



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN,
VINCULACIÓN Y POSGRADO

Tema:

“Sustentabilidad de un geo polímero diseñado con piedra pómez del Ecuador.”

Trabajo de titulación para optar al título de:

Máster en Ingeniería Civil con mención en Gestión de la Construcción

Autor:

Cinthia Mishel Maygalema Huilcarema

Tutor:

Ing. Marco Marcel Paredes Herrera, Mgs

Riobamba, Ecuador. 2024

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Cinthia Mishel Maygualema Huilcarema, con número único de identificación 060411910-7, declaro y acepto ser responsable de las ideas, doctrinas, resultados y lineamientos alternativos realizados en el presente trabajo de titulación denominado "Sustentabilidad de un geo polímero diseñado con piedra pómez del Ecuador" previo a la obtención del grado de Magister en Ingeniería Civil, mención en Gestión de la Construcción.

Declaro que mi trabajo investigativo pertenece al patrimonio de la Universidad Nacional de Chimborazo de conformidad con lo establecido en el artículo 20 literal j) de la Ley Orgánica de Educación LOES

Autorizo a la Universidad Nacional de Chimborazo, que pueda hacer uso del referido trabajo de titulación y a difundirlo

Riobamba, 02 de octubre de 2024

Ing. Cinthia Maygualema

CI 060411910-7

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, **Marco Marcel Paredes Herrera, Mgs.** catedrático adscrito a la Facultad de **Ingeniería**, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: **Sustentabilidad de un geo polímero diseñado con piedra pómez del Ecuador**, bajo la autoría de Cinthia Mishel Maygualema Huilcarema; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los **30** días del mes de **septiembre de 2024**



Marco Marcel Paredes Herrera, Mgs

C.I: 060378318-4



Dirección de
Posgrado
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN,
VINCULACIÓN Y POSGRADO



Riobamba, 13 de septiembre de 2024

ACTA DE SUPERACIÓN DE OBSERVACIONES

En calidad de miembro del Tribunal designado por la Comisión de Posgrado, CERTIFICO que una vez revisado el Proyecto de Investigación y/o desarrollo denominado "**Sustentabilidad de un geo polímero diseñado con piedra pómez del Ecuador.**", dentro de la línea de investigación de **Ingeniería, construcción, industria y producción, presentado por el maestrante Maygalema Huilcarema Cinthia Mishel**, portador de la CI. 0604119107, del programa de **Maestría en Ingeniería Civil con Mención en Gestión de la Construcción**, cumple al 100% con los parámetros establecidos por la Dirección de Posgrado de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Es todo lo que podemos certificar en honor a la verdad.

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:
**MARCO MARCEL
PAREDES HERRERA**

Ing. Marcel Paredes
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Dirección de
Posgrado
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN,
VINCULACIÓN Y POSGRADO



Riobamba, 13 de septiembre de 2024

ACTA DE SUPERACIÓN DE OBSERVACIONES

En calidad de miembro del Tribunal designado por la Comisión de Posgrado, CERTIFICO que una vez revisado el Proyecto de Investigación y/o desarrollo denominado "**Sustentabilidad de un geo polímero diseñado con piedra pómez del Ecuador**", dentro de la línea de investigación de **Ingeniería, construcción, industria y producción, presentado por la maestrante Maygualema Huilcarema Cinthia Mishel**, portador de la CI. 0604119107, del programa de **Maestría en Ingeniería Civil con mención en Gestión de la Construcción**, cumple al 100% con los parámetros establecidos por la Dirección de Posgrado de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Es todo lo que puedo certificar en honor a la verdad.

Atentamente,



Firmado digitalmente por:
TITO OSWALDO
CASTILLO CAMPOVERDE

Tito Oswaldo Castillo Campoverde

MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Dirección de
Posgrado
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN,
VINCULACIÓN Y POSGRADO



Riobamba, 13 de septiembre de 2024

ACTA DE SUPERACIÓN DE OBSERVACIONES

En calidad de miembro del Tribunal designado por la Comisión de Posgrado, CERTIFICO que una vez revisado el Proyecto de Investigación y/o desarrollo denominado "**Sustentabilidad de un geo polímero diseñado con piedra pómez del Ecuador.**", dentro de la línea de investigación de Arquitectura y Construcción **Desarrollo territorial-productivo y hábitat sustentable para mejorar la calidad de vida**, presentado por el maestrante **Maygalema Huilcarema Cinthia Mishel**, portador de la CI. 0604119107, del programa de **Maestría en Ingeniería Civil con Mención en Gestión de la Construcción**, cumple al 100% con los parámetros establecidos por la Dirección de Posgrado de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Es todo lo que podemos certificar en honor a la verdad.

Atentamente,



Ing. Cristian Marcillo
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO	CERTIFICADO DE CONTENIDO DE SIMILITUD		 SGC <small>SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO</small>	
	CÓDIGO:	VERSIÓN:		
	FECHA:			
	MACROPROCESO:	PROCESO:		
	SUBPROCESO:			

Riobamba, 30 de septiembre de 2024

CERTIFICADO

De mi consideración:

Yo **Marco Marcel Paredes Herrera**, certifico que **Cinthia Mishel Maygualema Huilcarema** con cédula de identidad No. **060411910-7** estudiante del programa de **Maestría en Ingeniería Civil con mención en Gestión de la Construcción, cohorte primera** presentó su trabajo de titulación bajo la modalidad de Proyecto de titulación con componente de investigación aplicada/desarrollo denominado: **Sustentabilidad de un geo polímero diseñado con piedra pómez del Ecuador**, el mismo que fue sometido al sistema de verificación de similitud de contenido TURNITIN identificando el 1% en el texto.

Es todo en cuanto puedo certificar en honor a la verdad.

Atentamente,



Ing. Marco Marcel Paredes Herrera Mgs.

CI: 060378318-4

Adj.-

- Resultado del análisis de similitud

DEDICATORIA

A ti, mi querido hijo, dedico este logro con todo mi amor y gratitud, eres mi mayor fuente de inspiración y motivación, por eso cada paso en este camino lo he dado pensando en tu futuro y en ser el mejor ejemplo para ti, tus sonrisas y abrazos me dieron la fuerza necesaria para seguir adelante, incluso en los momentos más difíciles. Esta tesis es una muestra de que, con esfuerzo y perseverancia, los sueños se pueden alcanzar, te amo.

¡Siempre recuerda que todo lo que hago es por ti y para ti!

AGRADECIMIENTO

Ser agradecida es uno de los valores inculcados por mis progenitores, por eso expreso mi profunda gratitud a Dios, quien me permite disfrutar de unos padres ejemplares, atreves de su esfuerzo dedicación y perseverancia, son un pilar fundamental en mi formación tanto personal como académica, proporcionándome las herramientas necesarias para enfrentarme a los desafíos presentes en este camino largo llamado vida y convertir todos mis obstáculos en peldaños para avanzar a mi objetivo.

¡Mami su fe en mí ha sido el motor que me permitió terminar mi meta!

Manifiesto mi agradecimiento a mi hermano, por su constante apoyo y presencia en cada etapa de mi vida, extendo también mi gratitud a mis abuelitos, a mi hogar y a mi familia, quienes siempre me brindaron su tiempo para escucharme y su respaldo incondicional, asimismo, expreso un sincero y eterno agradecimiento a los ingenieros involucrados en el desarrollo de esta investigación, cuya colaboración ha sido invaluable.

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR	
ACTA DE SUPERACIÓN DE OBSERVACIONES DEL TUTOR	
ACTA DE SUPERACIÓN DE OBSERVACIONES MIEMBROS DEL TRIBUNAL	
CERTIFICADO ANTIPLAGIO	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
RESUMEN	
ABSTRACT	
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.2.1. Objetivo General.....	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
CAPITULO II. ESTADO DEL ARTE	3
2.1. Geo polímeros.....	3
2.1.1 Definición y clasificación.....	3
2.1.2. Propiedades de los geopolímeros	4
2.1.3. Materias Primas en la Producción de Geopolímeros.....	4
2.1.4. Escorias Industriales:.....	5
2.2. Fuentes de recursos minerales no metálicos en el Ecuador.	5

2.3.	Impacto ambiental de la extracción de pétreos.....	7
2.4.	Impacto Ambiental de los proyectos de construcción	8
2.5.	Impacto Ambiental de los geopolímeros.	8
2.6.	Fases del ciclo de vida de los materiales de construcción.....	9
2.7.	Evaluación de la huella de carbono en la construcción	10
2.8.	Metodología de evaluación de huella de carbono en edificaciones.....	11
2.9.	Normativa para la evaluación de huella de carbono en edificaciones	11
2.10.	Sustentabilidad en la Construcción.....	12
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....		13
3.1.	Tipo de Investigación.....	13
3.1.1.	Investigación Cuantitativa.....	13
3.1.2.	Investigación Cualitativa.....	14
3.1.3.	Metodología Específica del Análisis del Ciclo de Vida.....	14
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		20
4.1.	Mina de análisis.....	20
4.2.	Extracción del material.....	20
4.3.	Análisis de Logística y Accesibilidad:.....	22
4.4.	Transporte de materiales.....	22
4.5.	Evaluación de la Calidad del Material.....	22
4.6.	Proceso de producción.....	23
4.7.	Transporte del producto final a bodega	26
4.8.	Valoración de Impactos Ambientales	26
4.9.	Método Delphi.....	29

4.10. Discusión.....	31
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	33
5.1. Conclusiones.....	33
5.2. Recomendaciones	34
BIBLIOGRAFÍA.....	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Ocurrencias de Minerales No Metálicos.....	6
Figura 2. Categorías de Impactos ambientales en la construcción.....	8
Figura 3. Ciclo de vida de los materiales de construcción	10
Figura 4. Fases de la Investigación Cuantitativa.....	14
Figura 5. Análisis del Ciclo de Vida.....	15
Figura 6. Ubicación de la Mina Profuturo	20
Figura 7. Proceso de Explotación de la Mina.....	21
Figura 8. Proceso de elaboración del Geo polímero.	24
Tabla 8. Matriz de Leopold del Cemento Portland.	28
Figura 9. Criterio de Expertos.....	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Minas de Piedra Pómez	16
Tabla 2. Calificación de la Matriz de Leopold	18
Tabla 3. Emisión de CO ₂ en la extracción y transporte de la Piedra Pómez.....	22
Tabla 4. Dosificación de geo polímero a base de Piedra Pómez.....	25
Tabla 5. Emisión de CO ₂ en la producción del geo polímero a base de Piedra Pómez	26
Tabla 6. Distancia promedio a las distribuidoras.	26
Tabla 7. Matriz de Leopold del Geopolímero a base de Piedra Pómez.....	27
Tabla 9. Resumen de Impactos (PP).....	29

RESUMEN

En el ámbito de la ingeniería civil, el hormigón es uno de los materiales más utilizados, pero con el avance de la tecnología, se han descubierto nuevos métodos de construcción que permiten el desarrollo e incorporación de materiales alternativos que mantienen las propiedades de resistencia necesarias, entre los más destacados se encuentran los geopolímeros, definidos como materiales sólidos conformados principalmente por aluminosilicatos y por activación de silicatos alcalinos, estos materiales han ganado popularidad en el campo de la investigación académica debido a la creciente demanda de materiales de construcción con menores emisiones de impacto ambiental durante su producción, además por sus características los geopolímeros representan una alternativa viable al cemento Portland, ofreciendo ventajas tanto en términos de sostenibilidad como de rendimiento.

Esta tesis presenta un estudio sobre la sostenibilidad de un geopolímero desarrollado a partir de piedra pómez extraída en Ecuador, el objetivo principal es evaluar la sostenibilidad de este geopolímero a través del análisis de su ciclo de vida, abarcando desde la extracción de la materia prima hasta la distribución del producto final, de esta manera, se busca determinar su viabilidad como alternativa ecológica en la construcción.

