



**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**  
*La Universidad Católica de Loja*

**ÁREA TÉCNICA**

**INGENIERO EN GEOLOGÍA Y MINAS**

TRABAJO DE TITULACIÓN

Pintura de Cal a partir de calizas ( $\text{CaCO}_3$ ) obtenidas en la parroquia Nambacola, para la utilización como medio catalítico de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ )

**Autor:** Jaramillo Riofrío, Wilmer Geovanny

**Director:** Sanmartín Gutiérrez, Víctor Aurelio

LOJA-ECUADOR

2021



*Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>*

2021

## Aprobación del director de trabajo de titulación

Loja, 19 de octubre del 2021

Magister.

Víctor Aurelio Sanmartín Gutiérrez

**Docente de la Titulación**

Ciudad. -

De mi consideración:

El presente Trabajo de Titulación denominado: Pintura de Cal a partir de calizas ( $\text{CaCO}_3$ ) obtenidas en la parroquia Nambacola, para la utilización como medio catalítico de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ); realizado por Wilmer Geovanny Jaramillo Riofrío, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo. Así mismo, doy fe que dicho Trabajo de Titulación ha sido revisado por la herramienta antiplagio institucional.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,

f. ....

Víctor Aurelio Sanmartín Gutiérrez

C.I.: 1101873204

### Declaración de auditoría y cesión de derechos

“Yo, Wilmer Geovanny Jaramillo Riofrío, declaro y acepto en forma expresa lo siguiente:

- Ser autor(a) del Trabajo de Titulación denominado: "Pintura de Cal a partir de calizas ( $\text{CaCO}_3$ ) obtenidas en la parroquia Nambacola, para la utilización como medio catalítico de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ )" de la Titulación Geología y Minas, específicamente de los contenidos comprendidos en: Introducción, Capítulo 1. Aspectos físicos – geográficos de la zona de estudio, Capítulo 2. Geología de la zona de estudio, Capítulo 3. Marco teórico, Capítulo 4. Metodología para el desarrollo de la investigación, Capítulo 5. Análisis de resultados, Conclusiones y Recomendaciones, siendo MSc. Víctor Aurelio Sanmartín Gutiérrez director del presente trabajo; y, en tal virtud, eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones judiciales o administrativas, en relación a la propiedad intelectual. Además, ratifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo son de mi exclusiva responsabilidad.
- Que mi obra, producto de mis actividades académicas y de investigación, forma parte del patrimonio de la Universidad Técnica Particular de Loja, de conformidad con el artículo 20, literal j), de la Ley Orgánica de Educación Superior; y, artículo 91 del Estatuto Orgánico de la UTPL, que establece: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.
- Autorizo a la Universidad Técnica Particular de Loja para que pueda hacer uso de mi obra con fines netamente académicos, ya sea de forma impresa, digital y/o electrónica o por cualquier medio conocido o por conocerse, sirviendo el presente instrumento como la fe de mi completo consentimiento; y, para que sea ingresada al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública, en cumplimiento del artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma: .....

Autor: Wilmer Geovanny Jaramillo Riofrío

C.I.: 1105327785

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo de fin de titulación principalmente a mis padres Wilmer y Alicia, por guiarme a lo largo de toda mi vida, por inculcarme valores inquebrantables, por el sacrificio diario para darme la mejor educación tanto en el hogar, como en la formación académica.

A mis hermanos Ximena y Paúl, a mi esposa Gabriela y a mi hija Elena Sofía por brindarme el apoyo y la inspiración durante mi carrera universitaria.

**Wilmer Jaramillo Riofrío**

## **Agradecimiento**

Primeramente, quiero agradecer a Dios y a la Virgen del Cisne por ser mis guías espirituales, por ayudarme a cumplir uno de mis propósitos en la vida; por guiarme hacia este objetivo.

En segundo lugar, quiero agradecer a mis padres por el amor, ejemplo, esfuerzo, dedicación y sacrificio que han hecho hacia mi persona para hoy cumplir esta meta.

También quiero agradecer a mis hermanos. A Ximena por sus consejos, su ejemplo y apoyo incondicional. A Henry Paúl por ser mi inspiración, el motivo a superarme y no rendirme nunca.

También quiero agradecer a mi esposa Gabriela Robalino, por su apoyo, por su amor, por su paciencia, por la motivación que siempre me has brindado.

Además, quiero agradecer al tutor MSc. Víctor Sanmartín, por haberme impartido sus conocimientos y guiado en este proyecto de fin de titulación y en toda mi etapa estudiantil.

También quiero agradecer a todos los docentes por sus enseñanzas y cariño que nos han impartido a mí y a mis compañeros a lo largo de esta etapa universitaria.

**Wilmer Jaramillo Riofrío**

## Índice de Contenidos

<i>Carátula</i> .....	<i>I</i>
<i>Aprobación del director de trabajo de titulación</i> .....	<i>II</i>
<i>Declaración de auditoría y cesión de derechos</i> .....	<i>III</i>
<i>Dedicatoria</i> .....	<i>V</i>
<i>Agradecimiento</i> .....	<i>VI</i>
<i>Índice de Contenidos</i> .....	<i>VII</i>
<i>Índice de Tablas</i> .....	<i>XI</i>
<i>Índice de Figuras</i> .....	<i>XII</i>
<i>Resumen</i> .....	<i>1</i>
<i>Abstract</i> .....	<i>2</i>
<i>Introducción</i> .....	<i>3</i>
<i>Antecedentes y justificación</i> .....	<i>4</i>
<i>Objetivos</i> .....	<i>6</i>
<i>General</i> .....	<i>6</i>
<i>Específicos</i> .....	<i>6</i>
<i>Capítulo uno</i> .....	<i>7</i>
<i>Aspectos físicos - geográficos de la zona de estudio</i> .....	<i>7</i>
1.1 <i>Localización Geográfica</i> .....	<i>7</i>
1.2 <i>Acceso</i> .....	<i>7</i>
1.3 <i>Clima</i> .....	<i>8</i>
1.4 <i>Hidrografía</i> .....	<i>8</i>
1.5 <i>Vegetación</i> .....	<i>9</i>
<i>Capítulo dos</i> .....	<i>10</i>
<i>Geología de la zona de estudio</i> .....	<i>10</i>
2.1 <i>Contexto Tectónico</i> .....	<i>10</i>
2.2 <i>Geología Regional</i> .....	<i>10</i>
2.2.1 <i>Formación Celica</i> .....	<i>11</i>

2.2.2	<i>Formación Sacapalca</i> .....	11
2.2.3	<i>Formación Saraguro</i> .....	11
2.2.4	<i>Formación Yunguilla</i> .....	11
<b>Capítulo tres</b> .....		<b>12</b>
<b>Marco teórico</b> .....		<b>12</b>
3.1	<b>Caliza</b> .....	<b>12</b>
3.1.1	<i>Composición Química y Mineralógica de la Caliza</i> .....	12
3.1.2	<i>Ambiente de Formación de las Calizas</i> .....	13
3.1.3	<i>Clasificación de las Calizas</i> .....	15
3.1.3.1	Carbonatos con textura deposicional reconocible .....	15
3.1.3.2	Carbonatos con textura deposicional no reconocible .....	15
3.1.4	<i>Características Físicas de las calizas</i> .....	17
3.1.4.1	Color.....	17
3.1.4.2	Resistencia.....	17
3.1.4.3	Densidad Aparente.....	17
3.1.4.4	Peso Específico .....	18
3.1.4.5	Dureza .....	18
3.1.4.6	Porosidad .....	19
3.1.5	<i>Usos de la Caliza</i> .....	19
3.2	<b>Pinturas a base de Cal</b> .....	<b>20</b>
3.3	<b>Catálisis</b> .....	<b>20</b>
<b>Capítulo cuatro</b> .....		<b>22</b>
<b>Metodología para el desarrollo de la investigación</b> .....		<b>22</b>
4.1	<b>Recopilación de información</b> .....	<b>22</b>
4.2	<b>Trabajo de Campo</b> .....	<b>22</b>
4.3	<b>Trabajo en Laboratorio</b> .....	<b>24</b>
4.3.1	<i>Caracterización Física de la Roca Caliza</i> .....	25
4.3.1.1	Densidad aparente de la Roca Caliza .....	25

4.3.1.2	Peso específico de la Roca Caliza.....	26
4.3.1.3	Porosidad de la Roca Caliza .....	27
4.3.2	<i>Caracterización Química de la Roca Caliza</i> .....	27
4.3.2.1	Preparación de la Muestra.....	28
4.3.2.1.1	<i>Secado</i> .....	28
4.3.2.1.2	<i>Trituración</i> .....	28
4.3.2.1.3	<i>Tamizado</i> .....	29
4.3.2.2	Composición Química de la Caliza por Fluorescencia de Rayos X .....	29
4.3.2.3	Pureza del Carbonato de Calcio .....	30
4.3.2.4	Pureza de la Caliza (CaCO <sub>3</sub> ) .....	31
4.3.3	<i>Caracterización Mineralógica de la Roca Caliza</i> .....	31
4.3.3.1	Preparación de la Muestra.....	31
4.3.3.2	Difracción de Rayos X .....	32
4.3.4	<i>Preparación de la pintura de Cal</i> .....	32
4.3.4.1	Preparación de la Muestra.....	32
4.3.4.2	Producir Óxido de Calcio (CaO), a partir de Calizas (CaCO <sub>3</sub> ).....	32
4.3.4.3	Producir Hidróxido de Calcio (Ca(OH) <sub>2</sub> ) a partir del Óxido de Calcio (CaO) obtenido .....	33
4.3.4.4	Elaboración y aplicación de la Pintura de Cal .....	34
4.3.5	<i>Evaluación de la Captación de CO<sub>2</sub> en la pintura de Cal</i> .....	35
4.3.5.1	Muestreo de la Pintura de Cal.....	35
4.3.5.2	Determinación de Captación de CO <sub>2</sub> en la pintura de Cal.....	36
	<b>Capítulo cinco</b> .....	<b>37</b>
	<b>Resultados y análisis</b> .....	<b>37</b>
5.1	Resultados de Caracterización física de la Roca Caliza .....	37
5.1.1	<i>Resultados de Densidad aparente</i> .....	37
5.1.2	<i>Resultados de los Pesos Específicos</i> .....	37
5.1.3	<i>Resultados de Porosidad total</i> .....	38

<b>5.2</b>	<b>Resultados de caracterización química de la roca Caliza .....</b>	<b>39</b>
<b>5.2.1</b>	<b><i>Resultados de Fluorescencia de Rayos X.....</i></b>	<b>39</b>
<b>5.2.2</b>	<b><i>Pureza de Carbonato de Calcio de la roca Caliza por volumetría.....</i></b>	<b>40</b>
<b>5.3</b>	<b>Resultados de caracterización mineralógica de la Roca Caliza .....</b>	<b>40</b>
<b>5.3.1</b>	<b><i>Resultados de Difracción de Rayos X en la roca Caliza.....</i></b>	<b>40</b>
<b>5.4</b>	<b>Producción de Óxido de Calcio (CaO) a partir de la caliza (CaCO<sub>3</sub>) por calcinación.....</b>	<b>41</b>
<b>5.5</b>	<b>Producción de Hidróxido de Calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) a partir del Óxido de Calcio (CaO) producido.....</b>	<b>42</b>
<b>5.6</b>	<b>Resultados de la captación de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) por la pintura de Cal como medio catalítico ambiental .....</b>	<b>42</b>
<b>5.6.1</b>	<b><i>Ensayos a la pintura de Cal luego de 60 días de haber sido aplicada .....</i></b>	<b>43</b>
<b>5.6.2</b>	<b><i>Ensayos a la pintura de Cal luego de 90 días de haber sido aplicada .....</i></b>	<b>44</b>
<b>5.6.3</b>	<b><i>Estimación de la captación de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) por la pintura de Cal .....</i></b>	<b>45</b>
	<b>Conclusiones.....</b>	<b>46</b>
	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>48</b>
	<b>Referencias.....</b>	<b>49</b>
	<b>Apéndice .....</b>	<b>51</b>

**Índice de Tablas**

Tabla 1 Densidad Aparente de la Caliza .....	17
Tabla 2 Peso Específico de algunos componentes .....	18
Tabla 3 Porosidad de las Calizas .....	19
Tabla 4 Resultados de Densidad Aparente g/cm <sup>3</sup> .....	37
Tabla 5 Resultados de Peso Específico g/cm <sup>3</sup> .....	38
Tabla 6 Resultados de Porosidad Total .....	39
Tabla 7 Resultados de Fluorescencia de Rayos X .....	39

## Índice de Figuras

Figura 1 Acceso desde Loja hasta Nambacola.....	7
Figura 2 Clima de Nambacola .....	8
Figura 3 Vegetación Aledaña al Yacimiento de Calizas .....	9
Figura 4 Composición Química y Mineralógica de la Roca Caliza.....	12
Figura 5 Ciclo de Formación del Carbonato de Calcio .....	13
Figura 6 Sedimentación Marina de las Calizas.....	14
Figura 7 Clasificación de las Calizas Según Dunham, Modificado de Moore en 2001.....	15
Figura 8 Clasificación de las Calizas según Dunham, Modificado por Embry y Klovan en 1971 .....	16
Figura 9 Escala de Mohs .....	18
Figura 10 Muestreo con el Cilindro Kopecky para los Ensayos Físicos.....	23
Figura 11 Muestreo para Determinaciones Químicas y Realización de la Pintura .....	24
Figura 12 Ingreso de Muestras al Laboratorio .....	24
Figura 13 Preparación de Muestra N° 1 para las Determinaciones de Densidad Aparente, Peso Específico y Porosidad.....	25
Figura 14 Determinación de Densidad Aparente de la Caliza.....	26
Figura 15 Determinación de Peso Específico Natural, Seco y Saturado.....	27
Figura 16 Trituración de Muestra N° 2 .....	28
Figura 17 Tamizado de Muestra N° 2 .....	29
Figura 18 Determinación de Fluorescencia de Rayos X .....	30
Figura 19 Determinación de la Pureza del Carbonato de Calcio por Volumetría .....	31
Figura 20 Calcinación del Carbonato de Calcio a 1200°C .....	33
Figura 21 Hidratación del Óxido de Calcio.....	33
Figura 22 Preparación de la Pintura de Cal .....	34
Figura 23 Aplicación de la Pintura de Cal .....	35
Figura 24 Muestreo de la Pintura de Cal.....	36
Figura 25 Porcentajes de Elementos Químicos de las Calizas .....	40
Figura 26 Resultados de Difracción de Rayos X de la Roca Caliza.....	41
Figura 27 Comparación de la Producción de CaO por el Método Práctico (Calcinación) y Teórico (Estequiometría) .....	42
Figura 28 Resultados de Difracción de Rayos X de la Pintura de Cal Luego de 60 Días de Aplicación.....	43
Figura 29 Resultados de Difractometría de Rayos X de la Pintura de Cal Luego de 90 Días de Aplicación.....	44

## Resumen

El Dióxido de Carbono es el gas de efecto invernadero más producido por el hombre, se lo genera por la combustión de combustibles fósiles, de biomásas y también se crea por erupciones volcánicas.

Este proyecto tiene como objeto elaborar una pintura de Cal a partir de la roca caliza para ser utilizada como medio catalítico de Dióxido de Carbono. A la pintura se la elabora a partir de la roca caliza.

Para lograr la catálisis de Dióxido de Carbono en la pintura, realizamos el ciclo de la cal que comprende cuatro procesos que son: calcinación, hidratación, mezclado y carbonatación. A la roca caliza se la funde a una temperatura de 1200°C para obtener Óxido de Calcio cumpliendo el proceso de calcinación. A partir del Óxido de Calcio se obtiene Hidróxido de Calcio añadiéndole agua, generando la hidratación. Seguidamente se realiza la pintura mezclando el hidróxido de calcio con agua y sal para aplicarla en una pared, el agua se evapora y además la pintura cataliza Dióxido de Carbono del ambiente, culminando con la carbonatación para convertirse nuevamente en roca caliza.

**PALABRAS CLAVE:** Dióxido de Carbono, caliza, catálisis.

### **Abstract**

Carbon Dioxide is the greenhouse gas most produced by man, it is generated by the combustion of fossil fuels, biomass and is also created by volcanic eruptions.

This project aims to produce a lime paint from limestone rock to be used as a catalytic medium for Carbon Dioxide. The painting is made from limestone rock.

