

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS**

**CAPTACIÓN Y MINERALIZACIÓN DEL CO<sub>2</sub> EMITIDO POR LA  
CHIMENEA DEL INCINERADOR DE LA EMPRESA HAZWAT**

**EVALUACIÓN DE CARBONATO DE POTASIO PARA  
FABRICACIÓN DE ADOQUINES DE HOMRIGÓN.**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO SUPERIOR  
EN AGUA Y SANEAMIENTO AMBIENTAL**

**SIMBAÑA VALLE JORGE JAVIER**

**jorge.simbana01@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: Santiago Stalin Guerra Salcedo**

**santiago.guerra@epn.edu.ec**

**DMQ, agosto 2023**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Jorge Javier Simbaña Valle declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

**Jorge Simbaña**

**jorge.simbana01@epn.edu.ec**

**jorgejavier199724@gmail.com**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Jorge Simbaña, bajo mi supervisión.

---

**Santiago Guerra**

**santiago.guerra@epn.edu.ec**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Jorge Javier Simbaña Valle

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo es dedicado a mí Abuelita Carmen, quién es mi guardián y mi ángel en el cielo, quién me cuida y me ha guiado a lo largo de mi vida.

A la familia Naranjo Vargas, por su compañía y su apoyo incondicional desde que me incluyeron como parte de su familia.

Se lo dedico a las personas que estuvieron conmigo en las buenas, en las malas, me ayudaron a ser mejor persona y ver los errores que cometía, Mateo, Katy, Ing. Lucy, Ing. Eli, Ing. Santi.

Especialmente a Marlon y Andy por ayudarme a entender algunos aspectos que te ponen la vida, enseñarme a querer y ser mejor persona conmigo mismo.

Dedicada a mi familia, quienes me ayudaron a lo largo de mi vida estudiantil, me dieron los ánimos y el apoyo necesario en momentos difíciles

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco en primer lugar a Dios, quien me ha dado la fuerza para continuar pese a todos los problemas y adversidades que he atravesado.

De igual forma, agradezco a los docentes de la carrera de Tecnología Superior en Agua y Saneamiento Ambiental, quienes me han compartido su sabiduría, experiencia y sobre todo dedicación en el transcurso de toda la carrera.

De manera especial agradezco a mi tutor de tesis Santiago Guerra, aunque a veces se porte falso y me cambio de apellido a Nazario, que sepa que aparte de ser un buen docente supo tenderme su mano de amigo; por las oportunidades que me brindo, por su paciencia, por su orientación en el transcurso del desarrollo de este trabajo, ya que, a pesar de todos los obstáculos para la realización de este, supo darme la fortaleza para continuar.

Agradecer también a la Ingeniera Lucía Montenegro, docente de la FICA por la oportunidad y confianza que me brindó al ser su Ayudante de Investigación, por la paciencia, mucha paciencia que tuvo en todo el transcurso de mis prácticas y sobre todo por todas las enseñanzas. También agradezco a la Ingeniera Eliana Peña por haberme sabido guiar, aconsejar y regañar cuando era necesario, sepan que las recordaré con mucho cariño y sobre todo como mi ejemplo a seguir en la vida laboral.

A los técnicos del LEMSUR al Ingeniero David Natez y a Francisco, por su ayuda con la realización de los ensayos mecánicos a los adoquines.

Agradecer a Jennifer, Bryan, Esteban, Mateo, Diego. Sobre todo, a mis boas: Isabela, Mishell, Fernanda, Katherine. Y en especial a Alejandro, Diana, Richard, Jairo a quienes en verdad puedo llamar amigos por todas las experiencias, consejos durante todo este tiempo.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES .....	1
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	2
DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTO .....	4
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS .....	8
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	9
RESUMEN.....	10
ABSTRACT.....	11
<b>1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO .....</b>	<b>12</b>
1.1 Objetivo general.....	13
1.2 Objetivos específicos.....	13
1.3 Alcance .....	13
1.4 Marco teórico .....	13
• 1.4.1 Antecedentes.....	13
• 1.4.2 Fuentes de Dióxido de Carbono.....	15
• 1.4.3 Métodos de captura de CO <sub>2</sub> .....	16
1.4.3.1 Precombustión.....	17
1.4.3.2 Postcombustión .....	17
1.4.3.3 Oxidación.....	17
• 1.4.4 Equipo de muestreo isocinético .....	18
1.4.4.1 Equipo Isocinético .....	18
1.4.4.2 Muestreo Isocinético .....	18
• 1.4.5 Contaminación atmosférica .....	19
• 1.4.6 Reutilización como material de construcción .....	20
• 1.4.7 Encapsulamiento con adoquines .....	20
• 1.4.8 Marco legal .....	20
1.4.8.1 Normativa legal.....	20
<b>2 METODOLOGÍA.....</b>	<b>21</b>
2.1 Planta Hazwat.....	21
• 2.1.1. Ubicación.....	21
2.2. Recopilación de datos .....	22
2.3 Incinerador de la empresa Hazwat.....	23
• 2.3.1 Descripción del incinerador de la empresa Hazwat .....	24

2.4	Método de captura de CO <sub>2</sub> .....	24
2.5	Uso del equipo de monitoreo isocinético.....	25
	• 2.5.1 Preparación del tren de muestreo .....	25
	• 2.5.2 Toma de la muestra.....	26
2.6	Determinación de acidez en la solución absorbente.....	27
2.7	Determinación de concentraciones de hidróxido de potasio para elaboración de adoquines .	28
	• 2.7.1 Cálculos de concentraciones de carbonato de potasio (K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ).....	28
2.8	Proceso de fabricación de los adoquines.....	33
	• 2.8.1 Dosificación .....	33
	• 2.8.2 Dosificación de agua .....	34
	• 2.8.3 Proceso de mezcla.....	34
	• 2.8.4 Elaboración de adoquines.....	35
	• 2.8.5 Fraguado y curado .....	35
2.9	Ensayos mecánicos.....	35
	• 2.9.1 Ensayo de compresión .....	36
2.10	Ensayo de absorción .....	37
	• 2.10.1 Materiales necesarios para el ensayo de absorción .....	37
2.11	Ensayo de lixiviación en adoquines.....	39
	• 2.11.1 Medición de pH.....	40
	• 2.11.2 Color aparente.....	40
	• 2.11.3 Turbiedad .....	40
	• 2.11.4 Alcalinidad .....	41
	• 2.11.5 Dureza .....	42
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>43</b>
3.1	Resultados de la elaboración de adoquines .....	43
3.2	Resultados de ensayos de lixiviación.....	44
	• 3.2.1 Resultados de pH.....	44
	• 3.2.2 Resultados de color aparente .....	45
	• 3.2.3 Resultados de turbiedad.....	46
	• 3.2.4 Resultados de ensayo de alcalinidad.....	47
	• 3.2.5 Resultados del ensayo de dureza .....	49
	• 3.2.6 Resultados de compresión.....	50
	• 3.2.7 Resultados de absorción.....	55
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>53</b>
4.1	CONCLUSIONES.....	53
4.2	RECOMENDACIONES.....	54
<b>5.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>55</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Información sobre las principales fuentes de emisión de GEI.....	15
<b>Tabla 2.</b> Cantidad de emisiones y fuentes emisoras de CO <sub>2</sub> .....	16
<b>Tabla 3.</b> Métodos de un muestreo isocinético.....	19
<b>Tabla 4.</b> Equipos y Materiales para la elaboración de adoquines .....	33
<b>Tabla 5.</b> Cálculo de cemento dosificación de cemento .....	34
<b>Tabla 6.</b> Cálculo de dosificación de cemento para cada concentración.....	34
<b>Tabla 7.</b> Codificación de adoquines por concentración.....	36
<b>Tabla 8.</b> Clasificación de tránsito y tipo de adoquín.....	37
<b>Tabla 9.</b> Codificación de adoquines para ensayo de absorción.....	38
<b>Tabla 10.</b> Materiales y equipos necesarios para el ensayo de absorción .....	38
<b>Tabla 11.</b> Masa de carbonato de potasio por cada concentración utilizada.....	43
<b>Tabla 12.</b> pH obtenido por cada concentración de lixiviado .....	44
<b>Tabla 13.</b> Resultados de color aparente en lixiviados.....	45
<b>Tabla 14.</b> Resultados del ensayo de turbidez en el lixiviado.....	46
<b>Tabla 15.</b> Resultados del ensayo de alcalinidad .....	47
<b>Tabla 16.</b> Cantidad de carbonato de potasio presente en el adoquín.....	49
<b>Tabla 17.</b> Resultados del ensayo de dureza al lixiviado .....	50
<b>Tabla 18.</b> División del adoquín por secciones para cálculo de área .....	51
<b>Continuación tabla 18.</b> División del adoquín por secciones para cálculo de área .....	51
<b>Tabla 19.</b> Resistencia de los adoquines .....	51
<b>Continuación tabla 19.</b> Resistencia de los adoquines.....	52
<b>Tabla 20.</b> Comparación de resistencia de adoquines con la normativa NTE 1488 .....	53
<b>Continuación tabla 20.</b> Comparación de resistencia de los adoquines con la normativa INEN 1488 .....	54
<b>Tabla 21.</b> Resultados del ensayo de absorción .....	55
<b>Tabla 22.</b> Resultados de absorción.....	44

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Esquema de proceso de captura de CO <sub>2</sub> .....	16
<b>Figura 2.</b> Muestreo por tren isocinético .....	18
<b>Figura 3.</b> Diagrama de flujo, proceso de tratamiento de gases .....	20
<b>Figura 4.</b> Ubicación de la Planta Industrial HAZWAT- Cayambe.....	22
<b>Figura 5.</b> Horno fijo de dos cámaras.....	23
<b>Figura 6.</b> Incinerador de le empresa Hazwat.....	24
<b>Figura 7.</b> Burbujeadores Isocinéticos .....	26
<b>Figura 8.</b> Resultados de pH en lixiviados .....	44
<b>Figura 9.</b> Resultados de color aparente en lixiviados .....	45
<b>Figura 10.</b> Resultados de ensayo de turbiedad .....	46
<b>Figura 11.</b> Alcalinidad a la fenolftaleína y volumen gastado de agente titulante .	48
<b>Figura 12.</b> Alcalinidad total y volumen gastado de agente titulante .....	48
<b>Figura 13.</b> Porcentajes de carbonato presente en el adoquín .....	49

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1.</b> Balance de masa.....	28
<b>Ecuación 2.</b> Ley de gases ideales.....	29
<b>Ecuación 3.</b> Ecuación para cálculo de moles producidas .....	29
<b>Ecuación 4.</b> Ecuación para cálculo de moles producidas en 1 hora .....	30
<b>Ecuación 5.</b> Ecuación para cálculo de flujo máximo de CO <sub>2</sub> .....	30
<b>Ecuación 6.</b> Ecuación para cálculo de flujo másico de CO <sub>2</sub> por cada impinger... 30	30
<b>Ecuación 7.</b> Ecuación para cálculo de flujo másico de CO <sub>2</sub> por cada concentración.....	31
<b>Ecuación 8.</b> Ecuación para cálculo de flujo másico de CO <sub>2</sub> en mg .....	31
<b>Ecuación 9.</b> Ecuación para cálculo de flujo másico de CO <sub>2</sub> en ppm .....	31
<b>Ecuación 10.</b> Ecuación para cálculo de moles de K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .....	31
<b>Ecuación 11.</b> Ecuación para cálculo de masa de K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .....	32
<b>Ecuación 12.</b> Ecuación para cálculo de masa de K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .....	32
<b>Ecuación 13.</b> Ecuación para cálculo de masa de K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> por cada litro de agua . 32	32
<b>Ecuación 14.</b> Porcentaje de absorción.....	39
<b>Ecuación 15.</b> Alcalinidad a la fenolftaleína.....	41
<b>Ecuación 16.</b> Alcalinidad total .....	41
<b>Ecuación 17.</b> Cantidad de K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> lixiviado .....	42
<b>Ecuación 18.</b> Dureza Total .....	43

## RESUMEN

El presente trabajo de integración curricular tuvo como finalidad evaluar la captación y mineralización del CO<sub>2</sub> producido por la chimenea de la empresa Hazwat, en la fabricación de adoquines de hormigón. En la actualidad el CO<sub>2</sub> es uno de los principales gases de efecto invernadero y reducir sus emisiones es de gran importancia. Para esto, se determinó la viabilidad de encapsular carbonato de potasio, sustancia producto de la mineralización de dióxido de carbono en adoquines.

Esta técnica permite reducir el impacto ambiental que tienen las emisiones de CO<sub>2</sub> de forma industrial hacia la atmósfera, al reducir las emisiones de este gas que genera la empresa. Se realizaron múltiples visitas de campo a la empresa Hazwat en Cayambe, donde se hizo un recorrido por las instalaciones y se observó la bloquera, la cual fue de ayuda para la fabricación de los adoquines. Una vez que se captó el CO<sub>2</sub> se procedió a mineralizarlo en carbonato de potasio, sustancia que fue encapsulada. Las dosificaciones utilizadas para encapsular el K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> fueron de 25, 30, 45 y 50%.

Los adoquines se realizaron en la bloquera de la empresa Hazwat, donde con ayuda de los técnicos se efectuó el fraguado y curado en 28 días. Después de este tiempo, los adoquines fueron trasladados a la Escuela Politécnica Nacional al laboratorio de Ensayos de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas (LEMSUR) para realizar los ensayos mecánicos de resistencia, absorción, cuyos resultados se compararon con la normativa del NTE y en el laboratorio de la Escuela de Formación de Tecnólogos (ESFOT) se realizaron los ensayos de lixiviación siguiendo la norma de la EPA 1315 y la norma de calidad.

Finalmente, los resultados obtenidos en cada ensayo realizado se compararon con las normativas de construcción y de calidad, dando como conclusión que los adoquines son aptos para su utilización, además que se los puede utilizar en diferentes áreas como parqueaderos, carreteras, etc. A la empresa se le entregará un informe técnico indicando la dosificación más adecuada para la fabricación de los adoquines

**PALABRAS CLAVE:** gases de efecto invernadero, mineralización, encapsulamiento, adoquines, resistencia mecánica, fraguado, curado, lixiviado, dosificación.

## ABSTRACT

The purpose of this work was to evaluate the capture and mineralization of CO<sub>2</sub> produced by the chimney of the Hazwat company, in the manufacture of concrete pavers. Currently the CO<sub>2</sub> is one of the main greenhouse gases and reducing its emissions is of great importance. For this, the feasibility of encapsulating potassium carbonate, a substance produced by the mineralization of carbon dioxide in cobblestones, was determined.

This technique allows reducing the environmental impact of CO emissions industrially into the atmosphere, by plummeting the emissions of this gas generated by the company.

Multiple field visits were made to the Hazwat company in Cayambe, where a tour of the facilities was conducted and the block machine was observed, which was helpful for the manufacture of paving stones. Then the CO<sub>2</sub> was mineralized in potassium carbonate, a substance that was encapsulated. The dosages used to encapsulate the K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> they were 25, 30, 45 and 50%.

The paving stones were made in the block factory of the Hazwat company, where with the help of technicians they were set and cured in 28 days. After this time, the pavers were transferred to Escuela Politécnica Nacional to the Materials, Soil and Rock Mechanics Testing Laboratory (LEMSUR) to carry out the mechanical resistance and absorption tests, the results of which were compared with the NTE regulations. Additionally, in the laboratory of the Technological Training School (ESFOT), the leaching tests were carried out following the EPA 1315 standard and the quality standard.

Finally, the results obtained in each test carried out were compared with the construction and quality regulations, concluding that the paving stones are suitable for being used in different areas such as parking lots, highways, etc. A technical report will be handed out to Hazwat in which indicating the most appropriate dosage for the manufacture of paving stones is set.

**KEYWORDS:** greenhouse gases, mineralization, encapsulation, paving stones, mechanical resistance, setting, curing, leaching, dosage.