Se realizó una evaluación comparativa con el cemento Portland en términos impacto ambiental, utilizando la herramienta de análisis conocida como matriz de Leopold, los resultados indican que el geopolímero a base de piedra pómez no solo satisface los requisitos técnicos para su aplicación en la construcción, sino que también ofrece importantes ventajas en términos de sostenibilidad, el uso de piedra pómez contribuye a la reducción del consumo de recursos no renovables y disminuye significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero, en comparación con la producción tradicional de cemento.

La tesis concluye que el geopolímero desarrollado a partir de piedra pómez ecuatoriana representa una solución prometedora para fomentar prácticas de construcción más sostenibles, se sugiere llevar a cabo investigaciones adicionales para mejorar las propiedades del material y evaluar su viabilidad en proyectos de construcción de gran escala, con el fin de maximizar su potencial como alternativa ecológica en el sector.

Palabras clave: geo polímero, piedra pómez, sustentabilidad, impacto ambiental.

ABSTRACT

In civil engineering, concrete is one of the most widely used materials, but with the advancement of technology, new building methods have been discovered they allow the development and incorporation of alternative materials that maintain the necessary resistance properties. Among the most notable are geopolymers, defined as solid materials composed mainly of aluminosilicates and alkaline silicate activation. These materials have gained popularity in the field of academic research due to the growing demand for construction materials with lower emissions of environmental impact during their production. In addition, due to their characteristics, geopolymers represent a viable alternative to Portland cement, offering advantages in terms of both sustainability and performance. This thesis presents a study on the sustainability of a geopolymer developed from pumice stone extracted in Ecuador. The main objective is to evaluate the sustainability of this geopolymer through the analysis of its life cycle, covering from the extraction of the raw material to the final product distribution. In this way, it seeks to determine its viability as an ecological alternative in construction. A comparative evaluation with Portland cement in terms of environmental impact was carried out, using the analysis tool known as Leopold matrix. The results indicate that the pumice-based geopolymer not only meets the technical requirements for its application in construction, but also offers important advantages in terms of sustainability. The use of pumice contributes to the reduction of the consumption of non-renewable resources and significantly decreases greenhouse gas emissions, compared to traditional cement production. The thesis concludes that the geopolymer developed from Ecuadorian pumice represents a promising solution to promote more sustainable construction practices. It is suggested to carry out additional research to improve the properties of the material and evaluate its viability in large-scale construction projects, in order to maximize its potential as an ecological alternative in the sector.

Keywords: geopolymer, pumice stone, sustainability, environmental impact.



Reviewed by:
MsC. Edison Damian Escudero
C.C.0601890593

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

El hormigón es uno de los materiales más utilizados en la ingeniería civil debido a sus propiedades físico-mecánicas y su durabilidad en comparación con otros materiales, sin embargo, el aumento en su uso implica un incremento en el consumo de cemento, industria responsable de aproximadamente el 8% de las emisiones globales de CO₂ (Ulusu et al., 2016), además, los concretos fabricados con cemento Portland son particularmente vulnerables a la corrosión causada por ataques de cloruros y sulfatos, lo que puede comprometer su integridad estructural a largo plazo (Neville et al., 1995). La industria de la construcción es una de las principales responsables del impacto ambiental, generando graves consecuencias tanto para el entorno natural como para el ser humano, ante esta situación, es imperativo mitigar los problemas derivados de los estilos de vida modernos.

Según Alberto & Coraspe (2021), los geopolímeros presentan una resistencia a la compresión comparable e incluso superior a la de los concretos basados en cemento Portland, manteniendo características deseables como una baja temperatura de fraguado, mayor resistencia al fuego y una mayor tolerancia a los ataques de cloruros y sulfatos.

La presente investigación aborda la sostenibilidad de un geopolímero elaborado a partir de piedra pómez de Ecuador, con el objetivo principal de mejorar la calidad ambiental en el sector inmobiliario, en este contexto, surge la necesidad de analizar el ciclo de vida de la piedra pómez, a fin de identificar alternativas de construcción que reduzcan el consumo energético y de recursos, al tiempo que se generen ahorros tanto en la fase de construcción como en la de mantenimiento, además se pretende ofrecer opciones constructivas más amigables con el medio ambiente, una de las alternativas es evaluar la sustentabilidad del geopolímero a base de piedra pómez, considerando sus propiedades físicas y mecánicas, mediante una investigación de carácter descriptivo no experimental con el propósito de medir el grado de impacto ambiental de este material.

El objetivo principal de este documento es evaluar la sostenibilidad del geopolímero basado en piedra pómez mediante un análisis de ciclo de vida, que abarca desde la extracción del material predominante hasta su distribución, asimismo, se busca comprender el impacto ambiental de este geopolímero en comparación con el cemento Portland, para identificar alternativas más sostenibles dentro del sector de la construcción.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Márquez (2022) , menciona que los escombros y residuos de las construcciones representan cerca del 50% de los desechos en vertederos y rellenos sanitarios.

Una de las características fundamentales de la sostenibilidad es el respeto por el entorno y la capacidad de adaptación a sus condiciones, además de la eficiencia en el uso de recursos mediante materiales de bajo impacto ambiental y social a lo largo de su ciclo

de vida (Baño Nieva & Escalera del Pozo, 2005), dentro de la industria de la construcción el cemento portland es uno de los principales responsables de las emisiones de CO₂ (Davidovits, 1994), lo que ha impulsado la investigación de materiales alternativos y sostenibles que cumplan con los requisitos de calidad necesarios para su uso como material aglomerante por ello, es fundamental trabajar en la mitigación de los efectos del cambio climático sobre el medio ambiente con el objetivo de mejorar la calidad de vida, esta investigación se centra en ofrecer resultados concretos sobre las diferencias entre el uso de hormigón tradicional con el cemento Portland y la implementación de un geopolímero a base de piedra pómez (PP), con el fin de identificar opciones constructivas que, al modificar su composición química, puedan igualar las características de resistencia del hormigón convencional, al mismo tiempo que se contribuye a la reducción de las emisiones de CO₂ mediante proyectos de ahorro energético.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Determinar la sustentabilidad del geo polímero a base de piedra pómez mediante el análisis del ciclo de vida.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Definir el alcance del análisis del ciclo de vida
- Analizar la sustentabilidad del geo polímero al utilizar un activador alcalino mediante un inventario de ciclo de vida
- Determinar el impacto ambiental del geo polímero a base de piedra pómez en comparación con el cemento portland

CAPITULO II. ESTADO DEL ARTE

2.1. Geo polímeros

2.1.1 Definición y clasificación

Polímero

Los polímeros son macromoléculas compuestas por unidades químicas repetidas, llamadas monómeros, pueden ser naturales como el caucho y el algodón o artificiales, como el poliuretano y el poliéster, se clasifican según el tipo de monómeros, la forma en que se forman las cadenas poliméricas y los materiales que los conforman, como termoplásticos, elastómeros o termoestables, su diversidad de propiedades los hace ampliamente utilizados en una variedad de aplicaciones industriales y cotidianas (Billmeyer, 1975).

Los geo polímeros son macromoléculas inorgánicas compuestas y surgen como una opción innovadora para reemplazar al cemento en aplicaciones de construcción, estos materiales se caracterizan por su estructura microscópica amorfa, similar a la zeolita, y se forman a partir de una reacción química entre un material precursor que contiene óxido de aluminio y óxido de silicio, como la ceniza volante, el metacaolín o la puzolana, y una solución alcalina acuosa, la reacción se lleva a cabo en un proceso de curado en horno, produciendo un material con propiedades que rivalizan o superan al concreto convencional en términos de resistencia a la compresión y durabilidad (Salirrosas, 2020), el concepto se refiere a los polímeros inorgánicos que están compuestos principalmente por aluminosilicatos, materiales conocidos como polímeros minerales, cerámicas con enlaces alcalinos y hidrocerámicos (Lenis-Rodas et al., 2023).

Estructura

La estructura de un geo polímero se caracteriza por una red tridimensional de polímeros inorgánicos que se forman a partir de la reacción química entre un material precursor rico en óxido de aluminio y óxido de silicio, como la ceniza volante, el metacaolín o la puzolana y una solución acuosa alcalina, la red polimérica resultante está compuesta principalmente por cadenas de tetraedros de SiO_4 y AlO_4 , interconectadas por enlaces Si-O-Al, estructura molecular que confiere al geo polímero propiedades mecánicas y químicas únicas, como resistencia a la compresión, durabilidad frente a agentes degradantes y estabilidad térmica, las características del geo polímero pueden variar según los materiales precursores utilizados y las condiciones de síntesis (Pérez, 2020).

2.1.2. Propiedades de los geopolímeros

Las propiedades de los geopolímeros abarcan una amplia gama de características físicas, químicas y mecánicas, propiedades que varían en función de los materiales precursores empleados, las condiciones de síntesis y el proceso de curado, es posible destacar diversas propiedades, especialmente relevantes en el ámbito de la construcción, entre las cuales se incluyen las siguientes:

Resistencia mecánica: Los geopolímeros pueden exhibir una resistencia aceptable a la compresión de 9.41 MPa con el 3% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, con respecto al cemento portland, dichos valores fueron ensayados mediante la utilización de geopolímeros con zeolitas naturales para la elaboración de cementos alternativos, particularidad que los hace adecuados para aplicaciones estructurales (Ulloa & al, 2021).

Alta resistencia química y durabilidad: Presentan una alta resistencia frente a agentes degradantes como ácidos, sulfatos y otros factores ambientales, propiedades que les otorga una durabilidad a largo plazo. (Geopolymer Solutions, 2023).

Estabilidad térmica: El concreto mantiene la resistencia hasta los 300°C sin perder sus propiedades mecánicas, mientras ciertos geopolímeros pueden soportar altas temperaturas sin perder sus propiedades mecánicas, útiles en aplicaciones de alta temperatura (Calderón Peñafiel, 2019), los geopolímeros con cenizas volantes y puzolanas tiene estabilidad térmica con menos del 5% de pérdida de masa y menos de 20% de pérdida de resistencia sobre los 1000°C (Salirrosas, 2020).

Aislamiento termoacústico: Según la composición del geopolímero y la creación de paneles de aislamiento que permiten una baja conductividad del calor de 0,316 y 0,344 W/m.K -y el coeficiente de absorción acústica se evaluó en frecuencias de 500 Hz, 0,70 y 0,50 respectivamente, contribuyendo a crear ambientes más silenciosos y confortables en edificios y estructuras (Villaquirán et al., 2022).

2.1.3. Materias Primas en la Producción de Geopolímeros

Las materias primas juegan un papel crucial en la producción de geopolímeros, proporcionando los componentes necesarios para su formación y desarrollo de propiedades específicas, entre las materias primas más importantes se encuentran (Salirrosas, 2020) (Pérez, 2020):

2.1.4. Escorias Industriales:

Las escorias, subproductos de procesos industriales como la metalurgia, son ampliamente utilizadas en la producción de geopolímeros debido a su alto contenido de aluminosilicatos, incluyen escorias granuladas de alto horno, escorias de acero, escorias no ferrosas y escorias granuladas de fósforo, materiales que ofrecen una fuente rica en componentes esenciales para la formación de las estructuras de geopolímeros.

Paval y Humo de Sílice:

El paval también conocido como ceniza de cáscara de arroz y el humo de sílice son fuentes de sílice altamente purificadas utilizadas como precursores en la producción de geopolímeros, su alto contenido de sílice les confiere propiedades valiosas en la formación de redes poliméricas estables.

Ceniza Volante y Metacaolín:

La ceniza volante es un subproducto de la combustión de carbón en centrales térmicas y el metacaolín es un derivado de la caolinita, son ricos en aluminosilicatos esenciales para la formación de geopolímeros, estos materiales ofrecen una combinación única de propiedades físicas y químicas que los hacen adecuados para su uso en aplicaciones de construcción.

Arcillas Calcinadas:

Las arcillas calcinadas sometidas a altas temperaturas para eliminar impurezas y activar componentes clave, son una fuente valiosa de aluminosilicatos en la producción de geopolímeros, su composición química y estructura cristalina las hacen adecuadas para la formación de matrices poliméricas estables.

