



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE HIDALGO**

**INSTITUTO DE CIENCIAS BASICAS E INGENIERIAS  
ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y MATETRIALES**

**“CARACTERIZACION DE FOSFORITA Y DIATOMITA DEL  
ESTADO DE HIDALGO; EVALUACIÓN DE POSIBLES  
USOS ALTERNOS”**

**T E S I S**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN MATERIALES**

Presenta:

**David Liván Loyola Escamilla**

**DIRECTORES:**

**Dr. ELEAZAR SALINAS RODRÍGUEZ**

**Dr. JUAN HERNANDEZ AVILA**

**Dr. EDUARDO CERECEDO SAENZ**

Mineral de la Reforma, Hgo., junio de 2024.



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo  
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería  
*School of Engineering and Exact Sciences*

Mineral de la Reforma, Hgo., a 10 de enero de 2025

Número de control: ICBI-D/027/2025

Asunto: Autorización de impresión.

**MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO**  
**DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH**

Con fundamento en lo dispuesto en el Título Tercero, Capítulo I, Artículo 18 Fracción IV; Título Quinto, Capítulo II, Capítulo V, Artículo 51 Fracción IX del Estatuto General de nuestra Institución, por este medio le comunico que el Jurado asignado al Egresado de la Licenciatura en Ingeniería en Materiales **David Liván Loyola Escamilla**, quien presenta el trabajo de titulación "**Caracterización de fosforita y diatomita del estado de Hidalgo; evaluación de posibles usos alternos**", después de revisar el trabajo en reunión de Sinodales ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación, firman de conformidad los integrantes del Jurado:

**Presidente:** Dr. Juan Hernández Ávila

**Secretario:** Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz

**Vocal:** Dr. Eleazar Salinas Rodríguez

**Suplente:** Dr. Javier Flores Badillo

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente  
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez  
Director del ICBI



GVR/YCC

Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184.  
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001  
direccion\_icbi@uaeh.edu.mx,  
vergarar@uaeh.edu.mx



uaeh.edu.mx

“Les tengo dos noticias, la buena es que la mitad de este trabajo está mal.  
La mala es que no sé cuál mitad, pero a alguno de ustedes les tocara descubrirlo”.

Dr. Randall Marret

## Agradecimientos

Agradezco profundamente al Dr. Juan Hernández Ávila, al Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz y al Dr. Eleazar Salinas Rodríguez, por su guía, paciencia y valiosas aportaciones durante cada etapa de esta investigación. Su compromiso fue fundamental para el éxito de este trabajo.

A mi familia por su amor, confianza y paciencia en todo momento; a mis abuelos por todo el apoyo que me ha brindaron, todas las palabras de aliento que me dio en este largo camino. Por cada esfuerzo que han hecho para que esto sea posible.

A mi abuela, por todos estos años de estar conmigo y de ser una inspiración. De su cariño y apoyo incondicional.

A mi abuelo, por su confianza y cariño brindados todo ese camino.

A mi mamá, que siempre dijo que iba a ser ingeniero algún día.

A mis amigos de la universidad por su apoyo, tolerancia, risas, compañía; no sólo fue divertido estar con ustedes, sino que también aprendí muchas cosas de ustedes:

A Luis Carlos, porque no es fácil aguantar mi impuntualidad y mis desilusiones amorosas, gracias por todas las aventuras que vivimos y por ser mi mejor amigo de la universidad.

A Jessica, por todos los momentos en los que fue mi mayor soporte para quedarme en la carrera, por su gran e incomparable amistad.

A Daniela, por todos esos momentos de diversión, y por todos los momentos en los que necesitaba a alguien para no sentirme tan vacío.

A Migue, por todos esos momentos de convivencia llenos de aprendizaje.

A Lucero, por todos esos recorridos a los demás institutos para matar el tiempo, por esas tardes de risas en los columpios de la escuela.

A Fátima, por todas esas risas y anécdotas en su casa, sobre todo por todos esos momentos de humor negro sin medidas.

A Leo, por esos grandes momentos que compartimos de camino a la uni, y dentro del laboratorio.

A Paloma, por todas esas veces en las que tuvimos platicas random, y por ofrecerme donde quedarme cuando perdía el bus.

A Xabram, por ser una de las mejores personas que pude conocer, con un gran corazón.

A Beto, por compartir ese gran humor ácido que nos caracteriza, y ser tan autentico.

A Luis Ángel, por todas esas noches alrededor de la fogata y esas platicas tan locas que tuvimos.

A JP, por todas esas veces en las que paso tiempo conmigo y esas veces en las que se preocupó por mi bienestar.

A Mitzy, por esos momentos de confianza y confianza que compartimos durante la carrera.

A Melissa, por esos grandes momentos dentro y fuera del campamento.

A Nona, por ser una de esas amistades que trasciende.

A Fer, por todas esas veces que se alegraba de verme otra vez en la escuela, las noches de café que compartimos como vecinos.

A Gael, por todas esas veces que nos fuimos riendo por horas de camino a la escuela.

A Amy, por demostrarme que es una gran persona que lucha por sus ideales.

A Valentina, por compartir un poco de su gran personalidad conmigo.

A mis amigos de toda la vida, gracias por seguir aquí, gracias por ser ese rayo de luz cuando ando perdido:

A Wuendi, por todo, realmente por todo, desde nuestras caminas a la prepa, hasta nuestras dates nocturnas en pijama. Por todos los momentos buenos y malos, por las llamadas divertidas con tu mamá que amo con todo mi corazón.

A Kim, por sus visitas inesperadas, por invitarme a conocer nuevas personas, por esas dates en su escuela, que terminan en horas libres.

A Mixalis, por esa calidez que la caracteriza, por abrirme las puertas de su magnífica casa, a toda su familia por contemplarme dentro de sus actividades, por hacer sentir bienvenido en todas las ocasiones que he estado presente.

A Kenia, por todas esas anécdotas juntos, por esa libertad que te caracteriza, y que tanto me gustaría tener.

A Kevin, por esas grandes salidas que organizábamos, por su gran amistad.

A Made, por su gran y valiosa amistad, por nuestros momentos juntos, las llamadas ocasionales para ponernos al día, por confiar en mí.

A Pau, por cada momento juntos, desde los buenos y no tan buenos, por cada minuto que pasamos juntos, por ser parte de mi familia.

A Doña Vero, por compartir desde un saludo, hasta su casa conmigo, muchas gracias.

A Evaristo, porque a pesar de la distancia se que puedo contar con ella cada que se requiera.

También quiero agradecer a:

Eiichirō Oda, porque su obra me ha salvado incontables veces. Me acompañó durante todos estos años.

## CONTENIDO

<b>RESUMEN</b>	<b>11</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>12</b>
<b>OBJETIVO GENERAL</b>	<b>13</b>
<b>OBJETIVOS PARTICULARES</b>	<b>13</b>
<b>JUSTIFICACIÓN</b>	<b>14</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	<b>17</b>
<b>ANTECEDENTES</b>	<b>17</b>
<b>CAPITULO 1: ANTECEDENTES</b>	<b>18</b>
<b>GENERALIDADES DE LA FOSFORITA</b>	<b>18</b>
<b>FORMAS DEL FÓSFORO</b>	<b>19</b>
ROCAS QUE CONTIENE FOSFORITA	20
PROPIEDADES QUIMICAS DE LA FOSFORITA	22
PROPIEDADES FÍSICAS DE LA FOSFORITA	23
MÉTODOS DE EXTRACCIÓN	23
SUPERFICIALES	23
<b>FOSFORITA EN EL ESTADO DE HIDALGO</b>	<b>23</b>
LOCALIZACIÓN DE YACIMIENTOS DE FOSFORITA EN EL ESTADO DE HIDALGO	23
GEOLOGÍA REGIONAL	24
MARCO NORMATIVO DE LA FOSFORITA	25
NORMAS NACIONALES DE LA FOSFORITA	26
NORMAS INTERNACIONALES	27
MÉTODOS DE EXTRACCIÓN	28
<b>PRINCIPALES USOS Y MERCADOS DE LA FOSFORITA</b>	<b>31</b>
USO AGRICOLA	31
MATERIALES DENTALES	33
ABONOS FOSFATICOS	33
FUENTES DE CALCIO	33
ALIMENTOS	34

PRODUCTOS QUÍMICOS	34
FARMACÉUTICA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
TRATAMIENTO DE AGUAS	35
DETERGENTES	35
BEBIDAS	35
METALURGÍA	35
PERFORACIÓN DE POZOS	35
LUBRICANTES	35
PIROTECNIA	35
TEXTIL	36
PRODUCTOS METÁLICOS	36
<b>PARA HACER BALAS, BOMBAS INCENDIARIAS Y GRANADAS DE MANO <sup>[15]</sup>.DIATOMITA</b>	<b>36</b>
GENERALIDADES DE LA DIATOMITA	37
GEOLOGÍA	37
PROPIEDADES FISICAS	44
COMPOSICION QUIMICA DE LA DIATOMITA	45
METODOS DE EXTRACCION	46
CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD	46
DIATOMITAS EN EL ESTADO DE HIDALGO	47
MARCO NORMATIVO DE LA DIATOMITA	47
NORMALIZACION INTERNACIONAL DE LA DIATOMITA	47
PRINCIPALES USOS Y MERCADOS DE LA DIATOMITA	47
POROSIDAD Y PODER ABSORBENTE	49
<b>CADENA PRODUCTIVA DE LA DIATOMITA</b>	<b>49</b>
MINADO	50
TRITURACION PRIMARIA	50
MOLIENDA / SECADO	50
CLASIFICACION	50
CALCINACION	51
CON FUNDENTE	51
SIN FUNDENTE	51
MOLIENDA	52
CLASIFICACION	52
EMBARQUE DEL PRODUCTO FINAL	52
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>53</b>
<b>DESARROLLO EXPERIMENTAL</b>	<b>53</b>
<b>CAPITULO 2: DESARROLLO EXPERIMENTAL</b>	<b>54</b>
<b>MUESTREO</b>	<b>54</b>

<b>CARACTERIZACION MINEROLOGICA</b>	<b>58</b>
DIFRACCION DE RAYOS-X (DRX)	58
MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO (MEB-EDS)	59
CARACTERIZACION QUIMICA	59
<b>GRANULOMETRIA</b>	<b>60</b>
<b>CARACTERIZACION FISICA (DIATOMITA)</b>	<b>61</b>
<b>ABSORCION DE ACEITE (DIATOMITA)</b>	<b>61</b>
<b>INTERCAMBIO IONICO (FOSFORITA)</b>	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
<b>INTERCAMBIO IONICO (DIATOMITA)</b>	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>63</b>
<hr/>	
<b>RESULTADOS</b>	<b>63</b>
<hr/>	
<b>CAPITULO 3: RESULTADOS</b>	<b>64</b>
<hr/>	
<b>FOSFORITA</b>	<b>64</b>
ANALISIS GRANULOMETRICO	64
DIFRACION DE RAYOS X	65
MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO Y ESPECTROMETIA DE ENERGIA DISPERSA DE RAYOS- X (EDS)	67
ESPECTROSCOPIA DE PLASMA ACOPLADO (ICP)	68
INTERCAMBIO IONICO	70
<b>DIATOMITA</b>	<b>75</b>
ANALISIS GRANULOMETRICO	75
MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO Y ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSA DE RAYOS – X (EDS)	77
ABSORCIÓN DE ACEITE	78
INTERCAMBIO IONICO	79
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>84</b>
<hr/>	
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>86</b>
<hr/>	



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Formación de la fosforita .....	19
Figura 2 Mineral de Apatita .....	21
Figura 3 Mineral de Colofanita.....	21
Figura 4 Mapa del Estado de Hidalgo, representa el municipio productor de fosforita.....	24
Figura 5 Mapa geológico de la región de Zimapán, Estados de Hidalgo y Querétaro .....	25
Figura 6 Explotación a cielo abierto de Fosforita .....	29
Figura 7 Proceso de obtención del mineral de fosforita .....	30
Figura 8 Yacimiento de Diatomita .....	38
Figura 9 Sistemas de clasificación de diatomeas.....	39
Figura 10 Eras geológicas y origen de las diatomeas.....	42
Figura 11 Partes del frústulo .....	44
Figura 12 Proceso de obtención del mineral de Diatomita.....	49
Figura 13 Diagrama General de Desarrollo experimental.....	54
Figura 14 Mineral de fosforita.....	55
Figura 15 Mineral de Diatomita .....	55
Figura 16 Trituradora de quijadas .....	56
Figura 17 Trituradora de rodillos.....	56
Figura 18 Hule con Mineral de Fosforita.....	57
Figura 19 Juego de tamices .....	57
Figura 20 Microscopio Electrónico de Barrido.....	59
Figura 21 Juego de tamices utilizados para el análisis de tamaño de partícula.....	60
Figura 22 Pasta en lata de acero.....	62
Figura 23 Grafica de retención de partículas.....	65
Figura 24 Espectro de difracción de rayos X de la fosforita.....	67
Figura 25 EDS de la fosforita.....	68
Figura 26 Difractograma de rayos X, antes del intercambio iónico.....	71
Figura 27 Fotomicrografías de las mallas de fosforita -400 a) microanálisis SEM-EDS y b) imagen general, 2200x, SEM-SE.....	72
Figura 28 Difractograma de rayos X de Fosforita tras el intercambio iónico.....	74
Figura 29 Micrografías de la fosforita tras el intercambio iónico, a) microanálisis SEM-EDS; b) imagen general, 2000x, SEM; c) imagen puntual donde se tomó el microanálisis; y d) cartografía de distribución de elementos de tierras raras y metales preciosos.....	75
Figura 30 Grafica de retención de partículas.....	76
Figura 31 Especies Minerales identificadas por Rayos X.....	77
Figura 32 EDS Diatomita.....	78
Figura 33 Difractograma de rayos X de diatomita, antes del intercambio iónico.....	80
Figura 34 Micrografías de la diatomita -400 malla, a) microanálisis SEM-EDS y b) imagen general, 4000x, SEM-SE.....	80
Figura 35 Difractograma de rayos X del material de diatomita, tras el intercambio iónico.....	82
Figura 36 Micrografía de la diatomita malla -400, a) microanálisis SEM-EDS; b y c) imagen general, SEM-SE; Y d) mappins.....	83