To achieve the catalysis of Carbon Dioxide in the paint, we carry out the lime cycle that comprises four processes that are: calcination, hydration, mixing and carbonation. The limestone is melted at a temperature of 1200 ° C to obtain Calcium Oxide, fulfilling the calcination process. From Calcium Oxide, Calcium Hydroxide is obtained by adding water to it, generating hydration. Next, the painting is made by mixing the calcium hydroxide with water and salt to apply it to a wall, the water evaporates and also the paint catalyzes Carbon Dioxide from the environment, culminating in carbonation to become limestone rock again.

KEY WORDS: Carbon Dioxide, limestone, catalysis.

## Introducción

La pintura a base de cal es una pintura mineral apta tanto para interiores como para exteriores. Su componente principal es el Hidróxido de Calcio o cal hidratada del cual deriva su nombre.

En el presente proyecto desarrollamos la pintura de cal a partir de la roca caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) obtenida del Yacimiento Nambacola, ubicado en la provincia de Loja, se determinó las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de la roca, además se utilizó la pintura de Cal como medio catalítico de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ).

El Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) es un gas incoloro e inodoro compuesto por un átomo de carbono y dos de oxígeno. Forma parte de la composición de la tropósfera que es la capa de la atmósfera más cercana a la Tierra, es indispensable para la vida ya que las plantas lo necesitan para realizar la fotosíntesis, aunque por las emisiones excesivas ha contribuido al aumento del cambio climático global ya que forma parte de los gases de efecto invernadero junto al Metano, Óxido Nitroso, Solidos Suspendidos y Ozono.

Las fuentes de contaminación de ( $\text{CO}_2$ ) son generadas por dos motivos, el primero es la combustión de combustibles fósiles que resultan de los siguientes sectores: transporte, electricidad, refinación, industrias, comercial, alumbrado público y hogares, etc. Y el segundo se produce por fuentes naturales como los incendios naturales y las erupciones volcánicas (Borrás, 2018).

## Antecedentes y justificación

El uso de las pinturas de cal se remota desde los años 6600-5650 a.C. en Anatolia, específicamente en el asentamiento de Çatalhöyük (Mellaart, 1971).

Entre los años 2000 y 1400 a.C., en el palacio de Knosos, se hallaron los ejemplares más antiguos de pintura al fresco. Este estilo creció y se desarrolló en la época griega y romana. Por otra parte, la pintura a base de cal (encalados y veladuras de cal) comenzó a popularizarse en Europa en la Edad Media por sus propiedades desinfectantes, transpirables e ignífugas, usándose mayormente en el exterior de las casas, barracones y cuarteles. Su uso en la ciudad se extendió hasta principios de 1900, mientras que en las zonas rurales se la empleó hasta mitad del siglo XX. En ese mismo siglo la pintura sintética fue ganando rápidamente el terreno de las pinturas tradicionales gracias a su facilidad de aplicación, la amplia gama de colores y el precio reducido. (Levano et al., 2018, p. 76)

El presente trabajo de fin de titulación tiene como finalidad realizar una pintura de cal a partir de la roca caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) obtenida del yacimiento Nambacola perteneciente al cantón Gonzanamá de la Provincia de Loja.

La pintura de cal se elabora partiendo de la roca caliza ( $\text{CaCO}_3$ ). A la roca caliza se la funde a una temperatura de  $1200^\circ\text{C}$  para liberar el  $\text{CO}_2$  y obtener un Óxido de Calcio o cal viva ( $\text{CaO}$ ) cumpliendo el proceso de calcinación. A partir del Óxido de Calcio se obtiene Hidróxido de Calcio o cal apagada ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) añadiéndole agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), y se genera la hidratación. Seguidamente se realiza la pintura mezclando el hidróxido de calcio con agua y Sal ( $\text{NaCl}$ ) para aplicarla en una pared. el agua se evapora y además la pintura cataliza Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) culminando con la carbonatación para convertirse nuevamente en roca caliza ( $\text{CaCO}_3$ ).

En las ciudades los niveles de contaminación de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) son elevados producto de la combustión de combustibles fósiles que resultan del transporte, electricidad, refinación, industrias, comercio, alumbrado público, hogares, etc. Por ello es importante tener una pintura que funcione como catalizador de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) ya

que nos permite reducir este gas que es el causante principal del calentamiento global, además nos ayuda a purificar el aire en las ciudades para mejorar la calidad de vida de las personas.

## Objetivos

### General

Elaborar pintura de Cal a partir de calizas ( $\text{CaCO}_3$ ) obtenidas en la parroquia Nambacola, para la utilización como medio catalítico de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ).

### Específicos

- Determinar la caracterización física, química y mineralógica de las calizas.
- Producir el Óxido de Calcio ( $\text{CaO}$ ) a partir de la caliza estudiada.
- Producir de Hidróxido de Calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) a partir del Óxido de Calcio ( $\text{CaO}$ ) obtenido.
- Estimar la captación de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) por la Pintura de Cal como medio catalítico ambiental.

## Capítulo uno

### Aspectos físicos - geográficos de la zona de estudio

#### 1.1 Localización Geográfica

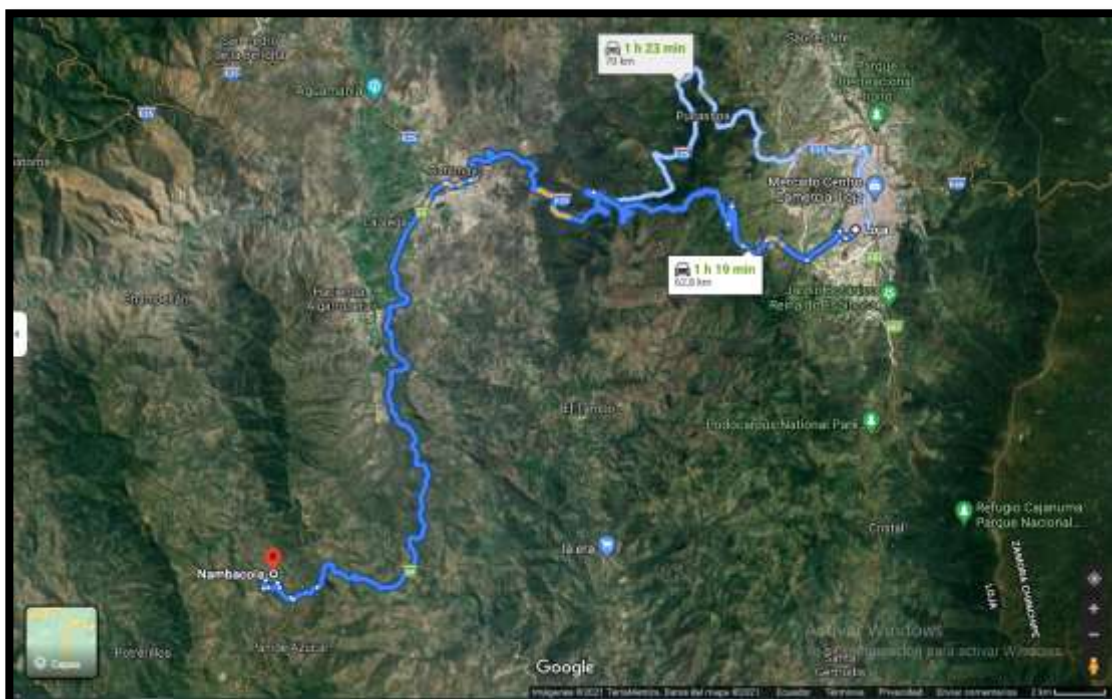
La zona de estudio se encuentra ubicada al Sur del Ecuador, al Suroeste de la provincia de Loja, perteneciente al cantón Gonzanamá en la parroquia Nambacola en el barrio "La Calera".

#### 1.2 Acceso

El acceso se realiza por el eje vial principal E69 transversal sur de primer orden que conectan los cantones Loja – Catamayo – Gonzanamá con un recorrido de 62.8 km hasta llegar a la entrada de la parroquia Nambacola, a continuación, se toma una vía de tercer orden durante un tramo de 10 Km aproximadamente hasta llegar al sector "La Calera", finalmente a través de senderos se puede llegar a cualquier punto del Yacimiento de Caliza.

#### Figura 1

*Acceso desde Loja hasta Nambacola*



*Nota.* Adaptado de [Vías de acceso Loja - Nambacola], de Google, s.f., <https://goo.gl/maps/UhCt9TYoW9LDDCni9>. Todos los derechos reservados 2021 por Google, Adaptado con permiso del autor.

### 1.3 Clima

El clima de la parroquia es característico de la región andina, con temperaturas promedio de 21 °C con una precipitación media anual de 1098.8 mm y una humedad relativa del 85% siendo estos factores los que determinan las condiciones de desarrollo de la biodiversidad, presenta climas tropical, subtropical, temperado y frío sub-temperado (GAD Parroquial de Nambacola (GADPN), 2015).

#### Figura 2

*Clima de Nambacola*



### 1.4 Hidrografía

El sistema de drenaje está compuesto por material detrítico provenientes como resultado de la meteorización y erosión de las rocas preexistentes en los alrededores; además está constituido por un sistema fluvial bien adaptado debido a la zona montañosa característica por sus ramificaciones irregulares, las cuales desembocan en los cursos de agua de la quebrada Grande que nacen en la parte alta de la cordillera y que recorre con dirección sureste – noroeste labrando los valles. En sus recorridos reciben las aguas de pequeñas quebradas como La Surcayacu – La Palaza – Hechiceros y Chalaca que se constituyen a afluentes del río Catamayo. Desde las condiciones climáticas que imperan en

el sector durante el año; este sistema hídrico mantiene su caudal únicamente en la época invernal (Ochoa, 2001).

### 1.5 Vegetación

En la parroquia Nambacola se encuentra una diversidad de especies forestales en los remanentes de bosques de montaña y galería en las que encontramos algunas especies importantes como: arupo, faique, guararo, guangazo, nanume, guabo, chirimoyo, laurel de cera, languapo, guaylo, arabisco, bolsa pasallo, luma, higuerón, jorupe. Además, dentro de la parroquia existen tres áreas protegidas como son: Área de bosque y vegetación protectora Santa Rita, Área de bosque y vegetación protectora La Chorrera y el Parque Nacional Yacuri (GADPN, 2015).

#### Figura 3

*Vegetación Aledaña al Yacimiento de Calizas*



## Capítulo dos

### Geología de la zona de estudio

#### 2.1 Contexto Tectónico

Ecuador forma parte del cinturón de fuego del Pacífico, con gran volcanismo y amplia sismicidad activa. Se localiza al Noreste del Continente Sudamericano, por el cual se encuentra afectado por la convergencia de las placas oceánicas de Nazca y Cocos con las placas continentales de Sudamérica y el Caribe, separados por la fosa tectónica y zona de subducción activa Perú – Ecuador - Panamá con dirección Norte - Sur; estos incluyen un centro de dispersión oceánico activo (la cordillera de Carnegie en Galápagos), entre las placas de Cocos y Nazca, en el Rift de Galápagos, fenómenos que se presentan de Oeste a Este, siendo muy importante la subducción durante el Terciario Inferior (Goldfields, 1993).

En el Ecuador encontramos la cordillera Occidental y la Cordillera Real, esta última que limita y controla el levantamiento andino desde el Eoceno, siendo la principal causante de la deformación y génesis de la zona sub-andina (Goldfields, 1993)

Las cuencas sedimentarias del sur del Ecuador presuntamente se formaron durante el Mioceno en dos fases de sedimentación, la primera fase fue nombrada fase Costera del Pacífico en la que la sedimentación ocurrió sobre un área extensa cerca del nivel del mar durante los 15 a 10 Ma, mientras que la segunda fase nombrada intramontañosa sucedió durante los 9 a 5 Ma en la que ocurre una inversión tectónica y compresional Este - Oeste exhumando la región y restringiendo a pequeñas cuencas, remanentes de las cuencas más antiguas (M. Steinmann, D. Hungerbühler, 1999).

#### 2.2 Geología Regional

Las formaciones geológicas que conforman la parroquia, según el GAD parroquial de Nambacola (2015) son: "la formación Celica, la formación Sacapalca, la formación Saraguro y la formación Yunguilla" (p. 16).

### **2.2.1 Formación Celica**

Esta formación estuvo sometida a un metamorfismo de bajo grado, que está interpretado como no deformacional, pero que ocurrió durante el enterramiento de la formación en una fijación extensional (Kennerly, 1992).

Se encuentra atravesada por el batolito de tangula que se sugiere paso en el Cretácico temprano.

En la parroquia Nambacola la formación Celica ocupa el 9.57 % de la superficie y está compuesta por lavas andesíticas, lavas basálticas y piroclastos (GADPN, 2015).

### **2.2.2 Formación Sacapalca**

La formación Sacapalca se formó en el Paleoceno y comprende una secuencia de rocas volcánicas andesíticas con foliación de flujo bien preservada de color púrpura a rojizo; además rocas sedimentarias como (limolitas rojas, areniscas y conglomerados) con tobas de composición dacítica y riolítica.

La Formación Sacapalca ocurre como una secuencia elongada de rumbo Norte – Sur. Esta unidad cubre aproximadamente un 66,45 % de la parroquia (GADPN, 2015).

### **2.2.3 Formación Saraguro**

La formación Saraguro está compuesta por una secuencia de rocas volcánicas de las que predominan lavas andesíticas y depósitos piroclásticos de composición riolítica a andesítica. Se formó durante el Oligoceno.

La formación Saraguro ocupa un 18.56 % de la superficie de toda la parroquia (GADPN, 2015).

### **2.2.4 Formación Yunguilla**

A la formación Yunguilla se le atribuye una edad del Cretácico Superior al Paleoceno, esta formación está conformada por lutitas, calizas y volcanoclastos dentro de la parroquia y representan el 2.13 % de la superficie (GADPN, 2015).

## Capítulo tres

### Marco teórico

#### 3.1 Caliza

La caliza es una roca sedimentaria compuesta mayormente por carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), generalmente calcita, aunque frecuentemente presenta trazas de magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ), aragonito y otros carbonatos (Klen, C.; Hurlbut, 1998).

Las calizas puras tienden a ser de color blanco, pero cuando tienen impurezas de arcilla, hematita, óxido de hierro, siderita y cuarzo presentan diferentes tonalidades como marfil, marrón, gris azulado entre otras.

Una característica química fundamental de la calcita es que reacciona con efervescencia al ácido clorhídrico.

##### 3.1.1 Composición Química y Mineralógica de la Caliza

El porcentaje de calcio (calcita) y magnesio (dolomita), determinan la composición química de la caliza.

La roca caliza es catalogada como pura cuando su composición química es de 90 a 100% de calcita y de 0 a 10% de dolomita; cuando tiene de 50 a 90% de calcita y de 10 a 50% de dolomita se considera que es una roca caliza magnesiana o caliza dolomítica; mientras que cuando tiene de 10 a 50% de calcita y de 50 a 90% de dolomita se considera una dolomita calcárea y finalmente si tiene de 0 a 10% de calcita y de 90 a 100% de dolomita se considera una dolomía o roca dolomítica (Maldonado, 2020).

**Figura 4**

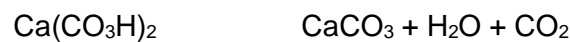
*Composición Química y Mineralógica de la Roca Caliza*



*Nota.* Adaptado de Composición de la dolomía y caliza [Fotografía] por Maldonado, 2020, Geologiaweb.com (<https://geologiaweb.com/rocas-sedimentarias/caliza/>). Copyright

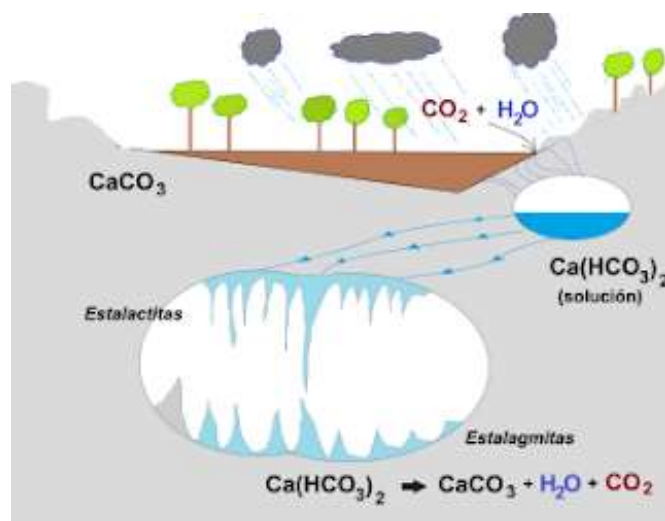
### 3.1.2 Ambiente de Formación de las Calizas

El ambiente de formación de las calizas se produce por la precipitación del carbonato cálcico con la intervención del agua en un proceso inorgánico y/o bioquímico. El calcio proviene de la meteorización de minerales que lo contienen (piroxenos, anfíboles o plagioclasa) que, junto al anhídrido carbónico de la atmósfera, da lugar a la siguiente reacción que depende de la presión y temperatura (Del Romo & Guillén, 2012).