Residuos Industriales Tratados:

Los residuos industriales son tratados térmicamente como los desechos de fundición y los residuos de la producción de vidrio, pueden ser utilizados como materias primas en la producción de geopolímeros, ofrecen una alternativa sostenible para la gestión de residuos y la producción de materiales de construcción de alto rendimiento.

2.2. Fuentes de recursos minerales no metálicos en el Ecuador.

En Ecuador se encuentran diversos recursos minerales no metálicos, entre los que destacan la caliza, el mármol, las arcillas, el yeso, la piedra pómez, la baritina y la bentonita, es especialmente significativa la extracción de caliza y puzolana para la industria del cemento, siendo este sector el más relevante en la producción minera no metálica.

El IIGE (2019) proporciona un detallado mapa de Ocurrencias de Minerales No Metálicos en el Ecuador, dividido por provincias, destaca la región del Austro, que abarca las provincias de Cañar, Azuay, Loja y Morona Santiago, como una zona rica en recursos minerales no metálicos **Figura 1**, aquí se encuentran importantes yacimientos de arcillas, caolines y feldespatos, fundamentales en la fabricación de cemento, cerámica y otros productos industriales, además la provincia de Cotopaxi alberga el yacimiento más grande de piedra pómez del país, utilizado en la producción de bloques alivianados y otros materiales de construcción.

En todas las regiones del país, se hallan rocas industriales y materiales áridos, como andesitas, basaltos, granitos, pizarra, puzolanas, arenas y gravas, todos vitales para la industria de la construcción, en la zona subandina y región Oriental destacan yacimientos de minerales industriales, como la arena silíceo, asimismo se encuentran materias primas minerales para la producción de vidrio (cuarzo), cemento, cerámica y fertilizantes tipo abonos fosfatados (fósforo) y nitrogenados (Miranda Torres, 2021)(Uribe, 2015).

Figura 1. Mapa de Ocurrencias de Minerales No Metálicos



Nota: Adoptado de Mapa de Ocurrencias de Minerales No Metálicos, por Mapas Temáticos 1'1000.000, 2011,

https://drive.google.com/file/d/1htTEX0_tYWIKIRamP4vc7GvCqnHWhQux/view.

Piedra Pómez y Puzolanas

En el Valle Interandino del Ecuador se encuentran vastos depósitos de piedra pómez, pumitas y puzolanas, estas reservas se encuentran entre las diez más grandes del mundo, lo que resalta su importancia a nivel global, los depósitos se sitúan en las proximidades de chimeneas volcánicas ya extintas y se presentan en forma de largas colinas, está compuesta por una mezcla de material volcánico conglomerático y aglutinado

tobáceo no consolidado, con pedazos de piedra pómez de tamaños variables (entre 20 y 200 mm) y polvo volcánico.

La utilización de la piedra pómez en el país se destina principalmente a la elaboración artesanal de bloques livianos, siendo una parte considerable de la producción destinada a la exportación, los yacimientos más relevantes se localizan en las inmediaciones de la ciudad de Latacunga, donde forman características colinas, en los últimos tiempos se ha registrado un notable aumento en la producción de puzolanas en el Ecuador, lo que se refleja en la fabricación de cemento puzolánico en las instalaciones de las fábricas de cemento Chimborazo y Selva Alegre, así como en la elaboración de bloques livianos para la construcción de viviendas (Gallegos Peñarreta, 2015).

Las puzolanas, compuestas por polvo y cenizas volcánicas, tienen sus principales reservas en el Valle Interandino, especialmente en los alrededores de la ciudad de Latacunga. Tanto las puzolanas como la piedra pómez están intrínsecamente relacionadas con la actividad volcánica del periodo Plio-Pleistocénico en la región.

2.3. Impacto ambiental de la extracción de pétreos.

El impacto ambiental de la extracción de pétreos se manifiesta de diversas maneras afectando los diversos recursos ambientales, se identifican diversos impactos significativos en los medios biótico, abiótico, social y cultural, este proceso es un claro ejemplo de cómo es la extracción de la piedra pómez ya que no se tiene un registro del proceso de extracción, entre los impactos más relevantes se encuentran aquellos relacionados con el suelo, donde se observa una alteración en su conformación y erosión debido al retiro de la cobertura vegetal y extracción del suelo (Marine Resource, 2019), esto a su vez afecta el componente humano, generando un impacto paisajístico que deprecia el valor de la propiedad, asimismo, se registran impactos en la calidad del aire durante ciertas etapas del proceso minero, aunque se consideran menos notables. En cuanto al componente biótico, la fauna y flora se ven afectadas directa e indirectamente, provocando de forma alterada nuevas adaptaciones en las interacciones ecológicas, por otro lado, no se identificaron impactos significativos en el componente agua, aunque se advierte sobre la importancia de gestionar adecuadamente este recurso para evitar posibles problemas ambientales y sociales en el futuro (Jovinao et al., 2020).

La minería a cielo abierto también conlleva la emisión de contaminantes gaseosos, líquidos y sólidos, que pueden afectar el suelo y los recursos hídricos de la zona (Marine Resource, 2019), en nuestra región la extracción de pétreos sigue siendo realizada de manera artesanal y rudimentaria, sin incorporar las nuevas tecnologías de extracción que podrían proteger mejor el ecosistema, en lugar de adoptar métodos más tecnificados, las empresas mineras aún dependen en gran medida del esfuerzo físico de los trabajadores (Jovinao et al., 2020).

Marine Resource (2019), menciona que la minería a cielo abierto es menos costosa que una minería subterránea, por otro lado, dentro de la mina existe afectaciones al utilizar cianuro, mercurio y ácido sulfúrico para eliminar el estéril, a consecuencia se contaminan aguas subterráneas y el aire en forma de polvo tóxico, materia absorbida por animales y plantas.

2.4. Impacto Ambiental de los proyectos de construcción

El sector de la construcción, reconocido globalmente como una de las principales fuentes de contaminación ambiental, provoca impactos negativos directos e indirectos en el medio ambiente y en la comunidad.

Los impactos se dividen en tres categorías **Figura 2** : ecosistemas, recursos naturales e impacto social, los principales impactos ambientales identificados incluyen la generación de polvo, contaminación acústica, remoción de la vegetación y contaminación atmosférica, conjuntamente tanto los trabajadores como la población cercana a los sitios de construcción están expuestos a problemas de salud como enfermedades respiratorias, cáncer y trastornos del sueño debido al polvo y al ruido generado durante las actividades de construcción.

Los recursos naturales utilizados durante el proceso constructivo, como energía, suelo, materiales y agua, son consumidos en grandes cantidades, contribución significativamente a la degradación ambiental y a la emisión de gases de efecto invernadero, la ubicación de los proyectos de construcción en áreas altamente pobladas expone a las comunidades locales a efectos perjudiciales para su salud, como polvo, vibraciones y ruido (Mendoza Zapata et al., 2021).

Figura 2. Categorías de Impactos ambientales en la construcción

Ecosistemas	Recursos Naturales	Impacto Social
<ul style="list-style-type: none"> • Generación de polvo • Contaminación acústica • Remoción de la vegetación • Contaminación atmosférica 	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo elevado de energía, suelo, materiales y agua. • Emisión de gases de efecto invernadero. 	<ul style="list-style-type: none"> • Problemas de salud para los trabajadores y la comunidad local • Exposición al polvo, vibraciones y ruido.

2.5. Impacto Ambiental de los geopolímeros.

Según Martínez González (2022) los geopolímeros a más de ser útiles en otros materiales de construcción como la elaboración de cerámicos, cementos, moldes,

herramientas, también se producen con bajo costo y el impacto ambiental es bajo, particularidad importante para ser considerado como sustentable.

Al cotejar las emisiones producidas a lo largo del ciclo de vida de un hormigón de geopolímero respecto a las de un hormigón convencional, se pueden disminuir las emisiones de CO₂, por otro lado, satisface los requisitos técnicos, exponiendo propiedades superiores a las del hormigón convencional (Albornoz Muñoz, 2015).

(Ferrer Navarro, 2022), menciona que su período de producción disminuye las emisiones de CO₂ respecto a un 40% en comparación con el cemento portland, lo que le atribuye mejores beneficios en construcción y pudiendo competir con el cemento portland.

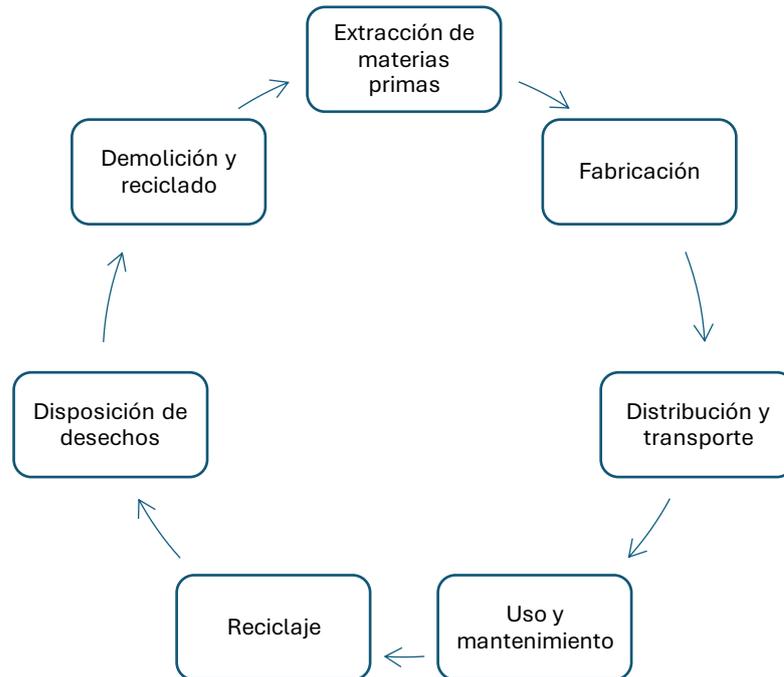
2.6. Fases del ciclo de vida de los materiales de construcción

La fabricación y uso de materiales de construcción tienen un impacto ambiental significativo, por otro lado, la extracción, procesamiento y producción de materias primas son etapas críticas que generan emisiones atmosféricas, vertidos líquidos, ruidos, vibraciones y un consumo excesivo de energía.

Las fases del ciclo de vida de los materiales de construcción se podrían indicar que son 7 **Figura 3**, descritas a continuación (Reto Kömmerling, 2021):

- **Extracción de materias primas:** Obtención de los recursos necesarios para la fabricación de materiales de construcción.
- **Fabricación:** Transformación de las materias primas en productos utilizables para la construcción, con un fuerte consumo de energía y recursos.
- **Distribución y transporte:** Traslado de los productos desde su lugar de fabricación hasta su destino final, con impacto en energía y recursos según el tipo de transporte.
- **Uso y mantenimiento:** Utilización de los materiales en la construcción y su mantenimiento durante su vida útil, con consideración de su durabilidad y necesidades de reparación.
- **Reciclaje:** Reutilización de los materiales al final de su vida útil cuando sea posible, para reducir la generación de residuos.
- **Disposición de desechos:** Manejo adecuado y eliminación de los residuos que no pueden ser reciclados para evitar impactos negativos en el entorno.
- **Demolición y reciclado:** Planificación y gestión de los residuos generados durante la demolición, con el objetivo de reciclar y reutilizar los materiales en nuevas construcciones o devolverlos al ciclo de producción.

Figura 3. Ciclo de vida de los materiales de construcción



Cada una de las siete etapas del ciclo de vida de los materiales de construcción mostrada en la **Figura 3** conlleva una serie de problemas medioambientales y un alto consumo energético a lo largo de la vida útil de una edificación.