## 1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El cambio climático es un fenómeno que genera alteraciones en el planeta a gran escala. Una de estas modificaciones es la emisión de Gases de Efecto Invernadero (G.E.I), gases que atrapan el CO<sub>2</sub> en la atmósfera, lo que ocasiona la retención de la radiación solar e impide que el dióxido de carbono salga al espacio, generando el calentamiento global. Bajo estas premisas, es clave mencionar que la producción de dióxido de carbono se ha elevado en un 6% al año 2021, alcanzando a 36 300 millones de toneladas anuales a nivel mundial y su eliminación juega un rol fundamental en las emisiones de este gas. Por esta razón y considerando las consecuencias a la atmósfera y seres vivos, el presente trabajo de integración curricular pretendió aportar a la disminución de la emisión de este gas CO<sub>2</sub>, realizando su encapsulación en materiales aprovechables, usando diferentes técnicas de carbonatación y captura. (UNFCCC, 2022); (Navas, 2021)

Para esto se analizó el material resultante de la carbonatación y encapsulamiento del gas CO<sub>2</sub> proveniente de las cenizas consecuencia de la incineración de los residuos sólidos de la empresa Hazwat. Esta empresa se encarga del almacenamiento y disposición final de desechos peligrosos, no peligrosos y especiales provenientes del sector industrial, los cuales son posteriormente incinerados.

A la solución resultado de la carbonatación se la integró a adoquines de hormigón, a los cuales se les realizó ensayos de caracterización, físicos de resistencia a la compresión, absorción, densidad, y de lixiviación. Las pruebas de resistencia a la compresión se efectuaron mediante la norma NEC INEN 3040.(NTE INEN 3040, 2016). Esta norma se basa en colocar los adoquines uno a continuación de otro, separarlos a 13mm por todos los lados en una temperatura de 24 °C por 48 horas, en cada intervalo de 2 horas se debe revisar que las mediciones de masa no disminuyan el 0.2% hasta que no haya humedad en la superficie de los adoquines. Finalmente se realizó el ensayo químico de lixiviación “Mass Transfer Rates of Constituents in Monolithic or Compacted Granular Materials Using a Semi-Dynamic Tank Leaching Procedure” (EPA Method 1315, 2017) el cual consistió en sumergir la muestra a analizarse en recipientes en una solución de agua destilada por un tiempo de 14 días, al final del ensayo se recolectó el lixiviado producido y se lo analizó y se comprobó si existe un escape del compuesto encapsulado

Las ventajas de uso de la técnica de mineralización, también llamada carbonatación es la gestión y tratamiento final de los desechos peligrosos, disminuyendo el gasto de energía de combustión y un bajo costo en comparación con otras técnicas de carbonatación como la oxicomustión y precombustión, las cuales capturan el CO<sub>2</sub> de la corriente de gas abundante de N<sub>2</sub> producida por la incineración de combustibles fósiles en el aire. (Salvador, 2017)

## **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el potencial de carbonato de potasio ( $K_2CO_3$ ) como material de construcción para aplicarlo a gran escala en la empresa Hazwat.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Levantamiento de información primaria y secundaria
2. Evaluar el encapsulamiento del carbonato de potasio ( $K_2CO_3$ ).
3. Optimizar el mejor tratamiento de encapsulación de  $K_2CO_3$  para la evaluación de los adoquines.

## **1.3 ALCANCE**

El presente proyecto busca evaluar las características de los adoquines de hormigón obtenidos a partir de la mezcla porcentual específica de  $K_2CO_3$  derivado de la mineralización del gas  $CO_2$  emitido por el incinerador de la empresa Hazwat y otros materiales que conforman el adoquín como: arena, grava, cemento.

El proyecto se inició con un balance de masa para conocer la concentración de  $CO_2$  que produce el incinerador de la empresa en 24 horas. Posteriormente, se realizó la reacción estequiométrica resultante de la mineralización del dióxido de carbono, luego se procedió a realizar la solución con la cantidad de  $K_2CO_3$  obtenida de los cálculos del balance a partir de datos recopilados (Mogollón Estévez & Vallejo Coral, 2022), así como el reemplazo del agua en la formulación de los adoquines por soluciones con concentraciones de 25, 30, 45,50% de carbonato de potasio captado.

Este proyecto se ejecutó con la finalidad de evidenciar el uso de Carbonato de Potasio resultado de la captación de  $CO_2$  en chimeneas como material de construcción, los cuales podrán ser implementados dentro de las instalaciones de la empresa Hazwat para que sus emisiones no afecten de forma significativa a la atmósfera.

## **1.4 MARCO TEÓRICO**

### **1.4.1 ANTECEDENTES**

Estudiar el clima conlleva una investigación compleja y que avanza de manera inmensurable, debido a las variaciones en los factores que intervienen. Como se sabe, el clima en el planeta no es estable y por esta razón ha existido alteraciones en su balance energético, también ha cambiado durante miles y millones de años. Aunque se han presentado variaciones climáticas en toda la historia de la Tierra, desde su formación hasta la actualidad hay una que resalta a lo largo de todo este tiempo y que ocurrió hace uno 100

000 años, que conllevó a una helada masiva, es decir, los períodos de glaciación. (US EPA, 2023)

En este contexto, se conoce como cambio climático a la variación global del clima en el planeta. Estas variaciones no solo se producen por alteraciones naturales, también se dan por la acción antropomórfica, es decir, la acción del hombre y se producen en diferentes tiempos por modificaciones en los parámetros: humedad, precipitaciones, temperatura, radiación solar, entre otras. Mientras que, cuando se habla de “efecto invernadero” se hace referencia a la retención del calor del sol en la atmósfera del planeta por parte de una capa de gases en la atmósfera. Pero esto no quiere decir que es mala del todo, ya que, sin estos gases, la vida como la conocemos no habría sido posible, por el simple hecho de que el planeta tendría bajas temperaturas. Entre los GEI se encuentran el metano, el dióxido de carbono y el óxido nitroso, que son expulsados a la atmósfera por la industria, la agricultura y la quema de combustibles fósiles. Los seres humanos han logrado a lo largo de la historia que estos gases eleven su concentración en un 30%. (US EPA, 2023)

Las preocupaciones acerca del cambio climático y las emisiones de gases de efecto invernadero alertaron a los científicos, por esta razón en 1997 se estableció el Protocolo de Kyoto y entró en vigor en el año 2015. Su principal objetivo el lograr reducir un 5% de emisiones para el 2008-2012. (CMNUCC, 2016.)

Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) se identificaron los principales gases potenciales que aceleran las variaciones climáticas en la Tierra, estos gases son: metano, dióxido de carbono, óxido nitroso, vapor de agua y el ozono. (IPCC, 2018). La recopilación sobre las principales fuentes de emisión se muestra en la tabla 1.

**Tabla 1.** Información sobre las principales fuentes de emisión de GEI.

Gas y otros	Principales fuentes de emisión
Metano (CH <sub>4</sub> )	Emisión de gasolina a la atmósfera, minería, ganadería, deforestación, biomasa, agricultura.
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	Centrales eléctricas de carbón, industrias siderúrgicas y metalúrgicas, deforestación, suelos contaminados y destruidos
Óxido Nitroso (N <sub>2</sub> O)	Cultivos, deforestación, combustibles fósiles
Ozono (O <sub>3</sub> ) y Vapor de Agua (H <sub>2</sub> O)	Radiación electromagnética, minería, construcciones civiles, filtración de manganeso, fotoquímicos, etc.

#### 1.4.2 FUENTES DE DIÓXIDO DE CARBONO

Las emisiones de dióxido de carbono se forman de dos maneras; natural y antropomórficamente y éstas han aumentado a gran escala y están directamente relacionadas con la quema de combustibles fósiles, utilización de abonos en cultivos y las dispersiones producidas por las industrias. (Santillán, 2016)

La principal fuente de emisión antropogénica es la quema de combustibles fósiles, debido a que se realiza a gran y pequeña escala. Las fuentes de emisión de gran tamaño se dan por la generación de energía eléctrica, en cambio las emisiones a pequeña escala son producidas por motores de automóviles y, hornos en centros comerciales. Se debe tener en cuenta que, las emisiones de CO<sub>2</sub> son producto de la incineración de material orgánico e inorgánico de procesos industriales como la fabricación de cemento, la quema de residuos tóxicos y peligrosos, etc. (US EPA, 2023) En la tabla 2 se especifican las industrias con mayor emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera al año. (US EPA, 2023.)

**Tabla 2.** Cantidad de emisiones y fuentes emisoras de CO<sub>2</sub>

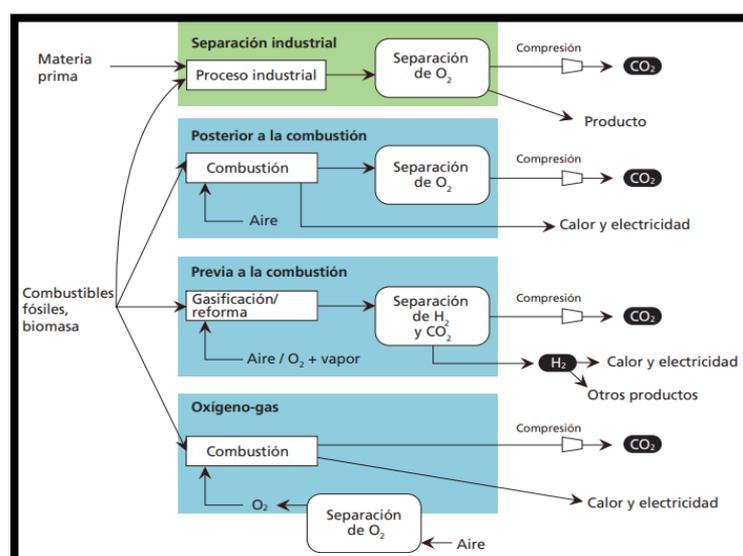
Fuentes emisoras	Cantidad de emisiones (MtCO <sub>2</sub> /año)
Refinerías	1 300
Producción de cemento	1 848
Industrias siderúrgicas	3 510
Industrias termoeléctricas que utilizan carbón para incineración	11 250

Como se observa en la Tabla 2, la industria que genera más CO<sub>2</sub> es la industria termoeléctrica, valor de referencia US EPA (2023) la cual constituye entre el 40% de emisiones totales.

Estas industrias manejan procesos de precombustión, postcombustión y oxicomustión y por esta razón sus emisiones de dióxido de carbono se aproximan al 50%.

### 1.4.3 MÉTODOS DE CAPTURA DE CO<sub>2</sub>

Actualmente existen métodos de captura de CO<sub>2</sub> los cuales son: postcombustión, precombustión y oxicomustión (Fraga, 2017). Utilizando el mejor método y tecnología adecuada y disponible se permite captar entre el 85 y 95% de dióxido de carbono emitido industrialmente. (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2005).



**Figura 1.** Esquema de proceso de captura de CO<sub>2</sub>

**Fuente:** (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2005)

#### **1.4.3.1 Precombustión**

Estos sistemas se basan en la nula generación de  $\text{CO}_2$  durante el proceso de combustión, la cual se realiza por una previa eliminación del carbono presente en el combustible (Fraga, 2017).

Este método se basa principalmente en producir hidrógeno. Para empezar el combustible se trata en el reactor con aire, vapor u oxígeno con la realización de una mezcla compuesta por hidrógeno (H) y monóxido de carbono (CO), la cual tendrá el nombre de “gas de síntesis”. Posteriormente la reacción entre el vapor y (CO) se realiza en el reactor secundario, obteniendo  $\text{CO}_2$  y gas hidrógeno, los cuales se los puede tratar por separado. (Fraga, 2017)

#### **1.4.3.2 Postcombustión**

Este método se basa en la captura de  $\text{CO}_2$  después de que se ha producido el proceso de combustión, el cuál elimina el dióxido de carbono del caudal de gases antes de liberarlo a la atmósfera. Este sistema es acogido por la mayoría de las centrales térmicas, las cuales trabajan mediante un ciclo de potencia de vapor. (Fraga, 2017)

La captura por postcombustión se clasifica en los siguientes sistemas: sistema de absorción física, sistema de por separación criogénica, separación por membranas o captura por algas y sistema de absorción química. Según Fraga (2017) el sistema de absorción química ha tenido más acogida y se ha ido desarrollando en los últimos años. El informe técnico presentado por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2005) revela que el sistema de absorción química utiliza un solvente líquido el cual permite capturar el  $\text{CO}_2$  presente en los caudales de gases, a su vez este compuesto es reutilizable siempre y cuando sea sometido a un proceso de regeneración, es decir liberar el compuesto del  $\text{CO}_2$  que se captó por acción térmica.

#### **1.4.3.3 Oxidación**

Estos sistemas utilizan oxígeno con una pureza entre el 90 y 100% como agente oxidante con el fin de aumentar la concentración de ( $\text{CO}_2$ ) en los gases de escape, generando un gas de combustión compuesto por vapor de agua y principalmente de dióxido de carbono. Con ayuda de este sistema se pueden obtener altas concentraciones de este gas, captando la mayoría de producto generado, pero tiene una desventaja, la cual se refleja en el costo energético, ya que, debido a su funcionamiento, este tiende a ser elevado (Fraga, 2017)

## 1.4.4 EQUIPO DE MUESTREO ISOCINÉTICO

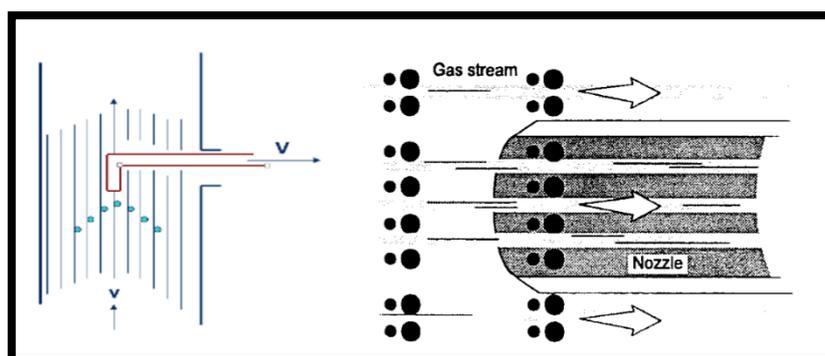
### 1.4.4.1 Equipo Isocinético

El muestreador isocinético automático integra cuatro sensores de presión para medir la presión diferencial, la presión estática y atmosférica y el flujo másico en la chimenea para determinar la velocidad, la densidad y la relación de pila con alta precisión.

El instrumento consta de dos unidades, una de control y otra de bombeo. El diseño permite que el usuario lleve solo la unidad de control liviana (6 kg) en el sitio de muestreo, mientras que la unidad de control más pesada (unidad de bomba) se puede dejar en el suelo, lo que la convierte en una unidad práctica que se puede apilar de manera diferente a las unidades tradicionales. Las unidades de bomba de otros fabricantes incluyen solo este dispositivo y deben soportar el peso. (Aspectos Claves de Un Equipo de Muestreo Isocinético, 2018)

### 1.4.4.2 Muestreo Isocinético

El muestreo con un equipo isocinético asegura la obtención de una muestra representativa del total de emisión producida por un incinerador, sin embargo, la muestra será representativa si no presenta alteraciones o perturbaciones en las líneas de corriente de gas que entran al equipo de muestreo. En este sentido, para este muestreo en específico se debe cumplir la condición de que la muestra debe ingresar en el canal de muestreo con la misma velocidad del flujo de gas en la chimenea. (Echeverri, 2006; Ronald & Córdor, 2018).



**Figura 2.** Muestreo por tren isocinético

**Fuente:** (Ronald & Córdor, 2018)

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) establece diferentes métodos para obtener una muestra representativa de gas al realizar un muestreo isocinético, los cuales se aprecian en la tabla 3.