**Figura 5**

*Ciclo de Formación del Carbonato de Calcio*



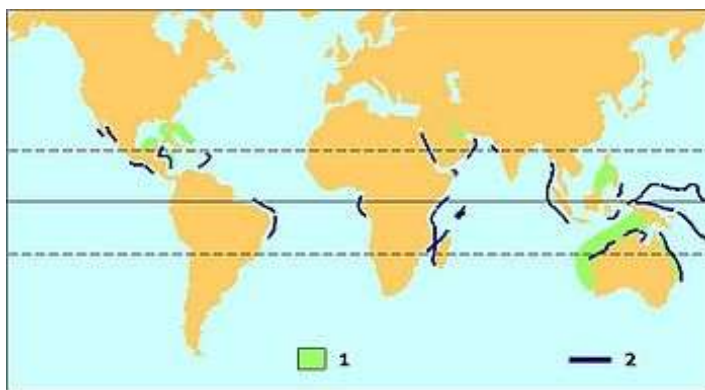
*Nota.* Adaptado de *Esquema del proceso de formación de grutas y cuevas con estalactitas y estalagmitas en regiones calcáreas, debido a la química del carbonato cálcico* [Fotografía] por Pozitron, 2013, Wikipedia (<https://es.wikipedia.org/wiki/Caliza>). CC BY-SA 3.0

La mayor parte de calizas proceden de la intervención de organismos que toman de las aguas los elementos para formar sus conchas y caparzones (corales, algas, foraminíferos, etc.). Al morir estos organismos, se produce una acumulación de estas partes que se unen por un cemento calcáreo, generado a la vez que la sedimentación o por procesos

diagenéticos; debido a que la disolución del carbonato se acelera al aumentar la presión y disminuir la temperatura. Las calizas no se forman en cuencas Oceánicas profundas. Por ello las grandes acumulaciones de calizas se han formado en el mar, pero en plataformas continentales, en aguas cálidas y alejadas de zonas emergidas que puedan aportar sedimentos detríticos. En ambientes continentales el medio sedimentario típico son los lagos, aunque también existen extensas formaciones calcáreas asociadas a suelos (costras calizas), surgencias de aguas como termales o cascadas que en determinadas condiciones se forman depósitos (travertinos) y cuevas cársticas. Estos procesos de formación de calizas, entre otros, han originado a lo largo de millones de años, el empobrecimiento del CO<sub>2</sub> de la atmósfera e hidrosfera primigenias del planeta Tierra y su enriquecimiento en oxígeno. La fijación del CO<sub>2</sub> en las rocas, sobre todo por algas (verde - azuladas) que originaron unas estructuras sedimentarias calcáreas llamadas estromatolitos, y la liberación de oxígeno hizo que, en el Precámbrico superior, los seres vivos se tuvieran que adaptar a este nuevo componente. Muchos de ellos no lo consiguieron y se extinguieron, lo que supuso seguramente la primera extinción en masa de la historia de la Tierra (Del Romo & Guillén, 2012).

### Figura 6

*Sedimentación Marina de las Calizas*



Nota. Adaptado de *Sedimentación calcárea marina actual 1: Plataformas carbonatadas; 2: Arrecifes coralinos* [Fotografía] por Adrian198cm, 2008, Wikipedia (<https://es.wikipedia.org/wiki/Caliza>). CC BY-SA 3.0

### 3.1.3 Clasificación de las Calizas

La clasificación de las rocas y sedimentos carbonáticos según Dunham (1962) son dos: los que presentan textura deposicional reconocible y los que presentan textura deposicional no reconocible.

**3.1.3.1 Carbonatos con textura deposicional reconocible.** Se describen a continuación los siguientes:

**Boundstone:** Los componentes originales se encuentran ligados durante la sedimentación debido a la acción de organismos bioconstructores (corales, algas rodoíceas, cianobacterias, etc.).

**Grainstone:** Textura grano-soportada y sin matriz micrítica. El espacio intergranular puede estar ocupado por cemento.

**Packstone:** Textura grano-soportada y con matriz micrítica. El espacio intergranular está ocupado por micrita.


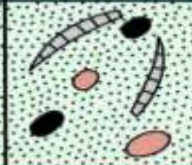
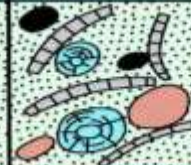
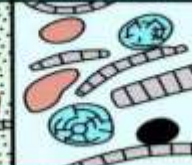

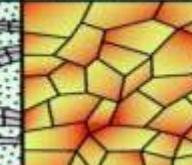
**Wackestone:** Textura matriz-soportada con más del 10% de granos.

**Mudstone:** Textura matriz-soportada con menos del 10% de granos.

**3.1.3.2 Carbonatos con textura deposicional no reconocible.** Los carbonatos con textura deposicional no reconocible son los que presentan textura cristalina.

Figura 7

Clasificación de las Calizas Según Dunham, Modificado de Moore en 2001

Textura deposicional reconocible					Textura deposicional no reconocible
Componentes originales no unidos durante la sedimentación				Componentes originales unidos durante el desarrollo de una bioconstrucción	
Con barro micrítico		Esqueleto clasto-soportado sin barro micrítico			
Esqueleto matriz-soportado	Esqueleto grano-soportado				
< 10 % granos	> 10 % granos				
Mudstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Boundstone	Cristalina
					

Nota. Adaptado de *Clasificación de Dunham 1962, modificado de Moore 2001* [Fotografía] por Atlas de Petrología Sedimentaria, 2007 - 2020, (<https://webs.ucm.es/info/petrosed/rc/cla/index.html>).

Copyright

Embry y Klovan en (1971) complementaron la clasificación de Dunham (1962), añadiendo cinco nuevos tipos que son:

**Rudstone:** Textura grano-soportada, en la que los "clastos" tienen un tamaño > 2 mm y están en una proporción superior al 10%.

**Floatstone:** Textura matriz-soportada, en la que los "clastos" tienen un tamaño > 2 mm y están en una proporción superior al 10%.

Dentro de los *boundstones* diferencian los siguientes tipos:

**Framestone:** Tipo de bioconstrucción en la que los organismos construyen armazones rígidos (Ej.: arrecifes de corales).

**Bindstone:** Tipo de bioconstrucción por organismos (esqueléticos o no) que incrustan y atrapan el sedimento (Ej.: estromatolitos).

**Bafflestone:** Tipo de bioconstrucción en la que los organismos atrapan sedimento por efecto pantalla (Ej.: *mud mounds*).

## Figura 8

*Clasificación de las Calizas según Dunham, Modificado por Embry y Klovan en 1971*

Textura deposicional reconocible						Textura deposicional no reconocible
Componentes originales no unidos durante la sedimentación				Componentes orgánicamente unidos durante el depósito		
Con lodo calcáreo (micrita) [tamaño limo fino y arcilla]		Textura sostenida por granos sin lodo calcáreo	> 10% granos > 2mm	Boundstone (puede dividirse en 3 tipos de acuerdo con la forma de las estructuras orgánicas)		Cristalina
Textura lodo-sostenida	Textura grano-sostenida			Textura lodo-sostenida	Textura sostenida por granos > 2mm	
< 10% granos Mudstone	> 10% granos Wackestone	Packstone	Grainstone	Floatstone	Rudstone	
				Bafflestone	Bindstone	Framestone

Nota. Adaptado de *Clasificación de Dunham 1962, modificado por Embry y Klovan 1971* [Fotografía] por Caballero C. I., 2020, (<http://usuarios.geofisica.unam.mx/cecilia/CT-SeEs/PracticaClacZ.pdf>). Copyright

### 3.1.4 Características Físicas de las calizas

Las propiedades físicas más importantes de las rocas calizas son el color, resistencia, densidad, peso específico, dureza y porosidad.

**3.1.4.1 Color.** Las calizas ricas en calcio y las calizas dolomíticas son blancas cuando son puras, pero también varían entre gris y negro a consecuencia de impurezas carbonosas que contienen. El óxido férrico da a la caliza color amarillo, rojo o pardo. La pirita, la marcasita y la siderita alteran el color superficial de la piedra al oxidarse bajo la influencia de los agentes atmosféricos (Kirk & Othmer, 1966).

**3.1.4.2 Resistencia.** Como piedra de cantería, la resistencia de la caliza es una propiedad importante. La resistencia de la caliza a la compresión o al aplastamiento oscila entre 98.4 y 583.5 kg/cm<sup>2</sup>. Esta resistencia excede mucho de la necesaria para la seguridad, pues 25 kg/cm<sup>2</sup> suele ser la carga máxima a la compresión a que se someten las rocas (Kirk & Othmer, 1966).

**3.1.4.3 Densidad Aparente.** La densidad aparente se define como la masa de suelo por unidad de volumen (g/cm<sup>3</sup> o t/m<sup>3</sup>). Describe la compactación del suelo, representando la relación entre sólidos y espacio poroso (Keller & Håkansson, 2010).

Existen tres métodos para determinar la densidad aparente de los suelos y rocas, el método de la parafina, el método de la probeta y el método del cilindro siendo este último el más utilizado para realizar este tipo de ensayos.

**Tabla 1**

*Densidad Aparente de la Caliza*

TIPO DE ROCA O COMPONENTE	Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> ) Rango medio
Caliza en seco	1.92 a 2.24
Caliza húmeda	2.24 a 2.88

*Nota.* Kirk & Othmer, 1966

**3.1.4.4 Peso Específico.** Es la relación entre la unidad de peso y la unidad de volumen de la fase sólida del suelo, siendo más o menos constante, ya que está determinado por la composición química y mineralógica de la fase sólida (Bear, 1972).

**Tabla 2**

*Peso Específico de algunos componentes*

TIPO DE ROCA O COMPONENTE	Peso Específico (g/cm <sup>3</sup> ) Rango medio
Humus y Yeso	< 2.5
Cuarzo, Feldespato, Calizas, Micas	2.5 a 3.0
Limonitas, Piroxenos y Olivinos	3.0 a 4.0
Hematitas y Magnetitas	> 4.0

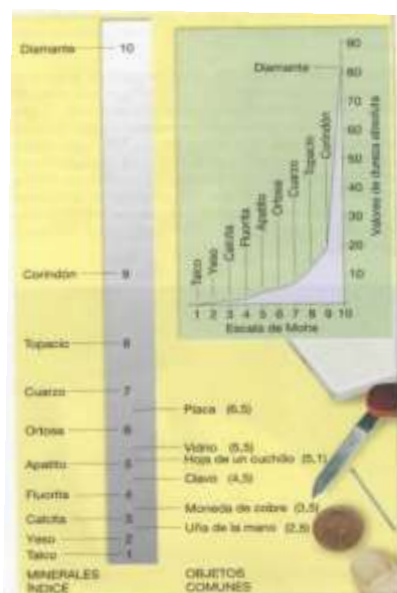
*Nota.* Bear, 1972

**3.1.4.5 Dureza.** La dureza de la calcita según la escala de Mohs es de 3, casi todas las calizas se rayan con una moneda de cobre.

La dureza de la caliza influye en la facilidad para trabajarla, es una propiedad importante en la piedra de cantería. Por lo general, las calizas se trabajan con bastante facilidad si no contienen minerales de silice y otros minerales duros (Kirk & Othmer, 1966).

**Figura 9**

*Escala de Mohs*



*Nota.* Adaptado de *Ciencias de la Tierra* [pag. ] por (Tarbuck, Lutgens, & Tasa, 2005), Pearson Educación S. A.

**3.1.4.6 Porosidad.** La porosidad, propiedad muy variable en las calizas, se expresa en porcentaje del espacio ocupado por los poros referido al volumen total de la roca. Las calizas menos compactas tienen un grado elevado de porosidad y pesan hasta no más de  $1.92 \text{ g/cm}^3$ . Las piedras más densas, con poca porosidad, pueden pesar  $2.40$  a  $2.72 \text{ g/cm}^3$ . La porosidad afecta a la duración de la roca, porque el agua infiltrada y congelada hace que la piedra se resquebraje. Además, la caliza muy porosa y húmeda exige más combustible para convertirla en cal (Kirk & Othmer, 1966).

La porosidad total como propiedad física o el volumen poroso que posee una roca es el primer parámetro a considerar por su importancia. De acuerdo con sus valores se suelen considerar las siguientes clases (Archie, 1952) y (Sander, 1967).

**Tabla 3**

*Porosidad de las Calizas*

<b>Porosidad de las Calizas</b>	<b>Porcentaje</b>
Porosidad muy baja	< 4%
Porosidad baja	4 a 8%
Porosidad media	8 a 16%
Porosidad alta	16 a 32%
Porosidad muy alta	> 32%

*Nota.* Archie, 1952 y Sander, 1967

Estos valores incluyen todos los espacios vacíos de la roca, es decir, la porosidad de poro y la porosidad de fisura; normalmente la contribución de las fisuras al volumen poroso total es muy pequeña, excepto en las rocas de muy baja porosidad.

### **3.1.5 Usos de la Caliza**

La caliza tiene diferentes usos en los campos de la agricultura, acuicultura, minería, petróleo, arquitectura y principalmente en construcción.

- En la agricultura y acuicultura luego de una trituration fina se lo utiliza como agente neutralizador del pH y para aumentar la disponibilidad de los nutrientes de los suelos.
- En minería se ocupa la caliza triturada para refinar algunos metales y también se la utiliza para recubrir las paredes de las minas de carbón para facilitar la respiración de la gente.

- Otro uso que se le da a la caliza es para sellar los pozos petroleros por su gran resistencia a la meteorización.
- En arquitectura se la utiliza como roca ornamental, para baldosas o para crear esculturas.
- Finalmente, el uso principal de las calizas es en el campo de la construcción, ya sea para fabricar cemento, como relleno y lastre en la construcción de vías o como **Pintura a base de cal**.

### 3.2 Pinturas a base de Cal

Según Levano et al.,(2018) se define como "Pintura a base de cal" a la pintura conformada por:

- Hidróxido de Calcio o Cal.
- Pigmentos de tierras naturales, tienen que cubrir el 15% del peso de la Cal
- Agua como disolvente
- Aditivos o pegantes.

### 3.3 Catálisis

Un catalizador es una sustancia que, sin ser modificada o consumida durante el proceso, cambia la velocidad de una reacción química. Los catalizadores pueden ser positivos, cuando aceleran la velocidad de reacción, o negativos, cuando desaceleran la velocidad de reacción. Al cambiar la velocidad de reacción no se alteran las condiciones de equilibrio, es decir, los catalizadores afectan por igual a la reacción directa y a la inversa. El catalizador aumenta la velocidad de la reacción química al reducir la energía del estado de transición y así disminuir la energía de activación y/o cambiando el mecanismo de la reacción. (Pinos, 2019, párr. 1)

Los catalizadores pueden clasificarse por su forma física en homogéneos y heterogéneos. **Los catalizadores homogéneos** tienen una composición y una estructura uniforme (como la leche con cacao). Los catalizadores homogéneos se disuelven, como el cacao, junto con los reactivos. Tienen la ventaja de ser muy eficaces ya que la libertad de

movimiento facilita el contacto entre las moléculas. Por otro lado, suelen ser difíciles de separar como intentar separar el cacao de la leche después de mezclarlo. **Los catalizadores heterogéneos** no se mezclan con la reacción, sólo entran en contacto con ella. Como cocinar, en el que podemos separar la sopa de los ingredientes sólidos, en una reacción de catálisis heterogénea es más sencillo 'extraer' el catalizador y purificar los productos (Melchiorre et al., 2020).

