tomará en cuenta los volúmenes generados, por lo que queda definido como en la Figura 28.

**Figura 28**

Mapa de intensidades para volúmenes de excavación



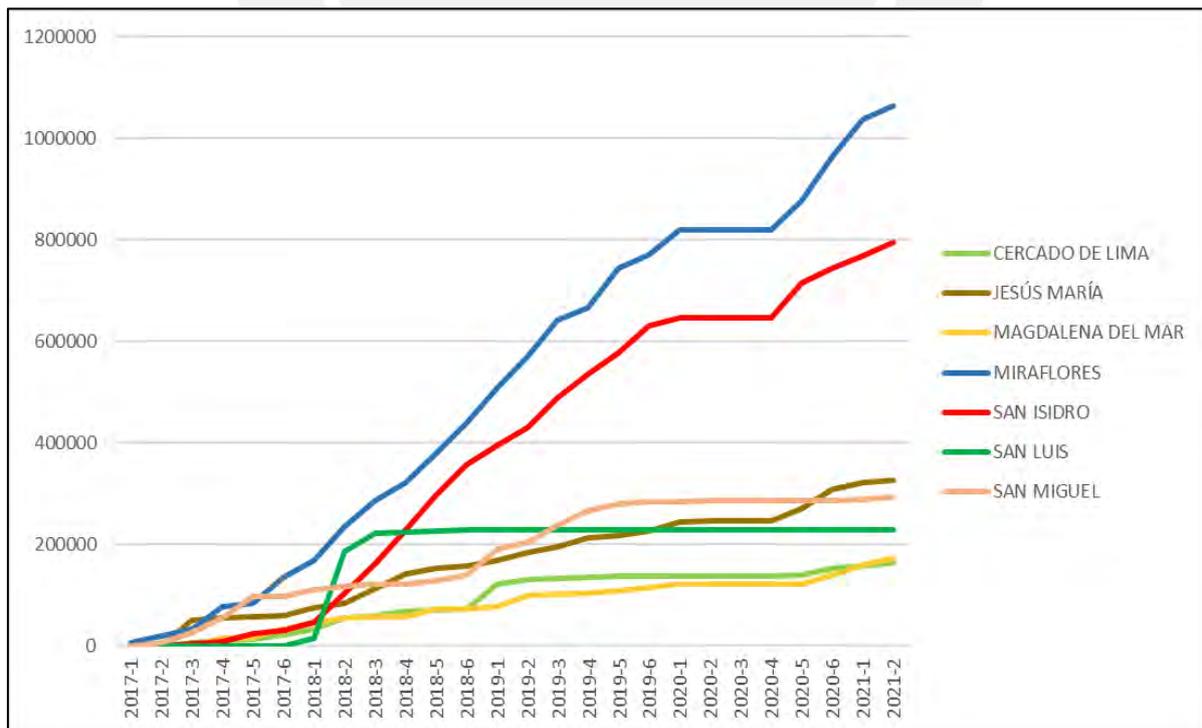
Nota: Se amplía en el Anexo 4. La intensidad de verde varía con el aportado de cada distrito acorde a los límites en la leyenda, se aprecia el oscurecimiento en la zona cercana al proyecto. Elaboración Propia

Generada la variación de color tal como se aprecia en la Figura 28, cuya parte inferior izquierda indica la leyenda de color asignado para cada rango de volúmenes, siendo el tono más oscuro para una mayor cantidad y desvaneciéndose con la disminución de tal, y los límites elegidos para los 6 rangos definidos: 0, 1 000, 5 000, 50 000, 150 000 y 500 000 m<sup>3</sup>. Se puede distinguir que la zona más cercana a la zona de reaprovechamiento hay tonos más oscuros, mientras que en zonas lejanas se muestra un tono desvanecido que en ciertos distritos llega a blanco que representa un aporte nulo de material excavado.

Finalmente, se distinguió el volumen de llegada para cada bimestre desde inicio del 2017 hasta el segundo bimestre del 2021 a fin de obtener una evolución del volumen acumulado durante todo el periodo de estudio. Así lo muestra el Anexo 1, a partir de lo cual se pudo elaborar en primer lugar, un gráfico que muestre el volumen acumulado durante cada bimestre para cada distrito como muestra la Figura 29, misma que se amplía al lector en el Anexo 3.

**Figura 29**

Serie de tiempo de aportes volumétricos de residuos limpios de Lima.



Nota: Se diferencian los volúmenes por distrito para el periodo de análisis, se ve el incremento y los claros aportantes mayoritarios como Miraflores y San Isidro. Elaboración Propia.

Acorde a la Figura 29, se aprecia que el material otorgado por el distrito miraflorentino es mayoría a través de todo el periodo de estudio con una pendiente positiva constante, y que el volumen generado final presenta similitud en porcentaje de participación para cada distrito a través de los cuatro años de aporte. Tendencia que se aprecia similar aunque en menor magnitud para los distritos de San Isidro, San Miguel y Jesús María. Asimismo, se puede observar que en los bimestres 2020-3 y 2020-4 el volumen generado en todos los distritos fue nulo lo cual se debe al periodo de cuarentena que atravesó el país donde las obras se vieron paralizadas y de la misma forma el transporte de los residuos generados.

#### **4.3. Proyección Potencial**

De la misma forma que se generó el gráfico diferenciado de volúmenes acumulados, se cuenta con el gráfico general de los volúmenes en el tiempo para las todas las obras analizadas contenidas en Lima Metropolitana como conjunto, así como se aprecia en la Tabla 17 que se extrae directamente del Anexo 1. Se trabajará con intervalos de tiempo de dos meses para generar una serie de veintiséis datos y lograr una mayor precisión en los pronósticos, solo se contará desde el inicio del 2017 puesto que no se estima con precisión cuánto únicamente pertenece a los dos últimos meses del 2016. Sin embargo, se debe mencionar además que existe un subregistro con intervalos de tres meses sobre los datos reales de volúmenes llegados a obra, tal subregistro será detallado más adelante. Se ha trabajado con ambos registros para el pronóstico pues el principal cuenta con los datos de origen y fechas de llegada por lo que dará un resultado más preciso, mientras que el subregistro mencionado cuenta únicamente con los volúmenes acumulados entre trimestres.

**Tabla 17**

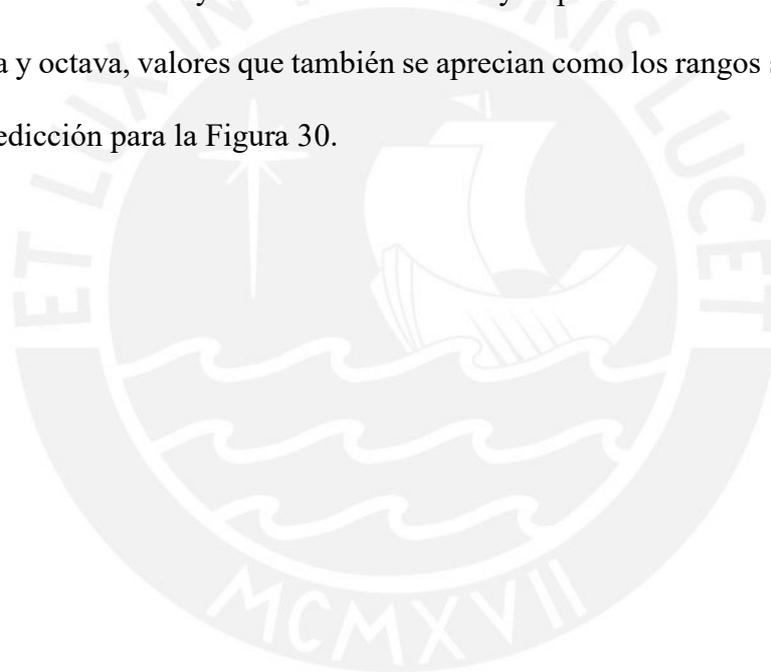
Volúmenes de material de excavación para el periodo 2017-2021

<b>Ciudad</b>	<b>LIMA</b>	
	<b>Bimestre</b>	<b>Acumulado (m3)</b>
2017-1	5970	5970
2017-2	25362	19392
2017-3	127949	102587
2017-4	285555	157606
2017-5	420866	135311
2017-6	601511	180646
2018-1	758230	156719
2018-2	1167519	409289
2018-3	1431782	264263
2018-4	1654579	222797
2018-5	1924870	270291
2018-6	2155268	230398
2019-1	2439507	284239
2019-2	2628764	189257
2019-3	2852521	223757
2019-4	3018619	166098
2019-5	3198142	179524
2019-6	3338831	140689
2020-1	3488258	149427
2020-2	3506502	18244
2020-3	3506502	0
2020-4	3506502	0
2020-5	3700418	193916
2020-6	3951701	251283
2021-1	4142868	191167
2021-2	4271640	128772

Nota: Se diferenci6 el volumen por bimestre seg6n su fecha de llegada, durante los periodos 2020-3 y 2020-4 no hubo colecci6n debido al confinamiento por pandemia de Covid19. Elaboraci6n propia.

Obtenidos los vol6menes de residuos limpios del departamento lime6o, se emplear6 para una estimaci6n futura el M6todo de Holt, el cual permite determinar un pron6stico para futuros periodos empleando datos reales y variables definidas para el sistema que permitan optimizar los tres errores explicados en la metodolog6a.

En consecuencia, se obtuvo los valores pronosticados como muestra la Tabla 18, donde pueden verse en la tercera y cuarta columna los valores definidos en el método, y en la quinta columna los valores pronosticados siendo las últimas seis filas lo estimado para un año siguiente al periodo del análisis. Del mismo se desprende que al segundo bimestre se contará con un volumen de 5 325267 m<sup>3</sup> de residuos de excavación, lo que cuenta con un volumen generado en ese periodo de 1 053 627 m<sup>3</sup>, que representa un incremento del 25% del volumen actual acumulado. Asimismo, la sexta columna indica la desviación estándar entre el valor pronosticado y el real, de modo que estableciendo un nivel de significancia de 5%, se demarcan los intervalos de confianza cuyos valores inferiores y superiores como se muestran en la columna séptima y octava, valores que también se aprecian como los rangos superior e inferior en la zona de predicción para la Figura 30.



**Tabla 18**

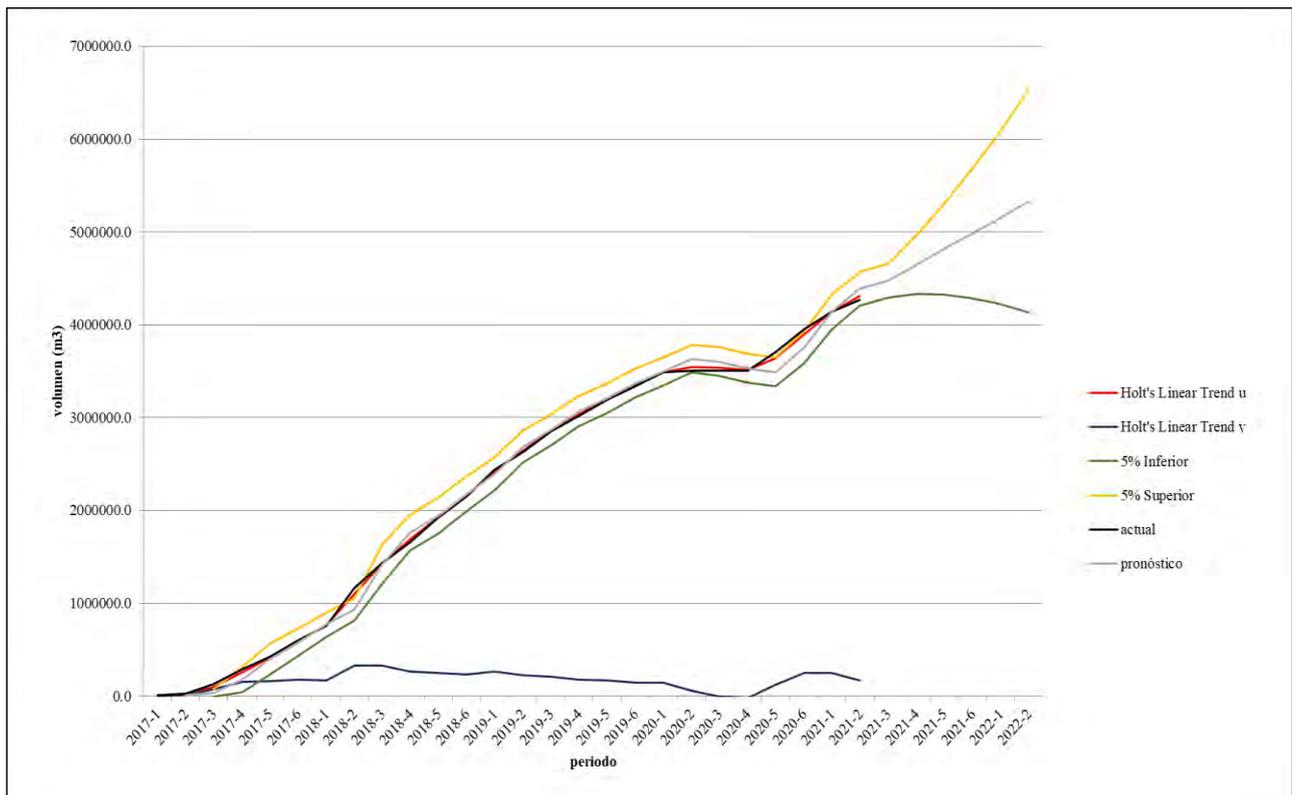
Volúmenes de material del periodo 2017-2021 con pronóstico hacia 2022.

<i>Bimestre</i>	<i>Acumulado</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>forecast</i>	<i>Desv.Est.</i>	<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>
2017-1	5970.0	<b>5970.0</b>	<b>0.0</b>				
2017-2	25362.0	19544.4	12895.7	5970.0			
2017-3	127949.0	99296.3	76409.1	32440.1	19392	-5568	70448
2017-4	285555.0	252600.1	149459.1	175705.4	68913	40638	310772
2017-5	420865.5	415223.6	161965.3	402059.2	84784	235886	568233
2017-6	601511.0	594214.4	178139.5	577188.9	74025	432103	722275
2018-1	758229.7	762466.9	168746.9	772353.9	67097	640846	903862
2018-2	1167519.1	1096627.5	325889.9	931213.8	61522	810633	1051795
2018-3	1431782.0	1429002.6	332050.9	1422517.4	105931	1214896	1630139
2018-4	1654578.8	1686521.2	261245.2	1761053.5	99144	1566736	1955371
2018-5	1924870.0	1931738.9	246019.1	1947766.3	99985	1751800	2143733
2018-6	2155268.0	2162015.0	231063.3	2177758.1	95130	1991307	2364209
2019-1	2439507.0	2425578.4	261938.3	2393078.3	90956	2214808	2571348
2019-2	2628763.6	2646389.5	222867.5	2687516.7	88109	2514826	2860207
2019-3	2852520.6	2857541.5	211737.8	2869257.0	86206	2700295	3038218
2019-4	3018618.6	3033816.8	178048.4	3069279.2	83191	2906228	3232330
2019-5	3198142.3	3202259.1	168922.7	3211865.2	81428	3052270	3371460
2019-6	3338831.4	3348536.5	147409.7	3371181.8	78917	3216508	3525855
2020-1	3488258.4	3490564.7	142297.3	3495946.2	76961	3345105	3646787
2020-2	3506502.4	3544410.3	58268.1	3632862.0	74815	3486228	3779496
2020-3	3506502.4	3535355.2	-5688.9	3602678.4	78377	3449061	3756295
2020-4	3506502.4	3513451.6	-21092.9	3529666.3	79362	3374119	3685213
2020-5	3700418.4	3638000.5	117266.8	3492358.7	77614	3340237	3644480
2020-6	3951701.4	3892771.2	247895.5	3755267.3	87851	3583082	3927453
2021-1	4142868.4	4142207.9	249359.6	4140666.7	95184	3954110	4327224
2021-2	4271640.4	4307618.5	169608.1	4391567.5	93181	4208936	4574199
<b>2021-3</b>				4477226.6	94396	4292213	4662240
<b>2021-4</b>				4646834.7	159729	4333772	4959897
<b>2021-5</b>				4816442.9	249466	4327499	5305387
<b>2021-6</b>				4986051.0	356303	4287711	5684391
<b>2022-1</b>				5155659.1	477021	4220715	6090603
<b>2022-2</b>				<b>5325267.2</b>	<b>609842</b>	<b>4129999</b>	<b>6520536</b>

Nota: Se muestra los pronósticos constantes en la columna de forecast, donde el último dato es para el bimestre inicial del 2022, en las dos últimas columnas se muestra el rango de error superior e inferior.  
Elaboración Propia.