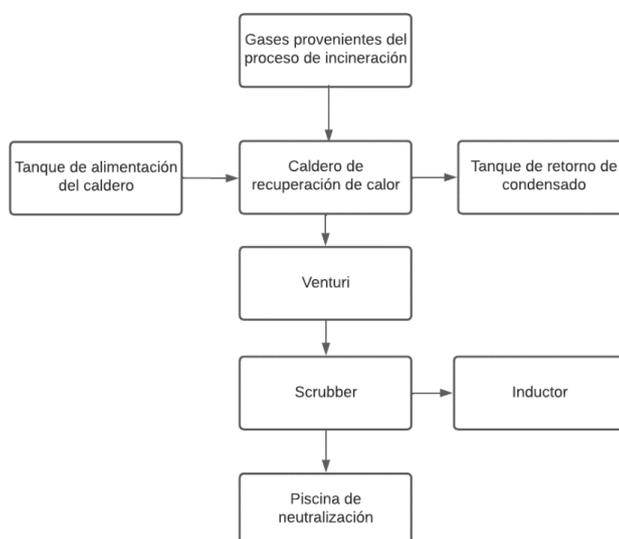
**Tabla 3.** Métodos de un muestreo isocinético

Número de método	Método
1	Localizar los puntos a ser muestreados
2	Calcular la velocidad de gas en la chimenea y el caudal (Tubo Pitot Tipo S)
3	Determinación de la masa molar del gas
4	Determinar la humedad en los gases producidos por la chimenea
5	Determinación de la emisión de material particulado de fuentes estacionarias.

#### 1.4.5 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Las plantas de incineración que tratan desechos tóxicos y peligrosos producen 6 500 y 10 000 m<sup>3</sup> en volumen de gases de combustión, ya que dependen del valor térmico medio de los desechos. (Camacho et al., 2011). Cabe recalcar que las plantas incineradoras que tienen en sus procesos la pirolisis, gasificación y suministro de aire con oxígeno producen menor volumen de gases de combustión.

Si las emisiones producidas por una incineración como (CO, HCl, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, dioxinas, furanos, metales pesados) no se tratan adecuadamente pueden ocasionar daños a la salud, afectando el sistema cardiovascular y principalmente el sistema respiratorio, de igual forma afecta a la calidad ambiental de las zonas aledañas a la incineradora. (Vargas et al., 2008).



**Figura 3.** Diagrama de flujo, proceso de tratamiento de gases

**Fuente:** Mogollón & Vallejo, 2022

#### **1.4.6 REUTILIZACIÓN COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN**

Con el desarrollo de la tecnología y de la industrialización desde la revolución industrial, se ha producido grandes impactos ambientales a nivel mundial como el calentamiento global y como consecuencia el aumento de gases de efecto invernadero. Por esta razón se ha comenzado a realizar investigaciones, con el objetivo de minimizar estas afectaciones específicamente en el sector de construcción, de tal manera que las emisiones puedan ser captadas y aprovechadas en diferentes áreas y así evitar la proliferación de gases de efecto invernadero y el aumento del calentamiento global.

En Ecuador, las investigaciones sobre el aprovechamiento de residuos y la mitigación de impactos ambientales se han enfocado en estudios a nivel universitario, algunos de estos motivados por empresas privadas. (Pozo, 2017)

#### **1.4.7 ENCAPSULAMIENTO CON ADOQUINES**

Varias investigaciones señalan que la utilización de materiales como ceniza o escorias de fundición en la fabricación de material de construcción aumenta su resistencia a la compresión. En este sentido la cantidad a de cemento a utilizarse se reducirá a comparación al proceso habitual, así se tendrá un ahorro económico en el proceso de producción.

Por otro lado, la utilización de carbonato de potasio en la fabricación de adoquines es una técnica nueva del proceso de mineralización del CO<sub>2</sub>. (Pozo, 2017)

#### **1.4.8 MARCO LEGAL**

##### **1.4.8.1 Normativa legal**

Según (Legislativo, 2008) en la sección 2, Art. 14 declara que es un derecho de la población vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, donde se debe garantizar la sostenibilidad y el buen vivir, denominado *sumak kawsay*. En este sentido, se declara el interés para la preservación del ambiente, la conservación de la biodiversidad y de los ecosistemas, así como la prevención del daño ambiental y la recuperación de espacios naturales degradados.

Por esta razón las investigaciones que ayuden a minimizar y mitigar los impactos ambientales producidos por el ser humano en el sector de producción son necesarias. Tal es así que al aumentar las emisiones de CO<sub>2</sub> se hace urgente la necesidad de encontrar

soluciones para reducir las. En este sentido, las investigaciones y ejecuciones de proyectos se enfocan en mejorar las condiciones ambientales para proyectos de encapsulamiento de materiales ya sean residuos sólidos, cenizas, escorias de fundición, entre otros. Para este proyecto se escogió realizar el encapsulamiento de carbonato de potasio, producto de la captación de CO<sub>2</sub> en adoquines. Para la elaboración de estos se utilizaron las especificaciones técnicas del Instituto Ecuatoriano de Normalización (NTE) (NTE INEN 3040 - Servicio Ecuatoriano de Normalización, 2017) que abarcan las características, ensayos y métodos para la realización de adoquines de hormigón e indica la cantidad exacta de materiales para la fabricación de estos elementos. En el Ecuador no existe una normativa legal que regule y controle la emisión y calidad de lixiviados, por lo cual se utilizó la normativa de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). (EPA Method 1315, 2017)

## **2 METODOLOGÍA**

### **Nota Aclaratoria**

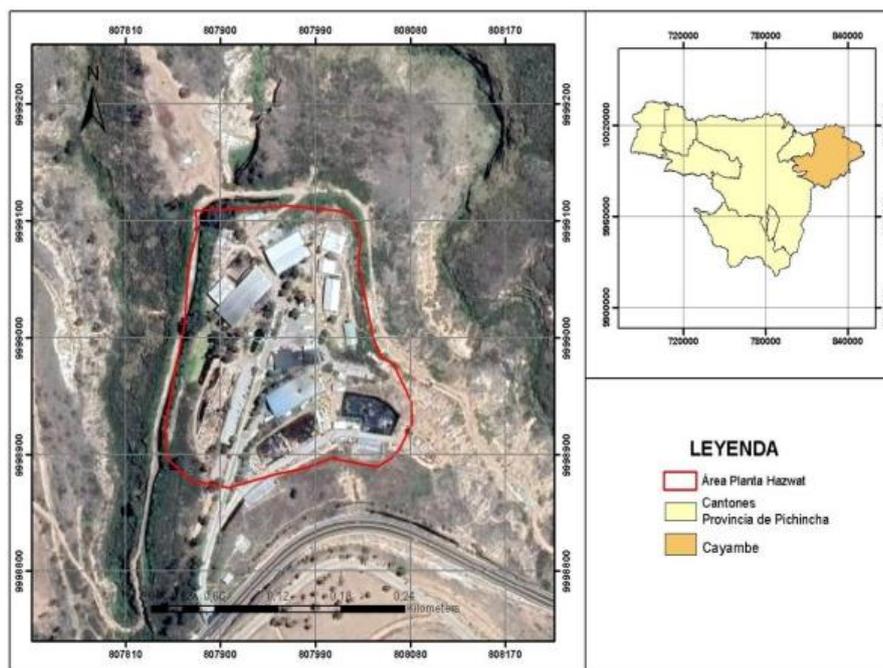
Se presentaron problemas de comunicación por parte de la empresa y los encargados del convenio (PVIF-21.02), por lo que se tuvo que cambiar la metodología más de una vez, ya que se tenía previsto realizar adoquines de hormigón, pero se terminó realizando adoquines.

Debido a problemas internos de la empresa se decidió hacer una simulación de la mineralización de CO<sub>2</sub> con un balance de masa con datos de tesis realizadas en la empresa, además, las visitas previstas para la captación de CO<sub>2</sub> y encapsulamiento se retrasaron hasta el 18 de junio del 2023 y por el tiempo de entrega del trabajo de integración curricular se optó por no realizar todos los ensayos presentes en la norma NTE INEN 3040 para adoquines de hormigón.

### **2.1 PLANTA HAZWAT**

#### **2.1.1. UBICACIÓN**

El presente estudio se realizó en una de las chimeneas de la empresa HAZWAT, localizada dentro de la Planta Industrial Cayambe, ubicada en las faldas del cerro Pambamarca, perteneciente a la provincia de Pichincha en la parroquia de Otón. La empresa se encuentra a una altura de 2830 msnm, a presión de 770 mmHg y una temperatura promedio de 10 °C, lo que le hace un clima templado, la empresa presenta un área de 42852,2 m<sup>2</sup>. (HAZWAT, 2017)



**Figura 4.** Ubicación de la Planta Industrial HAZWAT- Cayambe

**Fuente:** Mogollón & Vallejo, 2022

## 2.2. RECOPIACIÓN DE DATOS

Para la realización del presente proyecto, se inició con una visita a la Planta Industrial HAZWAT ubicada en Cayambe; donde, se hizo un recorrido por toda la empresa, la cual se la denominó levantamiento de información primaria. Se empezó con una inducción, aclarando los servicios que ofrecen, así como las normas de seguridad de la empresa, el manejo de residuos, los tratamientos y disposición final de los mismos. La visita estuvo dirigida por el encargado de planta, quién informó y guió en todo el recorrido. Así pues, se conocieron los métodos que se realizan a cada uno de los residuos que ingresan a la empresa, ya sea para un proceso de encapsulamiento, incineración o reciclaje.

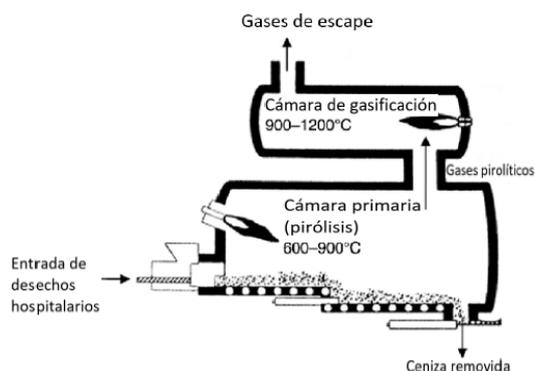
Se hizo un recorrido al área de incineración donde se observaron las chimeneas, los residuos que tratan en este proceso como son tulas, escombros de construcción, medicina caducada, revistas, EPP, se observó el lavador de gases y se explicó sobre su funcionamiento. Al observar la chimenea, se apreció que esta genera gran cantidad de humo, el cuál probablemente estará compuesto por dióxido de carbono, monóxido de carbono, material particulado y otros gases perjudiciales para la salud y el medio ambiente. Posteriormente, se realizó una actualización del inventario de residuos que llegan a la empresa y se procedió a revisar tesis anteriores sobre los resultados obtenidos de las emisiones que genera el incinerador de la empresa HAZWAT. Se obtuvieron parámetros fuera de norma en (CO<sub>2</sub>) y (CO), por lo cual se pensó en reducir estos gases. Se escogió

el primero para reducir sus emisiones y evitar que contamine la atmósfera, realizando su captación y posterior mineralización.

Para la obtención del porcentaje adecuado de carbonato de potasio ( $K_2CO_3$ ) se realizó una revisión bibliográfica de tesis realizadas en la empresa y documentos científicos, se tomó como referencia la tesis "Gestión de desechos tóxicos y peligrosos con materiales impregnados con hidrocarburos, fármacos, biopeligrosos y resinas de la empresa Hazwat mediante la incineración" (Mogollón & Vallejo, 2022). Donde se revisó el balance de masa y consecuentemente determinar la cantidad exacta de  $CO_2$  que produce la chimenea de la empresa HAZWAT.

### 2.3 INCINERADOR DE LA EMPRESA HAZWAT

Se visitó e inspeccionó las instalaciones del área de incineración de la empresa Hazwat. El ingeniero a cargo explicó la manera de operar de los incineradores de la empresa, indicó que es un horno fijo conformado por dos cámaras o también conocido como horno de aire controlado.



**Figura 5.** Horno fijo de dos cámaras

**Fuente:** (Gielar & Helios-Rybicka, 2013)

El horno fijo de dos cámaras está conformado por una cámara principal utilizada para volatizar la parte orgánica de los residuos sólidos, su forma generalmente es un tanque vertical u horizontal, y está diseñado con una cámara de combustión secundaria, fundamental en los equipos de incineración. Su función es calentar los compuestos orgánicos vaporizados a una temperatura de 900 a 1600 °C, de modo que el gas se oxida por completo.

### 2.3.1 DESCRIPCIÓN DEL INCINERADOR DE LA EMPRESA HAZWAT

La empresa Hazwat opera con el incinerador PENNRAM. Este tipo de incinerador es construido específicamente para la incineración de residuos industriales, médicos, construcción, municipales, entre otros (PENNRAM, 2022). En la figura 6, se muestra el incinerador que posee la empresa, sus características se detallan a continuación, según PENNRAM:



**Figura 6.** Incinerador de le empresa Hazwat

**Fuente:** Mogollón & Vallejo, 2022

**Máxima capacidad operativa:** 0.14 Kg/s

**Ciclo de precalentamiento:** 870 – 980 °C

**Temperatura de precalentamiento:** Esta es necesaria para que los quemadores arranquen con normalidad, cuando el sistema se encuentre frío o en modo de reposo, se los calienta al reiniciar el sistema. Su principal objetivo es elevar la temperatura a 760 °C antes de introducir los residuos.

**Temperatura mínima secundaria:** 871 a 1 000 °C

**Carga promedio:** 100 kg por 12 minutos (ciclo)

Este incinerador va a expulsar los gases de combustión provenientes del horno principal hacia el horno de postcombustión. El horno de combustión alcanza los 870 °C, posteriormente libera los gases a una temperatura de 1 200 °C, con un tiempo de residencia de tres segundos antes de pasar a los enfriadores. (PENNRAM, 2015)

## 2.4 MÉTODO DE CAPTURA DE CO<sub>2</sub>

Debido al tipo de incinerador que gestiona Hazwat, se optó por el método de postcombustión con subsistema de absorción química para la captura de CO<sub>2</sub>. Este gas es captado por absorción química, es decir, mediante el uso de una solución de líquido alcalino denominada solución absorbente. El proceso elimina el dióxido de carbono de una

corriente de gas al poner en contacto la corriente de gas con un solvente químico y hacerlo reaccionar con el solvente químico como lo es el etileno para formar un producto intermedio que reaccionará con el oxígeno y el óxido de etileno (OE). (Fraga, 2017)

Los sistemas que funcionan a través del método de postcombustión son adecuados para fuentes estacionarias de emisión de CO<sub>2</sub> grandes, como incineradores, ya que se va a procesar desechos industriales, desechos municipales, los cuales maneja la empresa Hazwat (Fraga, 2017; Mogollón & Vallejo, 2022).

Los sistemas de postcombustión que utilizan absorción química son económicos con una alta eficiencia de captura y no requieren un consumo de energía significativo. La mayoría de los procesos de absorción química utilizan soluciones salinas que contienen sodio o potasio. (López, 2010)

Para la simulación del presente trabajo de integración curricular se optó por utilizar hidróxido de potasio o potasa (KOH) como solución alcalina para la captación de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), utilizando concentraciones de 25, 30, 45, 50% previamente calculados con el balance de masa y la ecuación de gases ideales. (ver ecuación 1 y 2)

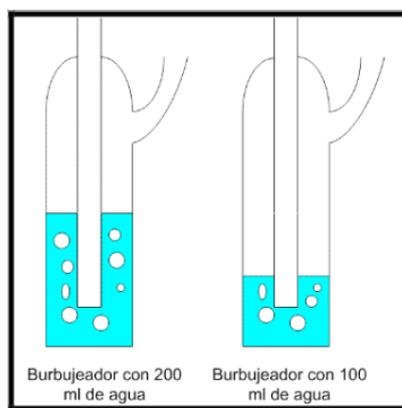
## **2.5 USO DEL EQUIPO DE MONITOREO ISOCINÉTICO**

El instrumento utilizado para capturar CO<sub>2</sub> fue un dispositivo de monitoreo de velocidad constante, también conocido como tren de velocidad constante. Este dispositivo se usa comúnmente para determinar la presencia de partículas en las corrientes de aire. A continuación, se detalla el procedimiento para la captura de gas con el equipo anterior.