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1 Composición química según el porcentaje de apatita en la roca.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 2 Regiones más importantes en la producción mundial de diatomita. ....</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 3 Condiciones durante la realización del experimento. ....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 4 Porcentaje de acumulativos en las mallas de la muestra. ....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 5 Composición química de la muestra 1 analizada a través de ICP. ....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 6 Composición química de la muestra 2 analizada a través de ICP. ....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 7 Composición química de la muestra 3 analizada a través de ICP. ....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 8 Composición química de la lixiviación del mineral SEDEX, realizada por ICP.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 9 Composición química promedio de la fosforita antes del intercambio iónico. ....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 10 Resultados del intercambio iónico realizado con fosforita (ICP).....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 11 Porcentaje acumulativo en las mallas de la muestra. ....</i>	<i>75</i>
<i>Tabla 12 Composición química de la Diatomita. ....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 13 Valores de absorción de aceite de las muestras analizadas. ....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 14 Composición química promedio de la diatomita antes del intercambio iónico. ....</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 15 Resultados del intercambio iónico realizado con diatomita (ICP).....</i>	<i>81</i>
<i>Tabla 16 Capacidad de intercambio catiónico (CIC), por elemento, del mineral utilizado para la eliminación de metales preciosos, metales pesados y elementos de tierras raras.....</i>	<i>83</i>

## RESUMEN

La fosforita y la diatomita son minerales no metálicos con propiedades fisicoquímicas que los hacen relevantes para diversas aplicaciones. La fosforita, extraída de Jiliapan, municipio de Pacula, Hidalgo, compuesta principalmente por fosfato de calcio ( $\text{Ca}(\text{PO}_4)_3$ ), presenta especies mineralógicas como  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ca}_4\text{P}_4\text{O}_9$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , y su composición química incluye  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{La}_2\text{O}_3$ . Por su parte, la diatomita, extraída de Hueyotlipa, municipio de Acatlán, Hidalgo, una roca silíceas sedimentaria formada por restos fosilizados de diatomeas, está constituida por  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , y contiene pequeñas cantidades de compuestos inorgánicos asociados como aluminio, hierro y otros metales alcalinos.

Ambos minerales fueron caracterizados mediante técnicas avanzadas como difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de dispersión de energía (MEB-EDS) y plasma acoplado inductivamente (ICP). Además, en el caso de la diatomita, se realizaron pruebas de absorción de aceite para explorar su capacidad adsorbente.

En base a los resultados obtenidos, se determinó que los usos que se les puede dar a estos minerales son, la fosforita se utiliza principalmente como fertilizante, mientras que la diatomita tiene aplicaciones en filtración, adsorción, abrasión y como aditivo en diversas industrias. Este estudio evalúa el potencial de ambos minerales como agro minerales para mejorar suelos agrícolas, explorando sus propiedades químicas y posibles beneficios agronómicos. Los resultados obtenidos permitirán definir su viabilidad, y aplicaciones en agricultura sostenible en otros sectores industriales relacionados.

## ABSTRACT

Phosphorite and diatomite are non-metallic minerals with physicochemical properties that make them relevant for various applications. Phosphorite, extracted from Jiliapan, municipality of Pacula, Hidalgo, composed mainly of calcium phosphate ( $\text{Ca}(\text{PO}_4)_3$ ), presents mineralogical species such as  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ca}_4\text{P}_4\text{O}_9$ ,  $\text{MgO}$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , and its chemical composition includes  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{La}_2\text{O}_3$ . For its part, diatomite, extracted from Hueyotlipa, municipality of Acatlán, Hidalgo, a sedimentary siliceous rock formed by fossilized remains of diatoms, is constituted by  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , and contains small amounts of associated inorganic compounds such as aluminum, iron and other alkali metals.

Both minerals were characterized by advanced techniques such as X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy with energy dispersive spectroscopy (SEM-EDS) and inductively coupled plasma (ICP). In addition, in the case of diatomite, oil absorption tests were performed to explore its adsorptive capacity.

Industrially, phosphorite is mainly used as a fertilizer, while diatomite has applications in filtration, adsorption, abrasion and as an additive in various industries. This study evaluates the potential of both minerals as agro minerals to improve agricultural soils, exploring their chemical properties and possible agronomic benefits. The results obtained will allow defining their feasibility and applications in sustainable agriculture and other related industrial sectors.

## **OBJETIVO GENERAL**

Realizar la caracterización detallada de los minerales no metálicos fosforita y diatomita, evaluando sus propiedades fisicoquímicas, y potenciales beneficios agronómicos, para determinar su viabilidad y eficiencia como agro minerales en aplicaciones agrícolas.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

Realizar revisión bibliográfica exhaustiva de las fuentes disponibles de minerales no metálicos.

Recolectar muestras por el método de canaletas y esquiras de ambos minerales.

Preparar muestras, Conminación y análisis granulométrico.

Caracterizar un mineral de Fosforita aplicando las técnicas de análisis instrumental (DRX, MEB-EDS e ICP) para determinar su posible uso como agro mineral.

Caracterizar un mineral de Diatomita aplicando las técnicas de análisis instrumental (DRX, MEB-EDS e ICP) para determinar su posible uso como agro mineral.

Determinar usos en base a sus propiedades fisicoquímicas.

## **JUSTIFICACIÓN**

El presente trabajo tiene como propósito principal llevar a cabo una caracterización exhaustiva de la Diatomita y la Fosforita provenientes de las regiones de Acatlán y Pacula en el estado de Hidalgo, respectivamente. Esta caracterización se centrará en la evaluación detallada de sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas. El propósito de este estudio es no solo comprender las cualidades inherentes de estos minerales, sino también explorar sus posibles aplicaciones industriales alternativas.

Al obtener una comprensión completa de las características de la Diatomita y la Fosforita, se buscará identificar nuevos mercados potenciales para estos minerales en función de sus propiedades únicas. Se espera que los resultados de este estudio proporcionen información valiosa no solo para los sectores tradicionales que emplean estos minerales, sino también para industrias emergentes que podrían beneficiarse de sus propiedades. En última instancia, este trabajo busca abrir nuevas oportunidades comerciales y fomentar el desarrollo económico en la región.

## INTRODUCCIÓN

El interés por el estudio de las fosforitas y su génesis aumentó mundialmente a partir de 1930, principalmente por el incremento de su uso como materia prima industrial para la fabricación de fertilizantes. Además, de su empleo como fertilizantes, los fosfatos se utilizan en alimentos balanceados, bebidas, cerámicos, ablandadores de aguas, productos limpiadores, jabones, detergentes e insecticidas, entre muchos otros usos. (Grupo Fosfatos, s.f.)

El fósforo es indispensable para los organismos vivos y en el caso de las plantas, lo obtienen de los fosfatos del suelo, pero el balance entre el consumo y la reposición natural de los fosfatos y de otros elementos solubles puede quebrarse por deficiencias propias del suelo, o bien por efecto del cultivo intensivo. (Grupo Fosfatos, s.f.)

En estos casos los suelos se empobrecen en fosfatos y el rendimiento de las cosechas disminuye hasta que el suelo queda inutilizado para la agricultura. A partir de 1940, las investigaciones permitieron establecer que los vegetales se alimentan exclusivamente de ciertas sustancias minerales, por lo que se comenzó a extraer esos nutrientes en gran escala para incorporarlos a los suelos, comenzando a partir de allí la moderna industria de los abonos químicos de origen mineral utilizados en la actividad agropecuaria. (Grupo Fosfatos, s.f.)

El fósforo, el potasio y el nitrógeno son los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. De ellos el fósforo es el más crítico en términos de su disponibilidad en la naturaleza. El nitrógeno está presente en la atmósfera como  $N_2$ , de la cual es extraído naturalmente por algunas plantas. (Grupo Fosfatos, s.f.)

El potasio es obtenido en gran escala de las evaporitas (rocas formadas por el residuo sólido de la evaporación de grandes cuerpos de agua) y también, si es necesario, puede recuperarse del agua de mar. El fósforo solamente se obtiene vía la explotación de depósitos de rocas fosfáticas. (Grupo Fosfatos, s.f.)

La diatomita es una roca silíceas, sedimentaria de origen biogénico, principalmente está constituida por restos (esqueletos) fosilizados de las frústulas de las diatomeas, presentando

diversos grados de consolidación. Se forma por la acumulación sedimentaria de los esqueletos microscópicos de algas unicelulares. Está compuesta de esqueletos opalinos fosilizados de la diatomea; los esqueletos se componen de sílice amorfa. (Harben, 2002)

La diatomita se forma por la acumulación sedimentaria hasta formar grandes depósitos con un grosor suficiente para tener un potencial comercial. La diatomita pura está formada por sílica opalina o hídrica, puede contener pequeñas cantidades de componentes inorgánicos como alúmina, hierro, tierras y metales alcalinos, así como otros constituyentes menores. La diatomita también contiene cantidades inusuales de agua libre, la cual puede variar de 10% a 60% aproximadamente. Los principales depósitos en el mundo, se han caracterizado por ser depósitos de tipo seco, en donde la diatomita se presenta como material de peso liviano. La densidad aparente (base seca) in situ varía de 0.32 a 0.64 ton/m<sup>3</sup>. (Harben, 2002)

El valor de la diatomita sin tratamiento se basa principalmente en la naturaleza de las partículas diatomáceas, contenido de sílice, carbonatos, argellita o impurezas solubles y el grado de compactación del manto o estrato. Estos factores se reflejan en la densidad aparente, capacidad de absorción, friabilidad y conformación petrográfica del manto (Harben, 2002).

Por lo tanto, en este trabajo se estudiarán las propiedades fisicoquímicas de estos materiales con el propósito de poder incrementar su valor económico y sus posibles usos alternos.



# **CAPÍTULO I**

# **ANTECEDENTES**

## CAPITULO 1: ANTECEDENTES

### GENERALIDADES DE LA FOSFORITA

Son rocas con un contenido en  $P_2O_5$  es superior al 15%. Los depósitos con menor tenor de  $P_2O_5$  (entre 1% y 15%) son adjetivados como fosfáticos: por ejemplo, lutitas fosfáticas, calizas fosfáticas. Las fosforitas no son abundantes en el registro geológico, pero tienen importancia económica. Se encuentran en la totalidad del registro sedimentario, desde el Precámbrico a los tiempos presentes. Las fosforitas aparecen tanto en ambientes marinos como continentales. No obstante, sus más importantes acumulaciones corresponden a facies marinas y lacustres. Hay controversias importantes en cuanto al origen de las fosforitas, ya que las concentraciones en aguas normales (marinas) son sólo de 70 ppb de  $P_2O_5$ , en tanto que los depósitos de fosforitas antiguas pueden tener hasta un 40% de  $P_2O_5$ . (Spalletti, s.f.)

Las fosforitas están **esencialmente constituidas** por peloides y fragmentos esqueléticos: bioclastos fosfáticos (braquiópodos inarticulados), huesos y dientes de vertebrados. También aparecen, en forma subordinada, ooides e intra-clastos. Hay también individuos de textura muy fina, criptocristalina que constituyen depósitos o rellenan intersticios y son equivalentes a las micritas. (Spalletti).

El fósforo, un nutriente esencial, dispara la formación del fitoplancton, el cual, a su vez, al ser la base de la cadena trófica marina, multiplica la vida de organismos superiores (p.ej., peces). Tanto el fitoplancton como los peces al morir van a parar al fondo de la plataforma, sufriendo sus partes orgánicas una degradación que supone la acumulación de sus esqueletos, como se observa en la **figura 1**. También pueden formarse como consecuencia de procesos diagenéticos de reemplazamiento de calizas por el apatito, por sustitución del anión carbonato por el fosfato. (Chavez, 2018) .