**Figura 30**

Volumen pronosticado para Lima hacia el segundo bimestre del 2022.



Nota: Para la serie de tiempo se maneja un MAE de 67123.8, un MSE 8910657560 y un MAPE de 10%.

Los ejes muestran el acumulado en las ordenadas y el periodo en las abscisas. Elaboración propia.

Se puede ver como en el pronóstico generado mientras más periodos se emplean en el pronóstico los límites de confianza se van ampliando debido a la incertidumbre de tales datos, asimismo se ve en la serie color azul como la tendencia tiende a mantenerse positiva, indicando el incremento de valores, además el error promedio es de  $67\,120\text{ m}^3$  que representa un error del 10%, que resulta en el mínimo posible bajo este arreglo.

Se debe comentar en este punto, que se cuenta con un subregistro de los volúmenes reales colectados en obra diferentes a los ofrecidos con detalle. Esto sucede debido a que no todas las constructoras exigen a la empresa transportista que rindan cuenta sobre el punto de disposición

de los residuos por lo que su manejo ha sido informal, registrándose solo el volumen recolectado cada trimestre. La mencionada data se muestra en la Tabla 19.

**Tabla 19**

Volúmenes reales de material de excavación del periodo 2017-2021 con pronóstico hacia el 2022

<i>Ciudad</i>	LIMA	
<i>Trimestre</i>	<b>Acumulado</b>	<b>Parcial</b>
Q4-2016	114471	114471
Q1-2017	633801	519330
Q2-2017	1099350	465549
Q3-2017	1583253	483903
Q4-2017	2102205	518952
Q1-2018	2612862	510657
Q2-2018	3204138	591276
Q3-2018	3779265	575127
Q4-2018	4305441	526176
Q1-2019	4881723	576282
Q2-2019	5404833	523110
Q3-2019	5725860	321027
Q4-2019	6077106	351246
Q1-2020	6311340	234234
Q2-2020	6311340	0
Q3-2020	6354474	43134
Q4-2020	6711327	356853
Q1-2021	7078113	366786

Nota: Se nominan “quarter” al periodo de diferenciación que es un cuarto de año desde finales de 2016 hasta inicios del 2021, en el periodo Q2-2020 no hubo ingreso de material por el contexto de pandemia. Elaboración Propia.

Entonces, siguiendo el mismo método antes descrito se genera el pronóstico para los siguientes 4 periodos (estimación de un año siguiente), como muestra la Tabla 20. Se continúa trabajando con un nivel de significancia del 5%, que permite describir un intervalo de confianza al 95%. De igual forma, se genera el gráfico lineal mostrado en la Figura 31. Se aclara que el valor de  $\alpha$  y  $\beta$  es de 0.8 y 0.95 respectivamente para esta serie temporal.

**Tabla 20**

Volúmenes reales de material de excavación del periodo 2017-2021 con pronóstico hacia el 2022.

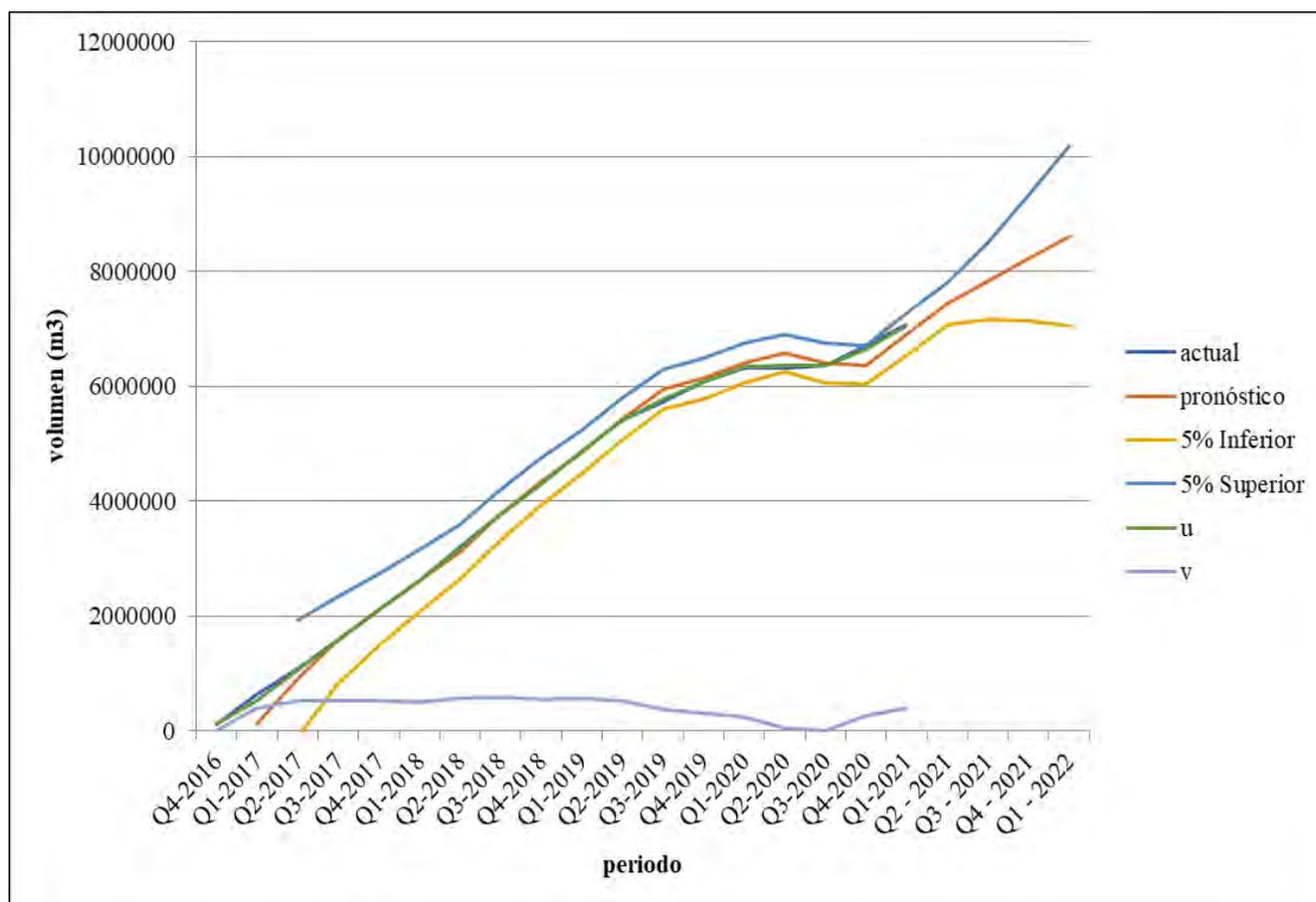
Trimestre	Acumulado	u	v	forecast	Desv.Est.	Inferior	Superior
Q4-2016	114471	114471.0	0.0				
Q1-2017	633801	529935.0	394690.8	114471			
Q2-2017	1099350	1064405.2	527481.2	924626	519330	-93242.3	1942493.9
Q3-2017	1583253	1584979.7	520919.8	1591886	387448	832501.9	2351270.8
Q4-2017	2102205	2102943.9	518112.0	2105900	316389	1485787.7	2726011.3
Q1-2018	2612862	2614500.8	511884.6	2621056	274007	2084011.1	3158100.7
Q2-2018	3204138	3188587.5	570976.6	3126385	245107	2645984.3	3606786.6
Q3-2018	3779265	3775324.8	585949.3	3759564	225992	3316628.9	4202499.3
Q4-2018	4305441	4316607.6	543516.1	4361274	209360	3950936.2	4771612.1
Q1-2019	4881723	4877403.2	559931.6	4860124	196831	4474342.8	5245904.7
Q2-2019	5404833	5411333.3	535230.3	5437335	185713	5073343.3	5801326.1
Q3-2019	5725860	5770000.7	367495.5	5946564	176483	5600663.9	6292463.3
Q4-2019	6077106	6089184.0	321598.9	6137496	180950	5782841.0	6492151.5
Q1-2020	6311340	6331228.6	246022.3	6410783	174121	6069511.7	6752054.3
Q2-2020	6311340	6364522.2	43930.0	6577251	169549	6244941.8	6909559.9
Q3-2020	6354474	6365269.6	2906.6	6408452	178168	6059248.5	6757655.9
Q4-2020	6711327	6642696.8	263701.2	6368176	172690	6029709.3	6706643.2
Q1-2021	7078113	7043770.0	394204.6	6906398	187930	6538062.3	7274733.7
<b>Q2 - 2021</b>				7437975	187015	7071432.0	7804517.1
<b>Q3 - 2021</b>				7832179	346538	7152976.7	8511381.6
<b>Q4 - 2021</b>				8226384	555280	7138054.7	9314712.7
<b>Q1 - 2022</b>				<b>8620588</b>	<b>800074</b>	<b>7052471.4</b>	<b>10188705.1</b>

Nota: Se maneja el mismo esquema que el pronóstico previo, el *forecast* indica el pronóstico calculado y las dos últimas columnas muestran el margen de error inferior y superior. Elaboración propia.

Como se aprecia en la Tabla 20, el valor real de residuos que se dispondrán en el punto de mejoramiento de talud a un año después de la fecha de estudio será de 8 620 588 m<sup>3</sup> que muestran un incremento durante ese periodo de 1 542 475 m<sup>3</sup> que representa un incremento del 22% del volumen real recolectado hasta la fecha. Se genera finalmente el respectivo gráfico que permita visualizar los valores de la tabla en un cuadro visual como muestra la Figura 31, en donde se señala además que el MAPE manejado para este ejercicio es de 7%, ligeramente menor al calculado para la estimación anterior.

**Figura 31**

Volumen pronosticado para Lima hacia el segundo bimestre del 2022



Nota: Para la serie de tiempo se maneja un MAE de 125720.9, un MSE 34 974 589 490 y un MAPE de 7%. Los ejes muestran el acumulado real pero no certificado en las ordenadas y los periodos de tres meses en las abscisas. Elaboración propia.

En base a todo lo mostrado, se puede determinar que para el siguiente año de operaciones, 2022, habría un incremento de entre 22 a 25% del volumen generado de residuos durante todo el periodo 2016-2021, donde la cantidad de volúmenes certificados y registrados representa únicamente el 60% de lo generado en realidad. En conclusión, se proyecta un incremento de 1 542 475 m<sup>3</sup> de material de excavación para reaprovechar en la zona de reutilización. El valor de incremento anual pronosticado comparado al volumen último de residuos municipales

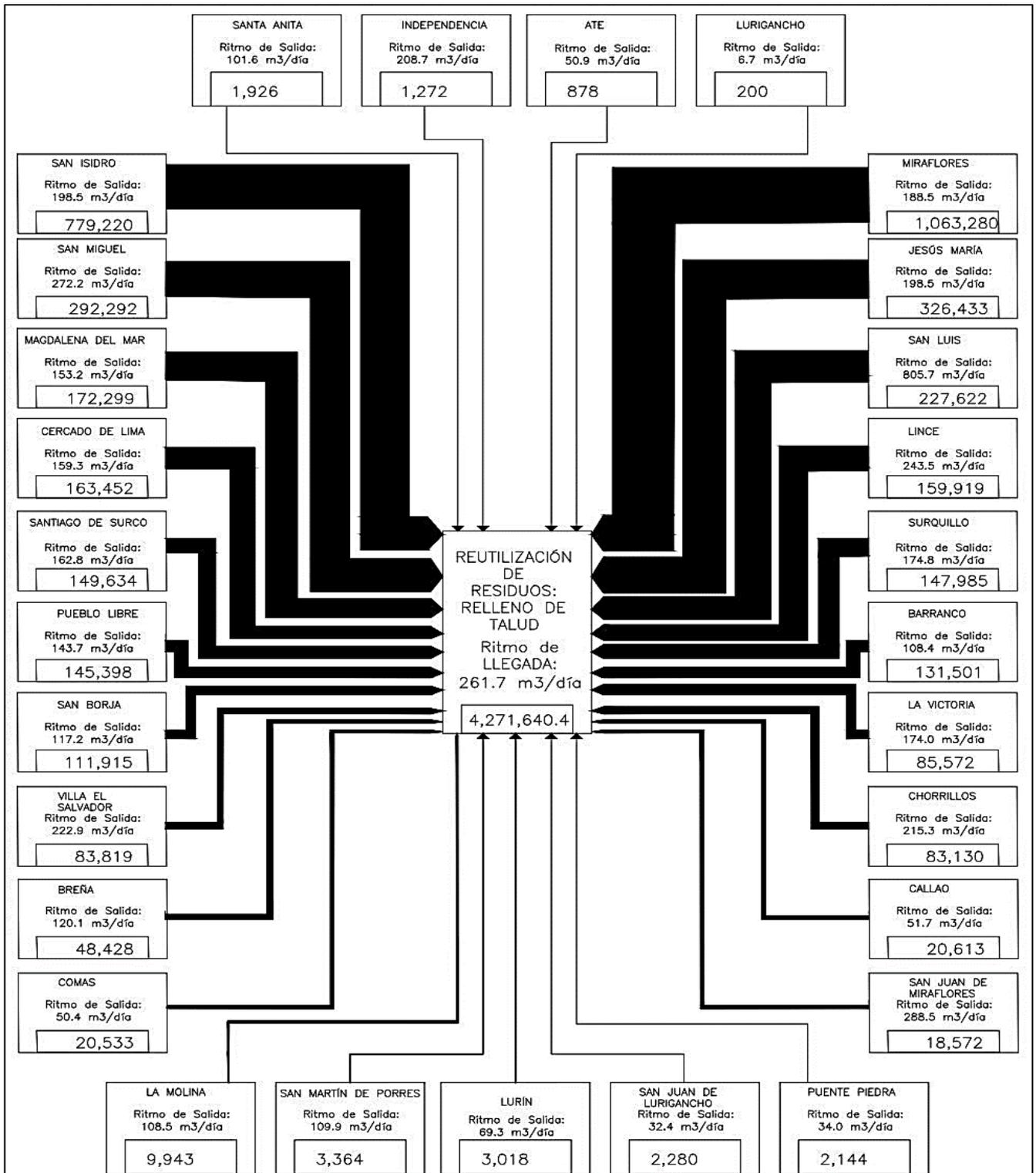
generados en 2019, representa un cercano al 15% de volumen, que representa un valor elevado de residuos por lo que su importancia debe ser tomada en cuenta (INEI, 2022). Asimismo, comparado al valor mencionado en el estado del arte para el grupo europeo (Hale et al, 2021), esta proyección estimada de más de 2 500 000 toneladas de material es superior a lo reportado en aprovechamiento para los casos de Francia, Portugal, Suecia o Eslovenia. Aquí podría hablarse de una reutilización del 100% pero deberían contarse el porcentaje restante, es decir aquellas obras que no han destinado su material en este punto, lo que se podría llegar a reducir ese porcentaje reaprovechado a un 50% incluso, dato que sería más realista con lo mostrado en la citada investigación.

#### **4.4. Efecto de la distancia en la reutilización**

A modo de presentar el flujo de material proveniente de las fases tempranas de proyectos de construcción, se permite elaborar también un gráfico de Stock de materiales como señala el análisis de flujo de materiales donde se mostrará en cajas el volumen proveniente de cada distrito y a través de flechas guía la magnitud del volumen dispuesto donde la primera asunción será que no se cuenta con material no aprovechado en el punto de acopio, además se indicará en cada cuadro el ritmo de material proveniente asumiendo en segundo lugar que el ritmo de llegada es constante y proviene del cociente entre volumen registrado entre días de traslado en cada obra (valores que ya se mostraron en la Tabla 10). La Figura 32 muestra el diagrama descrito.