### **2.5.1 PREPARACIÓN DEL TREN DE MUESTREO**

La preparación inicial del equipo incluyó seleccionar filtros para atrapar partículas y pesar el impactador (también llamado burbujeador) y los reactivos internos. Las unidades de monitorización isocinética más comunes suelen contener 4 elementos de choque dentro de un condensador o caja de refrigeración. (Ronald & Condor, 2018). Luego se eligió un filtro con suficiente porosidad para atrapar partículas en la corriente de aire. Se secó en estufa a 105°C durante 2 horas. (Haro, 2009). Se utilizó una balanza analítica para determinar el peso del filtro. Una vez que se obtuvo el peso del filtro, se almacenó en una placa de petri como se recomienda en el Método 5 de la EPA y se colocó en un compartimiento de tren de velocidad constante llamado horno o caja caliente donde la temperatura alcanza los 120 °C. Finalmente, se pesó la cantidad de gel de sílice en una balanza y se secó en estufa a 175 °C durante 2 h. (Haro, 2009).

El método 5 de la EPA indica que se debe determinar el material de la partícula. La unidad de impacto debe realizarse en el siguiente orden e incluye los siguientes reactivos: las dos primeras burbujas deben ser de 100 ml de agua destilada. De 200 a 300 gramos de silicio, el silicio debe almacenarse para distancia de agua en el flujo de aire.



**Figura 7.** Burbujeadores Isocinéticos

**Fuente:** (Haro, 2009)

Sin embargo, el presente trabajo de integración curricular no buscó determinar el material particulado que emite la chimenea de la empresa Hazwat, si no captar las partículas de dióxido de carbono emitidas por este.

### 2.5.2 TOMA DE LA MUESTRA

El muestreo depende de varios factores. En primer lugar, se debió seleccionar una boquilla del diámetro adecuado, este depende del caudal de gas que se vaya a captar, para conectar a la sonda y, lo más importante, una que permita que la muestra entre en el canal de muestreo a la misma velocidad que el flujo de aire que circula en la tubería o chimenea. El área de la boquilla afecta en gran medida la tasa de muestreo. (Ronald & Condor, 2018) Una vez lista la sonda de la boquilla, se realizó la prueba de fuga isocinética. El sistema de calentamiento de la sonda estuvo conectado a la caja de calentamiento y la temperatura rondó los 120 °C. Posteriormente se niveló la máquina y se verificó que el manómetro esté a cero. Luego se cerró la boquilla de la sonda y se encendió la bomba de succión mientras se abrió simultáneamente la válvula fina o de derivación y se cerró la válvula de control fino o gruesa. Una vez realizado este proceso, se cerró lentamente la válvula de derivación y se abrió la válvula de control de polvo fino. Cuando se detectó una presión de 0,50 atm (380 mmHg) y se leyó una lectura de fuga, la boquilla de la sonda quedó expuesta. La fuga

dio un resultado inferior a 570 ml/min, se apagó la bomba y se cerró ambas válvulas. (Haro, 2009)

Después de completar la prueba de fugas, se conectó nuevamente el sistema de calentamiento de la sonda y la caja de calentamiento, la temperatura fue de aproximadamente 120 ° C, mientras se colocó el impactador previamente pesado y se lo colocó en la secuencia anterior. Previamente se ubicó en el condensador o también llamado caja de enfriamiento. Este contiene hielo que rodea el burbujeador y gracias a esto redujo la temperatura de la corriente de aire a unos 20°C. Se esperó unos 20 minutos para que la caja calefactora alcance una temperatura de 120°C. (Haro, 2009; Ronald & Condor, 2018).

Se insertó la sonda en el muestreador de la chimenea e inmediatamente se procedió a encender el muestreador. Según (Ronald & Condor, 2018; Echeverri, 2006), el tiempo de muestreo no debe ser inferior a 1 hora. Sin embargo, dado que la sonda de velocidad constante de acero inoxidable de Apex Instruments (Mogollón & Vallejo, 2022) soportó una temperatura máxima de 650 °C, mientras que la temperatura de escape de la chimenea del incinerador fue de alrededor de 850 °C, el tiempo de muestreo se limitó a 10 minutos para evitar daños graves a la sonda.

## **2.6 DETERMINACIÓN DE ACIDEZ EN LA SOLUCIÓN ABSORBENTE**

Una vez que el CO<sub>2</sub> quedó atrapado en la solución absorbente, se realizó una valoración ácido-base utilizando hidróxido de sodio (NaOH) a una concentración de 0,02 N como valorante y un indicador de fenolftaleína. Esta prueba de laboratorio se realizó para estimar la acidez de la solución absorbente, que fue un método indirecto para determinar si hay gas atrapado. El resultado se reportó en unidades de mg/L CO<sub>2</sub>.

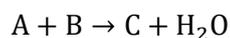
Para esta prueba, primero se preparó una solución madre de hidróxido de sodio 1 N en un matraz volumétrico de 100 mL. Luego se diluyó esta solución a una concentración de 0,02 N. Se realizaron los cálculos apropiados para determinar la cantidad de solución madre necesaria para alcanzar las concentraciones anteriores (ver anexos IV, V, VI). Luego se pipeteó el volumen requerido en otro matraz aforado de 100 mL y enrasó con agua destilada. Luego, se transfirió una porción de la solución diluida a un vaso de precipitados y luego a una bureta de 25 mL. Con un cilindro graduado se transfirieron 25 mL de la solución absorbente a un matraz Erlenmeyer de 100 mL y se agregó 2 o 3 gotas de indicador de fenolftaleína hasta que se produjo el cambio de color y se registró la cantidad consumida.

Finalmente, se obtuvo la concentración en mg/L de CO<sub>2</sub> de la solución absorbente. Los ejemplos de cálculo de soluciones se pueden encontrar en anexos (ver anexos III y IV)

## 2.7 DETERMINACIÓN DE CONCENTRACIONES DE HIDRÓXIDO DE POTASIO PARA ELABORACIÓN DE ADOQUINES

Una vez revisada la bibliografía y de escoger la solución alcalina que servirá para la captación del CO<sub>2</sub>. Se procedió a realizar los cálculos estequiométricos para obtener la ecuación resultante de la cuál partiremos a calcular las diferentes concentraciones de la sal básica resultantes de la mineralización de CO<sub>2</sub>.

Como se mencionó la solución alcalina es potasa cáustica (KOH) debido a su alta eficiencia al captar y mineralizar el dióxido de carbono. Se obtuvo la ecuación 1.



**Ecuación 1.** Balance de masa

**Fuente:** (Química, 2022)

Donde:

- A= Reactivo 1
- B= Reactivo 2
- C= Producto

La ecuación estequiométrica se igualó mediante el método de tanteo, debido a que no presentó dificultades como para utilizar un método más complejo. Así se obtuvo como resultado carbonato de potasio y agua al reaccionar potasa con dióxido de carbono. La cual sirvió para realizar los cálculos de las diferentes concentraciones.

### 2.7.1 CÁLCULOS DE CONCENTRACIONES DE CARBONATO DE POTASIO (K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)

Debido a que por problemas técnicos logísticos (explicados con anterioridad) no fue posible captar el CO<sub>2</sub> en la cantidad necesaria para los adoquines y por esta razón se optó por realizar una estimación de la cantidad de carbonato de potasio que se produciría, y con esto se prepararon soluciones base a medida de soluciones simuladoras. Se trabajó con diferentes concentraciones de soluciones (25, 30, 45, 50%) que se encontraron que podrían ser aquellas obtenidas en el proceso de captación. Cabe recalcar nuevamente que

estos porcentajes son referenciales, en base a una revisión de bibliografía y cálculos estequiométricos.

Para esto, se inició con la revisión bibliográfica de la tesis “Gestión de desechos tóxicos y peligrosos con materiales impregnados con hidrocarburos, fármacos, biopeligrosos y resinas de la empresa Hazwat mediante la incineración” (Mogollón & Vallejo, pág.173, 2022). La cuál se denominó levantamiento de información secundaria. (ver anexos VI y VII). Donde se sacaron los siguientes datos para el cálculo:

- Presión barométrica= 546 mmHg
- Volumen de gas muestreado= 1.4 m<sup>3</sup>
- Temperatura= 62°C =335 °K
- CO<sub>2</sub> producido = 4.63%

Por lo que se procedió a aplicar la ecuación de gases ideales

$$P * V = n * R * T$$

### **Ecuación 2.** Ley de gases ideales

Donde:

- P= presión atmosférica (atm)
- V= volumen (L)
- n= N° de moles (moles)
- R= constante universal de los gases ideales
- T= Temperatura absoluta (°K)

Se reemplazaron los datos en la ecuación 2 y se obtuvo el número de moles totales producidos por la chimenea.

Una vez que se obtuvieron las moles totales de la chimenea se procedió a calcular las moles de CO<sub>2</sub> producidas, por lo que se utilizó el porcentaje de dióxido de carbono emitido por la chimenea de la empresa Hazwat. Se determinaron los siguientes resultados, con la ecuación 3.

$$nT * \%CO_2$$

### **Ecuación 3.** Ecuación para cálculo de moles producidas

Donde:

- nT= número de moles producidas
- %CO<sub>2</sub>= porcentaje de CO<sub>2</sub> producido por la chimenea de Hazwat

Con el resultado se obtuvieron las moles de CO<sub>2</sub> emitidas por el incinerador de la empresa Hazwat, sin embargo, se necesita saber cuánto produce en 1 hora, porque como se explicó anteriormente en la simulación de captura de dióxido de carbono se necesita una hora para que se llenen los impingers. Por lo que se procedió a calcular cuánto CO<sub>2</sub> se producen en este tiempo, con la ecuación 4.

$$nT \text{ CO}_2 * \frac{60 \text{ min}}{72 \text{ min}} * 1 \text{ h}$$

**Ecuación 4.** Ecuación para cálculo de moles producidas en 1 hora

Donde:

- nT= número de moles producidas por el incinerador

Se tomó en cuenta el tiempo de muestreo según las referencias bibliográficas que son 72 minutos y con este dato se procedió a ajustar a una hora, que es el tiempo de llenado de los impingers.

Una vez obtenidas las moles de CO<sub>2</sub> producidas en una hora se procedió a calcular el flujo máximo de dióxido de carbono. Simplificando las moles y multiplicando la cantidad de mol por el peso molecular de dióxido de carbono, con la ecuación 5.

$$nT \frac{\text{moles de CO}_2}{\text{h}} * \frac{44 \text{ g de CO}_2}{1 \text{ mol de CO}_2}$$

**Ecuación 5.** Ecuación para cálculo de flujo máximo de CO<sub>2</sub>

Donde:

- nT= número de moles producidas por el incinerador

Con el resultado de la cantidad de CO<sub>2</sub> producido en una hora se realizó una división por el tiempo de burbujeo de solución en cada impinger, según consultado a expertos, el tiempo de burbujeo es de 15 minutos en cada impinger. Para esta simulación se utilizaron cuatro impingers.

$$\frac{nT \text{ g de CO}_2}{4} = x$$

**Ecuación 6.** Ecuación para cálculo de flujo másico de CO<sub>2</sub> por cada impinger

Donde:

- nT= número de moles producidas por el incinerador (g)
- x= masa de CO<sub>2</sub> por cada impinger (g)

Esto quiere decir que se obtendrá “x” g de masa en cada 100 ml de solución. Como se explicó con anterioridad, se procedió a definir concentraciones de 25, 30, 45, 50% de la

sal; ya que estos cálculos son resultantes de la simulación de captura de CO<sub>2</sub> en la chimenea de Hazwat. En este sentido se calculó la cantidad para cada concentración mencionada, gracias a las ecuaciones, 7, 8, 9 y 10.

Para cada concentración (m) de K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> se procedió a utilizar el resultado de la ecuación 7.

$$x * (m\%) = D$$

**Ecuación 7.** Ecuación para cálculo de flujo másico de CO<sub>2</sub> por cada concentración

Donde:

- x= masa de CO<sub>2</sub> por cada impinger (g)
- m= concentración (%)
- D= flujo másico por cada concentración

Posteriormente al resultado de la ecuación 7 se transformó a mg y se obtuvo la masa de CO<sub>2</sub> necesarias.

$$D * \frac{1000\text{mg}}{1\text{g}} = E$$

**Ecuación 8.** Ecuación para cálculo de flujo másico de CO<sub>2</sub> en mg

Donde:

- D= Flujo másico por cada concentración (g)
- E= Flujo másico de CO<sub>2</sub> (mg)

Luego se procedió a obtener el resultado de la ecuación 9 a partes por millón (ppm)

$$\frac{E \text{ mg CO}_2}{100 \text{ ml}} * \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} = F$$

**Ecuación 9.** Ecuación para cálculo de flujo másico de CO<sub>2</sub> en ppm

Donde:

- E= Flujo másico de CO<sub>2</sub> (mg)
- F= Flujo másico de CO<sub>2</sub> (ppm)

Con ayuda de la ecuación 1 y de la ecuación 8 se obtuvo la cantidad de moles de carbonato de potasio presentes en cada concentración.

Con lo cual se tiene que:

$$\frac{D}{44 \text{ g/mol de CO}_2} = G$$

**Ecuación 10.** Ecuación para cálculo de moles de K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>

Donde:

- D= Flujo másico por cada concentración (g)
- G= °N de moles de  $K_2CO_3$  producidas en la concentración (moles)

Se procedió a calcular la masa necesaria de carbonato de potasio con el resultado de la ecuación 10 y se tuvo que:

$$G * \frac{138 \text{ g de } K_2CO_3}{1 \text{ mol de } K_2CO_3} = H$$

**Ecuación 11.** Ecuación para cálculo de masa de  $K_2CO_3$

Donde:

- G= °N de moles de  $K_2CO_3$  producidas en la concentración (moles)
- H= Masa de  $K_2CO_3$  (g)

Luego, se procedió a dividir el resultado de la ecuación 11 por cada litro de agua que se consumió para la elaboración de adoquines, mediante la ecuación 12 y posteriormente se multiplicó el resultado por seis litros, ya que es la cantidad de agua necesaria para elaborar una serie de 8 adoquines, lo cual se refleja en la ecuación 13

$$\frac{H}{100 \text{ ml}} * \frac{1000 \text{ ml}}{1L} = I$$

**Ecuación 12.** Ecuación para cálculo de masa de  $K_2CO_3$

Donde:

- H= Masa de  $K_2CO_3$  (g)
- I= Masa de  $K_2CO_3$  por cada L de agua

$$I * cL H_2O = J$$

**Ecuación 13.** Ecuación para cálculo de masa de  $K_2CO_3$  por cada litro de agua

Donde:

- I= Masa de  $K_2CO_3$  por cada L de agua
- cL= Litros de agua consumidos

Donde se obtiene la cantidad de masa necesaria para fabricar adoquines con cada concentración.

Para el cálculo de las concentraciones de 30, 45, 50% de carbonato de potasio se realizó los mismos cálculos anteriores, solo cambia la concentración.

## 2.8 PROCESO DE FABRICACIÓN DE LOS ADOQUINES

La empresa Hazwat, cuenta con una bloquera, la cual se utilizó para la fabricación de los adoquines. Para esto se seleccionaron las herramientas, así como los equipos y se muestran en la tabla 4.

**Tabla 4.** Equipos y Materiales para la elaboración de adoquines

Equipos	Materiales
Maquina con motor eléctrico para la fabricación de los adoquines pertenecientes a la empresa Hazwat	Pala N°4
Balanza	Arena
Mezclador mecánico	Cemento PORTLAND
	Agua
	Carbonato de Potasio ( $K_2CO_3$ )

### 2.8.1 DOSIFICACIÓN

Para el proceso de dosificación de los materiales, se necesitó conocer la cantidad de carbonato de potasio a encapsular, de igual forma fue necesario saber la cantidad de adoquines que se realiza en un ciclo. Según la información del técnico de la bloquera, en un ciclo de producción se elaboran 8 adoquines. Con esta información se realizaron los cálculos para dosificar correctamente los 5 kg de  $K_2CO_3$  en las concentraciones presentes en la tabla 5.