Los catalizadores también pueden clasificarse según su estructura química en metálicos, los organocatalizadores y las enzimas. **Los catalizadores metálicos**, como su nombre indica, se basan en metales, generalmente unidos a pequeñas moléculas llamadas 'ligandos'. **Los organocatalizadores** no tienen metales. Tratan de imitar a los catalizadores naturales, y de hecho muchos de ellos son derivados de moléculas biológicas como la prolina o la urea. **Las enzimas** son los catalizadores que utilizan nuestras células. En su mayoría son proteínas. Tras varios millones de años de evolución, las enzimas son los catalizadores más eficientes del mundo (Melchiorre et al., 2020).

## Capítulo cuatro

### Metodología para el desarrollo de la investigación

#### 4.1 Recopilación de información.

Se inicia el presente estudio recopilando información desde cuando se empezó a utilizar la cal en fresco para revestir fachadas. La primera pintura de Cal en fresco data aproximadamente en los años 6600 – 5650 a.C. en Anatolia, Turquía (Mellaart, 1971).

En las últimas dos décadas las pinturas a base de Cal pigmentadas y en fresco han disminuido considerablemente su utilización ante las pinturas plásticas debido a la variedad de colores y su fácil aplicación, aunque en su composición contienen porcentajes muy elevados de petroquímicos que son perjudiciales para la salud y contaminantes para el medio ambiente.

Se recopiló información sobre las pinturas a base de Cal que sirven como medio catalítico para captar Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>). En el presente proyecto vamos a iniciar con la producción de la Cal en el yacimiento de Calizas de la parroquia Nambacola, provincia de Loja.

Nos basamos en el trabajo de titulación de Ochoa (2001) que se titula diseño de explotación de Calizas área minera UTPL, que se realizó a este yacimiento, delimitamos el área total para proceder con el muestreo.

#### 4.2 Trabajo de Campo.

Para poder plasmar el trabajo de campo se realizó un estudio bibliográfico previo de la zona de estudio, el cual sirvió como guía para proceder con el muestreo de la caliza. Se procedió a obtener dos muestras con diferentes fines de determinación.

- La primera muestra es una muestra *inalterada* tomada con la ayuda del cilindro de kopecky, el objetivo de tomar la muestra con esta herramienta es conservar la estructura y la humedad que tiene la roca en el lugar donde se hizo el muestreo (Polanco Rodríguez, 2012). Esta muestra nos servirá para determinar las caracterizaciones físicas de la roca como son

la densidad aparente, el peso específico y la porosidad. Se Etiquetó la muestra como muestra N° 1. (Figura 10).

### Figura 10

*Muestreo con el Cilindro Kopecky para los Ensayos Físicos*



- La segunda muestra es una muestra *alterada*, debido a que está constituida por material disgregado y fragmentado, ya que no se toma precauciones especiales para conservar las características de estructura y humedad del terreno. El objetivo de tomar de esta manera la muestra es para realizar los ensayos químicos como: pureza de la caliza, fluorescencia de rayos X, y ensayos mineralógicos como difracción de rayos X. Además, a partir de esta muestra se elaboró la pintura a base de Cal. Esta muestra fue etiquetada en el laboratorio como Muestra N° 2. (Figura 11).

**Figura 11**

*Muestreo para Determinaciones Químicas y Realización de la Pintura*



Las muestras fueron enfundadas y debidamente etiquetadas para ser llevadas al laboratorio. (Figura 12).

**Figura 12**

*Ingreso de Muestras al Laboratorio*



### **4.3 Trabajo en Laboratorio.**

Consistió en la determinación de ensayos físicos, químicos y mineralógicos, además de la realización de la pintura a base de Cal con el fin de realizar la captación de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>).

### 4.3.1 Caracterización Física de la Roca Caliza

A partir de la muestra N° 1 obtenida con el cilindro de Kopecky se determinó la densidad aparente, peso específico y porosidad, se realizó tres veces el procedimiento para obtener la media de los ensayos obtenidos.

#### Figura 13

*Preparación de Muestra N° 1 para las Determinaciones de Densidad Aparente, Peso Específico y Porosidad*



**4.3.1.1 Densidad aparente de la Roca Caliza.** Para determinar la densidad aparente se realizó por el método del cilindro ya que es el método más utilizado. Para su determinación se procedió a realizar los siguientes pasos:

- Se seca la muestra en el horno a 105°C durante 24 horas.
- Una vez seca la muestra la ponemos a reposar en el desecador de cristal.
- Luego se pesa la muestra seca en la balanza de precisión y se anota como (peso de suelo seco).
- Se determina la altura y el radio del cilindro de kopecky con el fin de determinar el volumen por medio de la formula  $U = \pi r^2 h$ .
- Finalmente se calcula la densidad aparente con las siguiente formula:

Densidad aparente

$$d_p = \frac{\text{peso de suelo seco}}{\text{Volumen del cilindro}}$$

- Se repite el procedimiento tres veces para obtener menos margen de error.

**Figura 14**

*Determinación de Densidad Aparente de la Caliza*



**4.3.1.2 Peso específico de la Roca Caliza.** Se determinó el peso específico de la roca caliza por el método del picnómetro, tomando como referencia la norma ASTM C 188 – 09, seguidamente se detalla el proceso:

- Se Llena el picnómetro de 50 ml con agua destilada, luego se pesa y se registra como Peso A.
- Luego se desecha aproximadamente la mitad de agua y nuevamente se pesa, registramos como Peso B.
- Se agrega al picnómetro una pequeña cantidad de muestra seca, nuevamente se pesa y se anota como Peso C.
- Se llena nuevamente el picnómetro con agua destilada, se pesa y se registra como peso D.

- Se apunta la densidad del agua  $d_a = 1 \text{ g/cm}^3$ .
- Finalmente se calcula el peso específico mediante las siguientes fórmulas:

$$E = C - B$$

$$F = D - A$$

$$G = F * d_a$$

$$\gamma = \frac{E}{G}$$

- Se Repite el procedimiento tres veces.

**Figura 15**

*Determinación de Peso Específico Natural, Seco y Saturado*



**4.3.1.3 Porosidad de la Roca Caliza.** La porosidad de la roca caliza se la determinó con los valores de la densidad aparente y peso específico ya obtenido; mediante la siguiente formula:

$$P \% = 1 - \frac{D \text{ aparente}}{P \text{ esp}} * 100$$

#### **4.3.2 Caracterización Química de la Roca Caliza**

Se determinó la composición química de la roca caliza a partir de la muestra N° 2, por medio del método de Fluorescencia de rayos X, además, se analizó la pureza del Carbonato de Calcio por el método volumétrico y la pureza de la Caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) por estequiometría.

**4.3.2.1 Preparación de la Muestra.** A partir la muestra N° 2 o muestra alterada, que se define como la muestra constituida por el material disgregado o fragmentado, en la que no se toma precauciones especiales para conservar las características de estructura y humedad (Polanco Rodríguez, 2012)

A continuación, se redacta los pasos a seguir para su preparación.

**4.3.2.1.1 Secado.** El secado consiste en secar la muestra en la estufa a una temperatura de 105°C durante 48 horas.

**4.3.2.1.2 Trituración.** Se procedió a disgregar la muestra por medio de la trituración de materiales que consiste en realizar la descomposición en tres fases, trituración primaria, trituración secundaria y trituración terciaria. De cada trituración, el material resultante se vuelve a triturar esperando una reducción de partículas con relación a cada trituración. El procedimiento que se llevó a cabo es el siguiente:

- Se colocó la muestra en la trituradora Retsch para procesar la primera trituración.
- Luego con la espátula se retiró el material restante y se colocó en un recipiente.
- Se repitió el proceso para la segunda y tercera trituración.

**Figura 16**

*Trituración de Muestra N° 2*



**4.3.2.1.3 Tamizado.** Seguidamente, se procedió a pasar la muestra por el tamiz N° 200 manualmente, si aún el material esta grueso se vuelve a pasar por la trituradora hasta lograr pasar toda la muestra por el tamiz, ya que, servirá para realizar los ensayos químicos y la pintura de Cal.

**Figura 17**

*Tamizado de Muestra N° 2*



**4.3.2.2 Composición Química de la Caliza por Fluorescencia de Rayos X.** Para determinar la composición química de la roca caliza se utilizó el equipo portátil de fluorescencia de rayos X marca Bruker, modelo S1 Turbo <sup>SD</sup> (Figura 18), por el método de medición *mining light elements* en el que se cuantifica el porcentaje de elementos químicos presentes como óxidos expresados en aniones y/o cationes. Para la medición realizamos el siguiente procedimiento:

- Se tomó de 5 a 10 g de la muestra N° 2 ya secada, triturada y tamizada anteriormente.
- Se encendió el equipo y se seleccionó el método a utilizar.
- Se colocó la muestra en el recipiente del equipo.
- Luego se realiza la medición y se espera un par de minutos para observar los resultados en la pantalla.
- Finalmente, los datos obtenidos en el equipo se los extrae con la ayuda de un USB.

**Figura 18**

*Determinación de Fluorescencia de Rayos X*



**4.3.2.3 Pureza del Carbonato de Calcio.** Para determinar la pureza del Carbonato de Calcio se utilizó el método volumétrico para el cual se realizó el siguiente procedimiento:

- Se pesó 0.327g en la balanza analítica.
- Se Colocó la muestra en el lado izquierdo del kitasato, mientras se llenó de agua el recipiente de pírex y la probeta.
- Seguidamente se dio la vuelta a la probeta llena de agua sin burbujas de oxígeno y se colocó sobre el pírex.
- Se midió 1 ml de HCl y se lo ubicó en el lado derecho del kitasato, se cerró con el tapón y se ubicó la manguera en la otra abertura del kitasato.
- Se insertó la manguera dentro de la probeta y se procedió a reaccionar el mineral con el HCl.
- Finalmente, se midió el volumen desplazado y se realizó los cálculos.

**Figura 19**

*Determinación de la Pureza del Carbonato de Calcio por Volumetría*



**4.3.2.4 Pureza de la Caliza (CaCO<sub>3</sub>).** Se determinó la pureza de la caliza (CaCO<sub>3</sub>) por el método de estequiometría, a partir de los datos obtenidos de la pureza de Carbonato de Calcio por el método volumétrico, utilizando el factor de corrección  $f_c = 1.0442$  con (CaCO<sub>3</sub>) químicamente pura.

$$\% \text{ Pureza } CaCO_3 = \frac{X}{F_c}$$

Donde;

**X** = % de pureza de Carbonato de Calcio obtenido por el método volumétrico.

**F<sub>c</sub>** = factor de corrección.

### **4.3.3 Caracterización Mineralógica de la Roca Caliza**

Se determinó la composición mineralógica de la roca caliza a partir de la muestra N° 2, por el método de Difracción de rayos X, con el propósito de determinar la composición mineral de la roca caliza.

**4.3.3.1 Preparación de la Muestra.** Se tomó la muestra N° 2 o muestra alterada, y se realizó la misma preparación que se utilizó en la caracterización química.

Se realizó el secado a 105°C, luego se trituró la muestra y finalmente se pasó por el tamiz N° 200 manualmente.

**4.3.3.2 Difracción de Rayos X.** Se realizó los ensayos de difracción de rayos X a través del software "Difrac EVA" que tiene una gran base de datos de minerales, la cual permite realizar el análisis cualitativo de graficas mediante difractogramas que se miden por el software "Topas".

En el presente método de difracción de rayos X se determinó el porcentaje de minerales que presenta la roca caliza.

- De la muestra N° 2 preparada se toma 10g de muestra y llevamos directamente al equipo de difracción de rayos X.

#### **4.3.4 Preparación de la pintura de Cal**

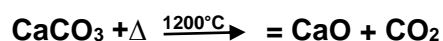
Para preparar la pintura de Cal se tomó la muestra N° 2, a la que se la preparó igual que para la determinación química y mineralógica de la roca. A continuación, se realizó la producción de Óxido de Calcio a partir de la Caliza, luego se convirtió el Óxido de Calcio en Hidróxido de Calcio y finalmente se realizó la pintura de cal.

**4.3.4.1 Preparación de la Muestra.** Se tomó la muestra N° 2 o muestra alterada, a continuación, se redacta los pasos a seguir para su preparación.

- Se secó la muestra en la estufa a una temperatura de 105°C.
- Se procedió a disgregar la muestra por medio de la trituración de materiales.
- Seguidamente se procedió a pasar la muestra por el tamiz N° 200 manualmente

**4.3.4.2 Producir Óxido de Calcio (CaO), a partir de Calizas (CaCO<sub>3</sub>).** Se produjo Óxido de Calcio (CaO) o cal apagada a partir de Calizas (CaCO<sub>3</sub>) por el método de calcinación, se realizó el siguiente procedimiento:

- Se pesó 292.50g de (CaCO<sub>3</sub>) en la balanza de precisión.
- Se calcinó en la mufla a 1200°C durante 4 horas.
- De la mufla se retiró con las pinzas y se colocó en el disecador de cristal.
- Se pesó el resultado de la reacción.



- Se obtuvo como resultado 151.85 g el Óxido de Calcio (CaO) mientras que el CO<sub>2</sub> se evapora producto de la calcinación.

**Figura 20**

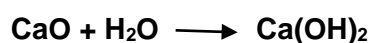
*Calcinación del Carbonato de Calcio a 1200°C*



#### 4.3.4.3 Producir Hidróxido de Calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) a partir del Óxido de Calcio (CaO)

**obtenido.** Se produce el Hidróxido de Calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) o cal hidratada, a partir del Óxido de Calcio (CaO) por el método de estequiometría, para lo cual se realizan los siguientes pasos:

- Se pesó 375.75 g de Óxido de Calcio (CaO) en la balanza analítica.
- Se calculó el agua requerida para la hidratación del Óxido de Calcio (CaO) por medio de estequiometría.



- Se mezcló 375.75 g de CaO con 120.68 ml de H<sub>2</sub>O y se obtuvo Hidróxido de Calcio Ca(OH)<sub>2</sub>.

**Figura 21**

*Hidratación del Óxido de Calcio*



**4.3.4.4 Elaboración y aplicación de la Pintura de Cal.** La pintura de Hidróxido de Calcio o pintura de Cal se realiza a través del siguiente procedimiento:

- Se pesó 400g Hidróxido de Calcio en la balanza de precisión.
- Se agregó 2 litros de agua.
- Se añadió 100g de sal (NaCl) como sellador.
- Se mezcló hasta obtener una pintura homogénea y espesa.

**Figura 22**

*Preparación de la Pintura de Cal*



- Una vez logrado una viscosidad homogénea y espesa en la pintura, se procedió a pintar una pared plana, limpia y que no haya sido pintada con ningún tipo de pintura anteriormente.
- Para el presente proyecto se procedió a pintar una pared con un área de 1.5m x 1.5m de espesor.

**Figura 23***Aplicación de la Pintura de Cal*

#### **4.3.5 Evaluación de la Captación de CO<sub>2</sub> en la pintura de Cal**

La aplicación de la pintura de cal se la realizó en la ciudad de Catamayo, el día 4 de diciembre del 2020, en la avenida Eliseo Arias Carrión que cuenta con una gran circulación de vehículos livianos y pesados; esta ubicación estratégica tiene como objetivo catalizar el Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) producto de la quema de los combustibles fósiles de los vehículos en circulación.

**4.3.5.1 Muestreo de la Pintura de Cal.** Se realizaron dos muestreos en la pintura de Cal, el primero el 4 de febrero del 2021, luego de 60 días de haber aplicado la pintura, y el segundo el 4 marzo del 2021, luego de 90 días de haber pintado, se realizó los muestreos con el siguiente procedimiento:

- Con la ayuda de una espátula y un cuadro de madera se procedió a raspar la pintura con mucho cuidado de no alterar la muestra con impurezas que puedan alterar los resultados.
- Finalmente, se enfundó la muestra y se llenó la muestra al laboratorio con su respectiva etiqueta.

**Figura 24***Muestreo de la Pintura de Cal*

**4.3.5.2 Determinación de Captación de CO<sub>2</sub> en la pintura de Cal.** Una vez ingresadas las muestras de la pintura de cal al laboratorio se realizó dos determinaciones cada muestra para verificar la presencia de CaCO<sub>3</sub>, el primer ensayo por difracción de rayos X y el segundo ensayo de Pureza de Carbonato de Calcio (CaCO<sub>3</sub>) por el método volumétrico en la pintura.

Finalmente determinamos el % de CO<sub>2</sub> captado por el método de estequiometria con los datos obtenidos en difracción de rayos X y pureza de Carbonato de Calcio por el método volumétrico.