**Figura 32**

Stock de material excavado para el departamento de Lima

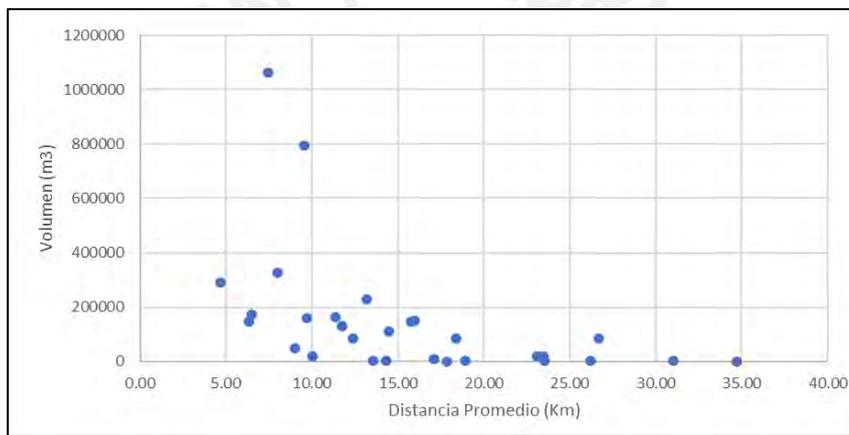


Nota: El diagrama de stock de materiales mostrado permite mostrar gráficamente la magnitud de los flujos mediante los grosores de línea, mostrando en este caso, los puntos de partida y el punto de llegada. Se agrega también el ritmo de emisión de volumen para cada distrito. Elaboración propia.

Como ya se ha mencionado, el distrito de Miraflores es quién más volumen ha puesto a disposición, seguido de distritos como San Isidro y Jesús María. Ahora, se desea determinar también si existe alguna relación entre la distancia promedio al punto de mejoramiento desde cada distrito y: a) el volumen otorgado, b) la cantidad de obras y c) el ritmo de entrega de material excavado. Para este fin, primero se generarán los gráficos de dispersión, referidos en la Figura 33, 34 y 35, a partir de los cuales se calculará el coeficiente de correlación de Pearson, para determinar si existe una correlación lineal entre tales pares de datos y el coeficiente de Spearman, para determinar si existe una relación monótona.

**Figura 33**

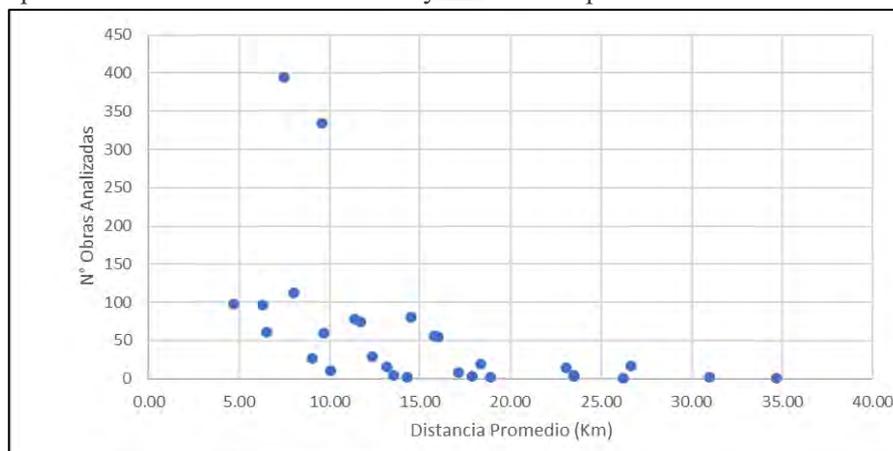
Gráfico de dispersión entre el volumen y la distancia promedio.



Nota: Los puntos agrupados parecen mostrar una relación directa entre ambos ejes. Elaboración Propia.

**Figura 34**

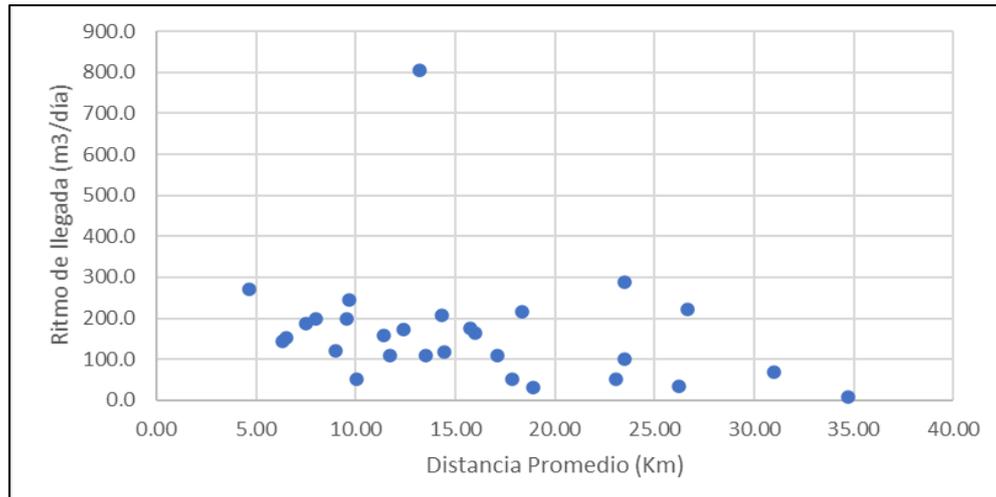
Gráfico de dispersión entre la cantidad de obras y la distancia promedio.



Nota: Los puntos agrupados parecen mostrar una relación directa entre ambos ejes. Elaboración Propia.

**Figura 35**

Gráfico de dispersión entre el ritmo diario de llegada y la distancia promedio.



Nota: Los puntos agrupados parecen no mostrar una relación u orden entre ambos ejes de ritmo y distancia al punto de disposición. Elaboración Propia.

Finalmente, con ayuda del complemento de *Real Statistics* se determina el coeficiente de correlación de Pearson y Spearman para cada caso. Iniciando respecto a la relación entre la distancia y el volumen dispuesto, el coeficiente Pearson obtenido es de -0.47, el cual indica una correlación lineal negativa débil. El obtenido por Spearman es de -0.74 por lo cual hay una relación monótona decreciente fuerte, entonces al incrementar el valor de distancia, el valor de volumen aportado se verá reducido drásticamente en una proporción probablemente exponencial. Esto puede traducirse en que mientras más lejos se encuentra la obra del punto de disposición menor será el volumen que destine y en una relación, lo que explica el valor negativo en los coeficientes de correlación, de tener un valor más cercano a cero el valor de dicha cifra determinaría que la correlación no existe, mientras que si se aproxima a la unidad hay una correlación muy fuerte.

Seguido se tiene la relación de la distancia al número de obras, donde el coeficiente Pearson obtenido de -0.49 indica una correlación lineal negativa débil. Por otro lado, el obtenido por Spearman es de -0.78 que indica una relación monótona decreciente fuerte, por

lo que mientras más lejano esté el distrito, menor será el número de obras que depositen su material de excavación al punto de San Miguel, lo que concuerda con el coeficiente de la relación anterior explicada y remarca el alcance del proyecto sobre obras cercanas a él.

Por último, se consideró la correlación entre la distancia y el ritmo de llegada, aquí el coeficiente Pearson obtenido de -0.28 indica una muy baja correlación lineal negativa. El obtenido por Spearman es de -0.39 por lo cual hay una muy baja relación monótona decreciente. Estos valores al ser casi nulos permiten afirmar que no hay una afectación evidente entre ambos factores, es decir, que la distancia no es un factor primordial para determinar la velocidad de traslado de los volquetes.

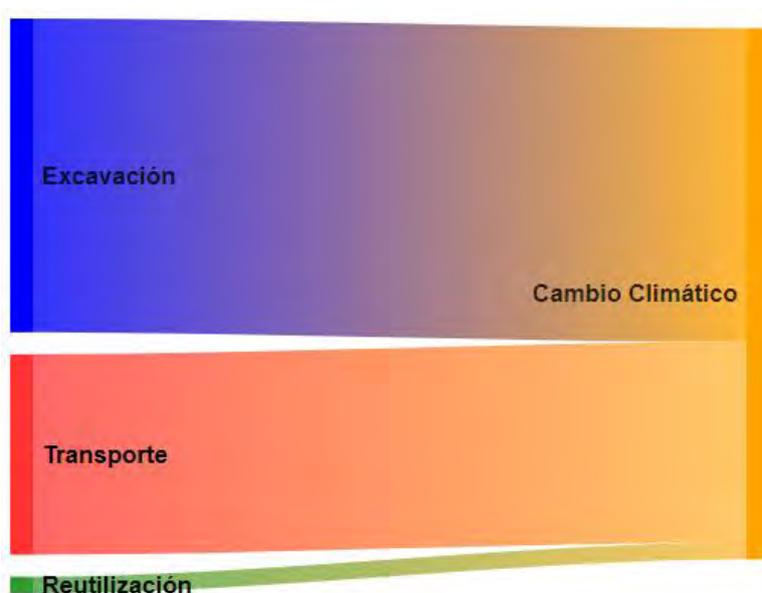
#### **4.5. Evaluación y Análisis de Impacto ambiental**

##### ***4.5.1. Impactos en la categoría de cambio climático***

Empleando la metodología IPCC a 100 años futuros, se estima por cada metro cúbico de material de excavación una generación de 20.8 Kg de CO<sub>2</sub>-eq, proveniente de un flujo que se muestra en la Figura 36 para la vida del residuo considerando la reutilización. Si se comparan el escenario empleado como en la Figura 37 contra una operación sin la reutilización del material, por cada metro cúbico generado se habría generado 26.5 Kg de CO<sub>2</sub>-eq, lo que supone una reducción cercana al 20% en emisiones. Además de ser una cantidad importante en cuanto a magnitud puesto que en el periodo de operación se habría reducido 40 000 toneladas de CO<sub>2</sub>, el cambio se ve más representativo cuando se explica en función al porcentaje de variación respecto a la cantidad del escenario común, puesto que ha sido constante en ese mismo periodo. Si se considera la densidad del material para trabajar como unidad funcional una tonelada de material generado, los resultados se vuelven 11.6 Kg de CO<sub>2</sub>-eq para el escenario favorable y para el caso alternativo sin aprovechamiento de 14.7 Kg de CO<sub>2</sub>-eq.

**Figura 36**

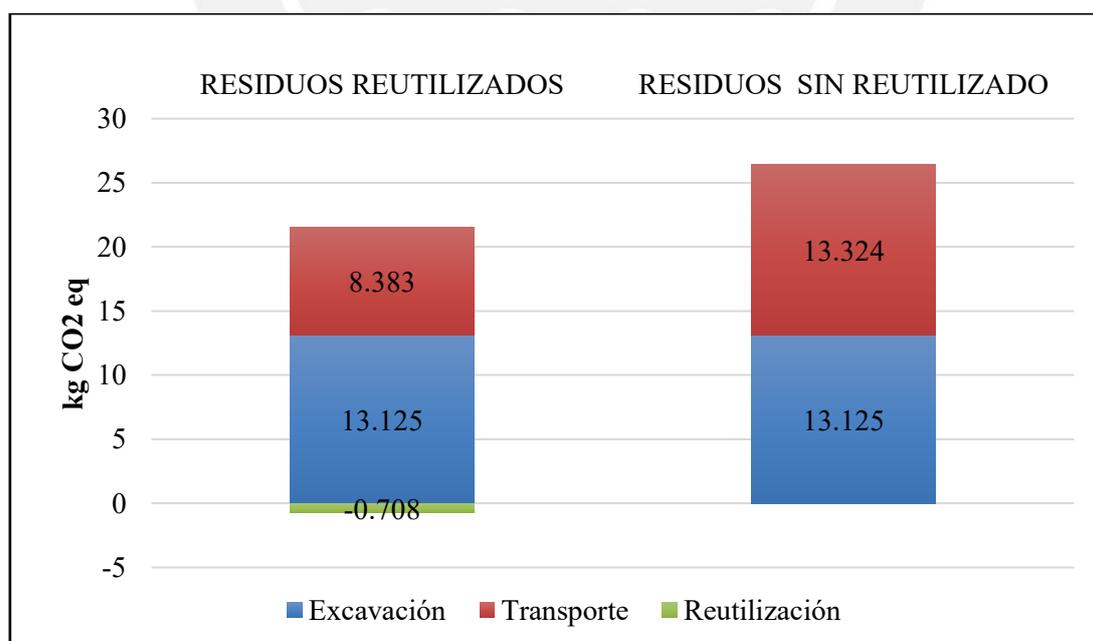
Participación de procesos unitarios en el indicador de cambio climático



Nota: El gráfico de Sankey separa por operación el impacto de cada fase donde hay reutilización en el proyecto. Elaboración Propia.

**Figura 37**

Resultados de dióxido de carbono emitido según IPCC 2013 GWP para 100 años.



Nota: El gráfico separa por operación el impacto de ambos escenarios, uno donde hay reutilización en el proyecto y otro donde se deposita de manera irregular. Elaboración Propia.

Cómo se aprecia de la Figura 36, en el primer escenario el aporte más importante proviene de la excavación, seguido del transporte y finalmente la reutilización con un valor mínimo pero negativo. Este valor final muestra que el aporte del proceso de chancado y compactado cubre casi totalmente el valor reducido por el agregado obtenido en cantera. La diferencia entre impactos proviene principalmente de la diferencia en la distancia recorrida, puesto que como se ha explicado mediante otros estudios, el transporte es una de las principales aportantes al cambio climático.

Para estimar si la magnitud es coherente podríamos comparar el valor a los estudios mencionados en el estado del arte. En el estudio de Lachat (2021) se hubo determinado que para cada tonelada reaprovechada de concreto se producía entre 18 y 45 Kg de CO<sub>2</sub>-eq, similar al rango de entre 11 y 15 Kg obtenidos en este caso, así como el estudio de Zhang y otros (2019) que mostró para cada tonelada de concreto reciclado se tuvo que generar entre 16 y 50 Kg de CO<sub>2</sub>-eq. Difiere en magnitud al rango menor establecido en el estudio por Gómez (2020) donde se indica entre 1 a 6 Kg de CO<sub>2</sub>-eq para el reúso de 1 tonelada de RCD en Colombia. Muy distinto fue el resultado obtenido por Paula y otros expertos (2021), donde para 1 metro cúbico de concreto con agregados reciclados se hubo producido más de 300 Kg de CO<sub>2</sub>-eq, y más del 50% de este aporte provenía del transporte del agregado. Distinto también frente a los valores obtenidos en el aprovechamiento de residuos inertes para la obtención de nuevo cemento, se logró reducir hasta 100 Kg de CO<sub>2</sub>-eq por tonelada de clínker aprovechado. Los estudios mostrados no permiten comparar directamente los valores obtenidos en el presente estudio puesto que los pocos encontrados si bien tocan el tema de reaprovechamiento, lo manejan en torno a los residuos inertes o a los de demolición y no a los inertes de excavación. Se encontró en el más próximo en enfoque un estudio que toca el proceso de excavación donde consideran los mismos ítems de maquinaria e insumos en muros de contención más emplean la energía empleada. En dicho estudio los resultados se diferencian por el tipo de suelo y la

pendiente de excavación, además que emplean como unidad funcional el metro cuadrado de área trabajada donde el promedio de emisión es de 200 Kg de CO<sub>2</sub>-eq pero en ese mismo punto se refería al trabajo estimado de 90 m<sup>3</sup> excavados (Forsythe y Ding, 2014).