Para conocer la cantidad de cemento que se utilizó para la fabricación de adoquines se utilizó otra vez lo dicho por la persona encargada de la elaboración de los adoquines, y se especificó que con un quintal de cemento se realizan 66 adoquines. En este sentido, se procedió a realizar el cálculo, donde se obtuvo la cantidad de cemento necesaria para la realización de 40 adoquines con sus respectivas dosificaciones de carbonato de potasio. (Ver tabla 5)

**Tabla 5.** Cálculo de cemento dosificación de cemento

N° Adoquines	Cantidad de cemento (Kg)
66	50,00
40	30,30

La cantidad de cemento necesaria para las concentraciones de 0, 25, 30, 45, 50% se obtuvo realizando una división, donde el resultado final fue 3.79 kg para cada concentración, la cual se muestra en la tabla 6.

**Tabla 6.** Cálculo de dosificación de cemento para cada concentración

Cantidad	Dosificaciones	Cemento necesario (Kg)
30,30	8	3,79

### 2.8.2 DOSIFICACIÓN DE AGUA

El agua es el material más importante para la fabricación de adoquines, cuando esta entra en contacto con el resto del material (cemento, arena) genera una reacción química la cual es denominada como proceso de hidratación. con la ayuda de esta reacción el cemento obtiene sus propiedades físicas y mecánicas. La calidad de agua tiene que estar libre de impurezas y tener un pH entre 7 y 8. (Urrutia, 2021)

Para la elaboración de adoquines en un ciclo, se necesitan 6 litros de agua por cada ciclo, es decir, se necesitaron 30 litros de agua para obtener 40 adoquines.

### 2.8.3 PROCESO DE MEZCLA

En este proceso se unió de manera proporcional y técnica los materiales de cada concentración, los cuales son necesarios para la fabricación de adoquines.

Para el mezclado primero se procedió a medir la cantidad necesaria de material en cada concentración, tanto el cemento, la arena y la solución de carbonato de potasio. Primero se inició colocando 1 litro de agua en un balde de 10 litros, posteriormente se añadieron los 3.79 kg de cemento y se fue homogenizando la mezcla. Se añadió la mezcla al mezclador mecánico y se agregaron los 5 litros de agua restantes poco a poco, de igual

forma la solución de carbonato de potasio se la midió en una balanza para cada concentración y se lo añadió a la mezcla. Los materiales giran dentro del trompo de la máquina hasta tener una consistencia maciza que se pueda sostener en la mano. (Ver anexo VII)

#### **2.8.4 ELABORACIÓN DE ADOQUINES**

Previo a la elaboración de adoquines se hizo una visita técnica a las instalaciones de la empresa Hazwat, donde se argumentó que el encapsamiento en adoquines es la mejor opción, por lo cual se decidió trabajar con estos. Antes de empezar la fabricación con la ayuda de los técnicos se verificó que la máquina de motor y la máquina de mezclado funcionen correctamente y estén engrasadas. Posteriormente se separaron los moldes de adoquines que se van a utilizar y se los colocó a la máquina de manera que el molde esté bien colocada y centrado en la máquina. Luego, se añadió la mezcla en la máquina de adoquines y se accionó la palanca de arranque. La máquina empezó a compactar la mezcla con movimientos de vibración, una vez que la mezcla esté compactada en cada molde se activó la palanca de seguridad y se procedió a retirar los adoquines.

Finalmente, los adoquines fueron almacenados y etiquetados por cada concentración utilizada y se los ordenó en un lugar fresco para el proceso de fraguado. Lo cual se puede observar en los anexos VIII y IX.

#### **2.8.5 FRAGUADO Y CURADO**

Una vez que los adoquines fueron ordenados y etiquetados se los dejó en reposo por 24 horas, ya que este es el tiempo donde empieza el proceso de fraguado inicial. Posteriormente empezó el curado, donde se aplicó agua de forma directa a los adoquines en forma de lluvia. Los ensayos mecánicos se necesita un curado de 12 a 24 horas, sin embargo, en este estudio se utilizó adoquines fraguados a los 30 días. (Ver anexo X)

### **2.9 ENSAYOS MECÁNICOS**

Los ensayos mecánicos a los adoquines se realizaron en el laboratorio de ensayos, mecánica de suelos y rocas (LEMSUR) perteneciente a la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional (E.P.N)

### 2.9.1 ENSAYO DE COMPRESIÓN

La resistencia a los adoquines se obtuvo mediante la norma ASTM C140/C4140 M-18 y la norma INEN 1488, donde se encuentra la información y requisitos necesarios para la fabricación de adoquines, la resistencia a la compresión que debe poseer cada uno de los adoquines y su clasificación.

Según la Norma Ecuatoriana de Construcción (NTE, 2017) se necesitan 12 adoquines para realizar este ensayo, pero como se fabricaron únicamente 8 por cada concentración, no se pudo cumplir con este requisito y se trabajó con una menor cantidad. Para este ensayo se entregaron 3 adoquines por cada concentración.

El procedimiento de este ensayo empieza codificando los adoquines que se van a utilizar, la codificación se lo hace por su respectiva concentración y se toma los datos de sus dimensiones (largo, ancho, espesor) para este ensayo se colocó la siguiente codificación. (Ver tabla 7).

**Tabla 7.** Codificación de adoquines por concentración

Código	Concentración (%)
35-I-E-01	25
35-I-E-02	25
35-I-E-03	25
35-I-E-06	30
35-I-E-07	30
35-I-E-08	30
35-I-E-11	45
35-I-E-12	45
35-I-E-13	45
35-I-E-16	50
35-I-E-17	50
35-I-E-18	50
35-I-E-21	0 (Blanco)
35-I-E-22	0 (Blanco)
35-I-E-23	0 (Blanco)

Previamente a la fabricación de adoquines se realizó el alisado en la cara delantera de los adoquines, por lo que no fue necesario realizar este proceso para el ingreso a la máquina de compresión.

Una vez que los adoquines estuvieron preparados se los ingresó a la máquina de compresión y resistencia en adoquines. La carga máxima del adoquín se obtuvo mediante la fuerza de presión de la máquina.

Con el resultado de la carga máxima se procedió a calcular el área de los adoquines, obteniendo la resistencia del adoquín y para así a comparar el resultado con el tipo de trabajo y cuáles adoquines no cumplen con las especificaciones de la norma. (Ver tabla 8).

**Tabla 8.** Clasificación de tránsito y tipo de adoquín.

Tipo de uso	Número de vehículos por día mayores a 3t brutas	Total, equivalente de repeticiones de eje estándar después de 20 años de servicio	Forma recomendada de adoquín	Resistencia característica (Mpa) compresión a los 28 días
Peatonal	0	0	A, B, C	20
Estacionamiento y calles residenciales	0-150	$0-4.5 \times 10^5$	A, B, C	30
Caminos secundarios y calles principales	150-1500	$4.5 \times 10^5 - 4.5 \times 10^6$	A	40

Fuente: (NTE INEN, 2018)

## 2.10 ENSAYO DE ABSORCIÓN

Según la norma (INEN 3040, 2017) del Instituto de Normalización, en el anexo D se emplea la determinación del total de agua absorbida por el adoquín. Este índice se expresó con la relación de la diferencia del peso saturado del adoquín menos el peso del adoquín completamente seco entre el peso del adoquín seco se expresó en porcentaje.

Para este ensayo se utilizaron 2 adoquines por cada concentración, es decir, 10 adoquines. Cabe recalcar que si los adoquines superan los 5 kg de peso tienen que ser cortados para mantener el espesor y así una probeta que no supere los 5 kg.

### 2.10.1 MATERIALES NECESARIOS PARA EL ENSAYO DE ABSORCIÓN

Para este ensayo se utilizaron los dos adoquines sobrantes, con ayuda de una brocha y una franela se los limpió hasta que no contengan polvo o restos de material particulado, en

la tabla 9 se muestra la codificación de los adoquines que se utilizaron en este ensayo. (ver tabla 9)

**Tabla 9.** Codificación de adoquines para ensayo de absorción

<b>Código</b>	<b>Concentración (%)</b>
35-I-E-04	25
35-I-E-05	25
35-I-E-09	30
35-I-E-10	30
35-I-E-14	45
35-I-E-15	45
35-I-E-19	50
35-I-E-20	50
35-I-E-24	0 (Blanco)
35-I-E-25	0 (Blanco)

Una vez que los adoquines se encontraban limpios y correctamente etiquetados, se procedió a revisar que los materiales para este ensayo se encuentren en buen estado. (ver tabla 10).

**Tabla 10.** Materiales y equipos necesarios para el ensayo de absorción

<b>Cantidad</b>	<b>Materiales y Equipos</b>
1	Estufa de secado
1	Cepillo o brocha
1	Recipiente o tanque
1	Agua Potable
1	Balanza
1	Tela

Este ensayo se basó en el principio de Arquímedes, donde se afirma que todo cuerpo que esté parcial o completamente sumergido en un fluido va a experimentar un empuje vertical hacia arriba igual al peso del fluido desalojado. (UAEH, 2020)

Los adoquines se introdujeron en un agua potable hasta que alcancen una masa constante o se encuentren completamente saturados, los adoquines fueron separados 2 cm de cada

uno para que sobrepase el agua al adoquín. Se mantuvieron en el tanque por 5 días para que tengan una buena saturación. Posteriormente se los secó con una tela seca para retirar el exceso de agua y finalmente se los pesó. (NTE INEN 3040, 2017)

Se colocó a los adoquines en la estufa de secado a 105 °C, manteniendo una distancia de 2 cm por un tiempo mínimo de secado de 3 días y así se obtuvo una diferencia mínima de la masa, la cual es de 0.1%. (NTE INEN 3040, 2017)

Según (NTE INEN 3040, 2017) para calcular el porcentaje de absorción de los adoquines se utilizó la siguiente fórmula.

$$W_a = \frac{M_1 - M_2}{M_2} * 100\%$$

#### **Ecuación 14. Porcentaje de absorción**

**Fuente:** (NTE INEN 3040, 2017)

Donde:

- Wa= Porcentaje de absorción
- M1= masa del adoquín saturado (g)
- M2= masa del adoquín seco (g)

## **2.11 ENSAYO DE LIXIVIACIÓN EN ADOQUINES**

Para este ensayo se utilizó 1 adoquín por cada concentración. Este ensayo se realizó siguiendo la metodología de la EPA 1315. Esta norma sugiere que los adoquines sean sumergidos por completo en agua destilada, para que se simule una escorrentía en el ambiente, para lo que se comenzó con una limpieza previa de los adoquines con una brocha. El tiempo que dura este ensayo es de 14 días.

Los adoquines fueron introducidos en agua destilada donde empezó el proceso de lixiviación, una vez introducidos; fueron cubiertos con una funda plástica para evitar que se filtre material particulado o algún residuo del ambiente que pueda contaminar el lixiviado.

Las muestras fueron tomadas a los 14 días, según la norma EPA-1315. La toma de la muestra se llevó siguiendo la norma INEN 2176 y la norma de calidad *Standard Methods*. (ST. Ed 23, 2017); las cuales tratan procedimientos para muestreo de lixiviados. Se tomó una muestra simple por cada concentración, para esto se introdujo un vaso de precipitación previamente esterilizado.

### **2.11.1 MEDICIÓN DE PH**

Este parámetro se midió en el laboratorio de la Escuela de Formación de Tecnólogos, se utilizó el pHmetro modelo Lovibond SD 50, para lo cual se procedió a tomar 200 mL de lixiviado en un vaso de precipitación, posteriormente se introdujo el pHmetro y se procedió a la lectura del resultado. En las cuatro muestras el valor del pH superó el 8.3, es decir que el lixiviado tenía presencia de carbonatos y bicarbonatos. (Ver anexo XIV)

### **2.11.2 COLOR APARENTE**

Para la medición de este parámetro se procedió a medir 10 mL del lixiviado previamente colocados en un vaso de precipitación. Se usó el espectrofotómetro modelo DR1900 de la marca HACH perteneciente al laboratorio de la Escuela de Formación de Tecnólogos, con el método "Method 8025 Color (Plantinum-Cobalt Standard Method).

Primero se procedió a colocar en una celda cuadrada de vidrio 10 mL de agua destilada para poder encerar el equipo, la cual se la denominó el blanco. Mientras que en otras 4 celdas se colocaron 10 mL de lixiviado.

Antes de introducir las celdas, fueron secadas con un papel y luego se las limpió con una franela de microfibra. Una vez encerado el equipo, se introdujeron las celdas de 10 mL de cada concentración de lixiviado, se colocó la tapa de protección para evitar el ingreso de luz exterior para que se evite la alteración de los resultados. Estos se expresaron en unidades de platino cobalto (Pt-Co). (Ver anexo XV)

### **2.11.3 TURBIEDAD**

Para este parámetro se utilizó el turbidímetro de la marca HACH modelo 2100Q. Primero se realizó la calibración del equipo, para lo que, se utilizaron estándares de 10, 100 y 800 NTU para su calibración.

Para medir la turbidez se trasvasó 10 mL de cada muestra de lixiviado por cada concentración en celdas circulares de vidrio. Se secaron con una toalla y luego se limpiaron una franela de microfibra. Posteriormente a la limpieza de cada celda, cada una fue insertada en el turbidímetro y se realizó la medición. Los resultados se expresan en unidades nefelométricas (NTU) como se lo muestra en los anexos XVI y XVII.

### 2.11.4 ALCALINIDAD

Este ensayo se realizó con el fin de determinar la cantidad de  $K_2CO_3$  que lixivió de los adoquines. Debido al alto pH obtenido, titular con una concentración de 0.02 N de titulante resultó ser muy baja para que exista cambio de color; por lo tanto, se utilizó  $H_2SO_4$  con una concentración de 2.68 N para la realización de este ensayo. (Ver anexo XVIII)

Para determinar la alcalinidad en el lixiviado de cada concentración se realizó una titulación ácido-base, se utilizó como agente titulante el ácido sulfúrico a una concentración de 2.68 N como se mencionó. Se utilizaron como indicadores de fenolftaleína y anaranjado de metilo para la determinación de carbonatos y bicarbonatos respectivamente.

Se colocó la bureta en el soporte universal, una vez lista la bureta, se procedió a purgar la bureta, se transfirió un poco de agente titulante a un vaso de precipitación de 50 mL y posteriormente se echó a la bureta. Para asegurarse que todo el agente titulante bañe a la bureta se abrió la llave de la bureta abruptamente. Una vez terminado el proceso de purga se aforó la bureta con el agente titulante.

Se transfirieron 100 mL de lixiviado a un matraz Erlenmeyer de 250 mL. Una vez transferido el lixiviado se procedió a agregar 3 gotas de fenolftaleína y se agitó el matraz. Como se presentó un color púrpura, se tituló con  $H_2SO_4$  a 2.68 N hasta que hubo el vire de color transparente (incoloro) y se registró el volumen gastado de agente titulante. La presencia de color púrpura indicó que existen carbonatos presentes en el lixiviado y que el pH es mayor a 8.3 (Romero, 2009)

Después se agregaron 3 gotas de anaranjado de metilo y se agito el matraz nuevamente. Se observó un color amarillo, por lo cual se procedió a titular con ácido sulfúrico a 2.68 N hasta que exista el cambio de color a un rojo ladrillo y se registró el volumen gastado de agente titulante. (Ver anexo XIX). El color amarillo indicó presencia de bicarbonatos en el lixiviado y que el pH es mayor a 4.5. (Romero, 2009)

Se utilizaron las ecuaciones 15 y 16 para determinar los resultados de la alcalinidad a la fenolftaleína y al anaranjado de metilo, los cuales se expresan en mg/L de  $CaCO_3$ .

$$\frac{A * N * 50000}{V_m}$$

**Ecuación 15.** Alcalinidad a la fenolftaleína

$$\frac{B * N * 50000}{V_m}$$

**Ecuación 16.** Alcalinidad total

Donde:

- A = Cantidad gastada de  $H_2SO_4$  hasta alcanzar el punto final de la fenolftaleína (mL)
- B = Cantidad gastada de  $H_2SO_4$  hasta alcanzar el punto final del anaranjado de metilo (mL)
- N = Normalidad del titulante
- $V_m$  = Volumen de muestra (mL)

Para conocer la cantidad de carbonato que continúa encapsulado se procede a realizar el cálculo teóricamente con la ecuación 17.

$$C_m = m_{cm} - AT$$

### **Ecuación 17. Cantidad de $K_2CO_3$ lixiviado**

Donde:

- $C_m$  = Cantidad de muestra que continúa encapsulada (mg)
- $m_{cm}$  = Masa de carbonato de potasio en el adoquín (mg)
- AT = Alcalinidad total (mg  $CaCO_3$ )

Para emplear la ecuación 17 se debe multiplicar a los resultados por 6, debido a que para realizar los adoquines se necesitaron 6 litros de agua, así las muestras se expresan en mg y para conocer el porcentaje de carbonato de potasio presente en el adoquín se debe realizar una regla de tres simple y al resultado multiplicarlo por 100.