2.7. Evaluación de la huella de carbono en la construcción

La industria de la construcción ejerce una influencia significativa en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), siendo responsable del 18% de las emisiones globales en el año 2010, emisiones tanto directas como indirectas, están estrechamente relacionadas con la producción y el uso de materiales de construcción, así como con el consumo energético a lo largo del ciclo de vida de los edificios, a nivel internacional varios países han investigado las emisiones vinculadas a la construcción, identificando áreas de mitigación que incluyen el uso de energía renovable, el mantenimiento adecuado de equipos y maquinaria, la optimización de operaciones y la reducción de materiales con una alta carga de carbono, la concienciación sobre la huella de carbono está en aumento, impulsando iniciativas tanto del sector privado como de la sociedad civil para medir y compensar estas emisiones, dado que la construcción consume aproximadamente el 30% de la energía y los recursos naturales, es crucial implementar estrategias efectivas de mitigación para abordar este desafío ambiental (Panceri, 2021).

2.8. Metodología de evaluación de huella de carbono en edificaciones

El análisis de las emisiones de carbono en la construcción se apoya en diversas metodologías que permiten una evaluación exhaustiva y precisa del impacto ambiental, una de ellas es el ciclo de vida (García et al., 2020):

- **Evaluación del Ciclo de Vida:** Esta metodología sigue un enfoque sistemático que abarca desde la extracción de materias primas hasta la disposición final del producto. La (Norma ISO 14044, 2006) establece un marco de cuatro etapas: definición del alcance, análisis de inventario, evaluación de impacto e interpretación, esta evaluación puede requerir una inversión significativa de tiempo y recursos.

2.9. Normativa para la evaluación de huella de carbono en edificaciones

Las normas de evaluación del ciclo de vida desempeñan un papel crucial en la medición y comunicación transparente de las emisiones de carbono asociadas con productos, actividades y procesos, se resume cuatro normas importantes en este ámbito:

- **PAS 2050:2008 Verificación de la Huella de Carbono:** Esta metodología, desarrollada por el Instituto Británico de Normas, se centra en evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel de producto, utiliza enfoques desde la cuna hasta la puerta y desde la cuna hasta la tumba para evaluar las emisiones a lo largo de la vida útil del producto. (PAS-2050, 2008)
- **Norma ISO/TS 14067:** Esta norma internacional proporciona principios, requisitos y pautas para la cuantificación y comunicación de las emisiones de carbono, diseñada para permitir una comunicación transparente y unificada de los resultados de GEI de productos, bienes y servicios, estableciendo métodos para evaluar la huella de carbono desde diferentes perspectivas, como desde la cuna hasta la tumba o desde la puerta hasta la puerta (ISO TS 14067, 2014).
- **Protocolo de Gases de Efecto Invernadero:** Desarrollado por el Instituto de Recursos Mundiales y el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible, este protocolo es ampliamente utilizado por líderes empresariales y gobiernos, se centra en la medición de las emisiones de tres alcances: directas, indirectas relacionadas con la energía y otras indirectas, por otra parte es una herramienta integral y estandarizada para medir las emisiones de una amplia gama de categorías incluidos los productos de construcción (Ranganathan et al., 2014).
- **Norma EN 15804 y 15978 Sostenibilidad en la construcción:** Estas normas europeas forman parte del esfuerzo europeo para armonizar varios protocolos. La norma UNE-EN 15804 (2012) proporciona una estructura de las Declaraciones de Producto Ambiental (EPD) para todos los productos de construcción, mientras que la norma (UNE-EN 15978, 2012) establece un marco para calcular y evaluar el desempeño ambiental de los edificios.

2.10. Sustentabilidad en la Construcción

Principios de Construcción Sostenible

Debido al impacto de los materiales y procesos constructivos que hay en la actualidad, se impulsa a buscar el concepto de la sostenibilidad de la construcción para abordar la protección de los recursos sin alterar el crecimiento y el desarrollo de nuestra sociedad, evitando la degradación de la economía, pero garantizando los recursos para futuras generaciones.

A través del enfoque de las definiciones que el tema aborda, se han dispuesto 3 principios importantes que se deben considerar al definir el “desarrollo sostenible” las mismas que son: medioambiental, social y económico, conceptos que profundiza de mejor manera con los objetivos específicos planteados por los países que forman parte de la ONU (Benavides & Molina, 2022)

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

La investigación analiza el ciclo de vida de un geo polímero a base de piedra pómez a partir de la extracción de la materia prima hasta la distribución del producto.

3.1. Tipo de Investigación

Este estudio adopta un enfoque mixto que combina métodos cuantitativos y cualitativos para abordar integralmente la sustentabilidad de un geo polímero elaborado con piedra pómez del Ecuador.

3.1.1. Investigación Cuantitativa

Para evaluar de manera cuantitativa y precisa el impacto ambiental del geo polímero, se utilizarán herramientas avanzadas como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), metodología que permitirá medir los efectos ambientales en cada etapa del ciclo de vida del geo polímero, además de proporcionar una visión integral de los impactos ambientales asociados, abarcando desde la obtención de materias primas hasta la disposición final del producto.

En este estudio, se adoptará una observación no participante, donde el investigador mantendrá una posición externa al proceso de fabricación del geo polímero, significa que no intervendrá directamente en la producción, sino que se dedicará a registrar y documentar detalladamente cada etapa y actividad involucrada en la elaboración del geo polímero, este enfoque garantizará una recolección de datos objetiva y precisa, fundamental para el análisis posterior, durante la fase de investigación cuantitativa, se seguirán diversas etapas propuestas, cada una de las cuales se detallará en un gráfico específico. Las fases representadas en la

Figura 4 incluirán la idea, del planteamiento del problema, revisión de literatura, desarrollo del diseño de investigación, recolección y análisis de datos hasta finalizar con el reporte de resultados.

Figura 4. Fases de la Investigación Cuantitativa



Nota: Adaptado del proceso de la investigación y sus fases, de K. Méndez Gómez, 2023, extraída de <https://view.genially.com/64f18d761227c400116d4f55/interactive-content-el-proceso-de-la-investigacion-y-sus-fases>.

3.1.2. Investigación Cualitativa

La investigación cualitativa se enfocará en analizar minuciosamente la calidad del geo polímero, considerando aspectos esenciales como su resistencia, durabilidad y comportamiento ambiental, este análisis se llevará a cabo mediante procesos éticos rigurosos, asegurando que el investigador cumpla con todas las normas y reglas científicas para obtener resultados válidos y precisos, reflejando la realidad de manera fidedigna.

El investigador deberá actuar con extremo cuidado en todas las etapas del proceso investigativo, apoyándose en un profundo conocimiento del tema y guiándose por sólidos principios y valores éticos.

Durante esta investigación, se examinarán las actividades involucradas en la elaboración del geo polímero, las industrias relacionadas, y los instrumentos utilizados para determinar características específicas, además se detallarán exhaustivamente los procesos implicados, aprovechando la experiencia y el conocimiento de las personas que participan en estos procedimientos (Enrique & Freire, 2020).

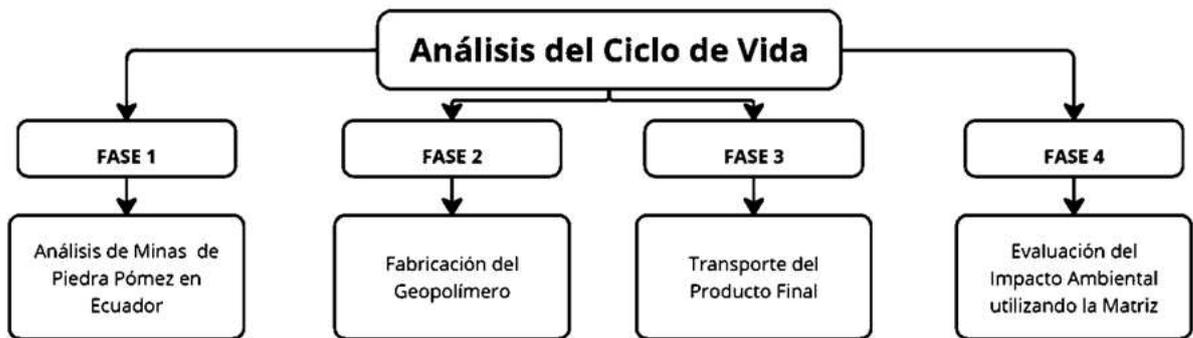
3.1.3. Metodología Específica del Análisis del Ciclo de Vida

La metodología de esta tesis se basa en el análisis del ciclo de vida (ACV) de un geo polímero a base de piedra pómez. para el estudio se propone una unidad de medida de

50 kg de geo polímero, lo cual permitirá determinar sus características y evaluar su sustentabilidad en comparación con el cemento Portland.

El ACV **Figura 5** considerará todas las etapas desde la extracción de la materia prima hasta la producción y salida del producto a la fábrica. Las etapas específicas del análisis incluirán:

Figura 5. Análisis del Ciclo de Vida.



Fase 1. Análisis de Minas de Piedra Pómez en Ecuador

Para la extracción y procesamiento de materias primas, se realizará un análisis exhaustivo del proceso de extracción y procesamiento de la piedra pómez en Ecuador, que incluye varias etapas importantes:

- **Identificación de Minas Potenciales:** Se comenzará con la identificación de todas las minas de piedra pómez operativas en el país, según Catastro Minero (2024) las minas de piedra pómez están en fase de exploración y explotación minera con solicitudes de concesión minera y minería artesanal, se encuentran inscritas bajo el régimen de pequeña minería.

Estas minas están ubicadas exclusivamente en los alrededores del volcán Cotopaxi, abarcando las provincias de Pichincha, Cotopaxi y Tungurahua **Tabla 1**.

Tabla 1. Minas de Piedra Pómez

Concesión	Titular	Fecha de insc	Plazo (meses)	Provincia	Cantón	Parroquia	Área
Victoria	Fuenlabrada C	24/7/2023	177	Cotopaxi	Latacunga	Latacunga	8
Santa Teresa	Carrera Luis Al	26/6/2003	277	Pichincha	Mejía	Aloasí	120
Zoila	Iler Zapata Zoil	31/3/2014	120	Pichincha	Mejía	Machachi	6
Daysi	Carrera Iler Da	9/9/2015	120	Pichincha	Mejía	Aloasí	6
Buena Vista	Galarza Tapia I	7/4/2016	120	Pichincha	Mejía	Machachi	21
Vásquez & Vás	Vasquez Vasqu	21/1/2016	300	Tungurahua	Ambato	Cunchibamba	25
Ariel	Enríquez Amor	21/1/2016	120	Cotopaxi	Latacunga	Mulaló	25
Cueva chiquita	Guanoluisa Mu	17/5/2016	180	Cotopaxi	Latacunga	Mulaló	16
Vásquez & Vás	Chimba Avila J	26/4/2016	300	Cotopaxi	Latacunga	11 de noviemb	13
La Churonita d	Camacho Muq	25/8/2016	180	Cotopaxi	Latacunga	Mulaló	6
Mikaela	Guanoluisa Mu	28/4/2017	300	Cotopaxi	Latacunga	Mulaló	65
Divino niño	Nacevilla Quin	28/4/2017	300	Cotopaxi	Latacunga	Mulaló	9
Vanesa	Guanoluisa Mu	25/5/2017	300	Cotopaxi	Latacunga	Mulaló	56
Buena vista	Vargas Mendoz	28/4/2017	300	Cotopaxi	Latacunga	San Juan de Pa	79
Chapas	Casa Toaquiza	25/5/2017	300	Cotopaxi	Latacunga	San Juan de Pa	114
Mathias	Changoluiza G	28/8/2017	120	Cotopaxi	Latacunga	San Juan de Pa	20
San francisco	Moya Llano Lui	11/9/2017	300	Cotopaxi	Latacunga	Mulaló	16
Cerón	Velásquez Quii	20/12/2017	300	Cotopaxi	Latacunga	San Juan de Pa	20
Milenio uno	Sociedad Civil	3/6/2022	120	Cotopaxi	Latacunga	Mulaló	76
Milenio tres	Sociedad Civil	2/6/2022	120	Cotopaxi	Latacunga	Mulaló	35

Nota: Adaptado de Virus Catastro Minero, por Gobierno Nacional, 2024, <https://hub.arcgis.com/datasets/cartoecuador::catastro-minero/explore?location=-0.908743%2C-78.638286%2C14.40>.