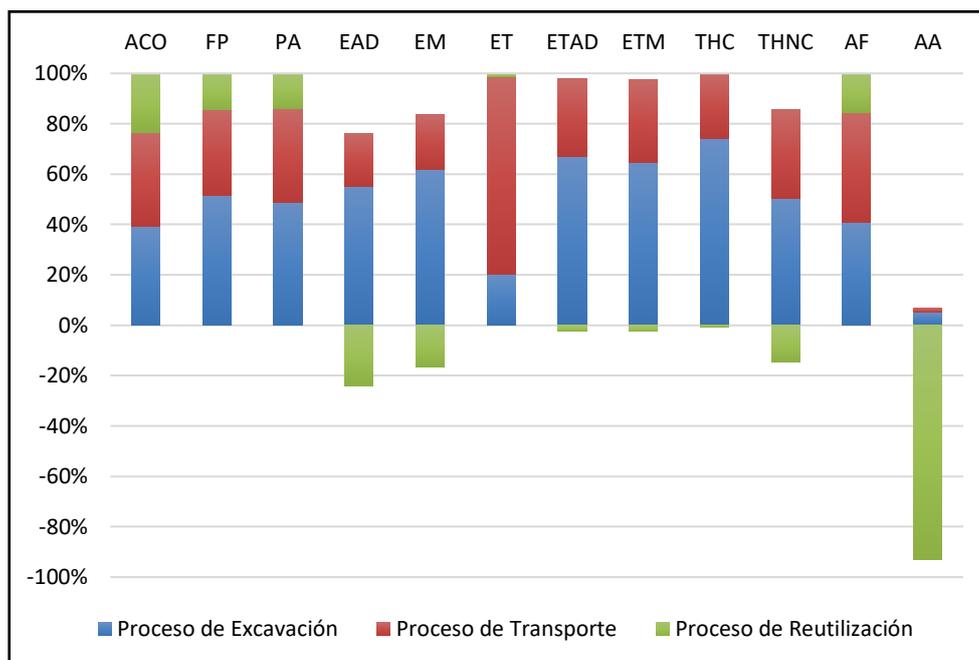
Asimismo, la reducción potencial estimada para el 2020 en el reaprovechamiento del presente caso equivale a poco más de 10 000 toneladas de CO<sub>2</sub>-eq considerando una reducción de 5.65 Kg por metro cúbico de material. Este valor es similar a lo que, según muestra el MINAM, logró reducirse en ese mismo año, a través de cambios en transporte y almacenamiento con la herramienta de Huella de Carbono Perú aplicados a distintas empresas, equivalente a más de 15 000 toneladas de CO<sub>2</sub>-eq (MINAM, 2022). Asimismo, estos valores no se comparan a lo determinado por Zhang y otros expertos (2018) donde se reportó que el país chino había logrado una reducción de más de 100 000 toneladas de CO<sub>2</sub>-eq para el año 2018 mediante prácticas de reutilización.

#### ***4.5.2. Impactos asociados a factores ambientales de agua y material particulado***

Empleando la metodología ReCiPe se obtienen los resultados como indica el gráfico de la Figura 38, expresado en porcentajes para mostrar la participación de cada operación unitaria puesto que los resultados tienen distinta unidad según la categoría y la magnitud de cada indicador no está normalizada, por lo que no es comparable como conjunto. De igual forma, los valores numéricos de estas categorías en ambos escenarios se muestran en el Anexo 5. Tales valores en ambos escenarios concuerdan en magnitud con lo repasado en el estado del arte, como para el potencial de acidificación y el agotamiento de ozono en el estudio en Francia (Lachat et al, 2021), para el potencial de acidificación y el agotamiento de fósiles en la reutilización en carreteras en Francia (Guignot et al, 2015) o a los valores de eutrofización en la Unión Europea (Zhang et al, 2019).

**Figura 38**

Resultados de categorías ambientales por operación en reutilización



Nota: El gráfico de barras muestra los porcentajes de cada proceso diferenciado por color en el escenario de reutilización. Las abreviaturas hacen referencia a: THC, toxicidad humano-carcinógena; EM, eutrofización marina; ETAD, ecotoxicidad de agua dulce; ETM, ecotoxicidad marina; AF, agotamiento de fósiles; EAD, eutrofización de agua dulce; THNC, toxicidad humana no carcinógena; ACO, agotamiento de la capa de ozono; FP, formación de material particulado; PA, potencial de acidificación terrestre; ET, ecotoxicidad terrestre; y AA, escasez de agua. Elaboración Propia.

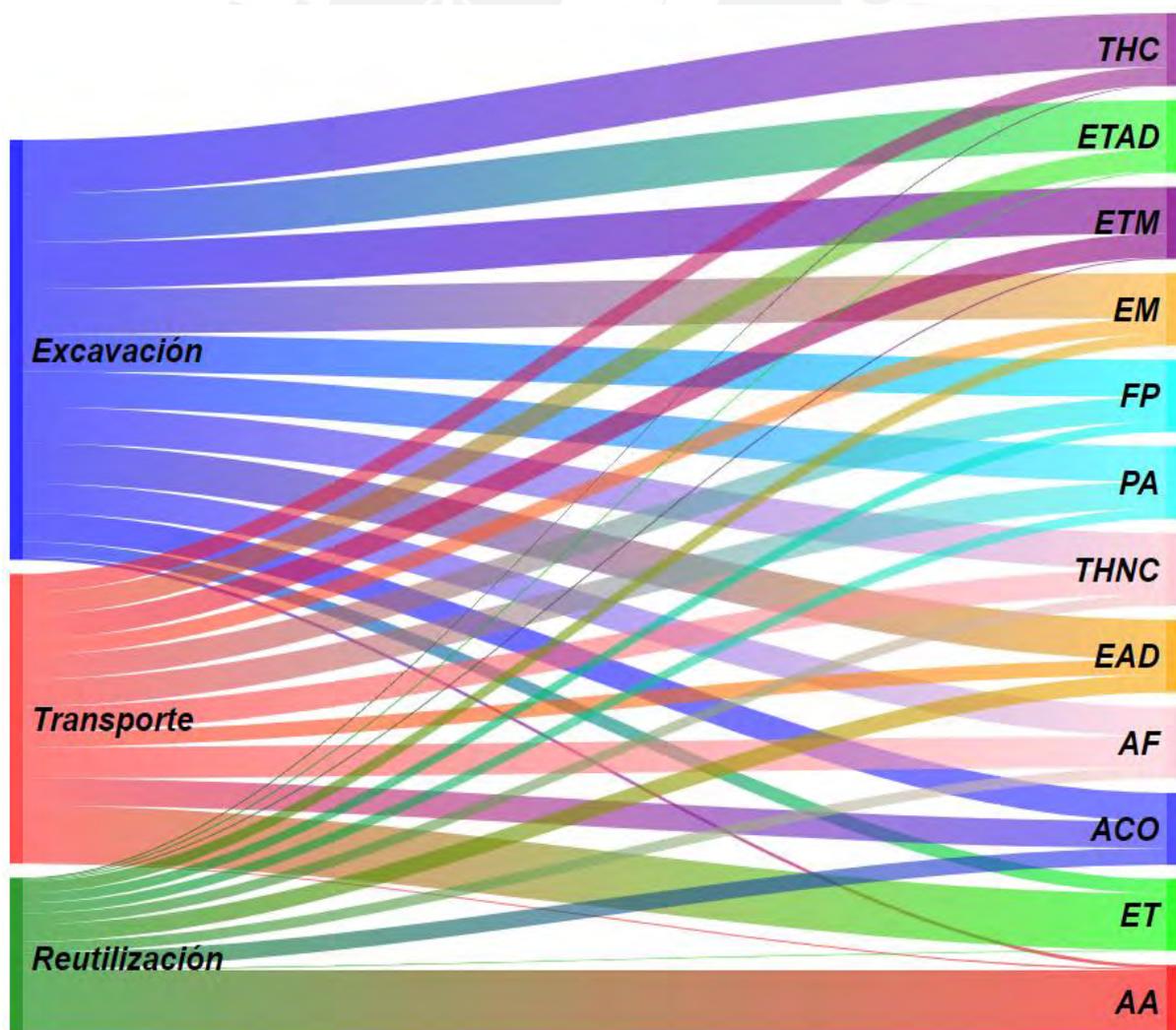
Sobre el gráfico de la Figura 38 se puede apreciar que el proceso de excavación tiene mayor relevancia en los efectos de toxicidad humana carcinógena, eutrofización marina, de agua dulce y ecotoxicidad de agua dulce y marina. El proceso de transporte tiene mayor incidencia en el impacto de ecotoxicidad terrestre, agotamiento de fósiles, agotamiento de la capa de ozono y formación de particulado. Finalmente, el proceso de reutilización (que presenta algunos valores negativos) resulta imponente en la categoría de agotamiento de agua, seguido de eutrofización de agua dulce, eutrofización marina y toxicidad humana no carcinógena mientras que ha resultado aportante para las categorías de agotamiento en la capa de ozono, formación de particulado, agotamiento de fósiles y potencial de acidificación. Dentro de esta

categoría de Agotamiento de Agua se ha alcanzado un valor negativo en el escenario que contempla ADEICS, esto quiere decir que al evitar el uso de agregado virgen en la formación del nuevo talud se está evitando consumir el agua en su producción en aún mayor cantidad que en lo empleado para humedecer el talud y las vías.

Asimismo, mediante un diagrama de Sankey como el mostrado en el gráfico de la Figura 39 se puede definir el flujo de nivel de afectación entre la operación unitaria cada categoría analizada según ReCiPe. Se debe considerar que se grafica la magnitud de cada categoría y no su afectación, puesto que para la operación de reutilización los valores obtenidos han sido negativos, es decir, en lugar de contribuir, han restado al efecto de dichas categorías.

**Figura 39**

Participación de proceso unitario en los resultados de impacto ambiental según ReCiPe

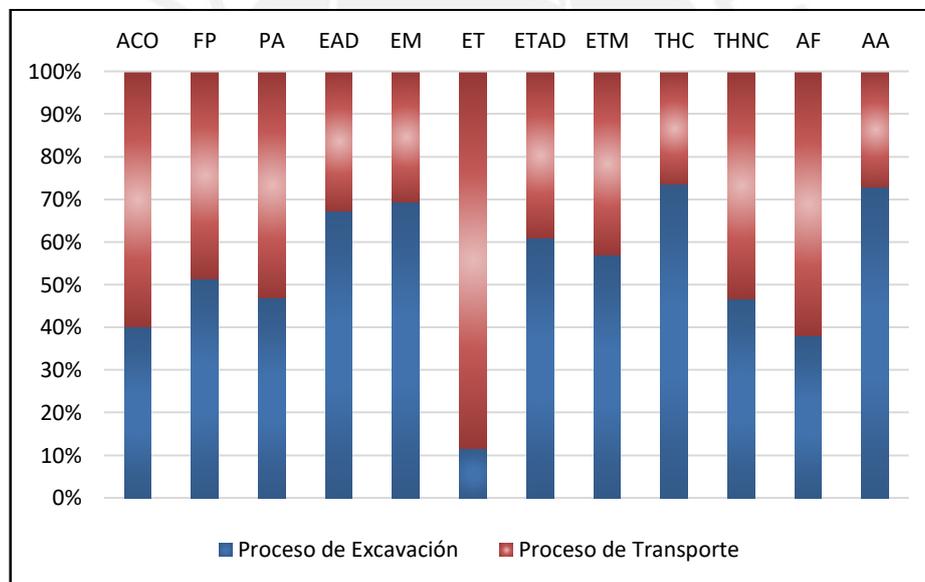


Nota: Las abreviaturas hacen referencia a: THC, toxicidad humano-carcinógena; EM, eutrofización marina; ETAD, ecotoxicidad de agua dulce; ETM, ecotoxicidad marina; AF, agotamiento de fósiles; EAD, eutrofización de agua dulce; THNC, toxicidad humana no carcinógena; ACO, agotamiento de la capa de ozono; FP, formación de material particulado; PA, potencial de acidificación terrestre; ET, ecotoxicidad terrestre; y AA, escasez de agua. Elaboración Propia.

Del gráfico en la Figura 39 se confirma además que la reutilización impacta más en el agotamiento de agua, el transporte es mayor en ecotoxicidad terrestre y agotamiento de capa de ozono mientras que, la excavación supera en toxicidad humana carcinógena, eutrofización y ecotoxicidad.

**Figura 40**

Indicadores de impacto ambiental para el escenario regular



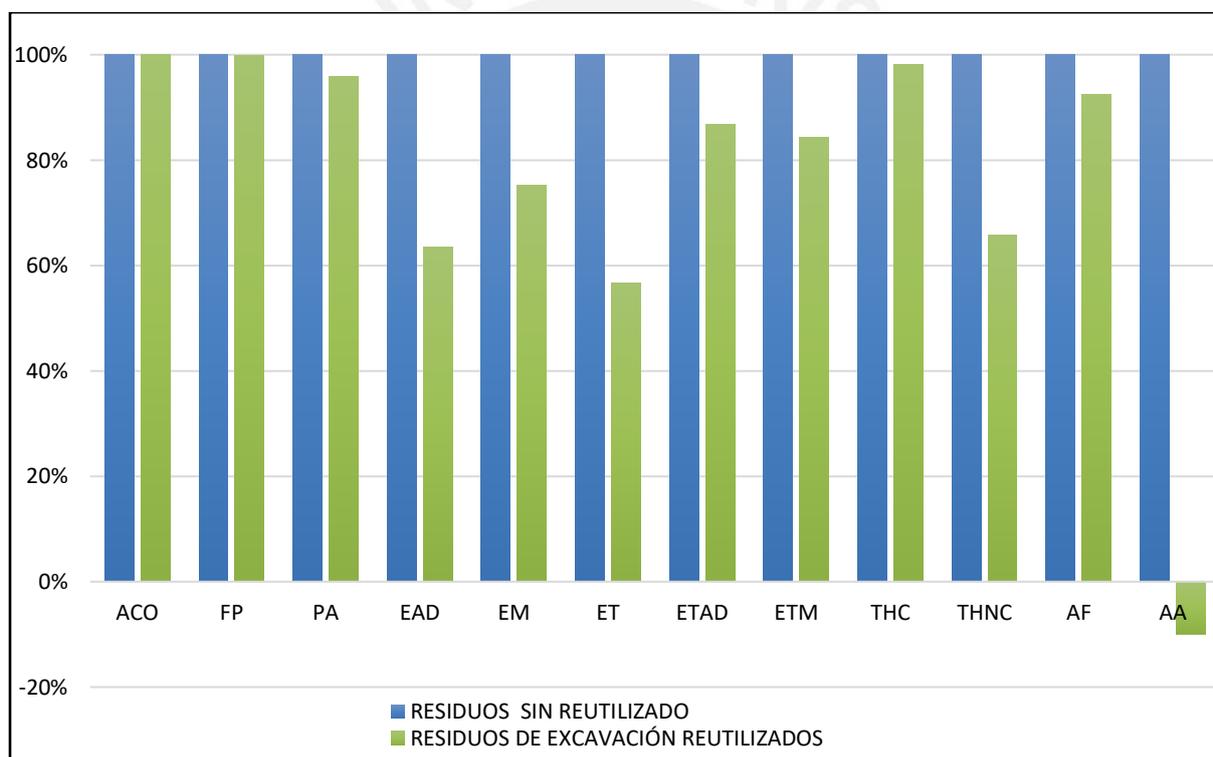
Nota: El gráfico de barras muestra porcentajes diferenciados, donde no hay reutilización, para uniformizar el resultado. Las abreviaturas refieren a: THC, toxicidad humano-carcinógena; EM, eutrofización marina; ETAD, ecotoxicidad de agua dulce; ETM, ecotoxicidad marina; AF, agotamiento de fósiles; EAD, eutrofización de agua dulce; THNC, toxicidad humana no carcinógena; ACO, agotamiento de la capa de ozono; FP, formación de material particulado; PA, potencial de acidificación terrestre; ET, ecotoxicidad terrestre; y AA, escasez de agua. Elaboración Propia.

Como muestra el gráfico de barras en la Figura 40, en el segundo escenario, donde no hay reutilización y donde la distancia de transporte se ha considerado mucho mayor, el proceso

de transporte sigue siendo más involucrado. Su aporte ha sido más del 60% respecto al impacto de ecotoxicidad terrestre, agotamiento de la capa de ozono y agotamiento de fósiles. Mientras que para la toxicidad humano-carcinógena, agotamiento de agua, eutrofización de agua dulce y marina y ecotoxicidad de agua dulce el aporte mayor al 60% ha sido del proceso de excavación. Finalmente, se presenta una comparativa entre ambos escenarios para poder apreciar, al igual que en la huella de carbono, en cuál categoría *midpoint* ha tenido mayor impacto el proceso de reutilización como muestra el gráfico de la Figura 41.