### **2.11.5 DUREZA**

Este ensayo se realizó con la finalidad de determinar la dureza del lixiviado de cada concentración. Se usó el espectrofotómetro modelo DR1900 de la marca HACH perteneciente al laboratorio de la Escuela de Formación de Tecnólogos, con los programas “220 Dureza Ca” y “225 Dureza Mg”. (Ver anexo XX)

Primero se procedió a tomar 100 mL de lixiviado a un matraz, posteriormente se trasvasó a una probeta de 100 mL, se agregó 1 mL de indicador de calcio y magnesio (negro de eriocromo) del kit de dureza, luego se procedió a homogenizar la muestra por 30 segundos. Una vez homogenizada la muestra se colocó 10 mL de solución en 3 celdas cuadradas. Para la preparación del blanco se añadió 1 gotita de EDTA en la primera celda, luego se procedió a tapar con el corcho la celda y a homogenizar.

Para determinar la dureza magnésica en otra celda se procedió a colocar 1 gotita de EGTA e igualmente se taponó con el corcho y se homogenizó. Para la determinación de la dureza cálcica no fue necesario agregar ningún indicador en la tercera celda. Cada celda fue secada con papel y luego con una franela de microfibras. Para encerrar el equipo se procedió

a seleccionar el programa, primero se midió la dureza cálcica, por lo que se seleccionó el programa 220. Una vez encerado el equipo se introdujo la tercera celda ya que esta es la correspondiente para la medición de la dureza cálcica, luego se registró el valor expresado en mg/L de  $\text{CaCO}_3$ .

Para determinar la dureza magnésica, se seleccionó el programa “225 de Dureza Mg” como en el procedimiento anterior, primero se procedió a encerar con la primera celda que contiene EDTA, se la limpió con papel y con una franela de microfibra, una vez encerado se procedió a introducir la segunda celda igualmente limpia y se procedió con la medición. Los registraron los valores en mg/L de  $\text{CaCO}_3$ .

Una vez registrados los valores de dureza en cada concentración de lixiviado se procedió a determinar la dureza total mediante la ecuación 17.

$$DT = D_{Ca} + D_{Mg}$$

#### **Ecuación 18. Dureza Total**

Donde:

- DT = Dureza total (mg/L  $\text{CaCO}_3$ )
- $D_{Ca}$  = Dureza Cálcica (mg/L  $\text{CaCO}_3$ )
- $D_{Mg}$  = Dureza Magnésica (mg/L  $\text{CaCO}_3$ )

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.1 RESULTADOS DE LA ELABORACIÓN DE ADOQUINES**

Para la elaboración de los adoquines con las concentraciones de 25, 30, 45, 50% se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla 11

**Tabla 11.** Masa de carbonato de potasio por cada concentración utilizada

<b>Concentración utilizada (%)</b>	<b>Masa de <math>\text{K}_2\text{CO}_3</math> obtenida (g)</b>
25	729.18
30	875.05
45	1312.57
50	1458.41
Masa total	4375.21

Como se observa en la tabla 11, la cantidad total de masa que se necesitó para realizar el encapsulamiento de  $\text{K}_2\text{CO}_3$  fue de 4375.21 g, lo que equivale a 4.375 kg de reactivo. En

este sentido, se pudieron realizar 40 adoquines con la cantidad de reactivo utilizado ( $K_2CO_3$ ), cabe señalar que al final se retiraron 39 adoquines debido a que hubo una falla en la elaboración de estos, los cuales se pueden visualizar en anexos.

## 3.2 RESULTADOS DE ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN

Los lixiviados se obtuvieron con la metodología de la normativa de la EPA y la norma de calidad y sus respectivos análisis se realizaron en el laboratorio de la ESFOT, se presentaron los siguientes resultados para las dosificaciones de 25, 30, 45, 50%.

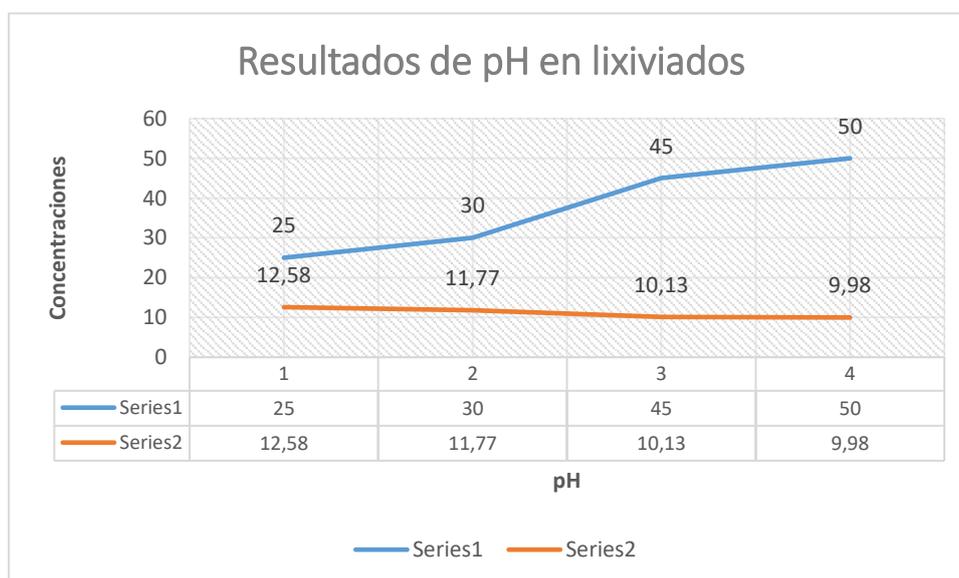
### 3.2.1 RESULTADOS DE PH

Para los resultados de lixiviación, primero se procedió a calcular el pH de cada lixiviado con sus respectivas concentraciones, las cuales se pueden ver en la tabla 12 y figura 8.

**Tabla 12.** pH obtenido por cada concentración de lixiviado

Concentración (%)	pH
25	12.58
30	11.77
45	10.13
50	9.98

**Figura 8.** Resultados de pH en lixiviados



Como se observa en la tabla 12 y la figura 8, el pH va disminuyendo conforme aumenta la concentración, esto quiere decir que a mayor concentración menor cantidad de pH, por lo que el lixiviado tiende a tener un pH básico y por esta razón se procedió a titular con  $H_2SO_4$ .

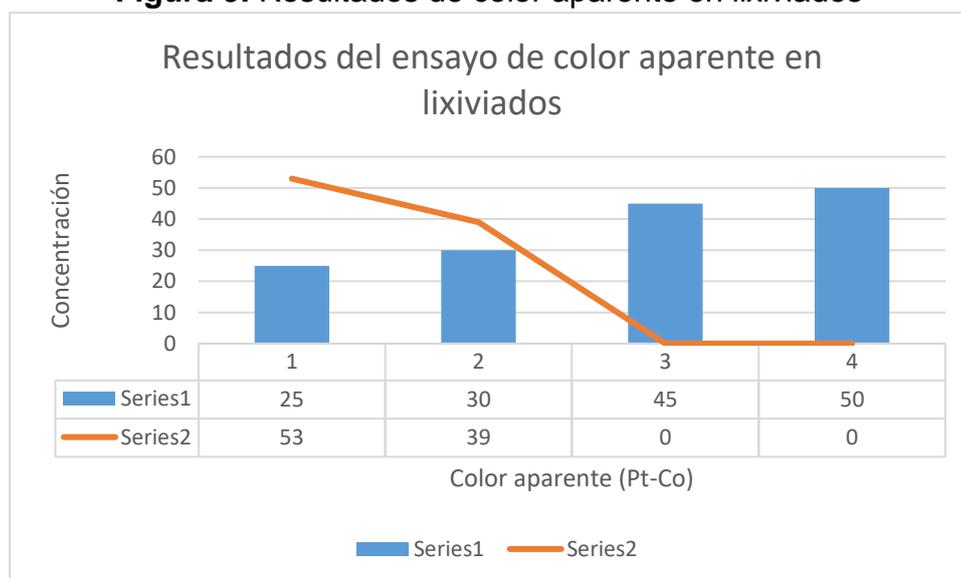
### 3.2.2 RESULTADOS DE COLOR APARENTE

Los ensayos de color aparente se los realizó en el laboratorio de la Escuela de Formación de Tecnólogos, este ensayo se realizó porque los lixiviados de las concentraciones de 25 y 30% presentaban coloración. En este sentido, se obtuvieron los siguientes resultados. (ver tabla 13 y figura 9)

**Tabla 13.** Resultados de color aparente en lixiviados

Concentración (%)	Color aparente (Pt-Co)
25	53
30	39
45	<15
50	<15

**Figura 9.** Resultados de color aparente en lixiviados



Como se ve en la figura 9, el color aparente disminuye conforme aumenta la concentración, esto quiere decir que a concentraciones más bajas de  $K_2CO_3$  el color de lixiviado será de un color amarillento. (Ver anexo XVIII) en cuanto a las concentraciones de 45 y 50% el

color aparente está en un rango <15 esto quiere decir que está por debajo del límite de detección que es hasta 15 Pt-Co, por lo que el lixiviado en estas concentraciones tuvo un color transparente (inoloro). (Ver anexo XV).

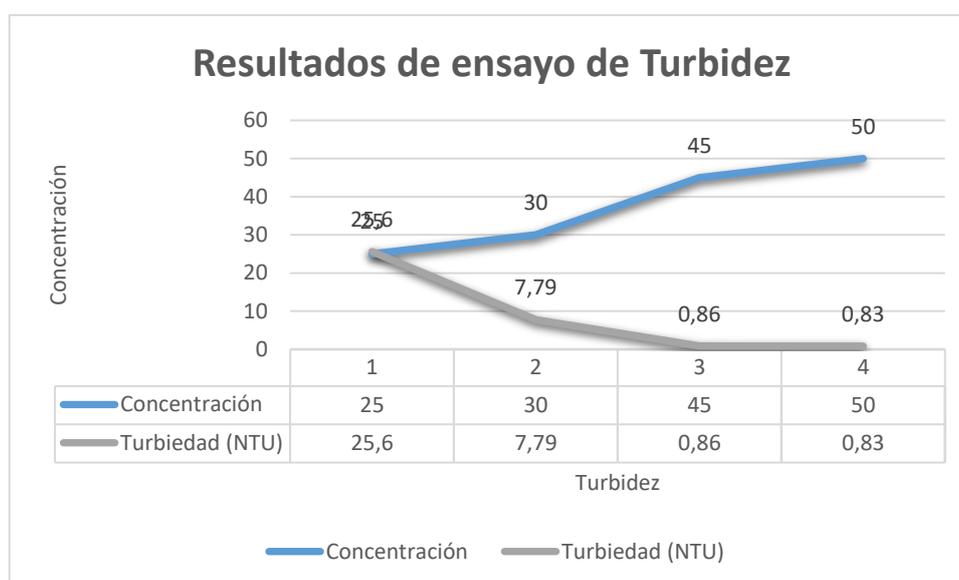
### 3.2.3 RESULTADOS DE TURBIEDAD

Para obtener mejores resultados del ensayo de lixiviación también se procedió a determinar la turbiedad en cada muestra lixiviado con su respectiva concentración, este ensayo se realizó en el laboratorio de la Escuela de Formación de Tecnólogos. (Ver anexo XVI) La turbiedad se analizó porque la muestra presentaba partículas suspendidas en mínima cantidad, esto podría ser porque parte del compuesto encapsulado lixivió. Los resultados de este ensayo se los puede observar en la tabla 14 y la figura 10.

**Tabla 14.** Resultados del ensayo de turbidez en el lixiviado

Concentración (%)	Turbiedad (NTU)
25	25,6
30	7,79
45	0,86
50	0,83

**Figura 10.** Resultados de ensayo de turbiedad



Como se aprecia en la figura 10 y la tabla 14, las concentraciones que presentaron mayor turbidez en sus lixiviados fueron las concentraciones de 25 y 30% respectivamente, mientras que en las concentraciones más altas la turbiedad bajo drásticamente, es decir, no presentaron restos de material particulado. (Ver anexo XVII)

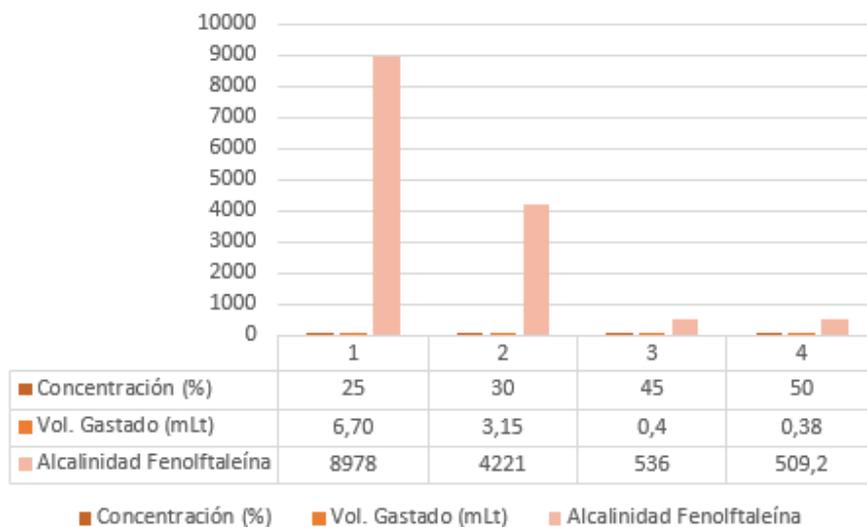
### 3.2.4 RESULTADOS DE ENSAYO DE ALCALINIDAD

Este ensayo se lo realizó en el laboratorio de la ESFOT. Este ensayo es uno de los más importantes porque se lo realizó con el fin de determinar la cantidad de  $K_2CO_3$  que lixivió de los adoquines, este ensayo necesito utilizar el  $H_2SO_4$  a 2.68 N como agente titulante para determinar la alcalinidad del lixiviado. En este sentido, se obtuvieron los siguientes resultados. (ver tabla 15)

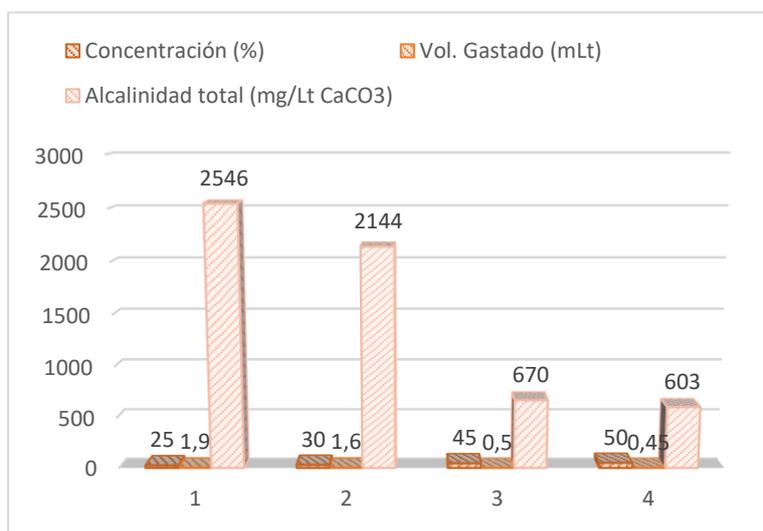
**Tabla 15.** Resultados del ensayo de alcalinidad