## Capítulo cinco

### Resultados y análisis

#### 5.1 Resultados de Caracterización física de la Roca Caliza

Esta caracterización permite determinar los parámetros físicos, en el presente proyecto se determinó la densidad aparente, el peso específico y porosidad de la roca del cual se describe los resultados a continuación:

##### 5.1.1 Resultados de Densidad aparente

Se obtuvo como media de los resultados de la densidad aparente (Tabla 4)  $1.18 \text{ g/cm}^3$ .

**Tabla 4**

*Resultados de Densidad Aparente  $\text{g/cm}^3$*

Número de Muestra	Peso de suelo seco (g)	Volumen Cilindro ( $\text{cm}^3$ )	Densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ )	Media Densidad aparente
Muestra N. 1.1	65.15 g	55.38 $\text{cm}^3$	1.18 $\text{g/cm}^3$	
Muestra N. 1.2	64.85 g	55.38 $\text{cm}^3$	1.17 $\text{g/cm}^3$	1.18 $\text{g/cm}^3$
Muestra N. 1.3	65.90 g	55.38 $\text{cm}^3$	1.19 $\text{g/cm}^3$	

Se comparó la media de los resultados de la densidad aparente  $1.18 \text{ g/cm}^3$  respecto a los rangos medios descritos en la (Tabla 1) de  $1.92$  a  $2.24 \text{ g/cm}^3$ , se obtuvo una densidad aparente baja, esto indica que la roca caliza del yacimiento Nambacola no es difícil de descomponer debido a su bajo nivel de compactación.

##### 5.1.2 Resultados de los Pesos Específicos

Para determinar el peso específico se utilizó la norma ASTM C 188 – 09, por el método del picnómetro. La media del peso específico de la roca caliza es de  $1.57 \text{ g/cm}^3$  (Tabla 5).

**Tabla 5***Resultados de Peso Específico g/cm<sup>3</sup>*

Muestra	A	B	C	D	E= C- B	F= D- A	G= F*d <sub>a</sub>	Pe= E/G	Media Pe
M 1.1	90.25	66.30	67.05	90.70	0.75	0.45	0.45 g/cm <sup>3</sup>	1.67 g/cm <sup>3</sup>	1.57 g/cm <sup>3</sup>
M 1.2	89.20	65.75	66.60	89.60	0.60	0.40	0.40 g/cm <sup>3</sup>	1.50 g/cm <sup>3</sup>	
M 1.3	87.25	63.05	63.90	87.80	0.85	0.55	0.55 g/cm <sup>3</sup>	1.55 g/cm <sup>3</sup>	

Nota. Donde;

A = Peso del picnómetro lleno de agua destilada.

B = Peso del picnómetro con agua destilada hasta la mitad.

C = Peso del picnómetro con agua destilada hasta la mitad más muestra seca.

D = Peso del picnómetro lleno de agua destilada más muestra seca.

d<sub>a</sub> = Densidad del agua que es igual a 1g/cm<sup>3</sup>.

Pe = Peso específico.

Según los rangos medios de 2.5 a 3.0 g/cm<sup>3</sup> expresados en la (Tabla 2), el peso específico obtenido de la roca caliza del yacimiento Nambacola 1.57 g/cm<sup>3</sup> es bajo, esto se debe a que la roca caliza no es 100% pura, es por ello que las impurezas como los humus y la arcilla bajan el peso específico de la roca. Además, según Kirk & Othmer en (1966) las calizas menos compactas tienen un grado elevado de porosidad y pesan hasta no más de 1.92 g/cm<sup>3</sup>.

### **5.1.3 Resultados de Porosidad total**

Como media de la porosidad total de la roca se obtuvo como resultado 24.86% (Tabla 6). En la siguiente tabla detallamos los resultados obtenidos:

**Tabla 6***Resultados de Porosidad Total*

Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Peso Específico (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidad total (%) $P \% = 1 - \frac{D \text{ aparente}}{P \text{ esp}} * 100$	Media Porosidad total
1.18 g/cm <sup>3</sup>	1.67 g/cm <sup>3</sup>	29.35 %	
1.17 g/cm <sup>3</sup>	1.50 g/cm <sup>3</sup>	22.00 %	24.86 %
1.19 g/cm <sup>3</sup>	1.55 g/cm <sup>3</sup>	23.23 %	

Según la (Tabla 3), la porosidad total de 16 a 32% es alta, es por ello que se determinó que esta roca caliza obtenida del yacimiento Nambacola, tiene un nivel de compactación bajo debido a que se encuentran espacios porosos entre sus partículas.

## 5.2 Resultados de caracterización química de la roca Caliza

La presente caracterización permitió determinar los parámetros químicos, en el que se determinó fluorescencia de rayos X y pureza de Carbonato de Calcio en la roca caliza, del cual se va a describir los resultados a continuación:

### 5.2.1 Resultados de Fluorescencia de Rayos X

Se realizó ensayos de fluorescencia de rayos X con el fin de determinar los porcentajes de elementos químicos encontrados en la muestra de caliza; de la cual se deriva la pintura de cal.

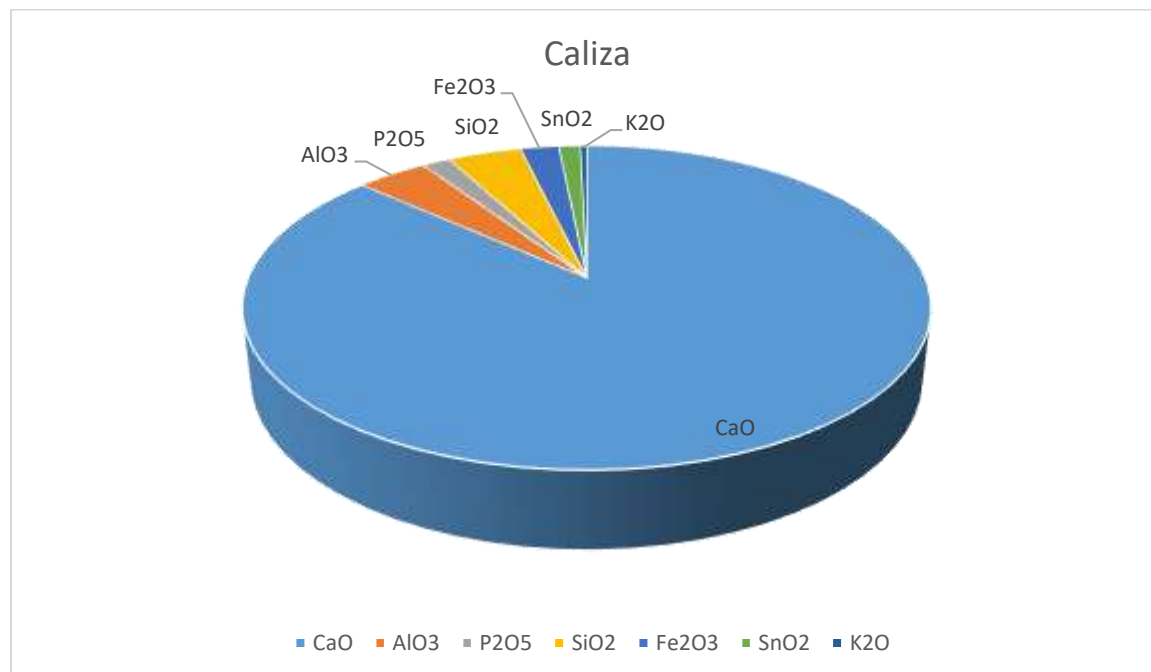
Los elementos encontrados principalmente son: Óxido de Calcio con un porcentaje del 84.2%, seguido por Óxido de Silicio con 4.01% y Óxido de Aluminio con 3.89%. Detallamos los resultados de fluorescencia de rayos X en la siguiente tabla:

**Tabla 7***Resultados de Fluorescencia de Rayos X*

Muestra	SiO <sub>2</sub>	AlO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SnO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O
Caliza	4.01	3.89	1.52	84.2	2.1	1.17	0.36

**Figura 25**

*Porcentajes de Elementos Químicos de las Calizas*



### **5.2.2 Pureza de Carbonato de Calcio de la roca Caliza por volumetría**

Se determinó la pureza de Carbonato de Calcio por el método volumétrico (Apéndice 4). Como resultado de la pureza del Carbonato de Calcio de la roca Caliza se obtuvo 92.84%.

Según Maldonado (2020) la roca caliza es catalogada como pura cuando su composición química es de 90 a 100% de calcita, lo que permitió concluir que la roca obtenida del yacimiento de calizas de Nambacola es pura (Figura 4).

### **5.3 Resultados de caracterización mineralógica de la Roca Caliza**

Esta caracterización permitió determinar los minerales presentes en la roca, se realizó esta determinación por el método de difracción de rayos X.

#### **5.3.1 Resultados de Difracción de Rayos X en la roca Caliza**

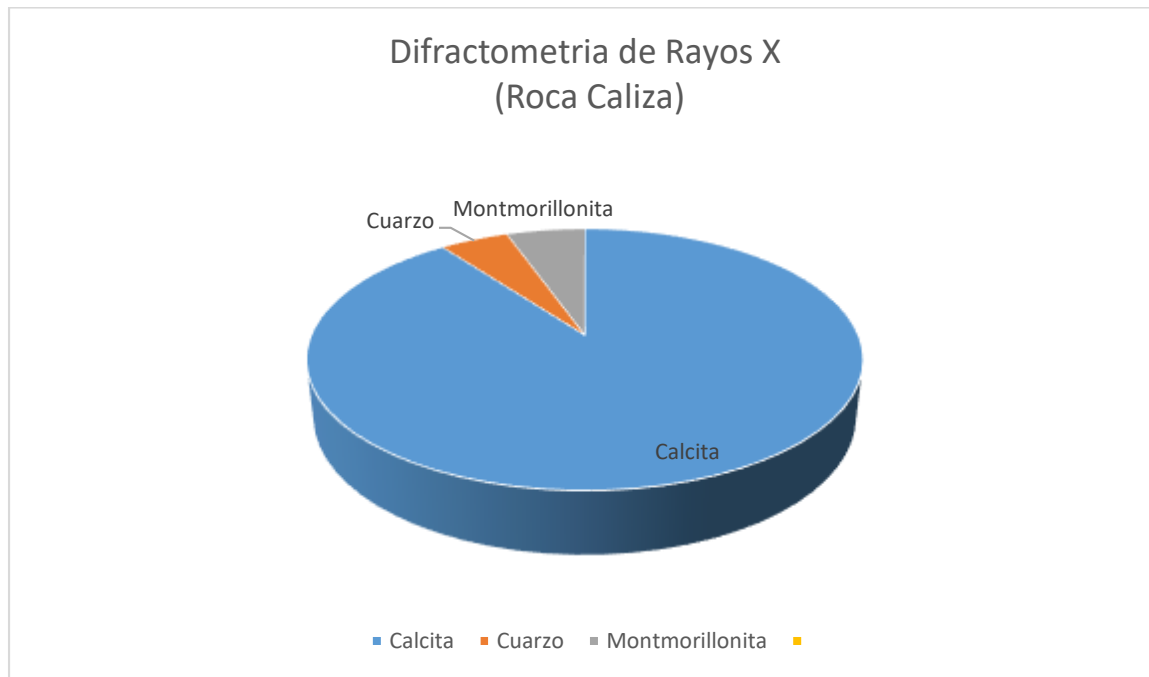
Se realizó el análisis mineralógico a través de difracción de rayos X que se define como la caracterización cualitativa y cuantitativa de estructuras cristalinas de cualquier mineral.

A partir de la muestra de la roca caliza obtenida en la parroquia Nambacola, se realizó el ensayo con el fin de determinar los minerales de la roca por el método de difracción de

rayos X, por el cual se obtuvo como resultado 89.79% de calcita, 4.76% de cuarzo y 5.45% de montmorillonita como lo detalla la figura N° 26.

**Figura 26**

*Resultados de Difracción de Rayos X de la Roca Caliza*



#### 5.4 Producción de Óxido de Calcio (CaO) a partir de la caliza (CaCO<sub>3</sub>) por calcinación

Se produjo (CaO) Óxido de Calcio por el método de Calcinación en lo experimental y se comparó los resultados por medio de estequiometría en teoría.

Este método de calcinación consistió en fundir 292.50 g de roca Caliza (CaCO<sub>3</sub>) a una temperatura de 1200°C durante 4 horas.

Como resultado se obtuvo 151.85 gr de Óxido de Calcio (CaO), que representa el 51.9% de la composición inicial de la roca caliza (CaCO<sub>3</sub>). (Apéndice 7).

Teóricamente por medio de estequiometría partiendo con el mismo peso de la roca Caliza (CaCO<sub>3</sub>) 292.50 g se obtuvo 152.15 g de Óxido de Calcio (CaO). Que representa el 52.0% de la composición inicial de la roca caliza (CaCO<sub>3</sub>). (Apéndice 7).

**Figura 27**

Comparación de la Producción de CaO por el Método Práctico (Calcinación) y Teórico (Estequiometría)



Adicionalmente, determinamos el % de rendimiento con los resultados de método experimental (calcinación) y los resultados por el método teórico (Estequiometría), obteniendo 99.8% de rendimiento porcentual. (Apéndice 8).

### 5.5 Producción de Hidróxido de Calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) a partir del Óxido de Calcio (CaO) producido

Se realizó la hidratación del Óxido de Calcio (CaO) aplicando agua (H<sub>2</sub>O). Para calcular el agua requerida para añadirle al Óxido de Calcio, se realizó la determinación por el método estequiométrico.

Cómo resultado se determinó que es necesario 120.68 ml de agua (H<sub>2</sub>O) para agregar a 375.75 g de (CaO). Produciendo finalmente 496.48 g de Hidróxido de Calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>). (Apéndice 9).

### 5.6 Resultados de la captación de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) por la pintura de Cal como medio catalítico ambiental

El Hidróxido de Calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) es el componente principal de la pintura de Cal, a éste, con el tiempo y la presencia del sol se evapora el agua (H<sub>2</sub>O) y además cataliza Dióxido

de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) del ambiente. Culminando el ciclo de la carbonatación y convirtiéndose nuevamente en una roca caliza ( $\text{CaCO}_3$ ).

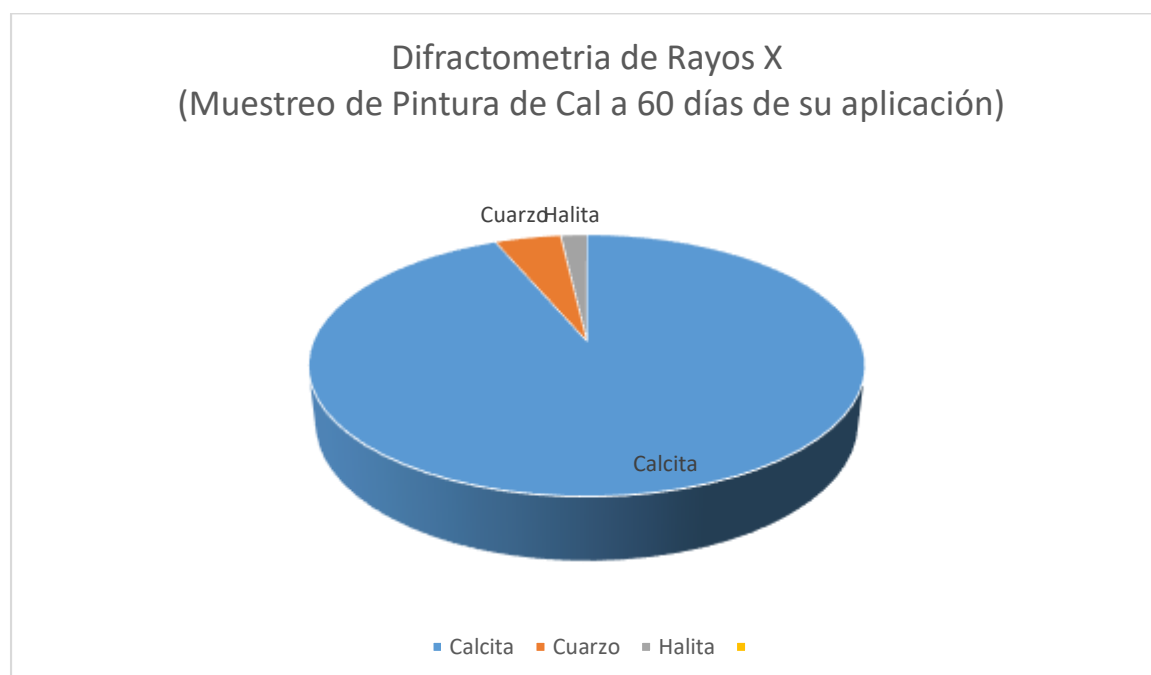
Para estimar el proceso de carbonatación se realizó dos muestreos a la pintura de Cal. El primero a los 60 días de aplicar la pintura y el segundo a 90 días de la aplicación.