**Figura 41**

Comparativas de categorías de impacto ambiental según ReCiPe



Nota: Los gráficos de barras permiten apreciar la diferencia porcentual del proceso de reutilización de los residuos de excavación comparando ambos escenarios. Elaboración Propia.

La principal categoría beneficiada es la de agotamiento de agua llegando a un valor negativo; en segundo lugar, ecotoxicidad terrestre a la par con la eutrofización de agua dulce y la toxicidad no carcinógena; seguido en magnitud por la eutrofización marina. En las categorías

cinco mencionadas, la reducción del indicador ha sido mayor a 30%. Para el caso del agotamiento de fósiles, el potencial de acidificación, toxicidad humano-carcinógena la reducción ha sido menor al 10%, siendo el caso de la formación del material particulado casi similar entre ambos escenarios variando en apenas un 1%. Habría que mencionar que la categoría de agotamiento en la capa de ozono se ha visto incrementada por un porcentaje igualmente mínimo a diferencia de las demás categorías, esto en similitud a lo expuesto por el estudio de Zanni y demás (2018), tanto para las reducciones estimadas logradas con el reaprovechamiento como para el caso contradictorio del agotamiento de la capa de ozono. Finalmente se desea presentar una aproximación a los estimados de ReCiPe para las categorías *endpoint*, por lo que se obtiene la siguiente Tabla 21.

**Tabla 21**

Resultados para las 3 áreas de protección según ReCiPe 2016

<b>Daño de categoría</b>	<b>Unidad</b>	<b>Residuos de excavación reutilizados</b>	<b>Residuos de excavación sin reutilizado</b>
Salud Humana	DALY	8.17E-05	9.36E-05
Ecosistemas	species.yr	1.39E-07	1.90E-07
Recursos	USD2013	2.737	2.735

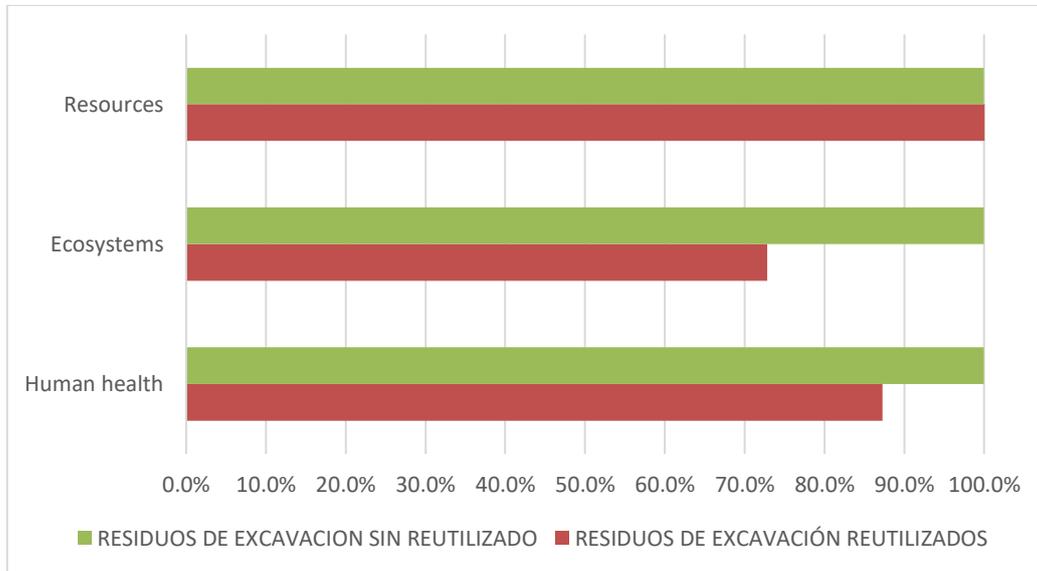
Nota: Se muestran los resultados para las tres categorías *endpoint*. Elaboración propia.

De la mostrada Tabla 21 se desprende el gráfico de barras mostrado en la Figura 42 donde se puede comparar los resultados de cada en porcentaje para determinar un mayor impacto. La justificación a esta parte del estudio reside en que permite explicar de manera más sencilla pero significativa la afectación directa de los efectos al ecosistema en el lector (Walaa, 2018). Es decir, que las categorías *endpoint* permiten una mejor toma de decisiones puesto que es más fácil de interpretar comparado a las categorías *midpoint* las cuales requieren mayor cálculo y discusión del flujo de procesos. Sin embargo, se debe indicar que, para una menor

incertidumbre en los resultados, debiera establecerse mínima data de calidad y la participación de expertos, como recalcan algunos autores (Hauschild et al, 2018).

**Figura 42**

Resultados de categorías endpoint según ReCiPe.



Nota: Gráfico de barras horizontales que compara ambos escenarios expuestos. Elaboración Propia.

De lo calculado se puede afirmar que se está evitando la pérdida de especies dentro de la ecósfera en más del 25%, mientras que por la actividad realizada se reduce el daño a la salud humana en un 15% aproximadamente y finalmente no se evita un costo monetario de reposición de energía. Si bien se pudiese describir en profundidad el valor numérico preciso de cada categoría *endpoint*, esto no es recomendado debido a la falta de consenso científico que posee esta metodología debido a su variabilidad, en vista de eso, resulta más práctico hablar de la variación entre escenarios.

#### 4.6. Impactos adicionales

Así como se determinó el impacto ambiental basado en el proceso de operación de los residuos, también se considera relevante mencionar otros efectos indirectos que ha tenido la actividad sobre la comunidad y los habitantes de la zona en diferentes ámbitos. Además de

reducir la huella ambiental, se ha logrado una mejora de la calidad paisajística mediante el incremento de áreas verdes y de esparcimiento. Esto mismo se traduce a una mejora del estado anímico sobre los transeúntes, así como a la reducción del nivel de estrés lo que mejora la salud. Dentro de este ámbito, se debe destacar que al eliminar el botadero informal de residuos municipales se evita también la proliferación de enfermedades y malos olores. Si bien esto no resalta los beneficios del aprovechamiento de los RCD, sí muestra que los proyectos sostenibles de generación de áreas verde tienen más efectos que los medibles.

Así también, se promueve la economía circular y una cultura de orden, esto en primer lugar debido a la difusión que ha tenido la asociación con diferentes educativos, autoridades locales y grupos de vecinos. Asimismo, la magnitud del proyecto permite que se haya trabajado con una larga serie de transportistas y constructoras con las cuales se ha presentado el proyecto y cuál es la participación de cada uno en pro del desarrollo sostenible. Esto incide en la falta de cultura de la reutilización que se reporta como un problema genuino en el Perú.

En el ámbito económico primeramente se ha visto un incremento en el valor del terreno adyacente al talud, lo cual además ha promovido la construcción de más proyectos inmobiliarios y la implementación de un plan urbanístico en toda la zona de la costa verde; también, se menciona la generación de oportunidades de empleo debido a los requerimientos de la actividad de control y recepción del material limpio. Finalmente cerrar la descripción de beneficios con la reducción en el costo de la formación del terraplén, que ha representado para la municipalidad, el empleo de material reutilizado; puesto que, en una obra similar de otro país este costo ascendía por miles de dólares al costo requerido para la obra en San Miguel. Ello muestra que el impacto económico de un proceso de reaprovechamiento tiene un mayor alcance del que pueda medirse o considerarse directamente.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

Las conclusiones a presentar en el capítulo presente parten de lo estudiado para los volúmenes de material excavado y los datos destacables del análisis estadístico realizados sobre ellos. En principio, ello resulta relevante puesto que, en la actualidad, el sector construcción y su intervención en la capital limeña es un factor constante y en ligero crecimiento debido a la creciente demanda tanto de vivienda como de áreas públicas, por lo que su impacto negativo en el ambiente tiene que ser un tema de relevancia.

Se cuenta con una iniciativa de reutilización para los RCD promovida por la municipalidad de San Miguel en el Circuito de Playas – 77, donde se ha iniciado el proceso de estabilización de talud y generación de espacios públicos y desde noviembre del 2016 hasta la fecha presente del estudio se ha trabajado con 4 271 640 m<sup>3</sup> de material excavado certificado proveniente de distintas 1400 obras en Lima Metropolitana y Callao, que en miras de aprovechar el material residual buscan generar un área de terreno para espacio público.

Principalmente el material de composición en estos volúmenes es del tipo rocoso que comprende más del 90% del material recolectado, seguido de un material fino que representa al 8% sobrante en volumen. Por otro lado, al punto se registra un valor anual entrante de residuos de 985 763 m<sup>3</sup> de material teniendo el máximo aporte en el 2018. Aun con la paralización por la pandemia, durante los 3 primeros años de operación se vio un incremento del volumen anual rescatado.

Asimismo, los distritos que más han ayudado a esta propuesta de reutilización a través de un aporte elevado son Miraflores, San Isidro y Jesús María contribuyendo entre ellos solos con poco más del 50% del volumen total. En la otra mano, los distritos con un aporte menor al 0.05% entre todos ellos son Independencia, Ate y Lurigancho. Se logró demostrar, además, que la relación entre la distancia promedio de las obras hacia el punto de recibimiento influye

en la cantidad de volumen dispuesto, así como en el rendimiento de llegada de material diario a obra obteniéndose para ambos factores un valor de correlación cercano a -0.8 que se traduce en una correlación monótona negativa fuerte.

Respecto al volumen pronosticado mediante el Método de Holt, se determinó que, para el año siguiente de operación del punto de mejora, se verá un incremento del 25% del volumen certificado, mientras que realmente, debido al subregistro que se maneja en el proyecto, el volumen real recolectado se verá incrementado en 1 542 475 m<sup>3</sup> que resulta en un total reaprovechado de 8 620 588 m<sup>3</sup>. Se debe resaltar además que las obras analizadas en el estudio se estima que representan un 30% apenas de todas las obras realizadas en Lima durante el periodo de operación.

Concerniente a la evaluación de impactos ambientales, se determina que el proceso de reutilización ha ayudado a reducir las emisiones que contribuyen al cambio climático en casi 20%, debido principalmente al no emplear material agregado de cantera para la formación del talud. Los valores obtenidos resultan coherentes con demás estudios del mismo tipo, donde se reafirma que las fuentes de los principales daños provienen de la quema de combustible y de la obtención de los naturales.

Se esperaba efectos adversos en algunas categorías de impacto, lo cual se ha comprobado en la categoría de agotamiento de capa de ozono; sin embargo, la disminución en la generación de nuevo agregado obtenido en canteras ha resultado una considerable diferencia positiva en la mitad de categorías. Asimismo, en cuanto a las demás categorías de impacto se tiene una alta incidencia en agotamiento de agua, ecotoxicidad terrestre, eutrofización de agua dulce, toxicidad no carcinógena; y eutrofización marina dónde se observa una reducción cercana al 30% como mínimo. Como último detalle, se considera que para los efectos directos sobre la sociedad sobre las categorías *endpoint* la actividad ha tenido mayor participación en la

evitación de la pérdida de especies dentro de la ecósfera reduciendo su indicador en más del 25%, además de provocar colaterales impactos positivos en el ámbito social de la comunidad.

## **5.2. Recomendaciones**

En vista de los resultados, se recomienda promover la política de reutilización para que el proyecto de mejora en San Miguel no sea el único punto donde se pueda reaprovechar los RCD en Lima, puesto que como se menciona en otros estudios, los materiales cerámicos, metálicos y pétreos de la etapa constructiva y de arquitectura tienen un mayor potencial de reutilización elevado.

Asimismo, se insta a realizar más investigaciones enfocadas hacia la caracterización y pronóstico del RCD para distintas obras en Perú, a fin de establecer comparativos y discutir los distintos sistemas de gestión que se ven en obras reales. Además, estos datos podrán verificar si la normativa dispuesta por el MINAM para el sector constructivo se ejecuta conforme a los objetivos de desarrollo sostenible, y divulgar indicadores ambientales.

Además, se debiera promover el uso de la metodología de análisis de ciclo de vida para más elementos en el ámbito de la construcción. Esto a fin de no solo poder establecer comparaciones entre tales estudios o determinar un rango válido de valores numéricos entre resultados, sino también para poder obtener mayor difusión en los mismos.

Se recomienda también pueden elaborar un comparativo en base a una revisión bibliográfica para confrontar las variaciones en resultados al emplear distintas metodologías y explicar sus variaciones o mostrar el uso de más softwares además de SimaPro.

Finalmente, se busca que mayores trabajos de investigación sobre temática ambiental se realicen, tanto dentro de la metodología del análisis de ciclo de vida como innovadoras metodologías de evaluación de impactos. Esto principalmente para crear conciencia del efecto de las actividades antrópicas sobre el medio natural, puesto que los resultados podrían mostrarse en entornos académicos y profesionales.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Abarca, L. (2017). *Nivel de importancia de las causas de generación de residuos en la construcción en Costa Rica*. Revista Tecnológica en Marcha. 30(4), 130-137. Recuperado de [https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/3417](https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/3417)

Acción RSE (2007). *Guía para la Empresa Ambientalmente Sustentable*. Santiago, (Chile). Recuperado de [http://www.centroscomunitariosdeaprendizaje.org.mx/sites/default/files/guia\\_para\\_la\\_empresa\\_ambientalmente\\_sustentable.pdf](http://www.centroscomunitariosdeaprendizaje.org.mx/sites/default/files/guia_para_la_empresa_ambientalmente_sustentable.pdf)

Actis, R. (2009). *ESCOMBRERAS: Ubicación, estabilidad y contaminación ambiental*. Buenos Aires, Argentina. LPM Editorial. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/231220982.pdf>

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (2018) *Construction and Demolition Debris Management in the United States, 2015*. Reporte Anual. Oficina de Conservación y Recuperación de Recursos. Recuperado de [https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-03/documents/final\\_cd-eol-management\\_2015\\_508.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-03/documents/final_cd-eol-management_2015_508.pdf)

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (2022) *Glosario Ambiental Bilingüe*. Recuperado de <https://espanol.epa.gov/espanol/temas-ambientales>

Amézquita, L., Durán, D., y Fajardo, D. (2016). *Matriz Origen-Destino y eficiencia en modos de transporte urbano: Un análisis de la movilidad de Bogotá*. Universidad de Medellín. Semestre Económico, Vol. 19 (39), 91-112. <https://doi.org/10.22395/seec.v19n39a4>

Betancourt, D. (2016). *La tendencia en el suavizamiento exponencial doble o de Holt*. Ingenio Empresa. Recuperado de: [www.ingenioempresa.com/suavizacion-exponencial-doble](http://www.ingenioempresa.com/suavizacion-exponencial-doble)

Botejara M., González J.,García J. (2022). *Comparative analysis of flat roof systems using life cycle assessment methodology: Application to healthcare buildings*, Case Studies in

Construction Materials, Volume 17, e01212, ISSN 2214-5095. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01212>

Bravo, J., Valderrama, C., Ossio, F. (2019). *Cuantificación Económica de los Residuos de Construcción de una Edificación en Altura: Un Caso de Estudio*. Información Tecnológica, 30(2), 85–93. Recuperado de <https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.4067/S0718-07642019000200085>

Brownlee, J. (2017). *How to decompose time series data into trend and seasonality*. Machine Learning Mastery. Recuperado de <https://machinelearningmastery.com/decompose-time-series-data-trend-seasonality/>

Cáceres, A. (2016). *Análisis de ciclo de vida comparativo de edificaciones multifamiliares en Lima* [tesis de pregrado]. Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ingeniería Civil. Recuperado de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/6682>