Concentración (%)	Vol. Gastado (mL)	Alcalinidad Fenolftaleína	Vol. Gastado (mL)	Alcalinidad total (mg/L $CaCO_3$ )
25	6,70	8978	1,90	2546
30	3,15	4221	1,60	2144
45	0,40	536,00	0,50	670
50	0,38	509,20	0,45	603

Como se puede observar en la tabla 15 el volumen gastado del agente titulante disminuye conforme aumenta la concentración, esto quiere decir que la alcalinidad a la fenolftaleína disminuyó también ya que se necesita de menos volumen de agente titulante para que exista el vire de color púrpura intenso a transparente. En cuanto al volumen gastado con el anaranjado de metilo, también disminuyó conforme la concentración de carbonato de potasio encapsulada era más alta. La alcalinidad total es el resultado de la titulación con anaranjado de metilo, es inversamente proporcional a la concentración; es decir, mientras más alta la concentración, será más baja la alcalinidad total, el resultado de la alcalinidad total se expresa en mg/L de  $CaCO_3$ . (ver figuras 11 y 12)

**Figura 11.** Alcalinidad a la fenolftaleína y volumen gastado de agente titulante

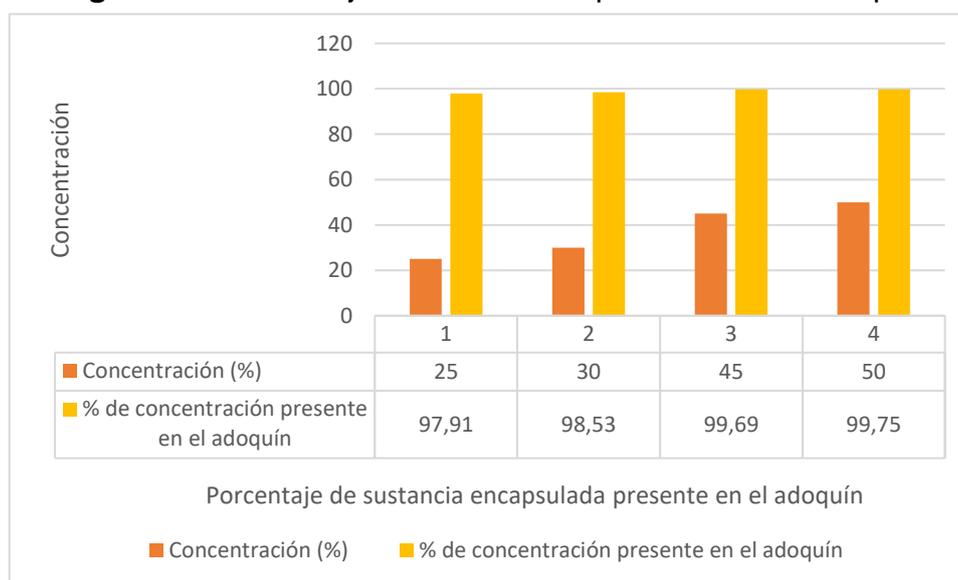
Resumiendo, los resultados de la tabla 15, se puede observar que mientras la concentración encapsulada es menor, la alcalinidad a la fenolftaleína va a aumentar, es decir que el lixiviado presentó carbonatos.

**Figura 12.** Alcalinidad total y volumen gastado de agente titulante

En la figura 12 se puede observar de la misma forma que si la concentración aumenta la alcalinidad el volumen gastado del anaranjado de metilo disminuye y la alcalinidad total también va a disminuir, con esto podremos saber cuánto se lixivió.

**Tabla 16.** Cantidad de carbonato de potasio presente en el adoquín

Concentración (%)	Muestra encapsulada (mg)	Carbonato lixiviado (mg)	Concentración en el adoquín (mg)	% de sustancia encapsulada presente en el adoquín
25	729180	15276	713904	97,91
30	875050	12864	862186	98,53
45	1312570	4020	1308550	99,69
50	1458410	3618	1454792	99,75

**Figura 13.** Porcentajes de carbonato presente en el adoquín

Como se puede observar en la tabla 16 y la figura 13. La sustancia encapsulada; es decir, el carbonato de potasio no lixivió en gran magnitud, las muestras más representativas son los adoquines fabricados con carbonato de potasio en concentraciones de 45 y 50%. Esto significa que si la concentración es mayor a 45% la sustancia no va a lixiviar en gran magnitud, lo que hace que la mineralización del CO<sub>2</sub> sea efectiva para elaborar material de construcción, en este caso adoquines.

### 3.2.5 RESULTADOS DEL ENSAYO DE DUREZA

El ensayo se realizó en el laboratorio de la Escuela de Formación de Tecnólogos, se implementó este ensayo debido a que el material fabricado (adoquines) está previsto que se implemente para parqueaderos, calles, calles secundarias, además

de ser un complemento adecuado del ensayo de lixiviación. Los resultados se muestran en la tabla 17.

**Tabla 17.** Resultados del ensayo de dureza al lixiviado

Concentración (%)	Dureza Magnésica (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Dureza Cálctica (mg/L CaCO <sub>3</sub> )	Dureza total (mg/L CaCO <sub>3</sub> )
25	0,20	3,04	3,24
30	0,07	3,88	3,95
45	0,12	3,91	4,03
50	0,11	3,97	4,08

Como se puede observar la dureza total aumentó a medida que se aumenta la concentración de carbonato de potasio encapsulado en el adoquín. La dureza es baja por lo que no se evidenció una pérdida de carbonatos del adoquín según la acción de lixiviación. En este sentido, los adoquines se encuentran de una forma rígida.

### 3.2.6 RESULTADOS DE COMPRESIÓN

Los ensayos mecánicos en los adoquines se realizaron en el laboratorio del LEMSUR perteneciente a la facultad de Ingeniería Civil y ambiental (FICA). Para realizar el ensayo de resistencia a la compresión de los adoquines se debió medir las dimensiones de los adoquines como: área, fecha de fabricación, fecha de rotura y códigos. Este ensayo se realizó en base a la norma ASTM C 140/C140M-18 con la cual trabaja el laboratorio.

Se obtuvieron las dimensiones de los adoquines para posteriormente calcular el área de este. Para calcular el área del adoquín se procedió a dividirlo en 3 secciones, como se puede observar en la tabla 18.

**Tabla 18.** División del adoquín por secciones para cálculo de área

Rectángulo mayor	Rectángulo menor	Triángulos
413,82	37,60	10,80
409,15	39,90	10,50
400,95	60,00	15,00
408,24	41,80	11,88
400,95	38,22	11,76
400,16	45,60	12,48
399,30	59,40	18,00
413,10	48,50	14,00
410,82	48,00	13,00
404,14	49,00	12,50
411,40	48,36	14,04

**Continuación tabla 18.** División del adoquín por secciones para cálculo de área

Rectángulo mayor	Rectángulo menor	Triángulos
401,72	47,50	12,50
413,82	53,76	16,24
407,29	51,84	14,58
419,68	39,90	10,50

Una vez que el área total de cada adoquín fue calculada la dividió con el resultado de la carga máxima del ensayo de compresión entregado por el laboratorio del LEMSUR, con estos datos se obtuvo la resistencia del adoquín, la cual se observa en la tabla 19.

**Tabla 19.** Resistencia de los adoquines

	Muestra	Concentración (%)	Carga de rotura (kN)	Área total (cm <sup>2</sup> )	Resistencia a la compresión	
					KN/cm <sup>2</sup>	MPas
BLANCO	35-I-E-21	0	2135,3	461,72	4,62	46,25
	35-I-E-22		1088	483,82	2,25	22,49
	35-I-E-23		1505,9	473,71	3,18	31,79
	35-I-E-01	25	1555	470,08	3,31	33,08
	35-I-E-02		1609,5	462,22	3,48	34,82

35-I-E-03		951,8	459,55	2,07	20,71
35-I-E-06	30	1492,9	475,95	3,14	31,37
35-I-E-07		1205	461,92	2,61	26,09
35-I-E-08		1456,3	450,93	3,23	32,30
35-I-E-11	45	1215,9	458,24	2,65	26,53
35-I-E-12		1534	476,70	3,22	32,18
35-I-E-13		1259	475,60	2,65	26,47

**Continuación tabla 19. Resistencia de los adoquines**

35-I-E-16	50	1712,5	471,82	3,63	36,30
35-I-E-17		1687,8	465,64	3,62	36,25
35-I-E-18		1397,2	473,80	2,95	29,49

Como se observa, el adoquín que presenta mayor resistencia es el blanco, el cual no contenía carbonato de potasio para su fabricación, pero al hacer una comparativa con los adoquines que contenían carbonato de potasio se tiene que la menor resistencia de los adoquines con la sustancia encapsulada fue con la concentración de 25%, mientras que los demás adoquines presentan una resistencia que está dentro del rango de la norma, es decir que mientras aumenta la dosificación de  $K_2CO_3$  los adoquines presentarán mayor resistencia, que se asemeja a los adoquines que actúan como blancos. La resistencia de los adoquines también depende de cómo fueron hechos y de su manipulación durante el traslado de estos al laboratorio del LEMSUR.

En la tabla 20 se puede observar la comparativa con la norma NTE 1488 para la utilización de adoquines en diferentes procesos o áreas.

**Tabla 20.** Comparación de resistencia de adoquines con la normativa NTE 1488

	Muestra	Concentración (%)	Resistencia		Normativa INEN 1488 (Mpas)		
					uso peatonal	estacionamientos/ calles residenciales	calles principales y secundarias
			KN/cm <sup>2</sup>	Mpas	20	30	40
BLANCO	35-I-E-21	0	4,62	46,25	Cumple	Cumple	Cumple
	35-I-E-22		2,25	22,49	Cumple	No Cumple	No Cumple
	35-I-E-23		3,18	31,79	Cumple	Cumple	No Cumple
	35-I-E-01	25	3,31	33,08	Cumple	Cumple	No Cumple
	35-I-E-02		3,48	34,82	Cumple	Cumple	No Cumple
	35-I-E-03		2,07	20,71	Cumple	No Cumple	No Cumple
	35-I-E-06	30	3,14	31,37	Cumple	Cumple	No Cumple
	35-I-E-07		2,61	26,09	Cumple	No Cumple	No Cumple
	35-I-E-08		3,23	32,30	Cumple	Cumple	No Cumple
	35-I-E-11	45	2,65	26,53	Cumple	No Cumple	No Cumple
	35-I-E-12		3,22	32,18	Cumple	Cumple	No Cumple
	35-I-E-13		2,65	26,47	Cumple	No Cumple	No Cumple

**Continuación tabla 20.** Comparación de resistencia de los adoquines con la normativa INEN 1488

35-I-E-16	50	3,63	36,30	Cumple	Cumple	No Cumple
35-I-E-17		3,62	36,25	Cumple	Cumple	No Cumple
35-I-E-18		2,95	29,49	Cumple	No Cumple	No Cumple

La tabla muestra que los adoquines elaborados con las concentraciones de 25, 30, 45, 50% de carbonato de potasio cumplieron con la normativa para la utilización de los adoquines para uso peatonal. Por otro lado, para la utilización de los adoquines en estacionamientos y calles residenciales la mayoría cumple con la normativa NTE 1488, sin embargo, unos pocos no cumplen, esto se debe a la manipulación de los adoquines al momento de que fueron trasladados al laboratorio del LEMSUR. Finalmente, el uso de los adoquines para calles principales y secundarias no es óptima debido a que no cumplieron con la normativa

### 3.2.7 RESULTADOS DE ABSORCIÓN

El ensayo de absorción se lo realizó en el laboratorio del LEMSUR, para realizarlos se siguió la metodología de la norma INEN NTE, 3040. Para este ensayo los adoquines entregados al laboratorio tuvieron que ser cortados en la mitad debido a su peso ya que la norma pide que los adoquines no sobrepasen los 5 kg, con la finalidad de para ser ingresados al horno de secado. Los resultados se los puede observar en la tabla 21.

**Tabla 21.** Resultados del ensayo de absorción

Concentración (%)	Adoquines		Peso saturado A (g)	Peso saturado B (g)
	Código (1) A	Código (2) B		
0 (Blanco)	35-I-E-24	35-24	4405	4184
	35-I-E-25	35-25	4238	No registra
25	35-I-E-04	35-04	4123	4493
	35-I-E-05	35-05	4100	No registra
30	35-I-E-09	35-09	4181	4307
	35-I-E-10	35-10	4536	No registra
45	35-I-E-14	35-14	4099	4216
	35-I-E-15	35-15	4205	No registra
50	35-I-E-19	35-19	4155	4416
	35-I-E-20	35-20	4495	No registra

Una vez que se pesó cada mitad de los adoquines se procedió a registrar el peso saturado de cada uno, los códigos que se encuentran con color rojo indica la muestra que no se tomó en cuenta porque la normativa pide solo 3 muestras por concentración. Posteriormente se realizó el cálculo del peso saturado total y del peso seco, para realizar el cálculo del porcentaje de absorción correspondiente a cada adoquín con sus respectivas concentraciones como se observa en la tabla 22.

**Tabla 22.** Resultados de absorción

Concentración (%)	Adoquines		Peso saturado A (g)	Peso saturado B (g)	Peso seco A (g)	Peso seco B (g)	% absorción (A)	% absorción (B)
	Código (1)	Código (2)						
0 (Blanco)	35-I-E-24	35-24	4405	4184	4096	3893	7.54	7.47
	35-I-E-25	35-25	4238	No registra	3923	No registra	8.03	No registra
25	35-I-E-04	35-04	4123	4493	3784	4143	8.96	8.45
	35-I-E-05	35-05	4100	No registra	3777	No registra	8.55	No registra
30	35-I-E-09	35-09	4181	4307	3872	3961	7.98	8.74
	35-I-E-10	35-10	4536	No registra	4200	No registra	8.00	No registra
45	35-I-E-14	35-14	4099	4216	3800	3925	7.87	7.41
	35-I-E-15	35-15	4205	No registra	3884	No registra	8.26	No registra
50	35-I-E-19	35-19	4155	4416	3863	4109	7.56	7.47
	35-I-E-20	35-20	4495	No registra	4163	No registra	7.98	No registra

Según los resultados obtenidos se observa que todos los adoquines, incluido los blancos no cumplen con el porcentaje mínimo de absorción como se estipula en la norma INEN NTE 3040 que es igual o inferior al 6%. Estos resultados pueden deberse a la fabricación y manipulación de los adoquines, ya que se pudieron formar espacios promoviendo una porosidad en la matriz (molde) de los adoquines lo cual provocó una mayor absorción de los adoquines.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 CONCLUSIONES

- El uso del carbonato de potasio como material de encapsulamiento en adoquines permitió disminuir la cantidad de arena que se generalmente se utiliza para su elaboración. Además, dado a que el pH del reactivo es alcalino pudo ayudar a la reacción en la carbonatación o mineralización del cemento, esto quiere decir que el reactivo resultante de la captación de  $\text{CO}_2$  es apropiado para la fabricación de adoquines ya que se obtuvieron buenos resultados en los ensayos mecánicos y en el ensayo de lixiviación.
- En función a las concentraciones de  $\text{K}_2\text{CO}_3$  administradas a los adoquines se pudo concluir que al agregar una concentración alta como la de 50% el adoquín presentará mejores resultados en cuanto a los ensayos realizados, tanto mecánicos como de lixiviación.
- La resistencia de los adoquines depende de la elaboración de estos, los adoquines con la concentración de 25% presentaron una resistencia menor a los demás, sin embargo, se están dentro del rango para su utilización.
- Debido a la reacción del carbonato de potasio con el cemento, se obtuvieron características buffer, debido a que el pH de los lixiviados de los adoquines después del tiempo de fraguado estuvo en un rango de 13-10.
- La determinación de la dureza sirvió para conocer la degradabilidad del adoquín, como el material no se degrada no se obtuvieron pérdidas, pero si se solubiliza es por eso que tiene presencia de carbonatos.
- Los adoquines no cumplen con la norma NTE 1488 para su utilización en calles principales y secundarias, sin embargo, cumplen la normativa para los apartados A y B, que son para uso peatonal y estacionamientos y calles residenciales.
- La fabricación y manipulación de los adoquines llegaron a afectar los resultados de algunos ensayos, como el de absorción, por lo cual no cumple con la normativa INEN NTE 3040.