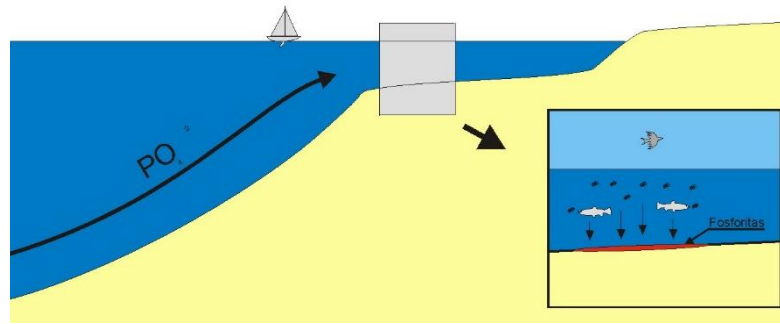


Figura 1 Formación de la fosforita

## FORMAS DEL FÓSFORO

Desde el punto de vista químico el fósforo puede encontrarse como:

- Fósforo inorgánico
- Fósforo orgánico
- Fósforo adsorbido
- Fósforo asimilable

La disponibilidad está determinada por los siguientes factores:

- pH del suelo.
- Fe, Al, y Mn solubles.
- Presencia de minerales que contienen Fe, Al y Mn.
- Minerales de calcio y magnesio disponibles.
- Cantidad y descomposición de materia orgánica.
- Actividad de microorganismos.

Todos estos factores están influenciados por el pH de suelo. La máxima disponibilidad del P ocurre para pH entre 6 y 7. A pH bajos, existe en solución Fe, Al y Mn que reaccionan con el ácido fosfórico dando fosfatos hidróxidos insolubles. También existe la fijación por los óxidos hidróxidos formando fosfatos hidróxidos insolubles. La fijación por silicatos-arcillas, se realiza en condiciones

de moderada acidez. En suelos alcalinos, los fosfatos precipitan con el Calcio y con el de  $\text{CaCO}_3$ . (Tesis) (Gutiérrez, 2013).

## ROCAS QUE CONTIENE FOSFORITA

### APATITA

Son rocas mineralizadas, es la sustancia madre y al mismo tiempo, la fuente original de todos los fosfatos que se presentan en la naturaleza. Las apatitas (**Fig. 2**) son minerales con sustancias naturales, sólidas y cristalinas que poseen una composición química definida. Cada uno está caracterizado por un conjunto de propiedades físicas y químicas que permiten su identificación.

- Sistema: Hexagonal.
- Hábito: se presenta en masas granudas y compactas y en cristales prismáticos largos, generalmente terminados por pirámides.
- Color: tiene una amplia gama de colores, según los cationes que contenga, variando del amarillo (el más común) al verde, azul o violeta.
- Raya: blanca.
- Brillo: vítreo.
- Dureza: 5.
- Densidad:  $3.1\text{gr/cm}^3 - 3.2\text{gr/cm}^3$  [5 y 6].

La apatita asociada a las rocas ígneas puede ser primaria o secundaria. Más allá que la apatita primaria se encuentre asociada a minerales de alta temperatura, también aparece en los últimos estadios magmáticos asociado a depósitos pegmatíticos ( $50^\circ\text{-}100^\circ\text{C}$ ). Los minerales más comunes asociados a depósitos magmáticos son fluorapatita ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ ), hidroxilapatita ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{OH}_2$ ) y cloroapatita ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{Cl}_2$ ). Dentro de los minerales más comunes asociados en los complejos ígneos alcalinos se encuentran: nefelina, feldespatos alcalinos, micas, piroxenos y anfíboles ricos en Fe y Mg. En algunos depósitos como los de Kola, Rusia, la apatita se encuentra como un componente cristalino dentro de la roca ígnea.



*Figura 2 Mineral de Apatita*

El principal yacimiento de este mineral en México está localizado en lo que se conoce, Cerro de Mercado, Durango.

#### COLOFANITA

El mineral de colofanita (**Fig.3**) se presenta en la naturaleza como apatitas amorfas, y sin una composición química definida en tonos amarillentos o castaños y en ocasiones incolora, y tiene ligera birrefringencia; en la siguiente figura se aprecia este mineral.



*Figura 3 Mineral de Colofanita*

## PROPIEDADES QUIMICAS DE LA FOSFORITA

El fósforo está presente en la mayoría de las rocas en cantidades minoritarias, pero en un tipo especial de rocas fosfáticas, denominadas fosforitas (fosfatos sedimentarios marinos), el contenido de  $P_2O_5$  generalmente excede el 18% y puede, en ocasiones, llegar al 40%. Esto último ocurre cuando la composición química se aproxima a la del carbonato-fluorapatita [ $Ca_5(PO_4, CO_3)_3F$ ]. Esta variedad permitió dar cabida a la asociación íntima de carbonato con apatita en materiales micro o criptocristalinos, de aspecto macizo, terrosos pulverulentos u opalinos, que se presentan en costras, esferulitas y nódulos en horizontes sedimentarios, constituyendo masas de rocas fosfáticas o la porción mineral de huesos y dientes de vertebrados, animales y humanos, tanto fósiles como modernos; el nombre original para tales especies era colofana. (James Dwight Dana, 1997).

Los minerales del grupo de la apatita de origen sedimentario son microcristalinos y diferentes considerablemente de las especies minerales "puras" que componen al grupo. Los espectros de difracción de rayos X son típicamente apatíticos con ligeros desplazamientos posicionales de los picos que indican cambios en los parámetros de la celda unidad. Éste es el grupo de minerales que esencialmente aparece en fosforitas no alteradas por metamorfismo o meteorización. La francolita es estructural y químicamente compleja. El grupo puede ser representado por la fórmula simplificada  $Ca_{10}[(PO_4)_{6-x}(CO_3)_x]F_{2+x}$ . El valor x es variable entre 0.39-1.36 con un promedio de 0.75 y puede exceder, en ocasiones, 1.90. (Trappe, 1998).

Tabla 1 Composición química según el porcentaje de apatita en la roca

Porcentaje %	Roca
Mayor al 50% (18% $P_2O_5$ )	Fosforita
Mayor al 20% (8% $P_2O_5$ )	Roca fosfática
Menor al 20% y Mayor al 5% (2-8% $P_2O_5$ )	Roca ligeramente fosfática

## PROPIEDADES FÍSICAS DE LA FOSFORITA

La fosforita es una roca estratificada, con una estructura vacuolar (con pequeñas cavidades) porosa u oolítica, tiene un color predominante, amarillo pardo, rojizo y es de grano de fino a medio. (Piedras, 2012).

## MÉTODOS DE EXTRACCIÓN

La explotación de yacimientos fosfáticos puede ser a cielo abierto (open pit) o subterránea. Más del 75% de la roca fosfática económicamente explotable de origen sedimentario se extrae a cielo abierto empleando desde métodos manuales hasta los de alta tecnología de extracción. Las primeras explotaciones en pequeña escala en Inglaterra, Francia y España datan de 1840. Años más tarde (1860) se conocen datos de Noruega y Alemania. Entre 1863 y 1895 la roca extraída en Ontario y Quebec se llevaba a Inglaterra para su procesamiento. (Grupo Fosfatos, s.f.).

## SUPERFICIALES

La minería a cielo abierto es una actividad industrial que consiste en la remoción de grandes cantidades de suelo y subsuelo, que es posteriormente procesado para extraer el mineral. Este mineral puede estar presente en concentraciones muy bajas, en relación con la cantidad del material removido.

## FOSFORITA EN EL ESTADO DE HIDALGO

### LOCALIZACIÓN DE YACIMIENTOS DE FOSFORITA EN EL ESTADO DE HIDALGO

Los municipios donde se localizan los principales yacimientos en el estado están en la localidad de Jiliapan, municipio de Pacula (marcado en la **Fig. 4**), donde la empresa minera Fosforita de México de Minerales Industriales S.A. de C.V. se encuentra en explotación de este material. (Garrido Hernández)

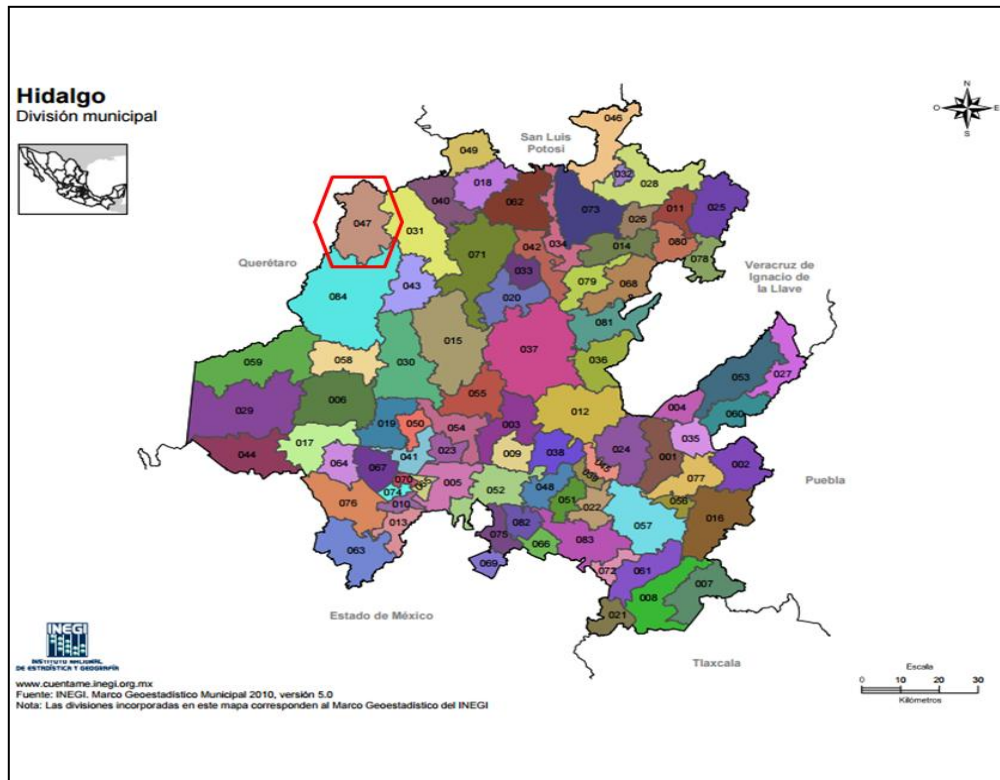


Figura 4 Mapa del Estado de Hidalgo, representa el municipio productor de fosforita

## GEOLOGÍA REGIONAL

Para hablar de la geología regional se usaron textos de la geología de Zimapán, por ser un área de estudio más común y por ende con mayor información disponible. Zimapán, se localiza en la sierra Madre Oriental, que es una cordillera formada por rocas sedimentarias marinas del Mesozoico, que fueron deformadas por acortamiento durante la orogenia Laramide, su actividad produjo pliegues y cabalgaduras, cuya edad no está bien definida, pero en las cercanías de Zimapán abarca probablemente desde el Cretácico Tardío hasta el Paleoceno Temprano.



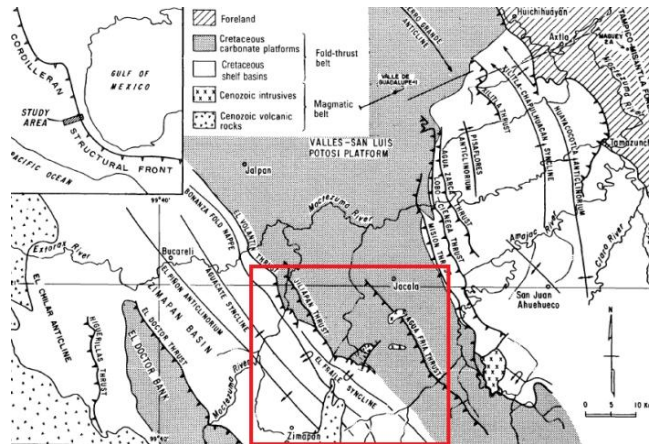


Figura 5 Mapa geológico de la región de Zimapán, Estados de Hidalgo y Querétaro

Se pueden observar formaciones de origen ígneo y marino de periodos del Cretácico y Cenozoico. Se describirán las formaciones más representativas; formación Trancas, El Doctor, formación Soyatal-Méndez, Plataforma de Valles-San Luis Potosí, formación El Abra, formación El Morro, y la formación Las Espinas. Las rocas más antiguas datan del Jurásico-Cretácico, las cuales pertenecen a la formación Trancas, formada por capas de 1 a 2 m de micrita fosilífera con radiolarios, intercaladas con lutitas calcáreas y limonitas ligeramente apizarradas. Su color es grisáceo amarillento, con algunas capas de arenisca gruesa, color café rojizo que consisten en litarenita feldespática con detritos de rocas ígneas y metamórficas.