Carbajal, M. (2018). *Situación de la gestión y manejo de los residuos sólidos de las actividades de construcción civil del sector vivienda en la ciudad de Lima y Callao*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Agraria La Molina. Facultad de Ingeniería Civil. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3215/carbajal-silva-marcia-andrea.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Chávez, A., Palacio, O., y Guarín, N. (2014). *Unidad logística de recuperación de residuos de construcción y demolición: estudio de caso Bogotá D.C.* Universidad de Granada. Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Volumen 23(2), 95-118. Recuperado de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0124-817020130002000006&lng=en&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-817020130002000006&lng=en&tlng=es)

Chica, L. y Beltrán, J. (2018). *Caracterización de residuos de demolición y construcción para la identificación de su potencial de reuso*. Universidad de Colombia. DYNA, 85(206), pp. 338-347. Recuperado de <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n206.68824>

Congreso de la República (2000). *Ley N° 27314*. Ley General de Residuos Sólidos. 20 de julio del 2000. Recuperado de <https://sinia.minam.gob.pe/normas/ley-general-residuos-solidos#:~:text=La%20Ley%2027314%20se%20aplica,sociales%20y%20de%20la%20poblaci%C3%B3n>

Congreso de la República (2016). *Decreto legislativo N° 1278*. Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos. 23 de diciembre de 2016. Recuperado de <https://sinia.minam.gob.pe/normas/ley-gestion-integral-residuos-solidos#:~:text=El%20presente%20Decreto%20Legislativo%20establece,la%20gesti%C3%B3n%20y%20manejo%20de>

Congreso de la República (2020). *Decreto Legislativo N° 1501*. Decreto Legislativo que modifica el Decreto Legislativo N° 1278, que aprueba la Ley de gestión integral de residuos sólidos. 11 de mayo de 2020. Recuperado de <https://sinia.minam.gob.pe/normas/decreto-legislativo-que-modifica-decreto-legislativo-no-1278-que-aprueba>

Cortés, C. (2018). *Estudio de los residuos sólidos en Colombia*. Universidad Externado de Colombia. Recuperado de [https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=H99hDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA11&dq=concepto+de+residuo&ots=OvpV\\_jGrty&sig=RSO2JUfSE0Nmd58InetLtqQnWuY](https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=H99hDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA11&dq=concepto+de+residuo&ots=OvpV_jGrty&sig=RSO2JUfSE0Nmd58InetLtqQnWuY)

Corzo S. (2016). *Análisis de ciclo de vida de una vivienda unifamiliar en Huancayo*. [tesis de pregrado]. Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ingeniería Civil. Recuperado de <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/7402>

De la Peña, G., y Vines, M. (2020). *Acercamiento a la conceptualización de la educación ambiental para el desarrollo sostenible*. Revista Cubana de Educación Superior, 39(2). Recuperado de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0257-43142020000200018](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0257-43142020000200018)

Diario CORREO (2016). El drama de los residuos sólidos en Lima. Recuperado de <https://diariocorreo.pe/peru/el-drama-de-los-residuos-solidos-en-lima-662594/?ref=dcr>

Diem, G. (2020). *Sustainable Development*. Salem Press Encyclopedia, 2-6. Recuperado de

<http://eds.a.ebscohost.com.ezproxybib.pucp.edu.pe:2048/eds/detail/detail?vid=1&sid=efbcc0bf-44f7-4cd0-9881->

[2eaa1cc4d0d0%40sessionmgr4006&bdata=Jmxhbmc9ZXMmc2l0ZT1lZHMtbGl2ZSZzY29wZT1zaXRl#AN=89474467&db=ers](http://eds.a.ebscohost.com.ezproxybib.pucp.edu.pe:2048/eds/detail/detail?vid=1&sid=efbcc0bf-44f7-4cd0-9881-2eaa1cc4d0d0%40sessionmgr4006&bdata=Jmxhbmc9ZXMmc2l0ZT1lZHMtbGl2ZSZzY29wZT1zaXRl#AN=89474467&db=ers)

EcoRae (2013). *Informe de resultados del ACV del proceso V2.0*. pp 21-88. Recuperado de [http://www.life-ecorae.eu/es/files/B1InformederesultadosdelACVdelproceso\\_V2.0.pdf](http://www.life-ecorae.eu/es/files/B1InformederesultadosdelACVdelproceso_V2.0.pdf)

El Peruano (2020). *Lima liderará el sector construcción*. 20 de mayo de 2020. Recuperado de <https://elperuano.pe/noticia-lima-liderara-sector-construccion-95725.aspx>

Eurofins (2021). *ISO 14041 Análisis ciclo de vida*. Página web. Recuperado de <https://www.eurofins-environment.es/es/tag/iso-14041-analisis-ciclo-de-vida/>

Fernandez, C. (2018) *Conceptos básicos de Ecodiseño. Unidad 04: Análisis y Coses del ciclo de vida*. ECOSIGN. Recuperado de <http://www.ecosign-project.eu/e-learning-docs/unit-04-basic-life-cycle-assessment-and-costs/>

Frischknecht, R., Fantke, P., Tschümperlin, L., Niero M., Assumció A., Bare J., Boulay A., Cherubini F., Hauschild M., Rosenbaum R., Verones F., Vigon B. y Jolliet O. (2016). *Global guidance on environmental life cycle impact assessment indicators: progress and case study*. Int J Life Cycle Assess 21, pp 30-68. Recuperado de [https://doi.org/10.1007/s11367-015-1025-](https://doi.org/10.1007/s11367-015-1025-1)

1

Forsythe, P., y Ding, G. (2014). *Greenhouse Gas Emissions from Excavation on Residential Construction Sites*. Journal of Construction Economics and Building. Volumen 14(4), pp. 1-10. Recuperado de <https://doi.org/10.5130/AJCEB.v14i4.4195>

Fuentes, V. y Argüello, A. (2015). *Indicadores de contaminación visual y sus efectos en la población*. Enfoque UTE, 6(3), 115-132. Recuperado de <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v6n3.74>

Garzón, E. y Sánchez, J. (2013). *Planificación de recogida y flujo de residuos sólidos (de construcción y demolición, hormigón, cerámica y otros) mediante la utilización de una herramienta informatizada para su gestión sostenible*. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio 52: V- XIV. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10261/96907>

Gómez, J. (2020). *Identificación y cuantificación de impactos ambientales de los residuos sólidos de construcción y demolición -RCD-, en la construcción del nuevo edificio de aulas mar caribe de la Universidad de Magdalena, aplicando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida*. [tesis de pregrado]. Colombia. Universidad de Magdalena. Facultad de Ingeniería civil. Recuperado de <http://repositorio.unimagdalena.edu.co/handle/123456789/5609>

González, R. (2016) *Cradle to cradle: Re-diseño y Re-evolución*. Universidad Politécnica de Madrid. Facultad de Arquitectura. Recuperado de <https://oa.upm.es/48845/>

Guignot, S., Touzé, S., Weid, F., Ménard, Y., y Villeneuve, J. (2015). *Recycling Construction and Demolition Wastes as Building Materials: A Life Cycle Assessment*. *Journal of Industrial Ecology*. Volumen 9(6), pp. 1030–1043. Recuperado de <https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.1111/jiec.12262>

Hale, S., Roque, A., Okkenhaug, G., Sørmo, E., Lenoir, T., Carlsson, C., Kupryianchyk, D., Flyhammar, P., Žlender, B. (2021). *The Reuse of Excavated Soils from Construction and Demolition Projects: Limitations and Possibilities*. *Sustainability* 2021 (13), 6083. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/su13116083>

Hauschild, M., Rosenbaum, R., y Olsen, S. (2018). *Life Cycle Assessment—Theory and Practice*. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(7), pp1517–1519. Recuperado de <https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.1007/s11367-018-1461-9>

Hoornweg, D. y Bhada-Tata, P. (2012). *What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management*. Urban development series; knowledge papers. Banco Mundial, Washington, DC. Recuperado de <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17388>

Instituto Nacional de Estadística e Informática (2022). *Datos estadísticos de Población y Vivienda de 2015 a 2022 Actualizado*. Recuperado de <https://www.inei.gov.pe/estadisticas/indice-tematico/poblacion-y-vivienda/>

Jang, H.-J., Ahn, Y.-H., y Tae, S.-H. (2022). *Proposal of Major Environmental Impact Categories of Construction Materials Based on Life Cycle Impact Assessments*. *Materials* (1996-1944), 15(14), N.PAG. Recuperado de <https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.3390/ma15145047>

Jiménez, L., Trochez N., y Díaz, Y. (2019). *Estudio para aprovechamiento de RCD en Santiago de Cali como agregado en materiales de construcción*. *Bistua: Revista de La Facultad de Ciencias Básicas*. Volumen 17(1), pp 87–93. Recuperado de <https://search-ebsohost-com.ezproxybib.pucp.edu.pe/login.aspx?direct=true&db=fua&AN=137393028&lang=es&site=e=ehost-live>

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Urban Development. Washington, DC. Banco Mundial. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10986/30317>

Koshand, A., Khanlari, K., Hamidreza, A., Zoghi, M. (2020). *Construction and demolition waste management: Fuzzy Analytic Hierarchy Process approach*. *Waste Management and Research*. Vol 38 (7), 773-778. Recuperado de <https://doi.org/10.1177/0734242X20910468>

Lachat, A., Mantalovas, K., Desbois, T., Yazoghli-Marzouk, O., Colas, A., Di Mino, G., Feraille, A. (2021). *From Buildings' End of Life to Aggregate Recycling under a Circular Economic Perspective: A Comparative Life Cycle Assessment, a Case Study*. Sustainability 2021, Volumen 13, ISN 9625. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/su13179625>

Magnusson, S., Lundberg, K., Svedberg, B., y Knutsson, S. (2015). *Sustainable management of excavated soil and rock in urban areas – A literature review*. Journal of Cleaner Production, Volumen 93, pp. 18–25. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.010>

Martel, G. (2008). Caracterización de residuos de la construcción y demolición de edificaciones para su aprovechamiento. [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/363217>

Marín, J. (2019). *Análisis de la generación de residuos de construcción y demolición (RCD) en un proyecto institucional: estudio de caso*. Tesis de maestría. Pontificia Universidad Javeriana – Cali. Facultad de Ingeniería. Recuperado de <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/22068/3754%20A478a.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Mesa J., Fúquene C. y Maury A. (2021). *Life Cycle Assessment on Construction and Demolition Waste: A Systematic Literature Review*. Colombia. Sustainability 2021 (13), 7676. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/su13147676>

Mikosch, N.; Dettmer, T.; Plaga, B.; Gernuks, M.; Finkbeiner, M. (2022). *Relevance of Impact Categories and Applicability of Life Cycle Impact Assessment Methods from an Automotive Industry Perspective*. Sustainability No 14, 8837. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/su14148837>

Ministerio del Ambiente (2011). Contaminación ambiental causada por los residuos sólidos. Conocimientos científicos básicos. Lima. Recuperado de

[https://www.minam.gob.pe/proyecolegios/Curso/curso-virtual/Modulos/modulo2/2Primaria/m2\\_primaria\\_sesion\\_aprendizaje/Sesion\\_5\\_Primaria\\_Grado\\_6\\_RESIDUOS\\_SOLIDOS\\_ANEXO4.pdf](https://www.minam.gob.pe/proyecolegios/Curso/curso-virtual/Modulos/modulo2/2Primaria/m2_primaria_sesion_aprendizaje/Sesion_5_Primaria_Grado_6_RESIDUOS_SOLIDOS_ANEXO4.pdf)

Ministerio del Ambiente. (2014). *Sexto informe nacional de residuos sólidos de la gestión municipal y no municipal*. Lima.

Ministerio del Ambiente. (2016). *Plan Nacional de Gestión de Residuos Sólidos 2016-2024*. Lima. Recuperado de [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/12033/planres\\_2909217.pdf](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/12033/planres_2909217.pdf)

Ministerio del Ambiente. (2020). *Lima: Estadísticas ambientales a Junio 2020*. Recuperado de <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/lima-estadisticas-ambientales-junio-2020>

Ministerio del Ambiente. (2018). *Ministerio del Ambiente denuncia penalmente a funcionarios de la Municipalidad de Chorrillos*. Note de Prensa. Recuperado de <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/1200-ministerio-del-ambiente-denuncia-penalmente-a-funcionarios-de-la-municipalidad-de-chorrillos>

Ministerio del Ambiente. (2022). *Estadística de reducción de la huella de carbono*. Recuperado de <https://huellacarbonoperu.minam.gob.pe/huellaperu/#/huellaperu>

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (2013). *Decreto Supremo N°003-2013-Vivienda*. Reglamento para la gestión y manejo de los residuos de las actividades de construcción y demolición. Emitido 8 de febrero de 2013.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2016). *Decreto Supremo N°019-2016-Vivienda*. Modificación del Reglamento para la Gestión y Manejo de los Residuos de las Actividades de la Construcción y Demolición. Emitido 21 de octubre de 2016.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). *Estudio de demanda de vivienda a nivel nacional*. [Presentación]. Recuperado de

[https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/154530/presentacion\\_-\\_estudio\\_de\\_demanda\\_2018.pdf](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/154530/presentacion_-_estudio_de_demanda_2018.pdf)

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2022). *Decreto Supremo N°002-2022-Vivienda*. Reglamento de Gestión y Manejo de los Residuos Sólidos de la Construcción y Demolición. Emitido 4 de abril del 2022.

Miranda, I., Borbón, C., García, F., Quintana, J., Morales, E., y Rivera, G. (2016). *Estudio de generación de residuos especiales en la construcción del fraccionamiento portal de romanza en Hermosillo, Sonora*. Revista EPISTEMUS, Vol 10(20), pp. 74–80. Recuperado de <https://doi.org/10.36790/epistemus.v10i20.26>

Miranda, L., Neira, E., Torres, R., Valdivia, R. (2016). *Perú hacia la construcción sostenible en cambio climático*. Recuperado de [https://www.academia.edu/26193481/PER%C3%9A\\_HACIA\\_LA\\_CONSTRUCCI%C3%93N\\_SOSTENIBLE\\_EN\\_ESCENARIOS\\_DE\\_CAMBIO\\_CLIMATICO](https://www.academia.edu/26193481/PER%C3%9A_HACIA_LA_CONSTRUCCI%C3%93N_SOSTENIBLE_EN_ESCENARIOS_DE_CAMBIO_CLIMATICO)

Mulders, L. (2013). *High Quality Recycling of Construction and Demolition Waste in the Netherlands*. Universidad de Utrecht. Recuperado de <https://studenttheses.uu.nl/handle/20.500.12932/13837>

Navia, C. y Tamayo, O. (2020). *Modelos Mentales Sobre El Concepto De Ambiente en Estudiantes Indígenas De Educación Básica*. Revista Latinoamericana de Estudios Educativos (1900-9895), 16(1), pp13–46. Recuperado de <https://revistasojs.ucaldas.edu.co/index.php/latinoamericana/article/view/2284>

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (2014). *Fiscalización ambiental en residuos sólidos*. Ministerio del Ambiente. Recuperado de [https://www.oefa.gob.pe/?wpfb\\_dl=6471](https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=6471)

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (2014). *Fiscalización ambiental en residuos sólidos de Gestión Municipal: Informe 2013-2014*. Ministerio del Ambiente.