Para este estudio, se ha decidido que el material utilizado para la elaboración del geo polímero será extraído de la mina PROFUTURO, esta mina está conformada por varias concesiones entre ellas las de Fuenlabrada Cia. Ltda., ubicada en la provincia de Cotopaxi, en el sector San Rafael del cantón Latacunga, esta mina se encuentra a pocos kilómetros del centro de la ciudad y a una altitud de 2752 metros sobre el nivel del mar, la piedra pómez extraída de esta mina será el material principal utilizado en la formulación del geo polímero.

- Evaluación de la Calidad del Material: Mediante consulta bibliográfica y de laboratorio de determinará las propiedades físicas y químicas de la piedra pómez, como densidad, porosidad, composición mineral y estabilidad térmica.
- Transporte de materiales: Se evaluará la distancia entre la mina y la planta de procesamiento, considerando las emisiones y el consumo de combustible de la maquinaria de transporte y extracción utilizados.

Fase 2. Fabricación del Geopolímero

Esta fase abarca la producción del geo polímero, iniciando desde la dosificación de materias primas hasta el curado del material final. Cada materia prima o activador alcalino utilizado y cada reactor especializado ingresan en esta fase para el control del consumo energético y la gestión de residuos.

- **La Dosificación de Materias Primas:** Se iniciará con la medición precisa de las materias primas que incluye la piedra pómez extraída y otros componentes necesarios para la formulación del geo polímero.
- **Mezcla en Reactores Especializados:** Este paso implica la homogenización de los componentes para asegurar una distribución uniforme de los materiales en toda la masa del geo polímero.
- **Adición de Activadores Alcalinos:** Los activadores facilitan la reacción química que convierte las materias primas en un material sólido y duradero.
- **Curado del Material:** Una vez mezclado, el material se someterá a un proceso de curado, en donde se mantendrá bajo condiciones controladas de temperatura y humedad para permitir la formación y endurecimiento del geo polímero.
- **Consumo Energético y Gestión de Residuos:** Durante todo el proceso de producción, se monitoreará el consumo energético de las plantas de producción y se gestionarán los residuos generados durante la fabricación.

Fase 3. Transporte del producto Final

Las Emisiones y el Consumo de Combustible están asociados a los diversos medios de transporte utilizados para distribuir el producto final, la fase de análisis incluirá la medición de los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos, así como la cuantificación del combustible consumido durante el transporte.

En cada etapa específica se considerarán aspectos importantes como: emisiones de CO₂, consumo de energía, consumo de combustible, uso de recursos naturales, generación de residuos, posterior a este análisis se realizará una valoración exhaustiva de los impactos ambientales del geo polímero a base de piedra pómez, se empleará la Matriz de Leopold, seguida de una validación de resultados mediante la Metodología Delphi, el enfoque integral permitirá obtener una visión detallada y consensuada sobre la sustentabilidad del material.

Fase 4. Evaluación del Impacto Ambiental utilizando la Matriz de Leopold

En primer lugar, se utilizará la Matriz de Leopold para evaluar los impactos ambientales asociados con la extracción, producción, transporte y punto final del geo polímero, el proceso comenzará con la identificación de todas las actividades involucradas

en estas etapas y los componentes ambientales que podrían verse afectados, como el aire, agua, suelo, flora y fauna. La matriz bidimensional se construirá listando estas actividades en el eje horizontal y los componentes ambientales en el eje vertical, se evaluará tanto la magnitud del impacto (el grado de cambio en el componente ambiental) como su importancia (la significancia de dicho cambio), utilizando una escala predefinida, por ejemplo, de 1 a 10, las evaluaciones realizadas se documentarán en la matriz, proporcionando una visión estructurada de los impactos potenciales.

Posteriormente, se identificarán los impactos críticos, aquellos con las mayores puntuaciones combinadas de magnitud e importancia y se desarrollarán estrategias de mitigación para minimizar los efectos negativos, además de prevenir y minimización los riesgos ocasionados al ser humano.

El análisis de ciclo de vida (ACV) del geo polímero abarca todos los procesos necesarios para que el producto esté listo desde la extracción de materias primas hasta su llegada al punto de venta, incluye etapas como la minería de la piedra pómez, el procesamiento y producción del geo polímero, el transporte y la distribución, así como la disposición final en el punto de venta, la Matriz de Leopold se utilizará para cuantificar el impacto ambiental utilizando la

Tabla 2 en cada una de estas etapas, evaluando aspectos como emisiones de gases de efecto invernadero, consumo de energía, uso de agua, generación de residuos y efectos sobre la biodiversidad, la evaluación detallada permitirá identificar áreas críticas y tomar decisiones informadas para mejorar el proceso de fabricación, reduciendo su huella ecológica y promoviendo prácticas más sostenibles (Dellavedova, 2016).

Tabla 2. Calificación de la Matriz de Leopold

MAGNITUD			IMPORTANCIA		
Intensidad	Alteración	Calificación	Duración	Influencia	Calificaciór
Baja	Baja	-1	Temporal	Puntual	1
Baja	Media	-2	Media	Puntual	2
Baja	Alta	-3	Permanente	Puntual	3
Media	Baja	-4	Temporal	Local	4
Media	Media	-5	Media	Local	5
Media	Alta	-6	Permanente	Local	6
Alta	Baja	-7	Temporal	Regional	7
Alta	Media	-8	Media	Regional	8
Alta	Alta	-9	Permanente	Regional	9
Muy Alta	Alta	-10	Permanente	Nacional	10

Nota: Adaptado de Criterios de implementación ISO 14000:2015 Caso Estudio Sector Transporte por Carretera (p. 5), por A. Salgado Fuentes, J. Quintero Remolina, J. Leal Vera, UNAD

Fase 5. Validación de resultados mediante la metodología Delphi

Este proceso comenzará con la selección de expertos en el área, pudiendo ser los responsables de cada área, como los trabajadores o administradores mineros, trabajadores o ingenieros de la fábrica, transportistas o encargados de la logística entre otros, que asegurarán que todos los aspectos del análisis sean cubiertos y que los resultados sean válidos.

Se propondrá un cuestionario basado en los resultados preliminares de la Matriz de Leopold, mismo que se enviará a las personas seleccionadas, solicitando su opinión sobre cada proceso en mención, las respuestas se recopilarán de manera anónima y se analizarán para identificar puntos de consenso y divergencia.

La combinación de la Matriz de Leopold y la Metodología Delphi proporcionó una evaluación detallada y validada de los impactos ambientales del geo polímero a base de piedra pómez (Torres, 2024).

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El propósito principal de la investigación es determinar la sustentabilidad del geo polímero a base de piedra pómez mediante el análisis del ciclo de vida, a partir de la explotación de la materia prima hasta puntos de distribución del material ya consolidado.

3.2. Mina de análisis.

La elección de la mina PROFUTURO no es casual, ya que esta región es conocida por la alta calidad de su piedra pómez, la cual posee características ideales para su utilización en la producción de geo polímeros, además la proximidad de la mina al centro de Latacunga **Figura 6** facilita la logística y el transporte del material, reduciendo así los costos y el impacto ambiental asociado con el transporte.

Figura 6. Ubicación de la Mina Profuturo

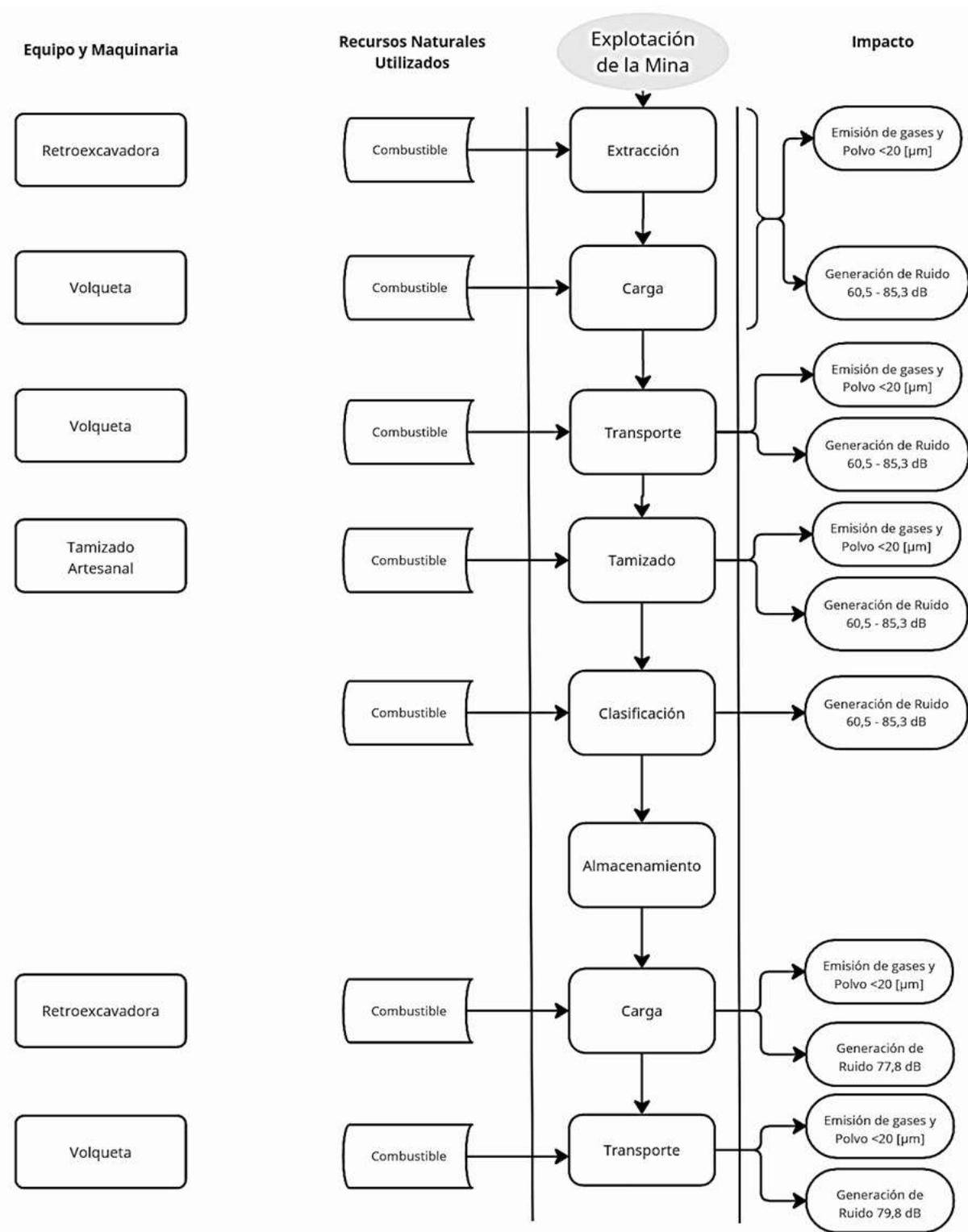


3.3. Extracción del material

En la **Figura 7** se muestra el proceso de extracción de la piedra pómez, procedimiento que inicia con la excavación directa mediante una retroexcavadora, seguida de la carga del material en volquetas con una capacidad de 8 m³ cada una, en donde transportan el material a una distancia de 100 metros, lugar en el que se clasifica a través de un tamiz artesanal. Posteriormente, en la fase de almacenamiento y transporte final, el material se apila y se carga nuevamente utilizando una retroexcavadora con una capacidad de 20 a 30 toneladas, finalmente, el material es transportado a las fábricas o puntos de venta mediante volquetas, durante el proceso se identifican los recursos utilizados, los impactos ambientales, así como el equipo, maquinaria, involucrados y los efectos generados, durante la extracción se observan emisiones de gases y polvo que pueden entrar en una suspensión de largo plazo las que se encuentran entre 20 – 70 μ (Núñez Caroca, 2018), así como una excesiva generación de ruido provocado por la maquinaria que se usa así está la volqueta con 79,8 dB (Huaquisto Cáceres & Chambilla Flores, 2021), además de evaluaciones en distintos puntos de una mina con una contaminación acústica entre 60,5 – 85,3 dB (Oleas Oleas, 2022), estos aspectos permiten identificar claramente los problemas

asociados con la extracción, facilitando la evaluación y mitigación de los impactos ambientales.