#### MARCO NORMATIVO DE LA FOSFORITA

En el Artículo 4o. de la Ley Minera, en el párrafo I queda especificado que se sujetarán a ésta, minerales o sustancias de los que se extraiga fósforo; en el párrafo II se especifica a los minerales o grupos de minerales de uso industrial como los fosfatos. (Dirección General de Desarrollo Minero, 2018)

## NORMAS NACIONALES DE LA FOSFORITA

- NOM-118-SCFI-2004 Industria cerillera – cerillos y fósforos - especificaciones de seguridad (contiene la modificación publicada el 29 de septiembre de 2009 en el DOF)
- NOM-104-STPS-2001 Agentes extinguidores - polvo químico seco tipo ABC a base de fosfato mono amónico.
- NMX-AA-127-SCFI-2006 Potabilización del agua para uso y consumo humano - polifosfato de sodio - especificaciones y métodos de prueba.
- NMX-BB-041-SCFI-1999 Material de laboratorio - fosfatasa alcalina, polvo, método enzimático colorimétrico cinético con sustrato de 4-nitrofenol fosfato - especificaciones y métodos de prueba.
- NMX-F-320-S-1978 Determinación de fosfatos en embutidos.
- NMX-K-450-1978 Determinación de ortofosfatos en aguas para calderas.
- NMX-K-475-1983 Productos químicos - Tripolifosfato de sodio - cromatografía de las especies de fosfatos que lo constituyen - método de prueba.
- NMX-K-486-1986 Productos para el aseo - tripolifosfato de sodio.
- NMX-L-097-1995-SCFI Explotación del petróleo - profosfato tetrasódicoanhidro empleado en perforación, reparación y terminación de pozos petroleros - especificaciones y métodos de prueba.
- NMX-Q-031-1980 Detergentes domésticos - determinación del contenido de fosfatos (expresados como  $P_2O_5$ ).
- NMX-Y-001-1987 Fertilizantes - superfosfato simple – especificaciones.
- NMX-Y-029-1983 Fertilizantes - superfosfato triple granulado.
- NMX-Y-043-1987 Productos para uso agropecuario - fertilizantes - fosfato de amonio - especificaciones.
- NMX-Y-055-1970 Método de prueba para la determinación del tamaño de partícula en superfosfato triple granulado.

- NMX-Y-341-SCFI-2006 Productos para uso agropecuario - ingredientes para la alimentación animal - fosfatos de calcio como fuentes de fósforo y calcio - especificaciones y métodos de prueba.

(Dirección General de Desarrollo Minero, 2018)

#### NORMAS INTERNACIONALES

##### Normas ASTM de Estados Unidos de Norteamérica

- F1088-04a (2010) Especificación para el fosfato tricálcico beta para implantes quirúrgicos.
- F1609-08 Especificación para recubrimientos de fosfato de calcio para materiales para implantes.
- D4293-83 (2008) Especificación para “fosfato éster” basado en fluidos para lubricación de turbina.
- D6280-98 (2008) Especificación para pigmentos de fosfato de zinc.
- F2024-10 Práctica para la determinación de difracción de rayos X del contenido de la fase de recubrimientos de hidroxiapatita rociada de plasma.
- D7412-09 Método de prueba para el monitoreo de condiciones de aditivos antidesgaste de fosfatos en lubricantes basados en hidrocarburos y “En servicio a petróleo” por análisis de tendencias usando espectrometría de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR).
- D1721-97(2007) Método de prueba para el tiempo de permanganato de fosfato tricresil.
- F1926/F1926M-08 Método de prueba para la evaluación de la estabilidad ambiental de gránulos de fosfato de calcio, formas fabricadas y recubrimientos.
- F1044-05 Método de prueba para pruebas de corte de revestimientos de fosfato de calcio y recubrimientos metálicos.
- F1160-05 Método de prueba para corte y prueba de fatiga en el plegado del fosfato de calcio y recubrimientos de metálicos médicos y compuestos de fosfato de calcio/metálicos.

- F1147-05 Método de prueba para pruebas de tensión de recubrimientos de fosfato de calcio y metálicos.
- D501-03(2009) Métodos de prueba de muestreo y análisis químico de detergentes alcalinos.
- E1787-08 Método de prueba para aniones en sosa cáustica y potasa cáustica (hidróxido de sodio e hidróxido de potasio) por cromatografía iónica.
- F1137-00(2006) Especificación para revestimientos de protección contra la corrosión fosfato/petróleo y fosfato/orgánico para sujetadores.
- D3231-07 Método de prueba para el fósforo en la gasolina.

(Dirección General de Desarrollo Minero, 2018)

#### MÉTODOS DE EXTRACCIÓN

En el estado de Hidalgo la explotación del mineral de fosforita se realiza a cielo abierto, utilizando el método de banqueo dando como resultado un gran volumen de material, una representación de la explotación se puede apreciar en la **figura 6**, también se utilizan equipos de minado como el tractor de oruga para el retiro de material estéril y vegetal y así llegar al mineral de valor, el tractor se utiliza también para el arranque de la roca fosfórica, posteriormente se utilizan cargadores frontales para el cargado del material a camiones de diferentes capacidades según lo demande la industria.



*Figura 6 Explotación a cielo abierto de Fosforita*

#### *SUBTERRÁNEAS*

La minería subterránea tiene por objetivo extraer recursos minerales de la tierra y abarca todas las actividades encaminadas a extraer materias primas depositadas debajo de la tierra y transportarlas hasta la superficie. El acceso a los recursos se efectúa por galerías y pozos que están comunicados con la superficie.

#### *CADENA PRODUCTIVA DE FOSFORITA*

La cadena productiva del mineral de fosforita tiene diversas etapas para su obtención, como se muestra en la **figura 7**, de las cuales cada una es de gran importancia para poder comercializarla y darle las diversas aplicaciones que este material dispone en las diferentes industrias.

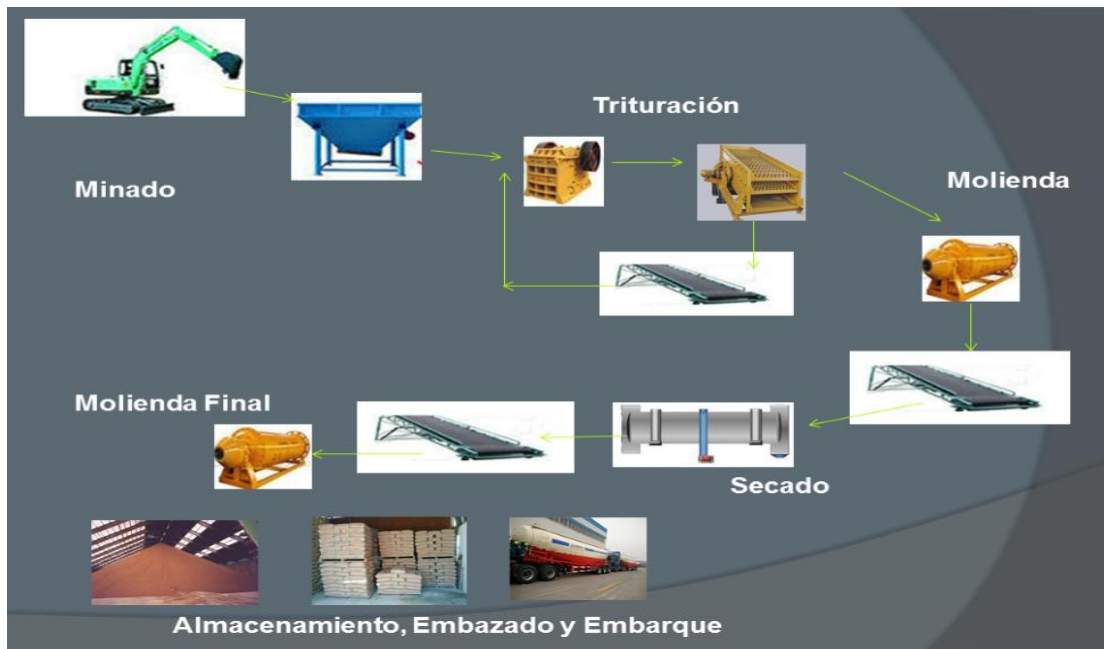


Figura 7 Proceso de obtención del mineral de fosforita

#### MINADO

La fosforita debe ser explotada a cielo abierto, a menos que pueda justificarse su explotación subterránea, otra razón para este tipo de extracción es debida al alto volumen que se requiere en los procesos de producción que la necesitan como materia prima y alterna.

#### ALMACENAMIENTO MINERAL

El mineral minado, si el proceso lo necesita, puede ser almacenado en stocks para que de ahí se alimente a la planta de beneficio, si no necesita el almacenamiento se puede descargar directamente el mineral de mina a la trituradora que es la primera etapa de beneficio de la fosforita.

#### TRITURACIÓN

Los diferentes tamaños de roca acarreados de la mina son puestos en las quebradoras con el fin de reducir su tamaño y facilitar la siguiente etapa. Muchas veces el material debe pasar por

muchas etapas de trituración hasta que se alcance el tamaño requerido para pasar a la siguiente fase, aunque siempre reduciendo la cantidad con cribas que nos ayudan a separar el material fino.

#### *SECADO*

El producto triturado es secado con la finalidad de que se elimine la humedad que traiga el mineral y poderlo procesar en la siguiente etapa sin problemas.

#### *MOLIENDA FINAL*

Consiste en la remolienda, con la finalidad de reducir aún más de tamaño la partícula, debido a que así se requiere tener el mineral para ser empacado.

#### *ALMACENAMIENTO, EMPAQUE Y EMBARQUE*

El producto obtenido en la molienda final es colocado en una tolva para almacenarlo; desde aquí el mineral de fosforita es envasado ya sea en bolsas de papel o plástico; aunque si se desea, este es cargado directamente en camiones para su entrega a granel.

#### *PRINCIPALES USOS Y MERCADOS DE LA FOSFORITA*

La fosforita es un mineral de gran aplicación, sobre todo en la industria de los fertilizantes; a continuación, se presentan algunas industrias donde este se aplica:

#### *USO AGRICOLA*

El agregado de fósforo (P) es necesario en muchas regiones del mundo para mejorar la fertilidad del suelo y la producción de cultivos. La aplicación directa de Roca Fosfórica (RF) sin procesar al suelo, puede proporcionar una valiosa fuente de nutrientes para las plantas en condiciones específicas, pero hay varios factores y limitaciones a considerar.

La apatita, un mineral de fosfato de calcio, es el componente principal de la RF. Principalmente se extrae de depósitos sedimentarios marinos, siendo una pequeña cantidad extraída de fuentes ígneas.

El mineral de fosforita se usa como un fertilizante fosfatado soluble en agua que se añade al suelo, se disuelve rápidamente y reacciona para formar compuestos de baja solubilidad. Cuando la RF se añade al suelo, se disuelve lentamente para liberar gradualmente los nutrientes, pero en algunos suelos, la velocidad de disolución puede ser demasiado lenta para sostener el crecimiento saludable de la planta. Para optimizar la efectividad de la RF, deben considerarse los siguientes factores:

- El pH del suelo: La RF requiere condiciones ácidas del suelo para ser una fuente de nutrientes efectiva. Generalmente, no se recomienda el uso de RF cuando el pH del suelo es superior a 5.5.
- El encalado para elevar el pH del suelo y reducir la toxicidad por Al puede reducir la tasa de disolución de la RF.
- Capacidad de fijación de P del suelo: La disolución de la RF se incrementa con una mayor capacidad de fijación de P del suelo (por ejemplo, con alto contenido de arcillas).
- Propiedades del suelo: Bajos contenidos de calcio y alta materia orgánica del suelo tienden a acelerar la disolución de la RF.
- Ubicación del fertilizante: La aplicación al voleo e incorporación de la RF con labranza acelera la reacción con el suelo.
- Especies de cultivo: Algunas especies de plantas pueden utilizar mejor la RF debido a la secreción de ácidos orgánicos desde las raíces al suelo adyacente.
- Tiempo: Debido al tiempo necesario para la disolución de la RF, esta requiere ser aplicada anticipadamente a la demanda de la planta. (International Plant Nutrition Institute (IPNI, s.f.)



## MATERIALES DENTALES

Los componentes inorgánicos más importantes del diente natural son los cristales de apatita. Por ello, una constante búsqueda de nuevos materiales para restauraciones que tengan resistencia, funcionalidad y conserven la estética de los dientes naturales, ha marcado las expectativas del uso de las apatitas, en el mercado. Su éxito, actualmente, está siendo reconocido por odontólogos, protésicos y pacientes, logrando desarrollar nuevos materiales cerámicos en base a cristales de flúor-apatita. (Minerales, 2015)

## ABONOS FOSFATICOS

**a) Superfosfato normal o superfosfato simple:** Producto obtenido por reacción del fosfato mineral triturado con ácido sulfúrico y que contiene como componentes esenciales fosfato monocalcico y sulfato de calcio.

**b) Superfosfato concentrado:** Producto obtenido por reacción del fosfato mineral triturado con ácido sulfúrico y ácido fosfórico y que contiene como componentes esenciales fosfato monocalcico y sulfato de calcio.

**c) Superfosfato triple:** Producto obtenido por reacción del fosfato mineral triturado con ácido fosfórico y que contiene como componente esencial fosfato monocalcico.

**d) Otros:** Escorias de desfosforación (fosfatos Thomas, escorias Thomas), fosfato natural parcialmente solubilizado, fosfato precipitado bicalcico dihidratado, fosfato calcinado, fosfato aluminocalcico, fosfato natural blando. (QuimiNet, 2006)

## FUENTES DE CALCIO

Además de la obtención de fertilizantes fosfatados, se obtienen derivados del elemento calcio (Ca) de la materia prima como la apatita.