Recuperado

de

<https://repositorio.oefa.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12788/56/fiscalizacion-ambiental-en-residuos-solidos-de-gestion-municipal-provincial-2013-2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Organización Internacional de Normalización. (2006). *Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia* (ISO 14040). Recuperado de <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>

Páez, M. (2018). *Importancia de la gestión sostenible en las empresas del siglo XXI*. Revista mktDescubre -ESPOCH FADE. Volumen (12), pp. 94-103. Recuperado de <https://core.ac.uk/download/pdf/234592352.pdf>

Paula, A., Jacinto, C., Oliveira, T., Polisseni, A., Brum, F., Teixeira, E., Mateus, R., y Larsson, P. (2021). *Characterisation and Life Cycle Assessment of Pervious Concrete with Recycled Concrete Aggregates*. Crystals. Volumen 11(2), pp. 209, ISN 2073-4352. Recuperado de <https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.3390/cryst11020209>

Pinzón, S., y Cortés, G. (2018). *Manejo de residuos de construcción y demolición en el municipio de Guamo, Tolima*. Revista Lámpsakos. Volumen (21), pp. 65-74. Recuperado de <https://doi.org/10.21501/21454086.2930>

Raymond, A., Tipton, J., Kendall, A., y DeJong, J. (2020). *Review of impact categories and environmental indicators for life cycle assessment of geotechnical systems*. Journal of Industrial Ecology, 24(3), 485–499. Recuperado de <https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.1111/jiec.12946>

Robayo, R., Matthey, P., Silv, Y., Burgo, D., y Delvasto, S. (2015). *Los residuos de la construcción y demolición en la ciudad de Cali: un análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento*. Tecnura. Volumen 19(44), pp 157–170. Recuperado de <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a12>

Rondón, E., Szantó, M., Pacheco, J., Contreras, E., Gálvez, A. (2016). *Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios*. Manuales de la CEPAL. Recuperado de <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/40407>

Sánchez, L. (2019). *Análisis de residuos de construcción y demolición para su reutilización como materia prima de agregados de construcción, Lima – 2018*. [tesis de pregrado]. Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería Civil. Recuperado de <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/37894>

Soares, K. (2016). *Material flow analysis and environmental impact assessment of the construction sector in Brazil*. Tesis doctoral. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Federal Fluminense. Recuperado de <http://hdl.handle.net/10803/454715>

Sone D. (2018). *Ideología política, valores y creencias hacia el medio ambiente en una muestra de Lima Metropolitana*. [tesis de pregrado]. Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ingeniería Civil. Recuperado de <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/13036>

Song, X., Carlsson C., Kiilsgaard R., Bendz D. y Kennedy H. (2020). *Life Cycle Assessment of Geotechnical Works in Building Construction: A Review and Recommendations*. Sustainability. Volumen 12(20): 8442. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/su12208442>

Suárez S., Molina J., Mahecha L., Calderón L. (2018) *Diagnóstico y propuestas para la gestión de los residuos de construcción y demolición en la ciudad de Ibagué (Colombia)*. Gestión y Ambiente, 21(1), 9–21. Recuperado de <https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.15446/ga.v21n1.69637>

Suárez, S., Betancourt, C., Molina, J., Mahecha, L. (2019). *La gestión de los residuos de construcción y demolición en Villavicencio: estado actual, barreras e instrumentos de gestión*.

Revista Entramado, 15(1), 224–244. Recuperado de <https://doi-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/10.18041/1900-3803/entramado.1.5408>

Valdivia, S. (2009). *Instrumentos de gestión ambiental para el sector construcción*. Lima. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú. 2da Edición. Recuperado de <https://repositorio.pucp.edu.pe/index/handle/123456789/181711>

Verán, D. y Vasquez, I. (2017). *Proyecto IKI-PNUMA Avanzando y midiendo consumo y producción sostenible para una economía baja en carbono en economías de ingresos medios y nuevos países industrializados en Perú. Actividad 8: Centrales Hidroeléctricas*. Grupo PELCAN. Pontificia Universidad Católica Del Perú. Departamento de Ingeniería. Recuperado de <https://red.pucp.edu.pe/cicludevida/wp-content/uploads/2018/06/Documento-final-de-Centrales-Hidroel%C3%A9ctricas.pdf>

Villoria, P., Del Río, M. y Porras, C. (2012). *Estimation of construction and demolition waste volume generation in new residential buildings in Spain*. Waste Management & Research. Volumen 30 (2). pp 137-46. Recuperado de <https://doi.org/10.1177/0734242X11423955>

Villoria, P., Del Río, M. (2014). *Sistema de gestión de residuos de construcción y demolición en obras de edificación residencial: Buenas prácticas en la ejecución de obra*. [Tesis de Doctorado]. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de <http://oa.upm.es/32681/>

Wala I. (2018). *Midpoint and endpoint impact categories in Green building rating systems*. Journal of Cleaner Production. Volume 182, Pages 783-793. ISSN 0959-6526. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.217>

Zabalza I., Aranda A. y Scarpellini S. (2009). *Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification*.

Building and Environment. Volumen 44(12), pp 2510-2520, ISSN 0360-1323. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.001>

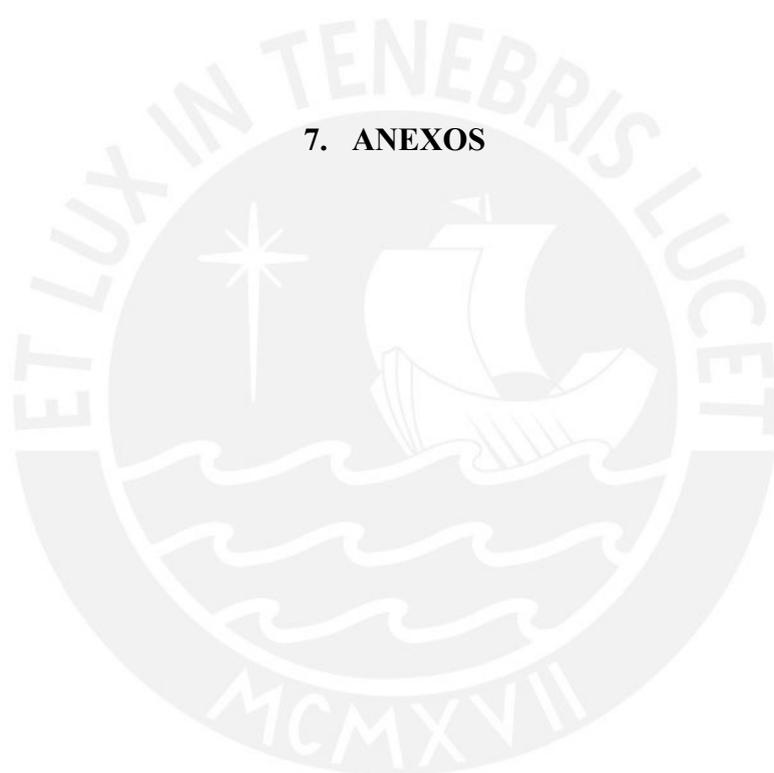
Zanni, S., Simionb, I., Gavrilesclub, M., Bonolia, A. (2018). *Life Cycle Assessment Applied to Circular Designed Construction Materials*. Procedia CIRP. Volumen 69, pp. 154-159, ISSN 2212-8271. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.040>

Zhang, C., Hu, M., Dong, L., Xiang, P., Zhang, Q., Wu, J., Li, B., Shi, S. (2018). *Co-benefits of urban concrete recycling on the mitigation of greenhouse gas emissions and land use change: A case in Chongqing metropolis, China*. Journal of Cleaner Production. Volumen 201, pp. 481-498, ISSN 0959-6526. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.238>

Zhang C., Hu M., Dong L., Gebremariam A., Miranda-Xicotencatl B., Di Maio F., Tukker A. (2019). *Eco-efficiency assessment of technological innovations in high-grade concrete recycling*. Resources, Conservation and Recycling, Volume 149, pp. 649-663, ISSN 0921-3449. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.06.023>

Ziegler, K., Vasquez I., Kahhat R. y Margallo M. (2019). *Proyecto IKI-PNUMA - Avanzando y midiendo consumo y producción sostenible para una economía baja en carbono en economías de ingresos medios y nuevos países industrializados en Perú. Actividad 9: Rellenos Sanitarios*. Red Peruana Ciclo de Vida. Departamento de Ingeniería. Pontificia Universidad Católica del Perú. Recuperado de [https://red.pucp.edu.pe/ciclodevida/wp-content/uploads/2020/05/documento\\_c.pdf](https://red.pucp.edu.pe/ciclodevida/wp-content/uploads/2020/05/documento_c.pdf)

**7. ANEXOS**



Anexo 1: Volumen dispuesto para cada distrito diferenciado por bimestre.

<i>Distrito</i>	<i>ATE</i>		<i>BARRANCO</i>		<i>BREÑA</i>		<i>CALLAO</i>		<i>CERCADO DE LIMA</i>		<i>CHORRILLOS</i>		
	<i>Bimestre</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Parcial</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Parcial</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Parcial</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Parcial</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Parcial</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Parcial</i>
2017-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2017-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2017-3	0	0	767	767	2705	2705	0	0	6814	6814	0	0	0
2017-4	0	0	6848	6081	11305	8600	1026	1026	9299	2485	16641	16641	16641
2017-5	0	0	6848	0	12321	1016	14388	13362	13190	3891	41597	24956	24956
2017-6	0	0	6848	0	17161	4840	14388	0	20667	7477	44107	2510	2510
2018-1	0	0	6848	0	17161	0	15315	927	32775.5	12108.5	44107	0	0
2018-2	0	0	6848	0	17161	0	16517	1202	54190.5	21415	44107	0	0
2018-3	0	0	11623	4775	17161	0	16517	0	58433.5	4243	54007	9900	9900
2018-4	0	0	16433	4810	24467	7306	17345	828	67053.5	8620	54007	0	0
2018-5	0	0	25326.12	8893.12	30974	6507	19455	2110	70116	3062.5	54007	0	0
2018-6	20	20	31866.12	6540	34124	3150	19455	0	71595	1479	69375	15368	15368
2019-1	20	0	35731.12	3865	34124	0	19455	0	122262.5	50667.5	69375	0	0
2019-2	20	0	41772.12	6041	34124	0	20363	908	129377.5	7115	69375	0	0
2019-3	20	0	47110.12	5338	38569	4445	20363	0	132122.5	2745	69855	480	480
2019-4	20	0	50515.12	3405	44883	6314	20363	0	135633.5	3511	69855	0	0
2019-5	20	0	54076.12	3561	48228	3345	20363	0	136703.5	1070	69855	0	0
2019-6	320	300	68545.12	14469	48228	0	20363	0	136703.5	0	69855	0	0
2020-1	678	358	82820.12	14275	48228	0	20363	0	136703.5	0	78910	9055	9055
2020-2	678	0	82820.12	0	48228	0	20363	0	136703.5	0	78910	0	0
2020-3	678	0	82820.12	0	48228	0	20363	0	136703.5	0	78910	0	0
2020-4	678	0	82820.12	0	48228	0	20363	0	136703.5	0	78910	0	0
2020-5	678	0	84095.12	1275	48228	0	20363	0	138911.5	2208	78910	0	0
2020-6	678	0	103879.12	19784	48428	200	20363	0	152142.5	13231	78910	0	0
2021-1	878	200	115717.12	11838	48428	0	20613	250	156618.5	4476	78910	0	0
<b>2021-2</b>	<b>878</b>	<b>0</b>	<b>131501.12</b>	<b>15784</b>	<b>48428</b>	<b>0</b>	<b>20613</b>	<b>0</b>	<b>163451.5</b>	<b>6833</b>	<b>83130</b>	<b>4220</b>	<b>4220</b>

<i>Distrito</i>	<i>COMAS</i>		<i>INDEPENDENCIA</i>		<i>JESÚS MARÍA</i>		<i>LA MOLINA</i>		<i>LA VICTORIA</i>		<i>LINCE</i>		
	<i>Bimestre</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Parcial</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Parcial</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Parcial</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Parcial</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Parcial</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Parcial</i>
2017-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2017-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2017-3	0	0	0	0	49332	49332	0	0	0	0	0	0	0
2017-4	0	0	0	0	53844	4512	0	0	0	0	2000	2000	
2017-5	0	0	0	0	56094	2250	0	0	0	0	10250	8250	
2017-6	0	0	0	0	58350	2256	0	0	0	0	10250	0	
2018-1	884	884	0	0	74517.16	16167.16	0	0	0	0	10560	310	
2018-2	2043	1159	0	0	84617.16	10100	2797	2797	5198	5198	34566	24006	
2018-3	2749	706	0	0	111862.16	27245	6638	3841	6963	1765	54661	20095	
2018-4	3502	753	0	0	141455.16	29593	8763	2125	15009.5	8046.5	65781	11120	
2018-5	5266	1764	0	0	151882.16	10427	8763	0	18519.5	3510	79374	13593	
2018-6	6802	1536	0	0	157107.16	5225	8763	0	37529.5	19010	87056	7682	
2019-1	6802	0	0	0	167382.16	10275	9453	690	46979.5	9450	103096.6	16040.6	
2019-2	8002	1200	0	0	183775.16	16393	9453	0	50479.5	3500	108159.6	5063	
2019-3	8002	0	0	0	194537.16	10762	9453	0	50479.5	0	118895.6	10736	
2019-4	8002	0	275	275	212535.16	17998	9453	0	50479.5	0	121961.6	3066	
2019-5	8002	0	1272	997	216764.66	4229.5	9453	0	50719.5	240	127666.6	5705	
2019-6	10192	2190	1272	0	226681.16	9916.5	9453	0	56719.5	6000	138844.6	11178	
2020-1	10453	261	1272	0	242793.16	16112	9543	90	74869.5	18150	144244.6	5400	
2020-2	10453	0	1272	0	245905.16	3112	9943	400	74869.5	0	144244.6	0	
2020-3	10453	0	1272	0	245905.16	0	9943	0	74869.5	0	144244.6	0	
2020-4	10453	0	1272	0	245905.16	0	9943	0	74869.5	0	144244.6	0	
2020-5	20533	10080	1272	0	271353.16	25448	9943	0	74869.5	0	144244.6	0	
2020-6	20533	0	1272	0	307959.16	36606	9943	0	83209.5	8340	151444.6	7200	
2021-1	20533	0	1272	0	321907.16	13948	9943	0	83209.5	0	155369.6	3925	
<b>2021-2</b>	<b>20533</b>	<b>0</b>	<b>1272</b>	<b>0</b>	<b>326433.16</b>	<b>4526</b>	<b>9943</b>	<b>0</b>	<b>85571.5</b>	<b>2362</b>	<b>159918.6</b>	<b>4549</b>	

<i>Distrito</i>	<i>LURIGANCHO</i>		<i>LURIN</i>		<i>MAGDALENA DEL MAR</i>		<i>MIRAFLORES</i>		<i>PUEBLO LIBRE</i>		<i>PUENTE PIEDRA</i>	
	<i>Bimestre</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Parcial</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Parcial</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Parcial</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Parcial</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Parcial</i>	<i>Acumulado</i>
2017-1	0	0	0	0	0	0	5916	5916	0	0	0	0
2017-2	0	0	0	0	0	0	18408	12492	0	0	0	0
2017-3	0	0	0	0	0	0	31712	13304	2133	2133	0	0
2017-4	0	0	0	0	15827	15827	77700	45988	7312	5179	0	0
2017-5	0	0	0	0	15953	126	84506	6806	9044	1732	0	0
2017-6	0	0	0	0	32554	16601	134464	49958	10424	1380	0	0
2018-1	0	0	0	0	46939	14385	169172	34708	17032	6608	0	0
2018-2	0	0	0	0	53949	7010	234370	65198	18332	1300	2144	2144
2018-3	0	0	0	0	57809	3860	286764	52394	19568	1236	2144	0
2018-4	200	200	0	0	57809	0	322389.56	35625.56	19568	0	2144	0
2018-5	200	0	0	0	71914	14105	378848.56	56459	29977	10409	2144	0
2018-6	200	0	0	0	71914	0	439045.56	60197	39751	9774	2144	0
2019-1	200	0	0	0	77593	5679	507319.56	68274	43293	3542	2144	0
2019-2	200	0	0	0	99161	21568	569656.06	62336.5	46869	3576	2144	0
2019-3	200	0	1234	1234	101839	2678	642087.06	72431	54819	7950	2144	0
2019-4	200	0	3018	1784	103639	1800	665638.06	23551	54819	0	2144	0
2019-5	200	0	3018	0	109139	5500	742786.26	77148.2	65168	10349	2144	0
2019-6	200	0	3018	0	114594	5455	769206.4	26420.14	67395	2227	2144	0
2020-1	200	0	3018	0	122392	7798	819475.4	50269	75707	8312	2144	0
2020-2	200	0	3018	0	122392	0	819475.4	0	77234	1527	2144	0
2020-3	200	0	3018	0	122392	0	819475.4	0	77234	0	2144	0
2020-4	200	0	3018	0	122392	0	819475.4	0	77234	0	2144	0
2020-5	200	0	3018	0	122392	0	877674.4	58199	98508	21274	2144	0
2020-6	200	0	3018	0	139008	16616	963860.4	86186	127559	29051	2144	0
2021-1	200	0	3018	0	159114	20106	1036123.4	72263	141530	13971	2144	0
<b>2021-2</b>	<b>200</b>	<b>0</b>	<b>3018</b>	<b>0</b>	<b>172299</b>	<b>13185</b>	<b>1063280.4</b>	<b>27157</b>	<b>145398</b>	<b>3868</b>	<b>2144</b>	<b>0</b>