Figura 7. Proceso de Explotación de la Mina



3.4. Análisis de Logística y Accesibilidad:

El material extraído de la mina ubicada en Cotopaxi será transportado a Riobamba para su producción en una fábrica especializada, este proceso logístico ha sido analizado para asegurar su eficiencia y viabilidad.

La distancia entre el Área Minera Profuturo en la provincia de Cotopaxi y la ciudad de Riobamba es de 96 km, permite una conexión relativamente directa y accesible entre el sitio de extracción y la planta de procesamiento, optimizando tanto el tiempo como los costos de transporte.

3.5. Transporte de materiales

El transporte del material extraído de la mina en Cotopaxi a la ciudad de Riobamba involucra un análisis detallado del consumo de combustible y la emisión de CO₂, en el cálculo detallado por la **Tabla 3** nos demuestra el consumo de 6,67 galones para transportar 8 m³ de piedra pómez desde el Área Minera Profuturo a Riobamba y 0,312 galones durante la extracción, sumando un total de 6,982 galones, cada galón de combustible genera 10,14 kg de CO₂, lo que resulta en una emisión total de 70,79 kg de CO₂, resultados que demuestran la importancia de optimizar los procesos logísticos para minimizar el impacto ambiental asociado con el transporte y la extracción de materia prima.

Tabla 3. Emisión de CO₂ en la extracción y transporte de la Piedra Pómez

ZONA MINERA	COMBUSTUIBLE				
	Distancia a la ciudad de Riobamba (km)	Extracción del material (m3)	Consumo de galones	Emisión de CO ₂ por galón (kg)	Total de CO ₂ (kg)
Área Minera Profuturo	96	8	6,67 (transporte)	10,14	70,79
Provincia de Cotopaxi			0,312 (extracción)		

3.6. Evaluación de la Calidad del Material

Las propiedades físicas y químicas de la piedra pómez extraída del Área Minera Profuturo en la provincia de Cotopaxi, presenta las propiedades físicas de la cuales destaca una densidad seca de 2084.23 kg/m³, un porcentaje de absorción del 3.41%, una granulometría con un 99.76% de partículas de Ø 0.6mm, 38.9% de partículas de Ø0.297-0.15mm, y 24.78% de partículas de Ø0.075mm, en cuanto a las propiedades químicas, la piedra pómez contiene un 1.9% de cristobalita (SiO₂), 3.8% de anortita (CaAl₂Si₂O₉),

6.7% de albita ((Na,Ca)Al(Si,Al)3O8), 4.3% de silicato de aluminio y potasio (KAlSi4O6) (Andrade et al., 2022).

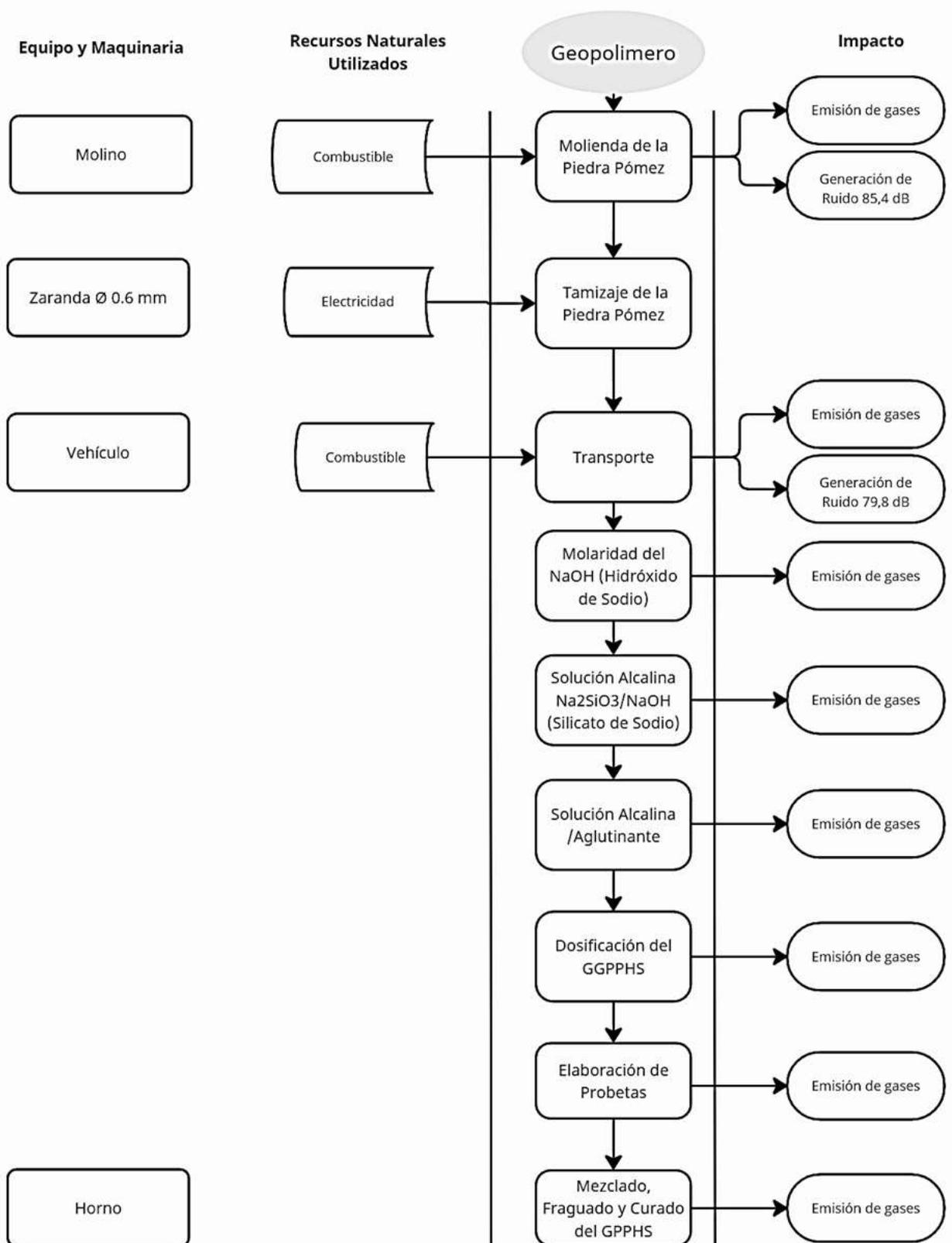
Cornejo (2017) menciona que la factibilidad para elaborar un geo polímero a base del PP de la cantera “Profuturo” ubicada de la provincia de Cotopaxi, proporciona la mejor resistencia a compresión, además de ser uno de los yacimientos más importantes del país.

3.7. Proceso de producción

El proceso de producción de la piedra pómez, detallado en la **Figura 8**, muestra los recursos utilizados, el impacto, el equipo y maquinaria en cada uno de los procesos.

La producción inicia con la molienda del material utilizando una trituradora con la que se puede producir hasta 50 toneladas por hora, para ello se utiliza 30 litro de combustible por hora (Gualán, 2011) generando 0,5676 kg de CO₂ por m³, seguida del tamizaje mediante una criba vibradora para obtener el tamaño de partículas deseadas, el material tamizado es transportado hasta la siguiente fase, en donde se prepara una solución alcalina que incluye hidróxido de sodio sustancia química distribuida por la empresa “Largo Rivera Herwin Roger – Novachem del Ecuador” ubicada en la ciudad de Quito y silicato de sodio sustancia química distribuida por la empresa “Relubquim” ubicada en la ciudad de Quito en una presentación de 30 kg (Castillo & Mieles, 2022), esencial para el proceso de geopolimerización, posteriormente se dosifica la mezcla y se elaboran las probetas, luego se lleva a un horno garantizando que las propiedades físicas y químicas del geo polímero sean óptimas para su aplicación final.

Figura 8. Proceso de elaboración del Geo polímero.



La **Tabla 4** detalla la dosificación del geo polímero a base de piedra pómez (Castillo & Mielles, 2022), especificando las proporciones de los componentes clave, para una concentración de NaOH de 8M y 12M, se mantiene una relación constante de Na₂SiO₃/NaOH de 2.5 y una proporción de solución alcalina/agente aglutinante de 0.35. la solución alcalina contiene 1.369 kg de Na₂SiO₃, 3.912 kg de NaOH y 0.978 kg de agua, dicha composición asegura una correcta activación de los componentes, el peso del agua en relación con el aglutinante es de 1.565 kg, manteniendo una proporción agua/aglutinante de 0.4, la dosificación planteada precisa garantizar la calidad y las propiedades mecánicas del geo polímero final, optimizando su rendimiento y durabilidad en aplicaciones constructivas, además de disminuir el impacto ambiental debido a los materiales que se utiliza.

Tabla 4. Dosificación de geo polímero a base de Piedra Pómez

Concentración de NaOH	Na ₂ SiO ₃ /NaOH	Solución Alcalina / Aglutinante	Solución Alcalina	Aglutinante (kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	NaOH (kg)	Agua /Aglutinante	Peso del Agua (kg)
8M	2.5	0,35	1,369	3,912	0,978	0,39	0,4	1,565
12M	2.5	0,35	1,369	3,912	0,978	0,39	0,4	1,565

Nota: Adoptado de Caracterización de un geopolímero a base de piedra pómez y humo de sílice como material precursor (p. 53), por J. Castillo Cevallos, M. Mielles Mariño, 2022, Repositorio UNACH

La **Tabla 5** presenta la emisión de CO₂ en la producción del geo polímero a base de piedra pómez, desglosando la contribución de cada compuesto utilizado, para el cálculo de CO₂ generado para 50 kg de geo polímero se utiliza la dosificación planteada en la **Tabla 4**, proporción del silicato de sodio (Na₂SiO₃) de 0,978 kg y representa el 18.519% del total del compuesto, además de genera una emisión de CO₂ de 9,417 kg, el hidróxido de sodio (NaOH), con una cantidad de 0,391 kg, constituye el 7.404% y contribuye con 2,776 kg de CO₂ por kg del compuesto, el agua (H₂O) aunque no contribuye directamente a las emisiones de CO₂, es utilizada en una cantidad de 1,565 kg y como material predominante es el aglutinante con un 74, 077 %, el cual refleja 14, 711 kg de contaminación, en total la producción del geo polímero emite 26,904 kg de CO₂, respuesta que recalca la importancia de considerar las emisiones de CO₂ en cada etapa del proceso de producción para desarrollar estrategias más sostenibles y minimizar el impacto ambiental del geo polímero.

Tabla 5. Emisión de CO₂ en la producción del geo polímero a base de Piedra Pómez

COMPUESTO	Cantidad en Kg	%	Emision en 1Kg	Kg	CO2 (Kg)
PP aglutinante	3,912	74,077	0,397	37,038	14,711
Na ₂ SiO ₃	0,978	18,519	1,017	9,260	9,417
NaOH	0,391	7,404	0,750	3,702	2,776
H ₂ O	1,565		0,000	14,817	0,000
					26,904

3.8. Transporte del producto final a bodega

El transporte del producto final del geo polímero a la bodega es un aspecto crucial para garantizar la eficiencia en la cadena de suministro y minimizar el impacto ambiental asociado con la distribución. Según la **Tabla 6**, la distancia promedio desde el lugar de elaboración del geo polímero hasta las distribuidoras es de 3,58 km, estas distancias que varían ligeramente entre cada ferretería, reflejan la proximidad y accesibilidad del producto final a los puntos de venta, optimizando la logística y mejorando la eficiencia operativa en la distribución del geo polímero, las distancias cortas no solo facilita un transporte más ágil y económico, sino que también reduce significativamente el consumo de combustible y las emisiones de CO₂, al mantener las distancias de transporte relativamente cortas, contribuye a una cadena de suministro más sostenible y se facilita una entrega oportuna del producto a los clientes.