## ALIMENTOS

En el procesamiento de gelatinas, polvos para hornear, como acondicionador de sal comestible, refinación de azúcar. El ácido fosfórico es usado en la manufactura de fosfatos de calcio para alimentos de animales.

En forma de  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ , en fabricación de quesos y como emulsionante, como aditivo al jamón evita la pérdida de agua. En forma de  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , se utiliza como levadura artificial en panadería (mezclado con  $\text{NaHCO}_3$ ) aprovechándose sus propiedades ácidas; en agua, los iones di-hidrógeno fosfato ceden protones al bicarbonato y la reacción produce  $\text{CO}_2$  que, al desprenderse y quedar ocluido en la masa, la hace más ligera.

En forma de  $\text{Na}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$ , también se utiliza como acidulante para la preparación de la masa del pan y su ventaja respecto del anterior es que no reacciona con el bicarbonato a menos que se caliente, lo que permite preparar grandes cantidades de masa y almacenarlas sin que se inicie el crecimiento de la misma de forma prematura.

Como fosfatos de sodio en el tratamiento de carnes de pollo y pescado y como pirofosfatos de sodio en mezclas para hornear como acidulantes y en el procesamiento de la papa. (Dirección General de Desarrollo Minero, 2018)

## PRODUCTOS QUÍMICOS

Se emplea en la fabricación de cerillos y como retardador de fuego; el fosfato de hueso de cal viva (bonephosphate of lime) utilizado para el producto resultante del tratamiento ácido de la roca fosfórica. También es utilizada en la elaboración de limpiadores; el ácido fosfórico es usado en la manufactura de pólvora.

En forma de  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ , es utilizado como agente de saponificación de grasas, decapante de pinturas debido a que en medio acuoso da disoluciones muy básicas, se utiliza a nivel industrial para limpiar metales y mezclado con  $\text{NaClO}$ , se utiliza en máquinas de lavado.

El trifosfato se utiliza como dispersante en fabricación de cementos y ladrillos y disminuye la cantidad de agua para hacer las pastas. En artículos para el hogar como detergentes, agentes de limpieza, retardantes de flama para ropa (especialmente de niños), alfombras y cortinas. El

fósforo rojo es utilizado en la elaboración de retardantes de flama, semiconductores, fuegos artificiales y cerillos. Los fosfatos son usados para el fosfatizado de la superficie metálica. Esto reduce los riesgos de corrosión de los metales, este último, el  $\text{CaHPO}_4$  se utiliza como abrasivo en pastas de dientes y en forma de  $\text{Ca}_2\text{P}_2\text{O}_7$  se añade en pastas de dientes con flúor. El difosfato es el más inerte de los fosfatos y se utiliza como abrasivo, puesto que no interfiere con los compuestos que contienen flúor.

#### TRATAMIENTO DE AGUAS

En la elaboración de suavizadores de agua y en el tratamiento de la misma. El uso de fosfatos previene la formación de incrustaciones, controla el fenómeno del agua negra (hidrocarburos en el mar) y roja (excesiva proliferación de micro algas) y reduce los riesgos de corrosión de las tuberías. Por otra parte, algunos fosfatos se usan en la depuración biológica de aguas industriales.

#### DETERGENTES

En la elaboración de detergentes y jabones, para ablandar el agua ya que forma complejos solubles con  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{Fe}^{+3}$ . Evita que se formen espumas insolubles de jabón cuando se lava con aguas duras.

#### BEBIDAS

En el procesamiento de bebidas carbonatadas y productos lácteos. El ácido fosfórico utilizado como acidulante en bebidas.

#### METALURGÍA

Es empleada para limpiar metales. Como  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ , en procesos de fosfatización de metales y en el tratamiento anticorrosión previo a la pintura.

#### PERFORACIÓN DE POZOS

En la elaboración de lodos de perforación y líquidos hidráulicos. El trifosfato se utiliza en perforaciones petrolíferas para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos.

#### LUBRICANTES

En aditivos para lubricantes y plastificantes.

#### PIROTECNIA

Para la elaboración de cortinas de humo y gases lacrimógenos.

## TEXTIL

En el tratamiento de sedas.

## PRODUCTOS METÁLICOS

Para hacer balas, bombas incendiarias y granadas de mano.  
(Dirección General de Desarrollo Minero, 2018)

## DIATOMITA

### GENERALIDADES DE LA DIATOMITA

La diatomita es una roca silícica, sedimentaria de origen biogénico, compuesta por esqueletos fosilizados de las frústulas de las diatomeas. Se forma por la acumulación sedimentaria de los esqueletos microscópicos de algas unicelulares y acuáticas. Está compuesta de esqueletos opalinos fosilizados de la diatomea; los esqueletos se componen de la sílice amorfa. La diatomita se forma por la acumulación sedimentaria hasta formar grandes depósitos con un grosor suficiente para tener un potencial comercial.

El 61% de la producción mundial de diatomita es usada como filtro, principalmente en las bebidas como cerveza, vinos, etc. El 39% restante, se aplica como agente de carga en diferentes industrias, destacando la fabricación de pintura y plástico. (Subsecretaría de Minería, 2017)

### GEOLOGÍA

Las paredes celulares de las diatomeas mantienen su estructura individual incluso en los filtros procesados comercialmente; la diatomita se forma de los restos flotantes de las diatomeas, se encuentra cerca de las aguas superficiales actuales o anteriores. Se divide generalmente en dos categorías basadas según la fuente de procedencia: de agua dulce y agua salada. La tierra de diatomeas de agua dulce se recoge en minas de lechos de lagos secos y es característico su bajo contenido de sílice cristalina. La tierra de diatomeas del agua salada contiene un alto contenido de la sílice cristalina, haciéndole un material útil para los filtros, debido a las características tamizantes de los cristales. La **figura 8** muestra un yacimiento que tuvo su origen en aguas dulces.

La fosilización de diatomeas es un aspecto clave de la formación de diatomita. El proceso implica la preservación de los frústulos de sílice a lo largo del tiempo geológico. Los pasos incluyen:

1. **Muerte y liquidación:** Cuando las diatomeas mueren, sus frústulas se hunden hasta el fondo del cuerpo de agua y se acumulan en los sedimentos.
2. **Compactación:** Con el tiempo, el sedimento de diatomeas acumulado se compacta debido al peso de las capas superpuestas.

3. **Cementación:** La compactación suele ir acompañada de cementación, donde minerales u otras sustancias unen los frústulos.
4. **Conversión a diatomita:** Los procesos geológicos continuos, incluidos los cambios de presión y temperatura, conducen a la transformación del sedimento de diatomeas en roca sólida de diatomita. (Geologyscience, 2023)



*Figura 8 Yacimiento de Diatomita*

#### *VARIEDAD DE DIATOMITAS*

- Tripolita es la variedad que se encuentra en Tripoli, Libia.
- Bannclay es la variedad que se encuentra en el Lower Bannvalley en el Norte de Irlanda.
- Moler (Mo-clay) es la variedad que se encuentra en el noroeste de Dinamarca, especialmente en las islas de Fur y Mors. (Goren, 2002)

#### *CLASIFICACIÓN DE LAS DIATOMEAS*

Han existido diversos modelos de clasificación de las diatomeas, (F, 1930), (Round FE, 1990), (R, 1979), los cuales dividen a estos organismos en dos o tres grupos principales como se muestra en la figura 9, siguiendo un criterio fundamentalmente morfológico, basado en la simetría de la ornamentación de la valva y la presencia o ausencia de rafe (fisura central).

Simonsen(1979)	Round, Crawford y Mann(1990)	Medlin y Kaczmarska(2004)
	Division Bacillariophyta	Division Bacillariophyta
Clase Bacillariophyceae		Subdivisión Coscinodiscophytina
Orden Centrales (Biddulphiales)	Clase Coscinodiscophyceae	Clase Coscinodiscophyceae
		Subdivisión Bacillariophytina
Orden Pennales (Bacillariales)	Clase Fragilariophyceae	
	Clase Bacillariophyceae	Clase Mediophyceae
		Clase Bacillariophyceae

Figura 9 Sistemas de clasificación de diatomeas

#### CLASES COSCINODISCOPHYCEAE

Este grupo de diatomeas (conocido como Centrales en la clasificación de Simonsen 1979) es un grupo definido por presentar un patrón radial en la simetría de la ornamentación de la cara valvar, que parte de un nódulo o anillo central (annulus). Frecuentemente su perímetro valvar es circular, pero también las hay multipolares (poligonales o triangulares) y bipolares. La gran mayoría presenta por lo menos una rimoportula (proceso labiado) y un grupo (subclase *Thalassiosirophycidae*) también presenta fultoportulae (procesos reforzados). (Krammer K, 1991), (Round FE, 1990), (Stoermer EF J. M., 2003).

Se reproducen asexualmente por división celular, produciendo frecuentemente esporas de resistencia que pueden sobrevivir por mucho tiempo enterradas en los sedimentos. Cuando se reproducen sexualmente, lo hacen por oogamia. Su forma de vida es principalmente holoplanctónica (pasan todo su ciclo de vida en la columna de agua) o meroplanctónica (pasan parte de su ciclo de vida como quistes, enterrados en el sedimento); por lo mismo son muy abundantes en el medio marino, siendo comparativamente menos abundantes en los ambientes continentales.

La mayoría de las especies de la Clase Coscinodiscophyceae que habitan en ambientes continentales se distribuyen en 5 subclases:

- Subclase Coscinodiscophycidae: Aulacoseira (A. granulata, A. ambigua, A. nivaloides), Melosira.
- Subclase Biddulphiophycidae: Terpsinoe
- Subclase Rhizosoleniophycidae: Urosolenia.
- Subclase Chaetocerotophycidae: Chaetoceros
- Subclase Thalassiosirophycidae: Cyclostephanos, Stephanocyclus (S. meneghinianus), Discostella (D. stelligera), Stephanodiscus, (S. niagarae) , Tertiarius†.

#### *CLASE FRAGILARIOPHYCEAE*

En esta clase el contorno valvar es normalmente bipolar (elongado), con la ornamentación en la cara valvar distribuida con una simetría bilateral con respecto a una costilla central longitudinal conocida como sternum (esternón). La reproducción sexual, cuando ocurre, es por isogamia (Round FE, 1990). Muchas de estas especies presentan rimoportulae (procesos labiados) y frecuentemente forman colonias ya sea por medio de espinas marginales o por medio de cojines de mucilago. (JC, 2003), (Krammer K, 1991).

En cuanto a su forma de vida, pueden ser parte del perifiton (viven sobre diversos sustratos) y del plancton (viven flotando en la columna de agua), y algunas son consideradas como ticoplancton (especies del perifiton que pueden entrar en el plancton por turbulencia). Son abundantes en los ambientes continentales y se distribuyen en una sola subclase.

- Subclase Fragilariophycidae: Asterionella, Diatoma, Fragilaria, Pseudostaurusira, Staurosira, Staurosirella, (Synedra), Ulnaria.

#### *CLASE BACILLARIOPHYCEAE*

El contorno valvar es generalmente bipolar (elongado) y la ornamentación de la cara valvar presenta frecuentemente una simetría bilateral con respecto al eje longitudinal o apical. Sin embargo, este grupo se caracteriza fundamentalmente por la presencia de un esternón rafidiano en por lo menos una de las dos caras valvares. Esto significa que la costilla de sílice que forma el



eje de simetría apical denominado sternum o esternón, contiene un rafe o sistema rafidiano que consiste de dos fisuras, o ramas del rafe, que recorren longitudinalmente el esternón en sentidos opuestos. El punto en donde las dos ramas del rafe se encuentran se denomina nódulo central y los puntos donde terminan cada una de las ramas del rafe nódulos polares. La posición del rafe puede ser central, siendo el eje de simetría de las ornamentaciones de la cara valvar, pero también puede encontrarse desplazado hacia uno de los márgenes.

El rafe es una estructura que permite la movilidad de las diatomeas, permitiéndoles deslizarse sobre las superficies en las que viven, debido a esto la mayoría de las especies en esta clase tiene una forma de vida perifítica (viven sobre diversos sustratos), aunque algunas han desarrollado estructuras para fijarse al sustrato, como cojines o pedículos mucilaginosos, y otras se pueden llegar a encontrar dentro del plancton (flotando en la columna de agua) o ticoplancton (entrar en el plancton por turbulencia). Este es un grupo sumamente diverso y muy abundante en los ambientes acuáticos continentales y se distribuye en dos subclases: Eunotiophycidae y Bacillariophycidae. Debido a la gran cantidad de géneros dentro de la subclase Bacillariophycidae los presentaremos por grupos dependiendo del tipo de simetría valvar.