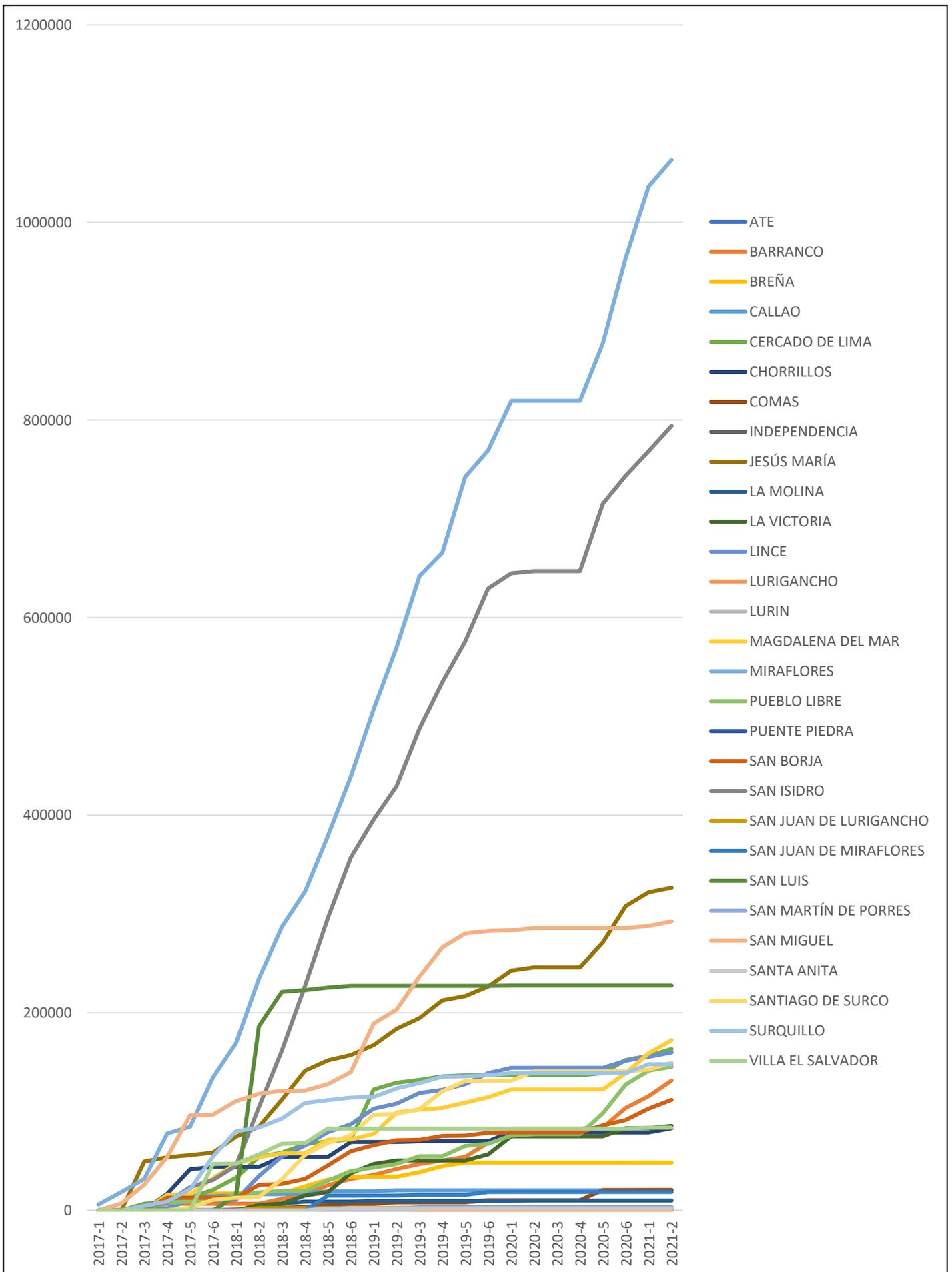
<i>Distrito</i>	<i>SAN BORJA</i>		<i>SAN ISIDRO</i>		<i>SAN JUAN DE LURIGANCHO</i>		<i>SAN JUAN DE MIRAFLORES</i>		<i>SAN LUIS</i>		<i>SAN MARTÍN DE PORRES</i>		
	<i>Bimestre</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Parcial</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Parcial</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Parcial</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Parcial</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Parcial</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Parcial</i>
2017-1		54	54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2017-2		54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2017-3		54	0	3686	3686	0	0	0	0	0	0	0	0
2017-4		12796	12742	7849	4163	0	0	0	0	0	0	0	0
2017-5		12796	0	23735	15886	0	0	0	0	0	0	0	0
2017-6		12796	0	30610	6875	0	0	0	0	0	0	0	0
2018-1		12832	36	45298.5	14688.5	0	0	0	0	14078	14078	0	0
2018-2		25730.24	12898.24	104327.6	59029.1	2280	2280	0	0	186359.5	172281.5	0	0
2018-3		26860.24	1130	161470.1	57142.5	2280	0	0	0	221371.5	35012	0	0
2018-4		31913.24	5053	227195.79	65725.69	2280	0	0	0	222858.5	1487	0	0
2018-5		45565.24	13652	296143.37	68947.58	2280	0	15012	15012	225397.59	2539.09	1764	1764
2018-6		59737.24	14172	357201.37	61058	2280	0	15012	0	227488.59	2091	1764	0
2019-1		66148.24	6411	395453.18	38251.81	2280	0	15012	0	227488.59	0	1764	0
2019-2		70882.24	4734	429312.28	33859.1	2280	0	15012	0	227488.59	0	1764	0
2019-3		71499.74	617.5	487417.28	58105	2280	0	15630.5	618.5	227488.59	0	3364	1600
2019-4		75207.74	3708	534545.28	47128	2280	0	15630.5	0	227488.59	0	3364	0
2019-5		75687.74	480	576042.28	41497	2280	0	15630.5	0	227488.59	0	3364	0
2019-6		78412.74	2725	629606.28	53564	2280	0	18572	2941.5	227488.59	0	3364	0
2020-1		78928.74	516	644960.28	15354	2280	0	18572	0	227621.59	133	3364	0
2020-2		78948.74	20	646878.28	1918	2280	0	18572	0	227621.59	0	3364	0
2020-3		78948.74	0	646878.28	0	2280	0	18572	0	227621.59	0	3364	0
2020-4		78948.74	0	646878.28	0	2280	0	18572	0	227621.59	0	3364	0
2020-5		86048.74	7100	715210.28	68332	2280	0	18572	0	227621.59	0	3364	0
2020-6		91548.74	5500	743779.28	28569	2280	0	18572	0	227621.59	0	3364	0
2021-1		103040.74	11492	768394.28	24615	2280	0	18572	0	227621.59	0	3364	0
<b>2021-2</b>		<b>111914.74</b>	<b>8874</b>	<b>794220.28</b>	<b>25826</b>	<b>2280</b>	<b>0</b>	<b>18572</b>	<b>0</b>	<b>227621.59</b>	<b>0</b>	<b>3364</b>	<b>0</b>

<i>Distrito</i>	<i>SAN MIGUEL</i>		<i>SANTA ANITA</i>		<i>SANTIAGO DE SURCO</i>		<i>SURQUILLO</i>		<i>VILLA EL SALVADOR</i>		<i>LIMA</i>	
<b>Bimestre</b>	<b>Acumulado</b>	<b>Parcial</b>	<b>Acumulado</b>	<b>Parcial</b>	<b>Acumulado</b>	<b>Parcial</b>	<b>Acumulado</b>	<b>Parcial</b>	<b>Acumulado</b>	<b>Parcial</b>	<b>Acumulado</b>	<b>Parcial</b>
2017-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5970	5970
2017-2	6900	6900	0	0	0	0	0	0	0	0	25362	19392
2017-3	26182	19282	0	0	0	0	4564	4564	0	0	127949	102587
2017-4	54078	27896	0	0	0	0	9030	4466	0	0	285555	157606
2017-5	96002.51	41924.51	0	0	2810	2810	21331	12301	0	0	420865.51	135310.51
2017-6	96769.51	767	0	0	10747	7937	54325.5	32994.5	47050	47050	601511.01	180645.5
2018-1	110570.51	13801	0	0	12747	2000	79923	25597.5	47470	420	758229.67	156718.66
2018-2	117987.51	7417	0	0	13362	615	84025	4102	56607.59	9137.59	1167519.1	409289.43
2018-3	120901.51	2914	0	0	31571	18209	93025	9000	67402.99	10795.4	1431782	264262.9
2018-4	121241.51	340	0	0	56161	24590	108910	15885	68091.99	689	1654578.75	222796.75
2018-5	127672.51	6431	1926	1926	68061	11900	111463	2553	82818.99	14727	1924870.04	270291.29
2018-6	140133.51	12461	1926	0	76035	7974	114124	2661	82818.99	0	2155268.04	230398
2019-1	189330.51	49197	1926	0	97049	21014	115006	882	82818.99	0	2439506.95	284238.91
2019-2	203434.01	14103.5	1926	0	97440	391	123474.5	8468.5	82818.99	0	2628763.55	189256.6
2019-3	236774.01	33340	1926	0	102739	5299	128852.5	5378	82818.99	0	2852520.55	223757
2019-4	266144.01	29370	1926	0	120501	17762	135278.5	6426	82818.99	0	3018618.55	166098
2019-5	280270.01	14126	1926	0	131177	10676	135878.5	600	82818.99	0	3198142.25	179523.7
2019-6	282570.01	2300	1926	0	131424	247	136634.5	756	82818.99	0	3338831.39	140689.14
2020-1	283570.01	1000	1926	0	131568	144	138834.5	2200	82818.99	0	3488258.39	149427
2020-2	285527.01	1957	1926	0	140878	9310	138834.5	0	82818.99	0	3506502.39	18244
2020-3	285527.01	0	1926	0	140878	0	138834.5	0	82818.99	0	3506502.39	0
2020-4	285527.01	0	1926	0	140878	0	138834.5	0	82818.99	0	3506502.39	0
2020-5	285527.01	0	1926	0	140878	0	138834.5	0	82818.99	0	3700418.39	193916
2020-6	285527.01	0	1926	0	140878	0	138834.5	0	82818.99	0	3951701.39	251283
2021-1	287804.01	2277	1926	0	142534	1656	147984.5	9150	83818.99	1000	4142868.39	191167
<b>2021-2</b>	<b>292292.01</b>	<b>4488</b>	<b>1926</b>	<b>0</b>	<b>149634</b>	<b>7100</b>	<b>147984.5</b>	<b>0</b>	<b>83818.99</b>	<b>0</b>	<b>4271640.39</b>	<b>128772</b>

Anexo 2. Inventario obtenido de Ecoinvent para ingresar a SimaPro

<b>Proceso</b>	<b>Excavación</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Transporte</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Reutilización</b>	<b>Cantidad</b>
<i>Operaciones unitarias</i>	<i>Desbroce y Replanteos</i>		<i>Acarreo</i>		<i>Extendido y Compactado</i>	
	Minicargador (1 pieza)	3.33333E-05	Minicargador (1 pieza)	3.33333E-05	Motoniveladora (2 piezas)	3.03829E-07
	Diesel (lt)	0.06	Diesel (lt)	0.04	Diesel (lt)	0.12
	Yeso (Kg)	0.00672	Cargador Frontal ( 1 pieza)	2.66667E-05	Compactadora de plancha (2 piezas)	3.03829E-07
	Estacas (Kg)	0.0002	Diesel (lt)	0.11	Diesel (lt)	0.22
	Agua (lt)	0.0016	Agua (lt)	0.454545455	Agua (lt)	16
					Plástico (m)	0.00005
<i>Operaciones unitarias</i>	<i>Excavación Masiva</i>		<i>Transporte al Punto</i>		<i>Cribado y Chancado inicial</i>	
	Excavadora (2 piezas)	2.66667E-05	Recorrido de Volquete (tkm)	28.26	Zaranda (1 pieza)	2.01829E-06
	Diesel (lt)	0.07	Plástico (Kg)	0.145	Transportadora (1 pieza=12m)	2.01829E-06
	Retroexcavadora (1 pieza)	1.33333E-05			Trituradora (1 pieza)	2.01829E-06
	Diesel (lt)	0.12			Grupo Electrónico (1 pieza)	2.01829E-06
					Diesel (lt)	0.795
<i>Operaciones unitarias</i>	<i>Muros de contención</i>		<i>Transporte interno</i>		<i>Chancado de mayor a 4"</i>	
	Concreto (m3)	0.0186	Cargador Frontal (2 piezas)	2.82561E-06	Cinta Transportadora (m)	1.00915E-05
	Acero (Kg)	1.5368	Diesel (lt)	0.11	Trituradora (1 pieza)	1.00915E-05
	Madera de Encofrado (Kg)	2.8	Recorrido de Volquete (tkm)	1.8	Diesel (lt)	1.325

Anexo3. Evolución en el tiempo para el volumen generado por distrito.





Anexo 5. Resultados de ACV mediante ReCiPe.

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Categoría de impacto</b>	<b>Unidad</b>	<b>RESIDUOS DE EXCAVACIÓN</b>	<b>Proceso de Excavación</b>	<b>Proceso de Transporte</b>	<b>Proceso de Reutilización</b>
ACO	Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC11 eq	1.01E-05	3.97E-06	3.79E-06	2.37E-06
FP	Formación de material particulado	kg PM2.5 eq	0.0381	0.0196	0.013	0.0055
PA	Acidificación terrestre	kg SO2 eq	0.074	0.036	0.0274	0.0103
EAD	Eutrofización de agua dulce	kg P eq	0.0032	0.0034	0.0013	-0.0015
EM	Eutrofización marina	kg N eq	0.000407	0.000376	0.000131	-0.000100
ET	Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB	118.56	24.20	92.90	1.46
ETAD	Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DCB	0.767	0.538	0.247	-0.018
ETM	Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DCB	1.105	0.748	0.385	-0.028
THC	Toxicidad humana carcinógena	kg 1,4-DCB	12.005	8.990	3.080	-0.065
THNC	Toxicidad humana no carcinógena	kg 1,4-DCB	11.355	8.060	5.620	-2.325
AF	Agotamiento de fósiles	kg oil eq	6.874	2.820	2.990	1.064
AA	Agotamiento de agua	m <sup>3</sup>	-1.861	0.113	0.034	-2.008

<b>Categoría de impacto</b>	<b>Categoría de impacto</b>	<b>Unidad</b>	<b>RESIDUOS SIN REUTILIZADO</b>	<b>Proceso de Excavación</b>	<b>Proceso de Transporte</b>
ACO	Agotamiento de la capa de ozono	kg CFC11 eq	9.89E-06	3.97E-06	5.92E-06
FP	Formación de material particulado	kg PM2.5 eq	0.0382	0.0196	0.0186
PA	Acidificación terrestre	kg SO2 eq	0.077	0.036	0.041
EAD	Eutrofización de agua dulce	kg P eq	0.0050	0.0034	0.0016
EM	Eutrofización marina	kg N eq	0.000541	0.000376	0.000165
ET	Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB	209.21	24.20	185.01
ETAD	Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DCB	0.883	0.538	0.345
ETM	Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DCB	1.312	0.748	0.564
THC	Toxicidad humana carcinógena	kg 1,4-DCB	12.237	8.99	3.247
THNC	Toxicidad humana no carcinógena	kg 1,4-DCB	17.26	8.06	9.2
AF	Agotamiento de fósiles	kg oil eq	7.428	2.82	4.608
AA	Agotamiento de agua	m <sup>3</sup>	0.155	0.113	0.042

# Anexo 6. Mapa de rellenos sanitarios en Perú.