Tabla 6. Distancia promedio a las distribuidoras.

FERRETERIAS	DISTANCIA (Km)
FERRIOCONSTRUC	2,5
RIOVIL	1,4
UNION CEMENTERA	3,5
SAN PEDRITO	6,8
INDICONS	3,8
PROMEDIO	3,6

3.9. Valoración de Impactos Ambientales

En el análisis de la Matriz de Leopold del Geo polímero de la piedra pómez que se muestra en la **Tabla 7**, se realizó una evaluación de magnitud e importancia de cada uno de los factores y acciones del geo polímero, la importancia de cada impacto se ha estimado en escala numérica de 1 a 10, la magnitud de cada acción sobre cada factor es de 1 a 10 y puede ser positiva (+) o negativa (-), para ello se ha considerado la relación entre el factor y la acción.

Tabla 7. Matriz de Leopold del Geopolímero a base de Piedra Pómez.

FACTORES \ ACCIONES			Extracción del Material				Producción			Transporte	AFECTACIÓN NEGATIVA	AFECTACIÓN POSITIVA	AGREGACIÓN DE IMPACTO			
			Ruido y Vibraciones	Transformación del terreno	Tala de Bosques	Transporte de materia prima	Molienda	Dosificación	Almacenamiento de productos	Transporte				Punto de venta		
Características Físicas y Químicas	Tierra	Forma del Terreno	-2 3	-8 9	-8 9								3	3	-150	
	Agua	Calidad del Agua Superficial			-3 3									1	1	-9
		Calidad del Agua Subterránea			-2 1									1	1	-2
	Atmósfera	Calidad del Aire	-2 5	-2 2	-6 5	-1 1	-2 1				-3 2			7	7	-55
		Ruido	-1 1		-1 1	-1 1	-2 2		-1 1		-1 1			7	7	-10
	Procesos	Erosión	-2 3	-2 2	-3 2									3	3	-16
		Estabilización de taludes	-2 1	-2 2	-3 3									3	3	-15
Consumo de Químicos y Combustible		-2 1			-1 1	-1 1	-2 3			-2 2	-2 2		6	6	-18	
Biológico	Flora			-1 1	-2 2								2	2	-5	
	Fauna			-2 1	-2 1								3	3	-8	
Factores Culturales	Uso de Tierra				-3 -4								2	0	12	
	Actividades Socioles	Calidad del Material						5					0	2	30	
		Manejo de residuos				-1 1								1	1	-1
AFECTACION NEGATIVA			7	6	11	3	3	1	1	3	3					
AFECTACION POSITIVA			0	0	0	0	0	1	0	0	0					
AGREGACION DE IMPACTOS			-31	-87	-124	-3	-7	24	-1	-11	-7					
											COMPROBACION					
													-247			
											-247		-247			

En el análisis de la Matriz de Leopold del Cemento Portland que se muestra en la **Tabla 8**, se realizó una evaluación de magnitud e importancia de cada uno de los factores y acciones del Cemento Portland, la importancia de cada impacto se ha estimado en escala numérica de 1 a 10, la magnitud de cada acción sobre cada factor es de 1 a 10 y puede ser positiva (+) o negativa (-), para ello se ha considerado la relación entre el factor y la acción.

Tabla 9. Resumen de Impactos (PP)

RESUMEN DE IMPACTOS DEL GEOPOLIMERO:			
IMPACTOS NEGATIVOS:	38	EQUIVALENTE AL:	97%
IMPACTOS POSITIVOS:	1	EQUIVALENTE AL:	3%
TOTAL DE IMPACTOS:	39	EQUIVALENTE AL:	100%
RESUMEN DE IMPACTOS DEL CEMENTO PORTLAND:			
IMPACTOS NEGATIVOS:	41	EQUIVALENTE AL:	98%
IMPACTOS POSITIVOS:	1	EQUIVALENTE AL:	2%
TOTAL DE IMPACTOS:	42	EQUIVALENTE AL:	100%

En el resumen de impactos **Tabla 9**, se muestran un impacto negativo de 41 en el cemento portland, mayor al impacto negativo del geo polímero a base de piedra pómez con estos resultados se expone la factibilidad de usar el geo polímero en lugar del cemento portland, se aclara que los impactos negativos al ambiente del geo polímero se dan porque se utilizan químicos y combustible, compuestos principales para la producción del geo polímero pero que en comparación con otro producto del mercado la afectación ambiental es menor.

Los resultados de los impactos positivos se dan ya que en la dosificación del material reemplaza ciertos productos de menor impacto ambiental y puede sustituir a cualquier otro del mercado teniendo una afectación ambiental menor a los demás, asimismo puede ser una alternativa para usarlo en la construcción.

3.10. Método Delphi

Para la determinación del impacto ambiental del geo polímero a base de piedra pómez en comparación con el cemento portland es necesario seguir los parámetros de la metodología Delphi, en donde se reunió a un panel de expertos, para esta tesis se conformó un grupo de dos docentes universitarios de la Universidad Técnica de Ambato, tres funcionarios del Gobierno Municipal de la ciudad de Ambato y dos ingenieros ambientales que trabajan sin relación de dependencia.

Mediante entrevistas personales se han obtenido valiosas observaciones sobre la comparación entre el cemento Portland y el geo polímero basado en piedra pómez, utilizando la metodología Delphi, se recolectaron y evaluaron las opiniones de un panel de siete expertos en términos de sostenibilidad e impacto ambiental de ambos materiales. Los resultados de las entrevistas son los siguientes:

Pregunta 1. ¿Cómo calificaría el nivel de ruido generado durante la producción del geo polímero en comparación con el cemento Portland?

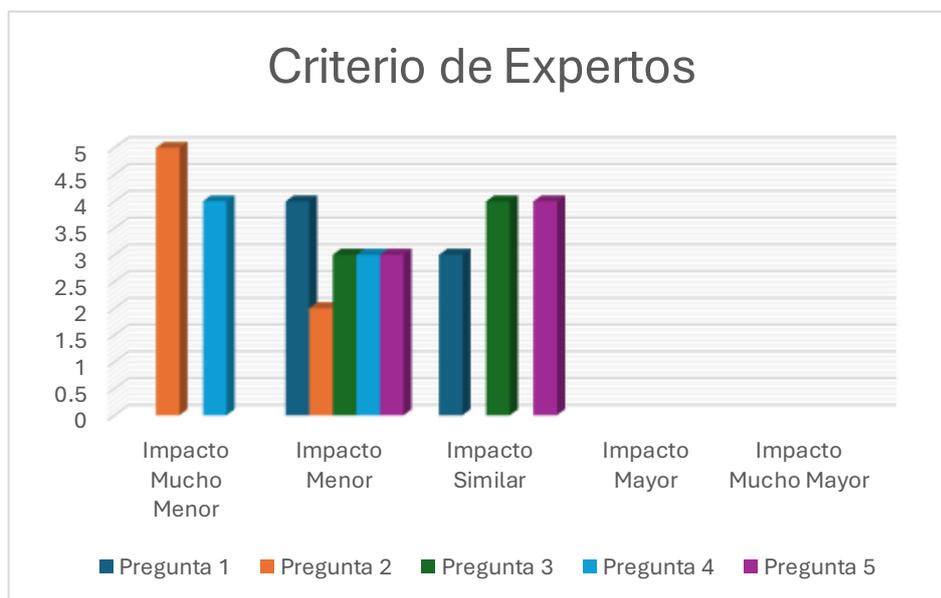
Pregunta 2. ¿Cómo calificaría la huella ecológica en la construcción mediante la adopción del geo polímero basado en piedra pómez en comparación con el cemento Portland?

Pregunta 3. ¿Cómo calificaría el nivel de contaminación del aire (polvo, gases) que se produce durante la fabricación del geo polímero en comparación con el cemento Portland?

Pregunta 4. ¿Cómo evalúa la sostenibilidad del geo polímero a base de piedra pómez en comparación con el cemento Portland?

Pregunta 5. ¿Cómo considera la generación de residuos en la producción del geo polímero en comparación con el cemento Portland?

Figura 9. Criterio de Expertos.



La opinión está dividida de acuerdo con los resultados obtenidos de la encuesta cuyos resultados se refleja en la **Figura 9**, pero la mayoría de los expertos considera que la generación de residuos es similar entre ambos materiales, aunque una parte significativa opina que el geo polímero genera menos residuos.

3.11. Discusión

La mina Profuturo fue seleccionada ya que las propiedades del material extraído de la mina proporciona la mejor resistencia a compresión (Cornejo, 2017), de acuerdo con la producción del geo polímero es una buena alternativa debido a sus componentes, razonamiento útil para la producción de un geo polímero pero que tiene desventajas al ser una mina a cielo abierto dado que se utiliza cianuro, mercurio y ácido sulfúrico para eliminar el estéril, debido a estas prácticas se contaminan aguas subterráneas y el aire en forma de polvo tóxico, polvo absorbido por animales y plantas, además de la erosión del suelo y la generación de un impacto sonoro que ahuyenta a los animales de la zona, lo que provoca un cambio en el hábitat de muchas especies (Marine Resource, 2019).

Los resultados obtenidos de la generación de CO_2 del geo polímero a base de piedra pómez en función de una dosificación ya planteada por Castillo & Mielles (2022), confirman que el material tiene el potencial para ser usado como precursor en geopolímeros, ya que la producción de CO_2 es de 26,904 kg en 50 kg de geo polímero a diferencia del cemento portland con una producción de 37,25 Kg de CO_2 en 50 kg (Ferrer Navarro, 2022), es una diferencia del 27,77% que en producciones altas va a representar un impacto positivo al medio ambiente.

La revolución de los geo polímeros dentro de la construcción es un tema que se empieza abordar dentro del Ecuador, por ende se encuentra poca información específica del geo polímero a base de piedra pómez, pero que requiere de más investigación para consolidarse como un material en el mercado, ya que lo que se sabe es que tiene ventajas de sostenibilidad como se puede evidenciar en las **Tabla 7** y **Tabla 8** en donde se puede observar que el impacto negativo del geo polímero es mejor al del cemento portland, además de constatar con el criterio compartido por Albornoz Muñoz (2015), mediante un análisis de huella de carbono menciona el gran potencial de los hormigones geo polímeros para un posible sustituto de hormigones con cemento portland.

Cómo se constata en nuestro estudio En el análisis de la Matriz de Leopold del Cemento Portland que se muestra en la **Tabla 8**, se realizó una evaluación de magnitud e importancia de cada uno de los factores y acciones del Cemento Portland, la importancia de cada impacto se ha estimado en escala numérica de 1 a 10, la magnitud de cada acción sobre cada factor es de 1 a 10 y puede ser positiva (+) o negativa (-), para ello se ha considerado la relación entre el factor y la acción.

Tabla 9 los impactos negativos del geo polímero son menos en comparación con los impactos del cemento portland, resultados que también recomiendan otros razonamientos como Albornoz Muñoz (2015) al comparar las emisiones producidas en el ciclo de vida de un geo polímero con respecto a las de un hormigón convencional, y deduce que al usar el hormigón geo polimérico se pueden disminuir las emisiones de CO_2 ,

además de satisfacer los requisitos técnicos del hormigón como la resistencia necesaria y la resistencia a la corrosión, mostrando propiedades superiores a las de un hormigón convencional.