### 5.6.1 Ensayos a la pintura de Cal luego de 60 días de haber sido aplicada

Se determinó la pureza del Carbonato de Calcio de la pintura de Cal por el método volumétrico; obteniendo como resultado 68.40% (Apéndice 5); además se determinó los minerales presentes en la pintura de Cal por medio de la difracción de rayos X, obteniendo 93.59% de calcita, 4.59% de cuarzo y 1.82% de halita, la presencia de este último mineral se debe a la aplicación de sal como sellante en la preparación de la pintura. (Figura 28).

#### Figura 28

Resultados de Difracción de Rayos X de la Pintura de Cal Luego de 60 Días de Aplicación



Según los resultados de captación de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) a los 60 días de aplicación el 93.59% de calcita que lee software del difractograma de rayos X, en realidad es una mezcla de Carbonato de Calcio y Óxido de Calcio, ya que la pintura se encuentra en una etapa de carbonatación, entonces el programa asocia el Óxido de Calcio con el Dióxido de Carbono y los une en un solo mineral como Calcita. Si tomamos como referencia los

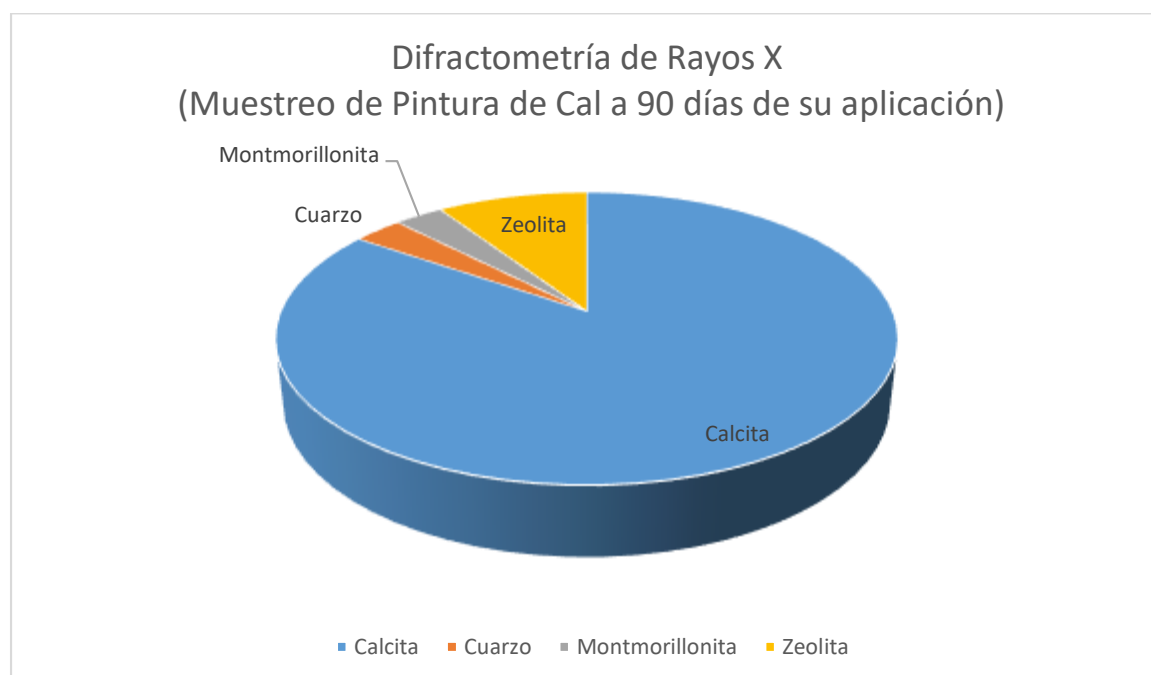
resultados de pureza de Carbonato de Calcio por el método volumétrico, se puede decir que el valor de Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) es 68.40%, mientras que el 25.19% restante del 93.59% es Óxido de Calcio. Lo que indica que, a 60 días de exposición, la pintura de cal se encuentra en proceso de captación de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ).

### 5.6.2 Ensayos a la pintura de Cal luego de 90 días de haber sido aplicada

Así mismo, se determinó la pureza del Carbonato de Calcio de la pintura de Cal por el método volumétrico; en esta determinación se obtuvo como resultado 82.24% (Apéndice 6). Finalmente, se realizó el ensayo de los minerales presentes en la pintura de Cal por medio de la difracción de rayos X, obteniendo los siguientes resultados: 84.57% de calcita, 3.07% de cuarzo, 3.02% de montmorillonita y 9.34% de zeolita.

#### Figura 29

*Resultados de Difractometría de Rayos X de la Pintura de Cal Luego de 90 Días de Aplicación*



Según los resultados de captación de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) a los 90 días de aplicación el software del difractograma de rayos X, asocia los siguientes elementos: aluminio, hidrógeno, potasio, sodio y silicio para tomarlos como Zeolita. (Figura 28). Se conoce que la roca caliza cuenta con aluminio, potasio y silicio gracias al ensayo de

fluorescencia de rayos X, mientras que el sodio es de la aplicación de sal (NaCl) y el hidrógeno del agua, al momento de realizar la pintura.

### **5.6.3 Estimación de la captación de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) por la pintura de Cal**

Se determinó la captación de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) a través de la pintura de Cal por el método estequiométrico.

Para realizar estas determinaciones se tomó los resultados de pureza de Carbonato de Calcio (CaCO<sub>3</sub>) por el método Volumétrico (82.24%) y el porcentaje de la calcita (CaCO<sub>3</sub>) por el método de difracción de rayos X (84.57%).

Finalmente se obtuvo 53.47% de captación de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) por el método volumétrico (Apéndice 10), mientras que por el método de difracción de rayos X se obtuvo 51.99% de captación de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>). (Apéndice 11).

Si comparamos los resultados por los dos métodos realizados, se tiene una diferencia de ±3% por lo que se tomó una media de 52.73% de captación de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>).

El resultado de captación de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) utilizando la pintura de Cal como medio catalítico ambiental teóricamente es igual al resultado de la evaporación de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) al momento de calcinar la roca Caliza para obtener Óxido de Calcio. Sin embargo, en el presente proyecto se obtuvo 52.73% de captación de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) a través de la pintura de Cal, mientras que el resultado de ebullición de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) al momento de calcinar la roca caliza fue 48.1%, arrojando una diferencia de ±3%, esto debido a la presencia de impurezas en la roca caliza y a que el presente proyecto se desarrolló in-situ, es decir la pintura estudiada fue expuesta al aire libre donde afectan varios factores como el viento que aloja partículas de otros materiales al momento de la exposición de la pintura durante los 90 días de captación de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), generando pequeñas diferencias al desarrollar las determinaciones en el laboratorio.

## Conclusiones

En los ensayos de caracterización física, la roca caliza tiene una densidad aparente de  $1.18 \text{ g/cm}^3$  de media, comparando con los rangos medios (Tabla N°1) se concluye que la roca caliza tiene una densidad aparente baja. Así mismo en el ensayo de peso específico se obtuvo  $1.57 \text{ g/cm}^3$  de media, comparando con los rangos medios (Tabla N°2), se comprueba que la roca caliza tiene un peso específico bajo. Esto demuestra que es fácil de descomponer, además, se obtuvo de porosidad  $24.86\%$  que comparando con los rangos medios de porosidad de las calizas (Tabla N°3) es alta.

En los ensayos de caracterización química, mediante fluorescencia de rayos X aplicados a la roca caliza, se determina que está compuesta por los siguientes elementos químicos:  $\text{CaO}$   $84.2\%$ ,  $\text{SiO}_2$   $4.01\%$ ,  $\text{AlO}_3$   $3.89\%$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$   $1.52\%$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$   $2.1\%$ ,  $\text{SnO}_2$   $1.17\%$ , y  $\text{K}_2\text{O}$   $0.36\%$ . Además, en el ensayo de pureza de Carbonato de Calcio por el método volumétrico se obtuvo  $92.84\%$  de  $\text{CaCO}_3$ ; con estos antecedentes se concluye que la roca caliza tiene una pureza alta y es rica en calcio.

En el ensayo de caracterización mineralógica, realizado por el método de difracción de rayos X, se determinó que la roca caliza está compuesta por los siguientes minerales: calcita  $89.79\%$ , cuarzo  $4.76\%$  y montmorillonita  $5.45\%$ ; ratificando que la roca caliza tiene pureza alta.

Para elaborar la pintura de Cal por el método de calcinación, se inició con  $292.50 \text{ g}$  de roca caliza ( $\text{CaCO}_3$ ), luego se fundió esta muestra a  $1200^\circ\text{C}$ , liberando Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) al ambiente, finalmente se obtuvo  $151.85 \text{ g}$  de Óxido de Calcio ( $\text{CaO}$ ) o cal viva. Además, se comparó mediante el método teórico (Estequiometría) que en  $292.50 \text{ gr}$  de roca caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) se obtiene  $152.15 \text{ g}$  de Óxido de Calcio ( $\text{CaO}$ ). Con los resultados del método experimental (Calcinación) y del método teórico (Estequiometría) obtenemos  $99.8\%$  de rendimiento porcentual.

Se realizó el cálculo por el método estequiométrico la cantidad necesaria de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) para realizar el Hidróxido de Calcio ( $\text{CaO}$ ) o apagado de cal (como comúnmente se

conoce este procedimiento). Se concluye que para 375.75 g de (CaO) se requiere 120.68 ml de (H<sub>2</sub>O), con una producción de 496.48 g de Ca(OH)<sub>2</sub>.

Para comprobar la captación de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) en la pintura, se desarrollaron dos muestreos: en el primero luego de 60 días de la aplicación, se determinó la pureza de Carbonato de Calcio obteniendo como resultado 68.40% de CaCO<sub>3</sub>, así también se determinó por difracción de rayos X los minerales presentes obteniendo como resultado 93,59% de Calcita, 4.59% de Cuarzo y 1.82% de Halita. En el segundo muestreo luego de 90 días de su aplicación, se determinó la pureza de Carbonato de Calcio obteniendo como resultado 82.24% de CaCO<sub>3</sub>, y se determinó por difracción de rayos X los minerales presentes en la pintura 84.57% de Calcita, 3.07% de Cuarzo, 3.02% de Montmorillonita y 9.34% de Zeolita.

Finalmente se concluyó que de 400g de Hidróxido de Calcio Ca(OH)<sub>2</sub> se evaporó 97.24 ml de agua por la presencia del sol, resultando 302.76 g de Óxido de Calcio (CaO), luego la pintura captó Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) del ambiente y se obtuvo 540.37 g de (CaCO<sub>3</sub>) de los cuales se estima que, de esta cantidad, el 52.73% es Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) captado por la pintura de cal obtenida del yacimiento Nambacola.

### Recomendaciones

Se debe realizar cuidadosamente el procedimiento en la determinación de la pureza del Carbonato de Calcio minimizando todos los errores que se pueden producir en el proceso como evitando burbujas de aire en la probeta, también evitar mezclar antes de tiempo la muestra con el Ácido Clorhídrico y finalmente ser cautelosos al tomar las lecturas y realizar los cálculos.

Tener precaución al hidratar el Óxido de Calcio, ya que al añadir agua a la cal se produce una reacción Exotérmica y puede producir errores en la determinación y quemaduras en la piel.

No utilizar sellador vinílico en la pintura de cal, para que no pierda la capacidad de captación de  $\text{CO}_2$ , en su lugar se utilizó Sal que cumple las mismas funciones sin perder capacidad de captación de  $\text{CO}_2$ .

Pintar en una superficie limpia, y preferible que no haya sido pintada anteriormente con pinturas sintéticas, con una capa gruesa de pintura, para que al momento de muestrear no raspar el cemento y tener errores al tomar la muestra.

Se recomienda dejar en exposición la pintura de Cal al ambiente, durante aproximadamente 90 días para la captación de Dióxido de Calcio ( $\text{CO}_2$ ); dependiendo de los niveles de  $\text{CO}_2$  al que se expone la pintura.

## Referencias

- Archie, G. E. (1952). Classification of carbonate reservoir rocks and petrophysical. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.* 36, 278–298.
- Bear, J. (1972). *Dynamics of fluids in porous media*. Dover Publications.
- Borrás, C. (2018). *Principales fuentes de emisión de CO2*. Ecología Verde.  
<https://www.ecologiaverde.com/principales-fuentes-de-emision-de-co2-404.html>
- Del Romo, A., & Guillén, F. (2012). *Caliza*. Región de Murcia Digital.  
[http://www.regmurcia.com/servlet/s.SI?sit=c,365,m,2012&r=ReP-8170-DETALLE\\_REPORTAJES](http://www.regmurcia.com/servlet/s.SI?sit=c,365,m,2012&r=ReP-8170-DETALLE_REPORTAJES)
- Dunham, R. J. (1962). Classification of Carbonate Rocks. *W.E. Ham*.
- Embry, A. F., & Klovan, E. J. (1971). A late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, NWT. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*.
- GAD Parroquial de Nambacola (GADPN). (2015). *Plan de desarrollo y Ordenamiento Territorial*.
- Goldfields. (1993). *Sumario Técnico del proyecto Nambija*.
- Keller, T., & Håkansson, I. (2010). Estimation of reference bulk density from soil particle size. *Geoderma*, 398.
- Kennerly, J. B. (1992). *Geología de la Provincia de Loja en el Sur del Ecuador*.
- Kirk, R., & Othmer, D. (1966). *Enciclopedia de Tecnología Química* (UTEHA (ed.)).
- Klen, C.; Hurlbut, C. S. (1998). *Manúal de Mineralogía* (Reverté (ed.); Cuarta edi).
- Levano, B., Navarro Ezquerra, A., & Rosell Amigó, J. R. (2018). Pinturas a base de cal: revisión del mercado y acotación normativa. *Ambiente Construído*, 18(4), 76.  
<https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000400294>
- M. Steinmann, D. Hungerbühler, D. S. and W. W. (1999). Neogene tectonic evolution and exhumation of the southern Ecuadorian Andes: a combined stratigraphy and fission-track approach. *Tectonophysics*, 255–276.
- Maldonado, Y. (2020). *Caliza o piedra caliza: Propiedades y usos*. Geologiaweb.

<https://geologiaweb.com/rocas-sedimentarias/caliza/>

Melchiorre, P., Pericàs, M. A., & Vidal, A. (2020). *Catálisis*. ICIQ VIRTUAL LAB.

<http://labvirtual.iciq.es/es/catalisis/>

Mellaart, J. (1971). *Earliest Civilizations of the Near East*. McGraw-Hill.

Ochoa, J. C. (2001). *Diseño de explotación de Calizas area minera UTPL*.

Pinos, V. (2019). *¿Sabes qué es y para qué sirve la catálisis?* UDECUENCA EN LINEA.