## 4.2. RECOMENDACIONES

- Para tener mejores resultados tanto en los ensayos mecánicos y de lixiviación, se recomienda que la concentración de carbonato de potasio suministrada este en un rango de 45% en adelante.
- Se recomienda la utilización de mascarillas al momento agregar la sustancia a la mezcla de los adoquines debido a que el carbonato de potasio resultante de la captación y mineralización de  $\text{CO}_2$  es una sustancia controlada, es decir, puede ser peligrosa.
- Se requiere utilizar orejeras al momento de la fabricación de los adoquines ya que la máquina moldeadora y mezcladora producen una gran cantidad de ruido que puede afectar a la persona.
- Para obtener mejores resultados se recomienda utilizar diferentes marcas de cemento, en este caso se utilizó el cemento portland debido a que la empresa trabaja con esa marca.
- En el ensayo de dureza se recomienda realizar análisis por el tiempo de lixiviación que se tuvo en cada muestra.
- Realizar ensayo para determinar si el adoquín está actuando como medio filtrante.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fraga, A. (Septiembre, 2017). *SISTEMAS DE CAPTURA DE CO<sub>2</sub>*. Universidad de Coruña. Escuela Técnica Superior de Náutica y Máquinas. [https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/19925/Queijo\\_Fraga\\_Adrian\\_TFM\\_2017.pdf.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/19925/Queijo_Fraga_Adrian_TFM_2017.pdf.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- Mayorga, D., Orna, E., Viteri, E., Balseca, O., Salazar, M., & Varela, R. (Febrero, 2022). *Análisis de Factibilidad Técnica y Económica en la Implementación de un Horno Incinerador de Desechos Hospitalarios para las Entidades de Salud de las Zonas Rurales de la Provincia de Chimborazo*. Revista científico – profesional Polo del Conocimiento. Dialnet. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/revista?codigo=26585>
- Aguirre, N., Ojeda, T., & Eguiguren, P. (Agosto, 2010). *El cambio climático y la conservación de la biodiversidad en el Ecuador*. Artículo de revisión (Pág. 17). Revista CEDAMAZ. Universidad de Loja. [https://www.researchgate.net/profile/Diego-Armijos-2/publication/271833091\\_Herpetofauna\\_de\\_un\\_Bosque\\_Humedo\\_Tropical\\_en\\_la\\_Quinta\\_El\\_Padmi\\_del\\_Centro\\_de\\_Estudios\\_y\\_Developmento\\_para\\_la\\_Amazonia\\_CEDAMAZ\\_provincia\\_de\\_Zamora\\_Chinchipe/links/54d327760cf28e0697279df5/Herpetofauna-de-un-Bosque-Humedo-Tropical-en-la-Quinta-El-Padmi-del-Centro-de-Estudios-y-Desarrollo-para-la-Amazonia-CEDAMAZ-provincia-de-Zamora-Chinchipe.pdf#page=17](https://www.researchgate.net/profile/Diego-Armijos-2/publication/271833091_Herpetofauna_de_un_Bosque_Humedo_Tropical_en_la_Quinta_El_Padmi_del_Centro_de_Estudios_y_Developmento_para_la_Amazonia_CEDAMAZ_provincia_de_Zamora_Chinchipe/links/54d327760cf28e0697279df5/Herpetofauna-de-un-Bosque-Humedo-Tropical-en-la-Quinta-El-Padmi-del-Centro-de-Estudios-y-Desarrollo-para-la-Amazonia-CEDAMAZ-provincia-de-Zamora-Chinchipe.pdf#page=17)
- Ministerio del Ambiente del Perú. (Septiembre de 2017). *Contaminación ambiental causada por los residuos sólidos; Conocimientos científicos básicos*. [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)
- Haro, L., & Oscullo, J. (Marzo, 2016). *Factor Anual de Emisión de CO<sub>2</sub> producido por el Parque Generador del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador, mediante la aplicación de la metodología de la Convención Marco Sobre el Cambio Climático UNFCCC, para el Periodo 2009-2014*. Revista Politécnica, Vol. 37, No. 1. [https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista\\_politecnica2/article/view/664/pdf](https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/664/pdf)
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (s.f.). *MAE trabaja en programas de mitigación y adaptación para reducir emisiones de CO<sub>2</sub> en Ecuador*. Noticias. <https://www.ambiente.gob.ec/mae-trabaja-en-programas-de-mitigacion-y-adaptacion-para-reducir-emisiones-de-co2-en-ecuador/#>

- Vera, L. (Febrero, 2022). *ELABORACIÓN DE MENÚS DE INCINERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS PARA LA EMPRESA HAZWAT*. Repositorio Digital Escuela Politécnica Nacional.
- Mogollón, A. & Vallejo, D. (Julio, 2022). *Gestión de desechos tóxicos y peligrosos con materiales impregnados con hidrocarburos, fármacos, biopeligrosos y resinas de la empresa HAZWAT mediante la incineración*. Repositorio Digital Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23031>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2005). *LA CAPTACIÓN Y EL ALMACENAMIENTO DE DIÓXIDO DE CARBONO. Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico*. Informe especial del IPCC. [https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs\\_spm\\_ts\\_sp.pdf](https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_spm_ts_sp.pdf)
- Datos Macro. (2021). Ecuador – *Emisiones de CO<sub>2</sub>*. <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/emisiones-co2/ecuador>
- United Nations Climate (UNFCCC). (Marzo, 2022). *Las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub> repuntaron en 2021 hasta su nivel más alto de la historia*. <https://unfccc.int/es/news/las-emisiones-mundiales-de-co2-repuntaron-en-2021-hasta-su-nivel-mas-alto-de-la-historia#:~:text=El%20carb%C3%B3n%20represent%C3%B3%20m%C3%A1s%20del,7%20500%20millones%20de%20toneladas>
- Organización de las Naciones Unidas. (Octubre, 2019). *Llegar a cero emisiones netas de carbono para 2050, ¿es posible?*. Noticias ONU. <https://news.un.org/es/story/2019/10/1464591>
- López, L. (2010). *Diseño y montaje de una instalación de laboratorio para la caracterización y desarrollo de absorbentes de CO<sub>2</sub> basados en aminas*. Capítulo 3: Captura de CO<sub>2</sub> en postcombustión: absorción. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/20214/fichero/4-Cap%C3%ADtulo+3%252FCap%C3%ADtulo3.pdf>
- Camacho, A., Abellán, J., García, C., & López, D. (2011). *Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos*. [https://prtr-es.es/Data/images/MTD\\_Incineracion\\_residuos\\_ES.pdf](https://prtr-es.es/Data/images/MTD_Incineracion_residuos_ES.pdf)
- Echeverri, C. (2006). *DETERMINACIÓN DE LA EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN FUENTES FIJAS*. Universidad de Medellín. <http://www.ingenieroambiental.com/4014/determinacion.pdf>
- Ronald, E. & Condor, D. (2018). *Determinación de material particulado en fuentes fijas a través del muestreo isocinético utilizando la metodología (EPA 5) realizado en el horno de fusión área*

*de ensayos al fuego de la Empresa Certimin S.A.*. Repositorio Institucional Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo.  
<https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5752>

Romero, J. (2009). *Calidad Del Agua. 3era Edición*. Escuela Colombiana de Ingeniería. Universidad de Colombia. Scribd.

<https://es.scribd.com/document/394434222/Calidad-Del-Agua-3ra-Edicion-Jairo-Romero>

Haro, J. (2009). *Implementación de la norma ISO IEC 17025:2005 para la acreditación de la determinación de material particulado en fuentes fijas de combustión*. Repositorio Digital Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1702>

PENNRAM. (2022). *Incinerators – Pennram*. <https://www.pennram.com/incinerators/>

HAZWAT. (2017). *Empresa de gestión integral de desechos*. <https://www.hazwat.com.ec/nuestra-empresa/>

IQR Ingeniería Química. (Marzo, 2021). *Análisis de Orsat para gases de combustión*. <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2021/03/analisis-se.html>

Grounds, T; H.G Midgley (1992) "Decomposition of synthesized ettringite carbonation reaction. Cement and Concrete Research, 12(3): p.131-136

Alarcón, C. (2017). *Evaluación de mezclas de carbones térmicos y coquizables en procesos de combustión*. Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Escuela de Metalurgia. [https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/3030/1/TGT\\_1597.pdf](https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/3030/1/TGT_1597.pdf)

Urieta, F. (Diciembre, 2010). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SU SISTEMA ORSAT MODIFICADO PARA EL ANÁLISIS DE BIOGAS*. Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química. Universidad Carlos III de Madrid. <https://core.ac.uk/download/pdf/30043121.pdf>

Yurramendi, L. & Caballero, S. (Mayo, 2012). *MINERALIZACIÓN DE DIOXIDO DE CARBONO MEDIANTE CARBONATACIÓN DE RESIDUOS TÉRMICOS*. Tecnalia, Unidad de Medio Ambiente. <http://www.dyna-management.com/Documentos/pdfsES%5C1003%5C6890DYNAINDEX.pdf>

García, B. (Junio, 2011). *Captura de CO<sub>2</sub> mediante carbonatación mineral con cenizas*. Universidad de Zaragoza. Escuela de Ingeniería y Arquitectura. <https://digital.csic.es/handle/10261/214744>

- M.I. Schierloh, R.F. Souchetti, L.D. Deusich, and L. joel Alza, “Estudio sobre variación de la resistencia a compresión en el tiempo, para hormigones utilizando cemento cpc40 y áridos de la zona de Concepción del Uruguay – Entre Ríos,” no. Cpc 40, 2018, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12272/3733>
- MARIA ALEJANDRA URRUTIA MONTAÑA and UNIVERSIDAD, “FABRICACIÓN DE ADOQUÍN ECOLÓGICO USANDO COMO MATERIA PRIMA BIOSÓLIDO DE PTAR (PALNTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES).,” *Angew. Chemie Int. Ed.* 6(11), 951-952., pp. 2013-2015, 2021.
- SENA, “MANUAL PARA LA FABRICACIÓN DE BLOQUES Y ADOQUINES,” 1990.
- ASTM C140/C140M (2017), “*Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units*,” ASTM International, (West Conshohocken), PA, 2017, p. 25, DOI: 10.1520/C0140\_C0140M-17, <http://www.astm.org>.
- UNFCCC. (Marzo, 2022). *Emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial*. <https://unfccc.int/es/news/las-emisiones-mundiales-de-co2-repuntaron-en-2021-hasta-su-nivel-mas-alto-de-la-historia>
- UAEH. (2020). “Principio de Arquímedes” <https://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/estatica/arquimides>
- Carvajal , L (2006). *Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado* (28 ed). Santiago de Cali: U.S.C.
- García, A.B. (2013). *ABSORCIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO, A ELEVADAS PRESIONES PARCIALES, POR DISOLUCIONES ACUOSAS DE MEZCLAS BINARIAS DE ALCANOLAMINAS*. <https://ruja.ujaen.es/bitstream/10953/545/1/9788484398424.pdf>
- IPCC. (2018). *Informe aceptado por el Grupo de Trabajo I del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático*. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4-wg1-ts-sp.pdf>
- Navas, Sarmiento, Álvarez (2022). *Estudio sobre los diferentes métodos de captura de CO<sub>2</sub>: Semilleros de Investigación*, 2(24), e13647. <https://doi.org/10.19053/22158391.13647>
- Romero, M (2015). *MINERALIZACIÓN DEL CO<sub>2</sub>*.
- M. Contreras, R. Pérez-López, M. Gázquez, V. Morales-Flórez, A. Santos, L. Esquivas, J.P. Bolivar, “FRACTIONATION AND FLUXES OF METALS AND RADIONUCLIDES DURING THE RECYCLING PROCESS OF PHOSPHOGYPSUM WASTES APPLIED TO MINERAL CO<sub>2</sub> SEQUESTRATION, *J. Hazard. Mater.* 196 (2011) 431-435.

- I.E. de Normalización, “Adoquines. Requisitos,” NTE INEN 1488, P.4, 1986.
- U.S. EPA, “1315-1 Revision January 2013,” vol. 7345, no. January, pp- 1-36, 2013
- ASTM, “ASTM C 136-06: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates,” pp. 3-7. 2006, doi: 10.520/C0136.
- J. Salvador, “*Tecnologías de captura y almacenamiento de dióxido de carbono*,” vol. 4, no.12, pp. 22-34, 2017. [www.ecorfan.org/bolivia](http://www.ecorfan.org/bolivia)
- NTE INEN 3040 – *Servicio Ecuatoriano de Normalización* (2017). <https://studylib.es/doc/7934296/nte-inen-3040-servicio-ecuatoriano-de-normalizaci%C3%B3n>
- CMNUCC (2016). *¿Qué es el protocolo de Kyoto?* [https://unfccc.int/es/kyoto\\_protocol](https://unfccc.int/es/kyoto_protocol)
- Santillán (2016). *Fuentes de emisión de gases de efecto invernadero en la agricultura*. <https://www.redalyc.org/pdf/2311/231117588003.pdf>
- US EPA (2023) “*Emisiones de dióxido de carbono*”. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono#:~:text=La%20principal%20actividad%20del%20ser,tierra%20tambi%C3%A9n%20emiten%20CO2>.
- “Aspectos claves de un equipo de muestreo isocinético (2018). <https://medioambienteyp procesosindustriales.com/aspectos-clave-de-un-equipo-de-muestreo-isocinetico-automatico/#:~:text=El%20equipo%20de%20muestreo%20isocin%C3%A9tico,de%20ma%C3%A1quina%20de%20muestreo>
- D. Legislativo, “*CONSTITUCIÓN DE LA REPÚBLICA DEL ECUADOR*,” Registro Oficial, vol.449, no. 20pp.25-2021. [https:// www.lexis.com.ec](https://www.lexis.com.ec)
- Altair. (2021) “*Carbonato de Potasio obtenido mediante la carbonatación de la potasa cáustica*”. <https://altairchimica.com/es/productos/carbonato-de-potasio/>
- Química.es (2019) “*Carbonato de Potasio o Potasa*”. [https://quimica.es/enciclopedia/Carbonato\\_de\\_potasio.html](https://quimica.es/enciclopedia/Carbonato_de_potasio.html).
- M. del Ambiente, “*TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACION SECUNADARIA DE MEDIO AMBIENTE* (2017). <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/2018/05/TULSMA.pdf>
- STANDARD METHODS (S.T. Ed. 23, 2017, 2310B). <https://standadmethods.org>

- Galán, I (2011). "CARBONATACIÓN DEL HORMIGÓN: COMBINACIÓN DE CO<sub>2</sub> CON LAS FASES HIDRATADAS DEL CEMENTO Y FRENTE DE CAMBIO DE PH". <https://core.ac.uk/download/pdf/19716738.pdf>
- Martínez, I (2014). "SIMULACIÓN DEL PROCESO DE CAPTURA DE CO<sub>2</sub> MEDIANTE LOS CICLOS DE CARBONATACIÓN/CALCINACIÓN DE CaO INTEGRADO EN PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA". <https://digital.csic.ec/handle/10261/94859>
- Romero, J. (2009). *Calidad Del Agua. 3era Edición*. Escuela Colombiana de Ingeniería. Universidad de Colombia. Scribd. <https://es.scribd.com/document/394434222/Calidad-Del-Agua-3ra-Edicion-Jairo-Romero>