- Subclase Eunotiophycidae: Eunotia
- Subclase Bacillariophycidae
- Monorafidias: Achnantheidium, Cocconeis, Planothidium,
- Simétricas: Anomoeoneis, Brachysira, Caloneis, Craticula, Diadesmis, Dipploneis, Eolimna, Fallacia, Frustulia, Geissleria, Hyppodonta, Luticola, Mastogloia, Navicula, Placoneis, Pinnularia, Sellaphora, Stauroneis.
- Heteropolares: Gomphonema, Rhoicosphenia
- Dorsoventrales: Amphopra, Cymbella, Encyonema, Encyonopsis, Navicella.
- Rafe modificado: Hantzschia, Nitzschia, Tryblionella, Epithemia, Rhopalodia, Surirella.

*DIATOMEAS; DIVISION BACILLARIOPHYTA*

Las Bacillariophyta, más comúnmente conocidas por el nombre de diatomeas, tienen un amplio registro fósil desde el Cretácico inferior (Harwood DM, 1990), aunque su origen se remonta al Jurásico (los fósiles más antiguos generalmente aceptados como diatomeas son de ~190 Ma), o inclusive al Triásico ya que por métodos moleculares (reloj molecular) se estima un máximo probable para el origen de este grupo de hasta 240 Ma. (Medlin, 1997).

Las primeras diatomeas fósiles son marinas, las formas dulceacuícolas aparecen un poco más tarde, durante el Cretácico superior (~70 ma). Ejemplares de estas primeras diatomeas dulceacuícolas se encuentran preservados en los sedimentos de la formación Tarahumara, en Sonora. (Chacón-Baca E, 2002).

Las formas dulceacuícolas se diversificaron rápidamente durante el Eoceno (55 ma), y para el Mioceno (23 ma) ya existían la mayoría de géneros dulceacuícolas modernos (Fig. 10).

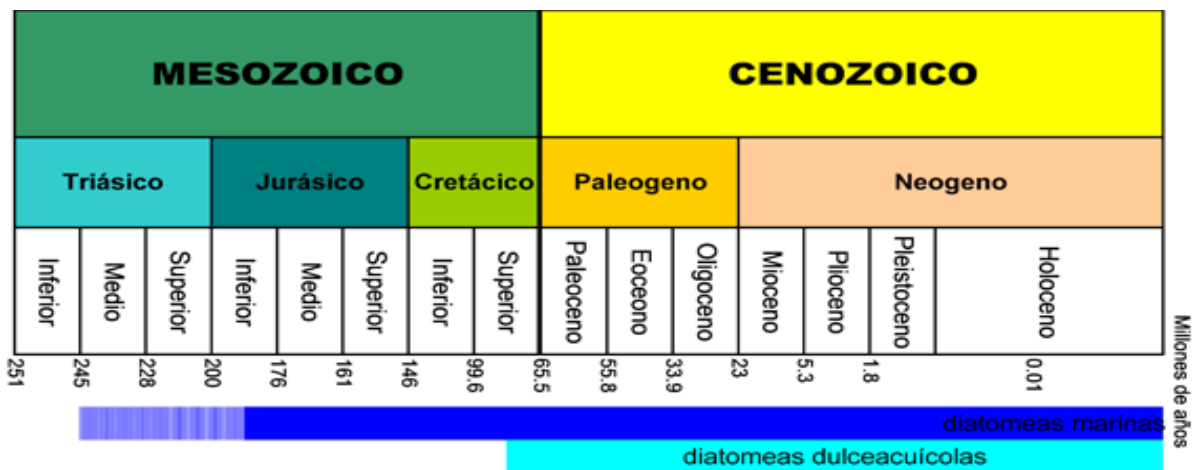


Figura 10 Eras geológicas y origen de las diatomeas

Las diatomeas son organismos eucariontes, unicelulares cuyo tamaño puede variar entre más o menos 10 y 200  $\mu\text{m}$  (0.01 a 0.2 mm). Dado que son organismos acuáticos y fotosintéticos, son generalmente consideradas como algas. Las diatomeas son importantes productores primarios, cuyos cloroplastos tienen un tono especial, pardo-dorado, que se debe a la presencia de

pigmentos como la fucoxantina, característico de las algas comúnmente llamadas pardas (ej. Bacillariophyta, Chrysophyta, Phaeophyta). Los cloroplastos de las diatomeas se caracterizan además por la presencia de clorofilas a + c, por estar delimitados por 4 membranas y por tener lamellas con 3 tilacoides. Todas estas características ubican a las diatomeas dentro del linaje de los Stramenopiles o Heterokontas.

La característica principal que distingue a las diatomeas es que sus células tienen una cubierta silíceo resistente a la degradación que se llama frústulo (**fig. 11**) y que está formado por dos mitades, cada una de las cuales se llama theca (thecae plural); la pieza principal de cada theca es denominada valva y al conjunto de las bandas o cinturones que sirven para unir a las dos valvas que forman al frústulo se le llama cíngulo. En un frústulo siempre hay una theca un poco más chica que la otra, por lo que se distingue entre epitheca (la más grande) e hipotheca (la más chica). Las valvas de las diatomeas tienen ornamentaciones características que permiten distinguir a las diferentes especies, e inclusive variedades, dentro del grupo. Las especies de diatomeas son bastante específicas a las condiciones en las que viven, por ejemplo, al pH, alcalinidad, salinidad, nivel de nutrientes, etc. Debido a esto y a la gran abundancia que pueden llegar a tener, es posible utilizarlos como indicadores ambientales e inclusive realizar, a partir de las asociaciones encontradas en una secuencia estratigráfica marina o lacustre, estimaciones sobre los valores que presentaron estos parámetros en el pasado. (Battarbee RW, 2001), (Stoermer EF S. J., 1999).

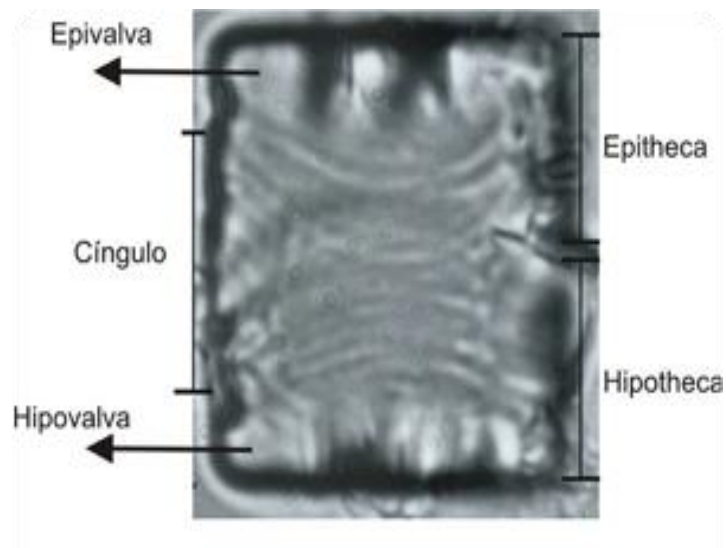


Figura 11 Partes del frústulo

#### PROPIEDADES FISICAS

- Aspecto macroscópico: Roca purulenta, fina y porosa con aspecto margoso
- Color por lo regular blanco brillante (en el caso de alta pureza)
- Pueden estar coloreadas
- Blanco (calcinado con fundente)
- Rosa (calcinado)
- Gris (sin calcinar)
- Alta porosidad
- Volumen de muy baja densidad
- Capacidad para absorber líquidos muy alta
- Capacidad abrasiva suave
- Conductividad térmica muy baja
- Alta resistencia a la temperatura
- Punto de fusión entre 1,400° y 1,750°C
- Peso específico 2.0 gr/cm<sup>3</sup> (la calcinación la incrementa a 2.3 gr/cm<sup>3</sup>)
- Área superficial 10 a 30 m<sup>2</sup>/g (la calcinación la reduce de 5 a 0.5 m<sup>2</sup>/g)

- Dureza (Mohs) 4.5 a 5 (la calcinación la incrementa a 5.5 a 6)
- Químicamente inerte
- El porcentaje de humedad varía de acuerdo al depósito (entre 10% y hasta 60%)

(Frederic, 1975), (DIGMAN, 1963).

#### COMPOSICION QUIMICA DE LA DIATOMITA

La diatomita está compuesta principalmente por sílice, la cual puede variar desde el 68% al 92% dependiendo de la calidad, existen componentes de menor proporción como son el hierro, titanio, calcio, aluminio, sodio y potasio. Y en elementos trazas se detectan elementos como el antimonio, arsénico, bario, berilio, bismuto, uranio, paladio y vanadio. Y algunos minerales que acompañan a la diatomita son las arcillas, yeso, mica, cuarzo, feldespato y calcita. Adicionalmente, se incorporan elementos biogénicos como restos de esponjas, silico-flojelados, restos de plantas y huesos de peces. (Harben, 2002), (RIVERA R., 1968), (L. L. Bahls, 1984).

Tabla 2 Regiones más importantes en la producción mundial de diatomita.

COMPUESTO	USA		KENIA	DINAMARCA	ESPAÑA	MEXICO	CHINA
	Lompoc CA	Nevada	Soysambu	Meler	Albacete	Jalisco	Jillin
SiO <sub>2</sub>	89.7	89.82	84.5	67.8	88.6	91.2	90.07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.72	2.32	3.06	10.3	0.62	3.2	1.98
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.09	0.84	1.86	6.85	0.2	0.7	0.67
TiO <sub>2</sub>	0.1	0.11	0.17	1.21	0.05	0.16	0.09
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.1	0.01	0.04	0.21	-	0.05	0.06
CaO	0.3	0.44	1.8	1.35	3.0	0.19	0.39
MgO	0.55	0.47	0.39	1.64	0.81	0.42	0.28
Na <sub>2</sub> O	0.31	0.67	1.19	0.46	0.5	0.13	0.22
K <sub>2</sub> O	0.41	0.19	0.91	1.47	0.39	0.24	0.35

PPC	3.7	5.4	6.08	7.91	5.2	3.6	6.3
TOTAL	99.98	100.27	100.0	99.2	99.37	99.89	100.4

#### METODOS DE EXTRACCION

La explotación de los yacimientos de diatomita puede ser a cielo abierto o subterránea. Gran cantidad de diatomita económicamente explotable de origen sedimentario se extrae a cielo abierto empleando métodos de alta tecnología de extracción.

#### *SUPERFICIALES*

La minería a cielo abierto de la diatomita es una actividad industrial que consiste en la remoción de grandes cantidades de suelo y subsuelo, que es posteriormente procesado para extraer el mineral. Este mineral puede estar presente en concentraciones muy bajas, en relación con la cantidad del material removido.

#### *SUBTERRANEAS*

La minería subterránea, por su parte, abarca todas las actividades encaminadas a extraer materias primas depositadas debajo de la tierra y transportarlas hasta la superficie. El acceso a los recursos se efectúa por galerías y pozos que están comunicados con la superficie.

#### CONSIDERACIONES DE SEGURIDAD

Las excelentes cualidades absorbentes de la tierra de diatomeas pueden dar lugar a una sequedad significativa de las manos, si se maneja sin guantes; El tipo de amenaza que se presenta por inhalación depende de la forma de la sílice. La sílice cristalina plantea un serio peligro en su inhalación porque puede causar silicosis. La sílice amorfa puede causar pulmones polvorientos, pero no lleva el mismo grado de riesgo que la sílice cristalina. La tierra de diatomeas de categoría alimenticia contiene generalmente porcentajes muy bajos de la sílice cristalina. La tierra de

diatomeas producida para los filtros de la piscina se trata con calor, haciendo al dióxido de silicio antes amorfo asumir su forma cristalina. (Huerta, 2010)

#### DIATOMITAS EN EL ESTADO DE HIDALGO

En el estado de Hidalgo existen 3 lugares donde se han detectado yacimientos de diatomita, estos son: Santa Clara, en el municipio de Emiliano Zapata, Tierras Blancas en el municipio del Cardonal y Hueyotlipa en el municipio de Acatlán Hgo.; este último yacimiento es de alto interés y al cual se le han realizado pocos estudios y es por esta razón que se decidió realizar la investigación de este lugar.

#### MARCO NORMATIVO DE LA DIATOMITA

En el artículo 4° de la Ley Minera queda especificado que se sujetarán a ésta, entre otros, los minerales de uso industrial, entre los cuales está incluida la diatomita. (Subsecretaría de Minería, 2017).

#### NORMALIZACION INTERNACIONAL DE LA DIATOMITA

##### CLAVE TÍTULO

- C330-05 Especificación para agregados ligeros para concreto estructural.
- C331-05 Especificación para agregados ligeros para unidades de concreto en albañilería.
- C294-05 Nomenclatura descriptiva para constituyentes de agregados de concreto.
- C593-06 Especificación para cenizas y otras puzolanas para uso con cal en la estabilización del suelo.

#### PRINCIPALES USOS Y MERCADOS DE LA DIATOMITA

- Filtro

La mayor demanda de filtro ayuda se da en la industria de la bebida en general, principalmente en la industria cervecera.

De acuerdo a su proceso de elaboración en general existen tres grupos con diferentes tamaños de partículas y aplicaciones:

- Natural

Sus aplicaciones son en la industria de la cerveza, vinos, separación de sólidos ultramicroscópicos, etc. Brinda mayor claridad en el líquido filtrado, así como menor flujo.