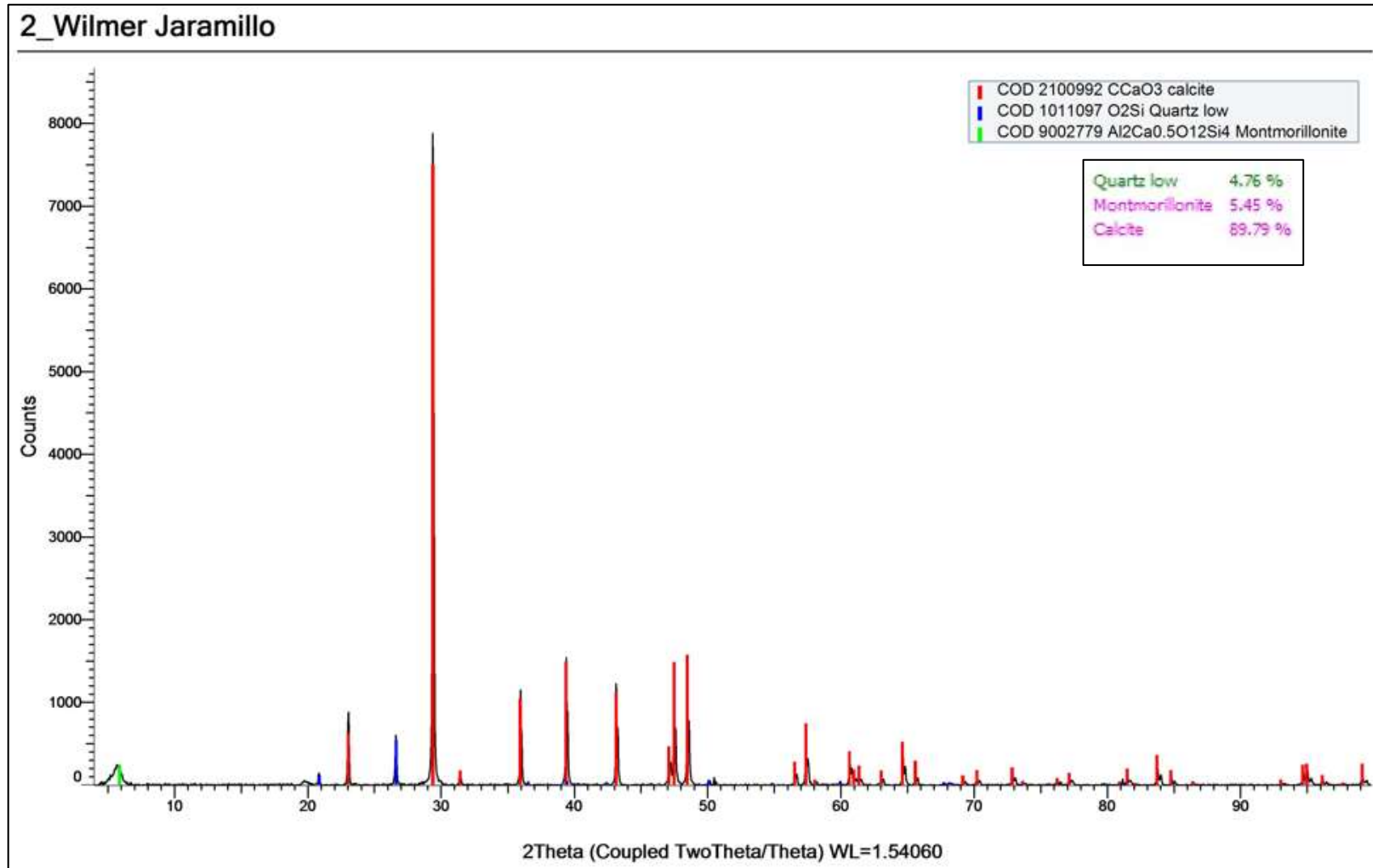
<https://www.ucuenca.edu.ec/component/content/article/233-espanol/investigacion/blog-de-ciencia/1289-quimica?Itemid=437>

Polanco Rodríguez, A. (2012). *Prácticas de Laboratorio de Mecánica de Suelos I*.

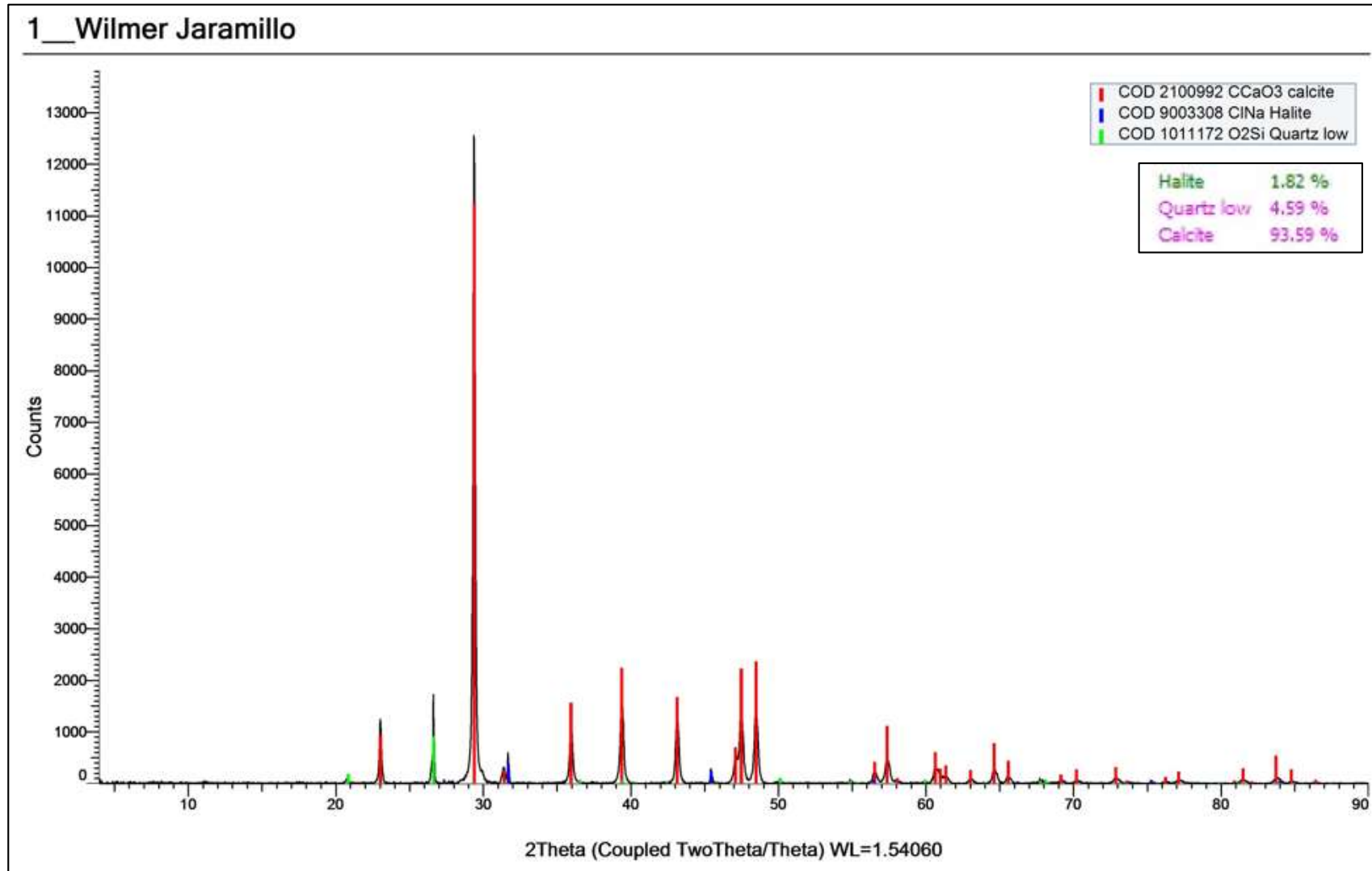
Sander, H. J. (1967). Classification of carbonate rocks of marine origin. *Bull. AAPG*. 51, 325–336.

## Apéndice

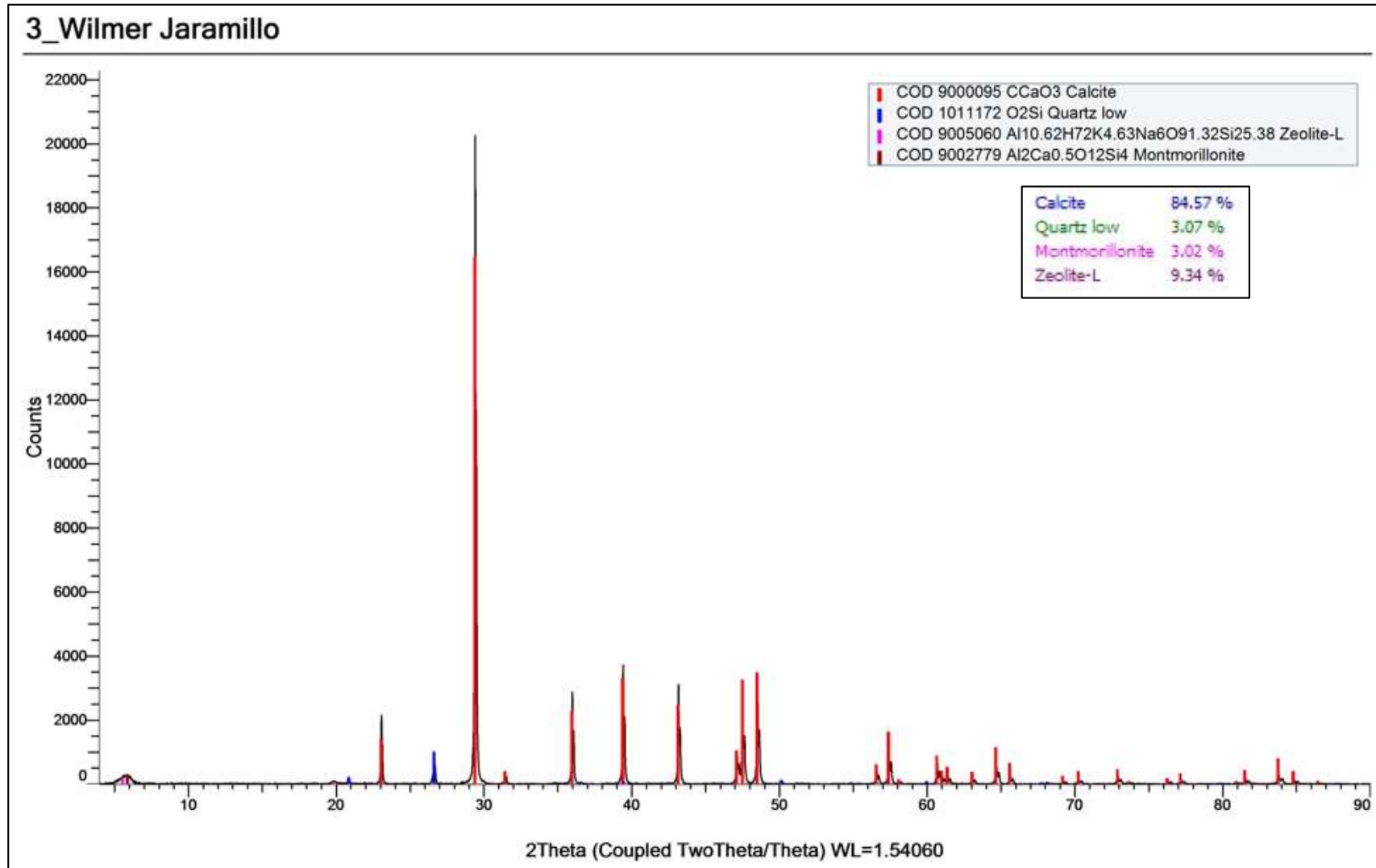
## Apéndice 1: Difractograma de la roca caliza



## Apéndice 2: Difractograma de la pintura de cal luego de 60 días de su aplicación



## Apéndice 3: Difractograma de la pintura de cal luego de 90 días de su aplicación



#### Apéndice 4: Determinación de la pureza del Carbonato de Calcio por el método volumétrico de la roca caliza

##### Datos

$$w = 0.327 \text{ g.}$$

$$T1 = 20^{\circ}\text{C} + 273^{\circ} = 293^{\circ}\text{K}$$

$$V1 = 102 \text{ ml de Volumen desplazado}$$

$$H1 = 15.5 \text{ cm} = 155 \text{ mm}$$

$$P1 = ?$$

$$V2 = ?$$

$$T2 = 0^{\circ}\text{C} + 273^{\circ} = 273^{\circ}\text{K} \quad \left. \vphantom{T2} \right\} \text{ condiciones}$$

$$P2 = 1 \text{ atm} \quad \left. \vphantom{P2} \right\} \text{ normales}$$

$$\text{Presión de Loja} = 596 \text{ mmHg}$$

$$P \text{ Hg} = 13.6 \text{ mmHg}$$

$$P \text{ de vapor de H}_2\text{O a } 20^{\circ}\text{C} = 17.54 \text{ mmHg}$$

##### Cálculos

$$P1 = \text{Presión de Loja} - \frac{H1}{P \text{ Hg}} - P \text{ de vapor de H}_2\text{O a } 20^{\circ}\text{C}$$

$$P1 = 596 \text{ mmHg} - \frac{155 \text{ mm}}{13.6 \text{ mmHg}} - 17.54 \text{ mmHg}$$

$$P1 = 568.06 \text{ mmHg}$$

Transformar 568.06 mmHg a atmósfera (atm)

$$\begin{array}{r} 760 \text{ mmHg} \quad \quad \quad 1 \text{ atm} \\ 568.06 \text{ mmHg} \quad \quad \quad X \end{array}$$

$$P1 = \frac{568.06 \text{ mmHg} * 1 \text{ atm}}{760 \text{ mmHg}}$$

$$P1 = 0.7461 \text{ atm}$$

$$\frac{P1.V1}{T1} = \frac{P2.V2}{T2}$$

$$V2 = \frac{P1.V1.T2}{T1.P2} = \frac{0.7461 \text{ atm} * 102 \text{ ml} * 273^{\circ}\text{K}}{293^{\circ}\text{K} * 1 \text{ atm}}$$

$$V2 = 70.91 \text{ ml}$$

Transformar 70.91 ml a litros (lt)

$$\begin{array}{r} 1000 \text{ ml} \quad \quad \quad 1 \text{ lt} \\ 70.91 \text{ ml} \quad \quad \quad X \end{array}$$

$$V2 = 0.07091 \text{ lt}$$

**Estequiometría**

PM 100g CaCO <sub>3</sub>	22.4 lt
X	0.07091 lt

$$X = \frac{100\text{g CaCO}_3 * 0.07091\text{lt}}{22.4\text{lt}}$$

$$X = 0.317 \text{ g CaCO}_3$$

0.327g CaCO <sub>3</sub>	100%
0.317g CaCO <sub>3</sub>	X

$$X = \frac{0.317\text{g CaCO}_3 * 100\%}{0.327\text{g CaCO}_3}$$

$$X = 96.94 \%$$

Fc = 1.0442 factor de corrección con CaCO<sub>3</sub> químicamente pura

$$X = \frac{96.94 \%}{1.0442}$$

$$X = 92.84 \%$$

**Porcentaje de Pureza CaCO<sub>3</sub> = 92.84 %**

## Apéndice 5: determinación de la pureza del Carbonato de Calcio por el método volumétrico de la pintura de cal a 60 días de aplicación

### Datos

$$w = 0.2019 \text{ g.}$$

$$T1 = 20^{\circ}\text{C} + 273^{\circ} = 293^{\circ}\text{K}$$

$$V1 = 46 \text{ ml de Volumen desplazado}$$

$$H1 = 8 \text{ cm} = 80 \text{ mm}$$

$$P1 = ?$$

$$V2 = ?$$

$$\left. \begin{array}{l} T2 = 0^{\circ}\text{C} + 273^{\circ} = 273^{\circ}\text{K} \\ P2 = 1 \text{ atm} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{condiciones} \\ \text{normales} \end{array}$$

$$\text{Presión de Loja} = 596 \text{ mmHg}$$

$$P \text{ Hg} = 13.6 \text{ mmHg}$$

$$P \text{ de vapor de H}_2\text{O a } 20^{\circ}\text{C} = 17.54 \text{ mmHg}$$

### Cálculos

$$P1 = \text{Presión de Loja} - \frac{H1}{P \text{ Hg}} - P \text{ de vapor de H}_2\text{O a } 20^{\circ}\text{C}$$

$$P1 = 596 \text{ mmHg} - \frac{80 \text{ mm}}{13.6 \text{ mmHg}} - 17.54 \text{ mmHg}$$

$$P1 = 572.58 \text{ mmHg}$$

Transformar 572.58 mmHg a atmósfera (atm)

$$\begin{array}{r} 760 \text{ mmHg} \\ 572.58 \text{ mmHg} \end{array} \quad \begin{array}{r} 1 \text{ atm} \\ X \end{array}$$

$$P1 = \frac{572.58 \text{ mmHg} * 1 \text{ atm}}{760 \text{ mmHg}}$$

$$P1 = 0.7533 \text{ atm}$$

$$\frac{P1.V1}{T1} = \frac{P2.V2}{T2}$$

$$V2 = \frac{P1.V1.T2}{T1.P2} = \frac{0.7533 \text{ atm} * 46 \text{ ml} * 273^{\circ}\text{K}}{293^{\circ}\text{K} * 1 \text{ atm}}$$

$$V2 = 32.29 \text{ ml}$$

Transformar 32.29 ml a litros (lt)

$$\begin{array}{r} 1000 \text{ ml} \\ 32.29 \text{ ml} \end{array} \quad \begin{array}{r} 1 \text{ lt} \\ X \end{array}$$

$$V2 = 0.0323 \text{ lt}$$

**Estequiometría**

PM 100g CaCO <sub>3</sub>	22.4 lt
X	0.0323 lt

$$X = \frac{100\text{g CaCO}_3 * 0.0323\text{lt}}{22.4\text{lt}}$$

$$X = 0.1442 \text{ g CaCO}_3$$

0.2019g CaCO <sub>3</sub>	100%
0.1442g CaCO <sub>3</sub>	X

$$X = \frac{0.1442\text{g CaCO}_3 * 100\%}{0.2019\text{g CaCO}_3}$$

$$X = 71.42 \%$$

Fc = 1.0442 factor de corrección con CaCO<sub>3</sub> químicamente pura

$$X = \frac{71.42 \%}{1.0442}$$

$$X = 68.40 \%$$

**Porcentaje de Pureza CaCO<sub>3</sub> = 68.40 %**

## Apéndice 6: Determinación de la pureza del Carbonato de Calcio por el método volumétrico de la pintura de cal a 90 días de aplicación