La encuesta revela que, en general, los expertos ven al geo polímero a base de piedra pómez como una alternativa más sostenible en comparación con el cemento Portland. Particularmente, destacan su menor huella ecológica y sostenibilidad superior, sin embargo, en aspectos como la generación de ruido y la contaminación del aire, las opiniones están más divididas, con muchos expertos considerando que ambos materiales tienen impactos similares. La metodología Delphi ha permitido obtener un consenso sobre los beneficios del geo polímero, aunque algunos aspectos todavía requieren de un análisis más detallado para alcanzar un acuerdo total, criterio que presenta similitud con Martínez González (2022) la cual menciona que los geo polímeros se producen con bajo costo y el impacto ambiental es bajo, además presenta alta resistencia a la compresión y es de bajo costo.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.12. Conclusiones

El análisis de ciclo de vida del geo polímero basado en piedra pómez ha revelado ventajas relacionadas con la sustentabilidad en comparación con el cemento Portland. Una de las características destacadas en su proceso de producción es la menor generación de gases de efecto invernadero, como el CO₂. Esto se debe a que el geo polímero utiliza materiales alternativos, como la piedra pómez, que generan menos contaminación.

Considerando el ciclo de vida completo que englobe todo el proceso de producción del geo polímero desde su extracción hasta su distribución, se puede demostrar un potencial significativo que permite mitigar los impactos ambientales en comparación con el cemento portland, esto luego de haber detallado cada una de sus etapas de producción mostrando así que es importante buscar alternativas sustentables que no perjudiquen y puedan representar una mejoría en la industria de la construcción destacando un carácter de responsabilidad ambiental.

En el análisis de comparación se determina que la elaboración del geo polímero a base de piedra pómez y del cemento portland son dañinas al medio ambiente debido a su composición química, pero se puede destacar que la menos perjudicial es el geo polímero ya que utiliza materiales alternativos amigables al medio ambiente.

Los resultados obtenidos en la matriz de Leopold demuestran que el geo polímero a base de piedra pómez presenta un impacto ambiental significativamente menor que el cemento Portland, con un valor de -457 frente a -268, por lo que se refuerza la idea de que el geo polímero no solo es una opción más sostenible, sino también una alternativa viable para su aplicación en proyectos constructivos.

Los geopolímeros basados en piedra pómez son limitados por el material de la cantera Profuturo principalmente relacionadas con la variabilidad de los materiales naturales con diferentes minas del Ecuador, además el desempeño de los geopolímeros en condiciones climáticas específicas requieren una investigación más profunda y garantizar la consistencia de sus propiedades mecánicas, no obstante, se confirma que los geopolímeros constituyen una alternativa sostenible en comparación con el concreto convencional, dado que su producción emite menos dióxido de carbono (CO₂) al no requerir la descarbonatación de la piedra caliza.

3.13. Recomendaciones

- La sustentabilidad del geo polímero es evidente pero no se descarta una posible afectación a la salud humana por la exposición de los compuestos potencialmente tóxicos.
- Los geos polímeros requieren menos energía para su producción y pueden ser fabricados a partir de materiales reciclados, reduciendo significativamente su impacto ambiental.
- Realizar un análisis de ciclo de vida hasta la implementación como un material de construcción.
- Investigar la factibilidad de empleo de los geo polímeros en diferentes áreas de construcción como en hormigones, morteros, etc.
- Utilizar residuos industriales o subproductos, como cenizas volantes o escoria de alto horno, que son fuentes ricas en sílice y alúmina. Esto reduce la necesidad de materiales vírgenes y disminuye el impacto ambiental.
- Realizar una inspección periódica de los geo polímeros para identificar cualquier signo de deterioro, para prevenir problemas mayores y prolongar la vida útil del material.

BIBLIOGRAFÍA

- Alberto, L., & Coraspe, V. (2021). Situación actual de la síntesis y utilización de geo polímeros. En *Artículo de Investigación* (Vol. 22, Número 2). <https://orcid.org/0000-0003-3190-9877>
- Albornoz Muñoz, J. F. (2015). *Cálculo de la huella de carbono asociada a la elaboración de hormigones geo polímeros en Chile*.
- Baño Nieva, A., & Escalera del Pozo, A. V. (2005). *Guía de construcción sostenible*. www.istas.ccoo.es
- Benavides, P. A. O., & Molina, J. F. Q. (2022). Indicadores de sostenibilidad urbana para la ciudad de Cuenca-Ecuador: construcción sostenible de edificaciones. *ConcienciaDigital*, 5(1.2), 105-125. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v5i1.2.2088>
- Billmeyer, F. W. (1975). *Ciencia de los Polimeros*.
- Calderón Peñafiel, J. C. (2019). *Estudio experimental de geopolímeros de arcillas en función de la resistencia mecánica*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=258284&info=resumen&idioma=SPA>
- Castillo, J., & Mieles, M. (2022). *Caracterización de un geopolímero a base de piedra pómez y humo de sílice como material precursor*.
- Catastro Minero. (2024). *Catastro Minero*. https://hub.arcgis.com/datasets/1cea6ad34d8d46818e23cca1335d4fe1_2/explore
- Cornejo, P. (2017). *Depósito de minerales no metálicos del ecuador*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24008.11523>
- Davidovits, J. (1994). Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries. *World Resource Review*, 263-278. <https://www.researchgate.net/publication/236503901>
- Dellavedova, M. Gabriela. (2016). *Guía metodológica para la elaboración de una evaluación de impacto ambiental*.
- Enrique, E., & Freire, E. (2020). *Qualitative research, an ethical tool in the pedagogical field*. 103-110.
- Ferrer Navarro, F. (2022). *Cementos alternativos al cemento portland*.

- Gallegos Peñarreta, A. M. (2015). *Diseño de la mezcla de hormigón alivianado usando piedra pómez de Latacunga. Aplicación a la fabricación de paneles no estructurales.*
- García, J., Quito, J., & Perdomo, J. (2020). *Análisis de la huella de carbono en la construcción y su impacto sobre el ambiente.*
- Geopolymer Solutions. (2023). *Durabilidad del hormigón geopolímero | Geopolymer Solutions.* <https://www.geopolymertech.com/es/hormigon-ecologico/durabilidad/>
- Gualán, D. (2011). *Diseño e implementación de un sistema de mantenimiento para una trituradora de piedra marcaa MINYU.*
- Huaquisto Cáceres, S., & Chambilla Flores, I. G. (2021). Estudio del ruido generado por la maquinaria de construcción en infraestructura vial urbana. *INVESTIGACION & DESARROLLO*, 21(1). <https://doi.org/10.23881/idupbo.021.1-7i>
- IIGE. (2019). *Mapa Metalogenético.* <https://www.geoenergia.gob.ec/mapa-metalogenetico-elaborado-por-iige-da-a-conocer-potencial-de-recursos-minerales-metalicos-existentes-en-ecuador/>
- ISO TS 14067. (2014). *ISO/TS 14067 Huella de Carbono de Productos.* <https://www.intedy.com/internacional/207/noticia-isots-14067-huella-de-carbono-de-productos.html>
- Juvinao, D. D. L., Ustate, L. M. T., & Camacho, F. O. M. (2020). Tecnologías, procesos y problemática ambiental en la Minería de arcilla. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 8(2), 20-43. <https://doi.org/10.17081/INVINNO.8.2.3857>
- Lenis-Rodas, J. A., Aleán-Vásquez, Á., Villa-Cardona, F., Córdoba-Castro, J., & Gómez-Botero, M. A. (2023). Desarrollo de morteros de construcción con geopolímeros obtenidos a partir de suelos degradados por la minería en El Bajo Cauca Antioquia. *Revista UIS Ingenierías*, 22(3). <https://doi.org/10.18273/revuin.v22n3-2023002>
- Marine Resource. (2019, junio 19). *Ventajas y Desventajas de la minería a cielo abierto.* <https://mineramarineresources.com/ventajas-y-desventajas-de-la-mineria-a-cielo-abierto/>
- Márquez, C. (2022, noviembre 4). *El sector de la construcción incorpora prácticas sostenibles.* <https://youtopiaecuador.com/cuidado-del-ambiente/sector-construccion-practicas-sostenibles-ecuador/>
- Martínez González, G. M. (2022, abril 6). *Geo polímeros y sus aplicaciones.* <https://celaya.tecnm.mx/geopolimeros-y-sus-aplicaciones/>

- Mendoza Zapata, L. A., Pacheco Bustos, C. A., & Certain Abrahan, W. D. (2021). Evaluación de impactos ambientales asociados a la eventual recuperación ambiental de canteras con residuos inertes de construcción y demolición en Barranquilla y su área metropolitana. *Research Article*, 39(2), 275-295. <https://doi.org/10.14482/INDE.39.2.628>
- Miranda Torres, M. (2021). *Caracterización e identificación de aluminosilicatos en la mina de la comunidad sucre para su evaluación en la adsorción de plomo*.
- Neville, E., Wharf, G., & London. (1995). Chloride attack of reinforced concrete: an overview. *Materials and Structure*, 63-70.
- Norma ISO 14044. (2006). *Norma ISO 14044: Evaluación del ciclo de vida de productos y servicios*. <https://normasiso.org/norma-iso-14044/>
- Núñez Caroca, R. A. (2018). *Evaluación del efecto de material particulado en suspensión orientado a la operación mina a partir de la implementación de una red de monitoreo ambiental en minera escondida*.
- Oleas Oleas, B. E. (2022). *Evaluación de la contaminación acústica derivada de la actividad minera en la cantera de áridos y pétreos «Flores» de la cabecera parroquial de San Luis, Cantón Riobamba, Provincia de Chimborazo*.
- Panceri, Julio. (2021). *Sustentabilidad : economía, desarrollo sustentable y medioambiente*. https://www.editorialbiblos.com.ar/libro/sustentabilidad_118530/
- PAS-2050. (2008). *AEC - Norma PAS 2050*. <https://www.aec.es/web/guest/centro-conocimiento/norma-pas-2050>
- Pérez, A. (2020). *Estudio del estado del arte de las propiedades físicas y mecánicas de geopolímeros dopados con nanopartículas de óxido de grafeno*.
- Ranganathan, J., Smith, B., Aksel, H., Norsk, H., Vicki, H., Cochran, A., Murphy, A. J., Gupta, S., Eaton, R., McMahon, M., Don, B. P., Dow, H., Canada, C., Vanderborcht, B., Melanie, H., Kjell, E. K., Norsk, O., Laurent, H., Pricewaterhousecoopers, S., ... Camobreco, V. (2014). *Protocolo de gases efecto invernadero*.
- Reto Kömmerling. (2021). *El ciclo de vida de los materiales*. Reto Kömmerling. <https://retokommerling.com/ciclo-de-vida-materiales/>
- Salirrosas, J. (2020a). *Geopolímeros en la industria de la construcción: aplicaciones con cenizavolante y puzolana natural*.

- Salirrosas, J. (2020). *Geopolímeros en la industria de la construcción: aplicaciones con ceniza volante y puzolana natural*.
- Torres, D. (2024). *Qué es el método Delphi, para qué sirve y ejemplos*.
<https://blog.hubspot.es/sales/metodo-delphi>
- Ulloa, & al. (2021). *Cementos alternativos basados en geopolímeros de zeolitas naturales*.
<https://doi.org/10.53313/gwj42022>
- Ulus, H., Aruntas, H. Y., & Gencil, O. (2016, agosto 15). Investigation on characteristics of blended cements containing pumice. *Construction and Building Materials*, 118, 11-19. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.05.030>
- UNE-EN 15804. (2012). *UNE-EN 15804:2012+A1:2014 Sostenibilidad en la construcción. D...* <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0052571>
- UNE-EN 15978. (2012). *UNE-EN 15978:2012 Sostenibilidad en la construcción. Evaluació...* <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0049397>
- Uribe, R. A. (2015). Investigaciones de Materias Primas Minerales No Metálicas en el Ecuador. *Revista Politécnica*, 36(3), 34-34.
https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/607
- Villaquirán, M. A., Perea, V. N., Ruiz, J. E., & Mejía de Gutiérrez, R. (2022). Mechanical, physical and thermoacoustic properties of lightweight composite geopolymers. *Ingeniería y competitividad: revista científica y tecnológica*, ISSN 0123-3033, Vol. 24, N°. 1, 2022 (Ejemplar dedicado a: Ingeniería y Competitividad), 24(1), 8.
<https://doi.org/10.25100/iyc.v24i1.10985>