- Calcinados

Sus aplicaciones son en los extractos alcohólicos, cerveza, sidra, jugos de frutas en general, adhesivos, productos farmacéuticos, jarabes, tratamiento de agua, vino, levadura, antibióticos, etc.

- Calcinados con fundente

Sus aplicaciones son en los aceites vegetales y grasas animales, químicos orgánicos e inorgánicos, aceite para corte de metales, solvente para limpieza en seco, colorantes y pinturas, aceites lubricantes, glucosa, lacas y barnices, jabón, maltosa, pectina, adhesivos, caseína, ésteres de celulosa, sidra, dextrina, grasas, gomas sintéticas, mosto de cerveza, etc.

- Carga funcional

En la industria de la pintura la diatomita es un eficiente extendedor de pigmentos y agentes mateantes. Con su infinita variedad de formas, las diatomeas se entrelazan con la película de la pintura dándole mayor tenacidad y mejores propiedades de lijado. Sus formas microscópicas irregulares al difundir la luz permiten controlar el grado de brillo al nivel deseado.

La porosa estructura de las diatomeas reduce la tendencia a la formación de ampollas y asegura al mismo tiempo un secado más rápido debido a la mejor evaporación de los solventes.

Es materia prima importante en productos para limpieza y pulimento; en la industria del hule se utiliza en hules naturales y sintéticos para la elaboración de neumáticos, suelas, tacones, rodillos, guantes, empaquetaduras, etc.



## POROSIDAD Y PODER ABSORBENTE

La Diatomea con grado de porosidad elevada o de gran poder absorbente, es muy importante en cuanto a sus cualidades como aislante. Este poder de absorción se determina mediante la diferencia de agua absorbida y puede ser traducida de peso o como coeficiente de absorción que constituye la expresión en centímetros cúbicos de agua absorbida por gramo de producto seco.

Como consecuencia de su coeficiente de conductibilidad extremadamente reducido y la resistencia permanente a las temperaturas más variable, la Diatomita llega a formar el aislante más racional y más ampliamente utilizado. (Huerta, 2010).

## CADENA PRODUCTIVA DE LA DIATOMITA

La cadena productiva del mineral de diatomita (**Fig. 12**) tiene diversas etapas para su obtención de las cuales cada una es de gran importancia para poder comercializarlo y darle las diversas aplicaciones que este material dispone en las diferentes industrias. (Subsecretaría de Minería, 2017).

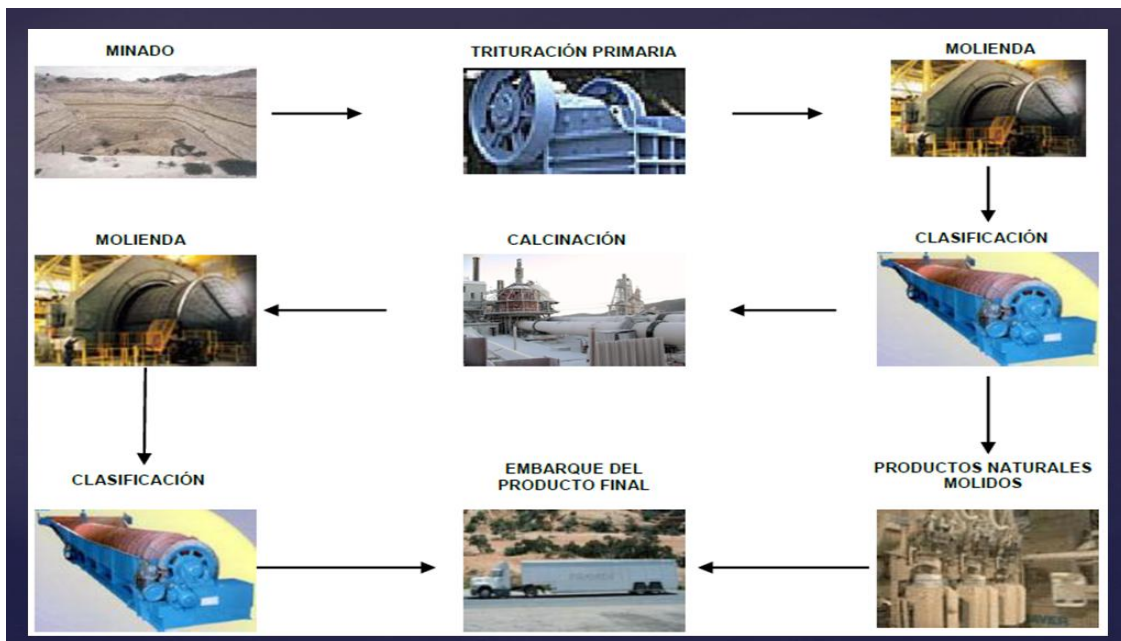


Figura 12 Proceso de obtención del mineral de Diatomita.

## MINADO

Generalmente la diatomita es minada a cielo abierto, en esta etapa se utiliza equipo minero como bulldozer, cargadores, excavadoras, retroexcavadoras y camiones de acarreo para descapotar y remover el material estéril que se encuentra sobre el yacimiento y posteriormente se realiza la extracción del mineral. La diatomita en bruto es transportada a los almacenes, comúnmente contiene 40% de humedad, en algunos casos rebasa al 60%.

## TRITURACION PRIMARIA

La primera etapa de trituración de la diatomita natural normalmente es por medio de molinos de martillo para conservar la estructura de la diatomea. Este proceso es para reducir el tamaño del material y remover materiales diferentes a la diatomita.

## MOLIENDA / SECADO

En esta etapa se reduce el tamaño de las partículas de diatomita, recibidas de la etapa de trituración primaria. En este proceso la molienda y el secado se realizan simultáneamente y las partículas suspendidas de diatomita son acarreadas en una corriente de gases calientes. Los secadores son usados para reducir la humedad hasta 15% aproximadamente. Los secadores operan en un rango de temperaturas de 70°C a 430°C.

## CLASIFICACION

Las partículas suspendidas que salen del secador pasan a través de una serie de ventiladores, ciclones y separadores a una casa de bolsas. Estas operaciones secuenciales separan el polvo en varios tamaños, remueven impurezas y rechazan el agua absorbida. Los productos de diatomita natural son secados, molidos y clasificados usando ciclones y ventiladores que posteriormente son ensacados y embarcados.

## CALCINACION

Para las aplicaciones de filtración, la diatomita natural es calcinada por tratamiento térmico en calcinadores rotatorios, con o sin agente fundente. La calcinación se utiliza para ajustar la distribución del tamaño de partícula y para usarse como filtro de ayuda.

## CON FUNDENTE

El ajuste adicional del tamaño de partícula es por la adición de un fundente entre 2 y 8%, usualmente sosa cáustica, cloruro de sodio o hidróxido de sodio, antes de la calcinación. El fundente agregado sinteriza las partículas de diatomita e incrementa el tamaño de la partícula, permitiendo de este modo una tasa de flujo incrementada durante la filtración del líquido. Para los grados calcinados, el polvo se calienta en grandes calcinadores rotatorios al punto de fusión incipiente, y así, en estricto sentido técnico, el proceso es sinterización más que calcinación. El material que sale del horno se muele adicionalmente y se clasifica. Los productos resultantes son llamados “calcinados con fundente”.

La calcinación con fundente produce una sustancia blanca, coloreada por la conversión de fierro a un complejo de silicatos de sodio-aluminio-fierro más que al óxido. La temperatura alcanza hasta 1,200°C.

## SIN FUNDENTE

Las temperaturas típicas de operación del calcinador oscilan entre 650°C y 1,200°C produciendo grandes partículas con grandes poros y pequeñas áreas superficiales; ajustando la distribución del tamaño de la partícula. Para grados calcinados directamente, el polvo es calentado en grandes hornos rotarios. La fusión y aglomeración forman grupos de diatomeas.

La oxidación del fierro le da una coloración rosada. Parte de la sílice amorfa se convierte en sílice cristalino.

#### MOLIENDA

El material existente en el horno es adicionalmente molido para obtener productos o polvos de tamaño más fino que los obtenidos anteriormente de acuerdo a las especificaciones del mercado.

#### CLASIFICACION

El material producido en la molienda es nuevamente clasificado de acuerdo a las especificaciones del mercado, es decir, separan el polvo en varios tamaños y remueven las impurezas.

#### EMBARQUE DEL PRODUCTO FINAL

El producto final puede tener diferentes tamaños y colores (gris, rosa y blanco) de acuerdo a las necesidades de los clientes. Es colocado en sacos y embarcado. (Subsecretaría de Minería, 2017)

## **CAPÍTULO II**

# **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

## CAPITULO 2: DESARROLLO EXPERIMENTAL

En el siguiente diagrama (fig. 13), se muestra cómo se realizó el desarrollo experimental.

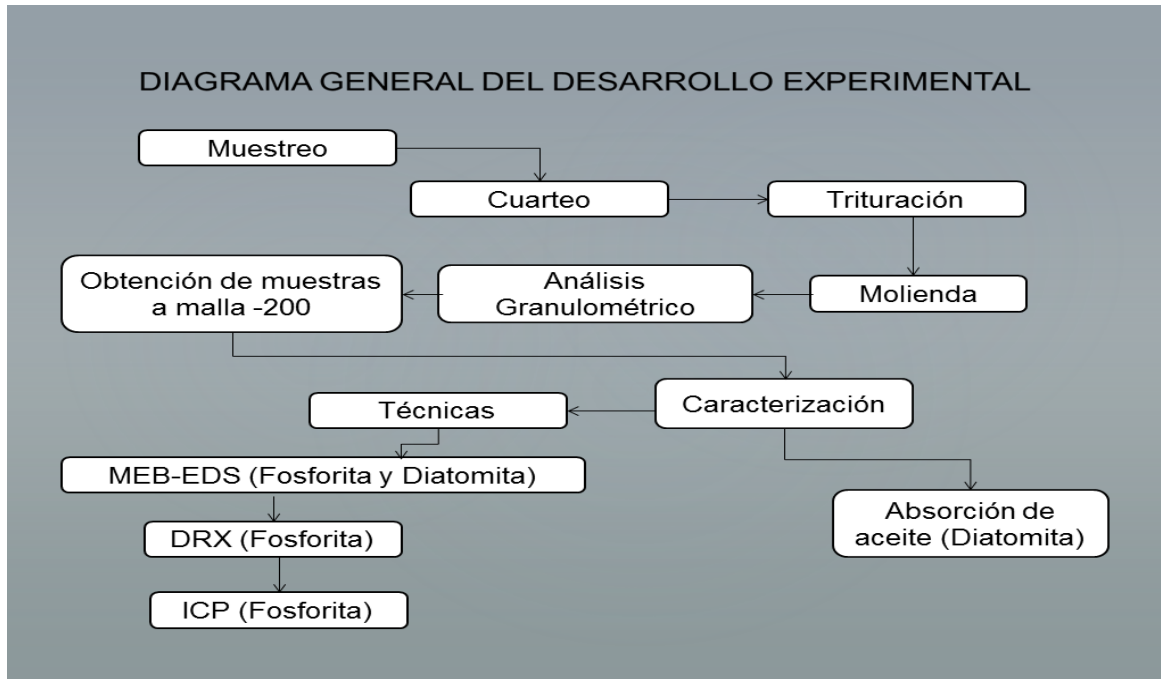


Figura 13 Diagrama General de Desarrollo experimental.

### MUESTREO

#### Fosforita

El mineral de fosforita (**Fig. 14**) utilizado en el desarrollo de este trabajo fue extraído del municipio de Pacula, Hidalgo. Se tomó una muestra representativa del lugar de origen de este mineral de aproximadamente 2 Kg. y después esta muestra fue mezclada para homogenizarse correctamente y por completo.



*Figura 14 Mineral de fosforita*

#### Diatomita

El mineral de Diatomita utilizado en el desarrollo experimental de este trabajo fue extraído de la comunidad de Hueyotlipa, municipio de Acatlán, Hidalgo (**Fig. 15**); Se extrajo una muestra representativa del lugar de origen de este mineral de aproximadamente 2 Kg. Después esta muestra fue mezclada para homogenizarse y comenzar con los análisis respectivos.



*Figura 15 Mineral de Diatomita*

Se realizó la preparación mecánica de los dos minerales de manera independiente, pasando las muestras por la trituradora de quijadas (**Fig. 16**) reduciéndolas a un tamaño aproximado de 1.27

cm., estas después se hicieron pasar por la trituradora de rodillos (**Fig.17**), para que enseguida se pasara por el pulverizador con el objetivo de reducirla aún más de tamaño.



*Figura 16 Trituradora de quijadas*



*Figura 17 Trituradora de rodillos.*

Todo el mineral de las dos muestras se homogenizó adecuadamente usando hule de 120cm X 120cm, en donde se colocó el mineral (**Fig. 18**) y enseguida se comenzó a hulear varias veces, esto con la finalidad de que el mineral destinado a analizarse sea lo más homogéneo posible para el ensayo.