### Datos

$$w = 0.19867 \text{ g.}$$

$$T1 = 18^{\circ}\text{C} + 273^{\circ} = 291^{\circ}\text{K}$$

$$V1 = 54 \text{ ml de Volumen desplazado}$$

$$H1 = 9.75 \text{ cm} = 97.5 \text{ mm}$$

$$P1 = ?$$

$$V2 = ?$$

$$\left. \begin{array}{l} T2 = 0^{\circ}\text{C} + 273^{\circ} = 273^{\circ}\text{K} \\ P2 = 1 \text{ atm} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{condiciones} \\ \text{normales} \end{array}$$

$$\text{Presión de Loja} = 596 \text{ mmHg}$$

$$P \text{ Hg} = 13.6 \text{ mmHg}$$

$$P \text{ de vapor de H}_2\text{O a } 18^{\circ}\text{C} = 15.477 \text{ mmHg}$$

### Cálculos

$$P1 = \text{Presión de Loja} - \frac{H1}{P \text{ Hg}} - P \text{ de vapor de H}_2\text{O a } 18^{\circ}\text{C}$$

$$P1 = 596 \text{ mmHg} - \frac{97.5 \text{ mm}}{13.6 \text{ mmHg}} - 15.477 \text{ mmHg}$$

$$P1 = 573.35 \text{ mmHg}$$

Transformar 573.35 mmHg a atmósfera (atm)

$$\begin{array}{r} 760 \text{ mmHg} \\ 573.35 \text{ mmHg} \end{array} \quad \begin{array}{r} 1 \text{ atm} \\ X \end{array}$$

$$P1 = \frac{573.35 \text{ mmHg} * 1 \text{ atm}}{760 \text{ mmHg}}$$

$$P1 = 0.7544 \text{ atm}$$

$$\frac{P1.V1}{T1} = \frac{P2.V2}{T2}$$

$$V2 = \frac{P1.V1.T2}{T1.P2} = \frac{0.7544 \text{ atm} * 54 \text{ ml} * 273^{\circ}\text{K}}{291^{\circ}\text{K} * 1 \text{ atm}}$$

$$V2 = 38.218 \text{ ml}$$

Transformar 38.218 ml a litros (lt)

$$\begin{array}{r} 1000 \text{ ml} \\ 38.218 \text{ ml} \end{array} \quad \begin{array}{r} 1 \text{ lt} \\ X \end{array}$$

$$V2 = 0.0382 \text{ lt}$$

**Estequiometría**

PM 100g CaCO <sub>3</sub>	22.4 lt
X	0.0382 lt

$$X = \frac{100\text{g CaCO}_3 * 0.0382\text{ lt}}{22.4\text{ lt}}$$

$$X = 0.1706 \text{ g CaCO}_3$$

0.19867g CaCO <sub>3</sub>	100%
0.1706g CaCO <sub>3</sub>	X

$$X = \frac{0.1706\text{g CaCO}_3 * 100\%}{0.19867\text{g CaCO}_3}$$

$$X = 85.88 \%$$

F<sub>c</sub> = 1.0442 factor de corrección con CaCO<sub>3</sub> químicamente pura

$$X = \frac{85.88 \%}{1.0442}$$

$$X = 82.24 \%$$

**Porcentaje de Pureza CaCO<sub>3</sub> = 82.24 %**

## Apéndice 7: Producción de Óxido de Calcio (CaO) a partir de la roca caliza (CaCO<sub>3</sub>)

### Método Experimental (Estequiometría)



$$\text{Ca} = 40.078 \text{ g/mol}$$

$$\text{C} = 12.0107 \text{ g/mol}$$

$$\text{O}_3 = 15.9994 \text{ g/mol} * 3$$

$$\text{P. M.} = 100.087 \text{ g/mol de CaCO}_3$$

$$\text{Ca} = 40.078 \text{ g/mol}$$

$$\text{O} = 15.9994 \text{ g/mol}$$

$$\text{P. M.} = 56.077 \text{ g/mol de CaO}$$

292.50 g de roca caliza CaCO<sub>3</sub> al 92.84%

$$100.087 \text{ g de CaCO}_3$$

$$56.077 \text{ g de CaO}$$

$$292.50 \text{ g de CaCO}_3$$

$$X$$

$$X = 163.883 \text{ g de CaO}$$

$$163.883 \text{ g de CaO} * 0.9284 = 152.15 \text{ g de CaO}$$

$$\% \text{ Teórico} = \frac{152.15 \text{ g}}{292.50 \text{ g}} * 100 = \mathbf{52.0 \%}$$

### Método Práctico (Calcinación)

2.92.5 g de CaCO<sub>3</sub> se calcino a 1200°C por 4 horas, se obtuvo 151.85 g de CaO

$$\% \text{ Práctico} = \frac{151.85 \text{ g}}{292.50 \text{ g}} * 100 = \mathbf{51.9 \%}$$

**Apéndice 8: rendimiento porcentual entre el método experimental (calcinación) y el método teórico (estequiometría).**

**Datos**

Rendimiento Práctico = 151.85 g

Rendimiento Teórico = 152.15 g

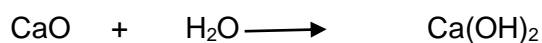
$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{\text{Rendimiento Práctico}}{\text{Rendimiento Teórico}} * 100\%$$

$$\% \text{ Rendimiento} = \frac{151.85 \text{ g}}{152.15 \text{ g}} * 100\%$$

$$\% \text{ Rendimiento} = 0.9980 * 100\%$$

$$\% \text{ Rendimiento} = \mathbf{99.8\%}$$

**Apéndice 9: Producción de Hidróxido de Calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) a partir de Óxido de Calcio (CaO).**



$$\begin{array}{l} \text{Ca} = 40.078 \text{ g/mol} \\ \text{O} = 15.9994 \text{ g/mol} \\ \hline \text{P. M.} = 56.077 \text{ g/mol de CaO} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{H}_2 = 1.0079 \text{ g/mol} \\ \text{O} = 15.9994 \text{ g/mol} \\ \hline \text{P. M.} = 18.010 \text{ g/mol de H}_2\text{O} \end{array}$$

Se tomaron 375.75 g de CaO

Determinar cantidad de agua necesaria

$$\begin{array}{r} 56.077 \text{ g de CaO} \\ 375.75 \text{ g de CaO} \end{array} \qquad \begin{array}{r} 18.010 \text{ g de H}_2\text{O} \\ X \end{array}$$

$$X = 120.68 \text{ g de H}_2\text{O}$$

Densidad de agua 1g/ml por lo tanto 1g = 1ml

$$\text{Volumen H}_2\text{O} = \mathbf{120.68 \text{ ml de H}_2\text{O}}$$

**Hidróxido producido**

$$\begin{array}{l} \text{Ca} = 40.078 \text{ g/mol} \\ \text{O}_2 = 15.9994 \text{ g/mol} * 2 \\ \text{H}_2 = 1.0079 \text{ g/mol} * 2 \\ \hline \text{P. M.} = 74.093 \text{ g/mol de Ca(OH)}_2 \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{H}_2 = 1.0079 \text{ g/mol} * 2 \\ \text{O} = 15.9994 \text{ g/mol} \\ \hline \text{P. M.} = 18.010 \text{ g/mol de H}_2\text{O} \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 18.010 \text{ g de H}_2\text{O} \\ 120.68 \text{ g de H}_2\text{O} \end{array} \qquad \begin{array}{r} 74.093 \text{ g de Ca(OH)}_2 \\ X \end{array}$$

$$X = \mathbf{496.48 \text{ g de Ca(OH)}_2}$$

**Apéndice 10: Calculo de captación de Dióxido de Carbono por medio de la pintura de cal después 90 días de aplicación.**

**Tomando la pureza del Carbonato de Calcio (CaCO<sub>3</sub>) por método volumétrico**

Determinar cantidad de agua evaporada



$$\text{Ca} = 40.078 \text{ g/mol}$$

$$\text{O}_2 = 15.9994 \text{ g/mol} * 2$$

$$\text{H}_2 = 1.0079 \text{ g/mol} * 2$$

$$\text{P. M.} = 74.093 \text{ g/mol de Ca(OH)}_2$$

$$\text{H}_2 = 1.0079 \text{ g/mol} * 2$$

$$\text{O} = 15.9994 \text{ g/mol}$$

$$\text{P. M.} = 18.010 \text{ g/mol de H}_2\text{O}$$

Se tomaron 400 g de Ca(OH)<sub>2</sub>

$$74.093 \text{ g de Ca(OH)}_2$$

$$18.010 \text{ g de H}_2\text{O}$$

$$400 \text{ g de Ca(OH)}_2$$

$$X$$

$$X = 97.24 \text{ g de H}_2\text{O}$$

Densidad de agua 1g/ml por lo tanto 1g = 1ml

$$\text{Volumen H}_2\text{O} = \mathbf{97.24 \text{ ml de H}_2\text{O evaporada}}$$

Cantidad de CaO obtenido

$$\text{CaO} = 400 \text{ g de Ca(OH)}_2 - 97.24 \text{ g de H}_2\text{O}$$

$$\text{CaO} = \mathbf{302.76 \text{ g de CaO}}$$

Determinar el peso del Carbonato de Calcio CaCO<sub>3</sub>

$$\text{Ca} = 40.078 \text{ g/mol}$$

$$\text{O} = 15.9994 \text{ g/mol}$$

$$\text{P. M.} = 56.077 \text{ g/mol de CaO}$$

$$\text{Ca} = 40.078 \text{ g/mol}$$

$$\text{C} = 12.0107 \text{ g/mol}$$

$$\text{O}_3 = 15.9994 * 3 \text{ g/mol}$$

$$\text{P. M.} = 100.087 \text{ g/mol de CaCO}_3$$

$$56.077 \text{ g de CaO}$$

$$302.76 \text{ g de CaO}$$

$$100.087 \text{ g de CaCO}_3$$

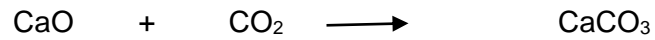
$$X$$

$$X = 540.37 \text{ g de CaCO}_3$$

Ajustar a la pureza de Carbonato de Calcio 82.24% CaCO<sub>3</sub> (método Volumétrico)

$$540.37 \text{ g de CaCO}_3 * 82.24\% = \mathbf{444.40 \text{ g de CaCO}_3}$$

Determinar el % de CO<sub>2</sub> captado



$$\text{Ca} = 40.078 \text{ g/mol}$$

$$\text{O} = 15.9994 \text{ g/mol}$$

$$\text{P. M.} = 56.077 \text{ g/mol de CaO}$$

$$\text{C} = 12.0107 \text{ g/mol}$$

$$\text{O}_2 = 15.9994 * 2 \text{ g/mol}$$

$$\text{P. M.} = 44.0095 \text{ g/mol de CO}_2$$

$$56.077 \text{ g de CaO}$$

$$302.76 \text{ g de CaO}$$

$$44.0095 \text{ g de CO}_2$$

X

$$X = 237.61 \text{ g de CO}_2$$

Ajustamos al Carbonato de Calcio con 82.24% de pureza de CaCO<sub>3</sub>

$$237.61 \text{ g de CO}_2 / 444.40 \text{ g de CaCO}_3 * 100$$

**53.47 % de CO<sub>2</sub> Captado**

**Apéndice 11: Cálculo de captación de Dióxido de Carbono por medio de la pintura de cal después 90 días de aplicación.**

**Tomando la pureza de la Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) por método de difracción de rayos X**

Determinar cantidad de agua evaporada



$$\text{Ca} = 40.078 \text{ g/mol}$$

$$\text{O}_2 = 15.9994 \text{ g/mol} * 2$$

$$\text{H}_2 = 1.0079 \text{ g/mol} * 2$$

$$\text{P. M.} = 74.093 \text{ g/mol de Ca(OH)}_2$$

$$\text{H}_2 = 1.0079 \text{ g/mol} * 2$$

$$\text{O} = 15.9994 \text{ g/mol}$$

$$\text{P. M.} = 18.010 \text{ g/mol de H}_2\text{O}$$

Se tomaron 400 g de  $\text{Ca(OH)}_2$

$$74.093 \text{ g de Ca(OH)}_2$$

$$18.010 \text{ g de H}_2\text{O}$$

$$400 \text{ g de Ca(OH)}_2$$

$$X$$

$$X = 97.24 \text{ g de H}_2\text{O}$$

Densidad de agua 1g/ml por lo tanto 1g = 1ml

$$\text{Volumen H}_2\text{O} = \mathbf{97.24 \text{ ml de H}_2\text{O evaporada}}$$

Cantidad de CaO obtenido

$$\text{CaO} = 400 \text{ g de Ca(OH)}_2 - 97.24 \text{ g de H}_2\text{O}$$

$$\text{CaO} = \mathbf{302.76 \text{ g de CaO}}$$

Determinar el peso del Carbonato de Calcio  $\text{CaCO}_3$

$$\text{Ca} = 40.078 \text{ g/mol}$$

$$\text{O} = 15.9994 \text{ g/mol}$$

$$\text{P. M.} = 56.077 \text{ g/mol de CaO}$$

$$\text{Ca} = 40.078 \text{ g/mol}$$

$$\text{C} = 12.0107 \text{ g/mol}$$

$$\text{O}_3 = 15.9994 * 3 \text{ g/mol}$$

$$\text{P. M.} = 100.087 \text{ g/mol de CaCO}_3$$

$$56.077 \text{ g de CaO}$$

$$302.76 \text{ g de CaO}$$

$$100.087 \text{ g de CaCO}_3$$

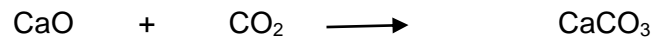
$$X$$

$$X = 540.37 \text{ g de CaCO}_3$$

Ajustar a la pureza de Carbonato de Calcio 84.57% CaCO<sub>3</sub> (Difracción de Rayos X)

$$540.37 \text{ g de CaCO}_3 * 84.57\% = \mathbf{456.99 \text{ g de CaCO}_3}$$

Determinar el % de CO<sub>2</sub> captado



$$\text{Ca} = 40.078 \text{ g/mol}$$

$$\text{O} = 15.9994 \text{ g/mol}$$

$$\text{P. M.} = 56.077 \text{ g/mol de CaO}$$

$$\text{C} = 12.0107 \text{ g/mol}$$

$$\text{O}_2 = 15.9994 * 2 \text{ g/mol}$$

$$\text{P. M.} = 44.0095 \text{ g/mol de CO}_2$$

$$56.077 \text{ g de CaO}$$

$$302.76 \text{ g de CaO}$$

$$44.0095 \text{ g de CO}_2$$

$$X$$

$$X = 237.61 \text{ g de CO}_2$$

Ajustamos al Carbonato de Calcio con 84.57% de pureza de CaCO<sub>3</sub>

$$237.61 \text{ g de CO}_2 / 456.99 \text{ g de CaCO}_3 * 100$$

**51.99 % de CO<sub>2</sub> Captado**