*Figura 18 Hule con Mineral de Fosforita.*

Se realizó el tamizado en seco, haciendo un análisis de granulometría a diferentes mallas (**Fig. 19**) para tener una distribución de tamaños adecuada de los dos minerales, el producto obtenido del tamiz de malla -200 fue el de mayor interés, ya que de él necesitaríamos una cantidad adecuada y considerable para los ensayos correspondientes en la caracterización.



*Figura 19 Juego de tamices*

Para llevar a cabo el intercambio iónico con los minerales naturales, se siguió un procedimiento en dos etapas de la siguiente manera: se pesaron 20 g de cada mineral (fosforita y diatomita) con un tamaño de partícula de malla -400, y luego se añadieron a un volumen de 500 ml de solución de lixiviación que contenía los elementos mostrados en la **Tabla 8**. Los experimentos se realizaron

a una velocidad de agitación de 500 rpm, con un pH de 0.3, el cual se controló añadiendo NaOH constantemente durante todo el experimento, y el tiempo de reacción utilizado fue de 24 horas. Después de finalizar el tiempo de reacción, la solución se filtró y secó; luego, tanto los sólidos como los residuos líquidos se caracterizaron (ICP-OES, XRD, XRF y SEM-EDS) para evaluar la capacidad de intercambio iónico de cada mineral.

#### CARACTERIZACION MINERALOGICA

Para conocer las principales especies minerales presentes en estos minerales se llevó a cabo un análisis mediante Difracción de Rayos-X (DRX), análisis por ICP (Inductively Coupled Plasma Spectrometry) o Espectrómetro de Plasma Inductivamente Acoplado y Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) este último análisis solo se le realizó a la diatomita.

#### DIFRACCION DE RAYOS-X (DRX)

Se pesó un gramo de muestra en polvo de diatomita, con un tamaño de partícula de -200 mallas (34µm), para el análisis se usó un porta muestras donde posteriormente se compacto el mineral y se hizo el análisis de difracción de rayos - X, el cual se llevó a cabo con Difractómetro INEL, modelo EQUINOX 2000 operado en las condiciones de trabajo mostradas en la **tabla 3**.

*Tabla 3 Condiciones durante la realización del experimento.*

Características	Radiación	Monocromador	Voltaje	Intensidad	T barrido
Descripción	Co K $\alpha$ <sub>1.7890</sub>	Germanio	30 KeV	20 Ma	15 min

El espectro obtenido por DRX se indexo con la ayuda del programa MATCH 1 y las especies minerales encontradas se muestran en la sección de resultados.

#### MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO (MEB-EDS)

El equipo usado para el análisis de microscopía electrónica de barrido fue un microscopio JEOL 1300, modelo JSM, (**Fig. 20**) con un alcance de 300,000 ampliificaciones, spot size de 10-2 a 10-5amp y una resolución de 30 KeV. Este equipo cuenta con un espectrómetro de Rayos-X por dispersión de energías (EDS), con el cual se determinan las intensidades relativas de los elementos presentes en los materiales dentro de un área de análisis de 1  $\mu\text{m}^3$  aproximadamente y es un análisis puntual y semi cuantitativo.



*Figura 20 Microscopio Electrónico de Barrido.*

Se montaron las muestras de fosforita y diatomita en polvo con un tamaño de partícula de -200 mallas sobre cinta grafito doble cara, lo cual nos sirvió para poder instalarlas en el equipo y así haber realizado el análisis. Los datos de las pruebas se presentan en la sección de resultados.

#### CARACTERIZACION QUIMICA

La caracterización química solo se le realizó a la muestra de fosforita, esta caracterización se centró en la cuantificación de los elementos contenidos en la muestra, utilizando análisis por ICP. Se pesaron 3 muestras de 1 gr. de este mineral, estas pesadas fueron del producto obtenido de la malla 200 y enseguida se agregaron a matraces volumétricos para hacer la digestión con agua regia a una temperatura adecuada y por cierto tiempo, ya digeridas las muestras se enfriaron a temperatura ambiente para poderlas manipular y pasarlas a filtrar con la finalidad de que la poca

cantidad de sílice que no se digesto de las muestras no se pasara a la solución que se usaría en el análisis; una vez filtradas las muestras se agregaron a matraces aforados de 100ml y se realizó el aforo, enseguida se obtuvieron alícuotas de cada muestra para guardarlas en frascos ámbar y almacenarlos en un refrigerador y así conservar las condiciones de las muestras; Posteriormente se prepararon tres estándares y un blanco, los estándares contenían los siguientes elementos Al, Mg, Ca, Ti, Ba, Au, La P, Fe, y Na en diferentes concentraciones de 1, 3, 10, 5 y 20 ppm. Enseguida se realizó la curva de calibración, procediéndose con la programación del equipo y la medición de los estándares preparados, algunos de un solo elemento y otros multi-elemental.

Las especies minerales analizadas por este método fueron  $\text{Ca}(\text{PO}_4)_3$  y  $\text{La}_2\text{O}_3$ , principalmente, así como también  $\text{Ca}_4\text{P}_4\text{O}_9$ ,  $\text{MgO}$ , y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

#### GRANULOMETRIA

Este análisis granulométrico para las dos muestras se llevó a cabo con la utilización de un juego de tamices U.S. Standar Testing Sieve No.80, 100, 120, 150, 200, 220 y 325 (**Fig. 21**); tamizándose 2 Kg. de cada muestra, posteriormente a las fracciones retenidas en cada una de las mallas, se les realizaron operaciones de acumulativos positivos y negativos; dichos valores son presentados en la siguiente sección. El cual se agregó al juego de tamices para posteriormente instalarlos en un RO-TAP, y por mecanismos que ejerce el equipo (verticales y horizontales) se hizo pasar la mayor cantidad de mineral en cada malla.



*Figura 21 Juego de tamices utilizados para el análisis de tamaño de partícula.*

### CARACTERIZACION FISICA (DIATOMITA)

Las técnicas utilizadas en esta sección tienen como objetivo medir las propiedades del material, como lo son la masa específica a granel y porcentaje de absorción de aceite para la Diatomita y tamaño de partículas;

### ABSOCION DE ACEITE (DIATOMITA)

Este es una medición que expresa en porcentaje de líquido que puede absorber el carbonato de calcio hasta su punto de saturación. Este número funciona como criterio orientativo para evaluar la superficie específica de un material; sin embargo, este no es un valor absoluto y preciso; y no ofrece ninguna información predictiva sobre la morfología o granulometría, más es indispensable para la formulación de pinturas, ya que brinda información sobre la demanda de vehículo utilizado.

La medición de absorción de aceite se puede hacer por el método de frotado con espátula descrito en la norma ASTM D 281-2007 y de la cual se extrajo la formula siguiente:

$$\text{Absorción de aceite: } \frac{(\text{Peso final pasta-Peso inicial aceite}) * 100}{\text{Peso de la muestra}}$$

La realización de esta prueba consistió en el pesado 3 gr. de cada muestra, y se colocaron en una lata de acero impermeable, lo suficientemente grande para evitar pérdidas de material, (**Fig. 22**) A continuación se agregó aceite de linaza gota a gota (el recipiente con el aceite gotero y perilla fueron pesados previamente) y se batió al mismo tiempo hasta que se obtuvo una pasta dura y manejable, que no se rompiera; para finalizar se pesó el recipiente con el aceite una vez más para después efectuar los cálculos necesarios para esta prueba.



*Figura 22 Pasta en lata de acero.*

# **CAPÍTULO III**

## **RESULTADOS**

## CAPITULO 3: RESULTADOS

En el siguiente capitulo se presentan los principales resultados obtenidos del estudio de caracterización de la fosforita y diatomita del estado de Hidalgo, los cuales se presentan a continuación:

### FOSFORITA

#### ANALISIS GRANULOMETRICO

En la **tabla 4** Se muestran los datos obtenidos del análisis granulométrico aplicado a la muestra correspondiente al mineral de fosforita, teniendo el mayor porcentaje de retención en las mallas -200 +230 (**figura 23**).

*Tabla 4 Porcentaje de acumulativos en las mallas de la muestra.*

Abertura del tamiz	Abertura <i>micras</i>	Pesos (gr)	% Peso Retenido en la malla	Acumulativo - (%)
+80	177	0	0	
-80+100	149	15.1	0.77	100
-100+120	125	187.18	9.35	99.21
-120+150	150	325.07	16.25	89.86
-150+200	74	525.24	26.26	73.61
-200+230	63	830.22	41.53	47.35
-220+325	44	94.78	4.73	5.84
-325	44	22.3	1.11	1.11
TOTAL		<b>1999.89</b>	<b>100</b>	



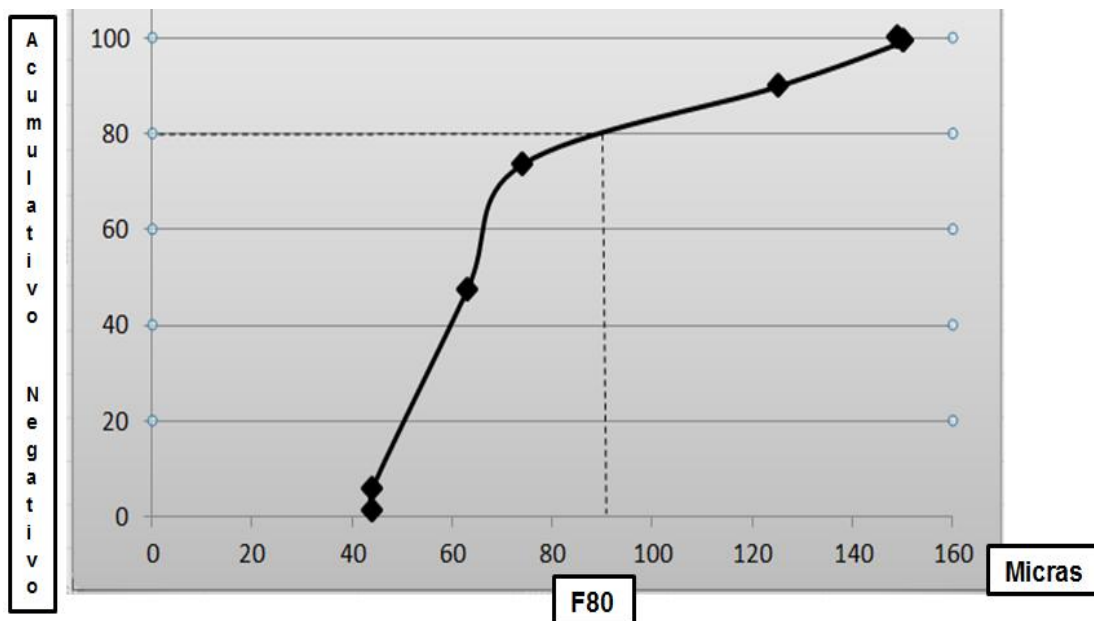


Figura 23 Grafica de retención de partículas.

#### DIFRACION DE RAYOS X

Como resultado de la aplicación de la prueba de Rayos - X, se obtuvo el espectro de difracción el cual se presenta a continuación. El espectro presentado en la **figura 24**, fue obtenido tras el análisis de la muestra de mineral de fosforita del cual una vez que se llevó a cabo la indexación se confirmó la presencia de Oxido de Lantano, y Fosfato Calcio formando completamente a la muestra, la indexación consto de buscar en el programa Mach 1 las especies minerales que coincidieran con los picos que se arrojaron en el espectro y así llegar a obtener las especies antes mencionadas.

#### Características

El Óxido de Lantano se confirmó que existía en el mineral de fosforita ya que al hacer la indexación se encontró a esta especie, el Óxido de Lantano un compuesto inorgánico cuya fórmula química es ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ). Su apariencia es en forma de polvo blanco y es insoluble en agua.

El Óxido de Lantano es un óxido metálico formado por:

- átomos de lantano.
- átomos de oxígeno.

Las principales propiedades del óxido de lantano ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ) son:

- Densidad: 6,51 g/cm<sup>3</sup>, sólido.
- Masa molar: 325,809 g/mol.
- Punto de fusión: 2315 °C.
- Punto de ebullición: 4200 °C.

Entre los usos y aplicaciones más comunes en las que se utiliza el Óxido de Lantano se encuentran:

- Lentes ópticos.
- Imágenes de rayos - X.
- Piezas para la termoeléctrica.
- Convertidores de gases de escape. (óxido de lantano, s.f.).

#### Fosfato Cálcico

Esta especie se determinó a partir de que se realizara la indexación correspondiente a este compuesto a partir del espectro arrojado por el análisis. Esta especie está compuesta principalmente por calcio y fosfato, que abunda mayormente en los dientes y estructuras de los esqueletos de marinos invertebrados.

#### Aplicación

Puede ser usado confiablemente con materiales dentales, también en cerámicas y resinas fotopolimerizables, para prevenir las caries de recidiva y mejorar el pronóstico de estas restauraciones; en aleaciones; en pastas tópicas para profilaxis periodontal, hechas a base de agua, libres de azúcar, constituyendo mezclas especiales de pulidores y agentes del complejo Fosfato Cálcico para el sellado tubular; materiales blanqueadores; complementos artificiales de saliva; enjuagues bucales. (Dirección General de Desarrollo Minero, 2018).

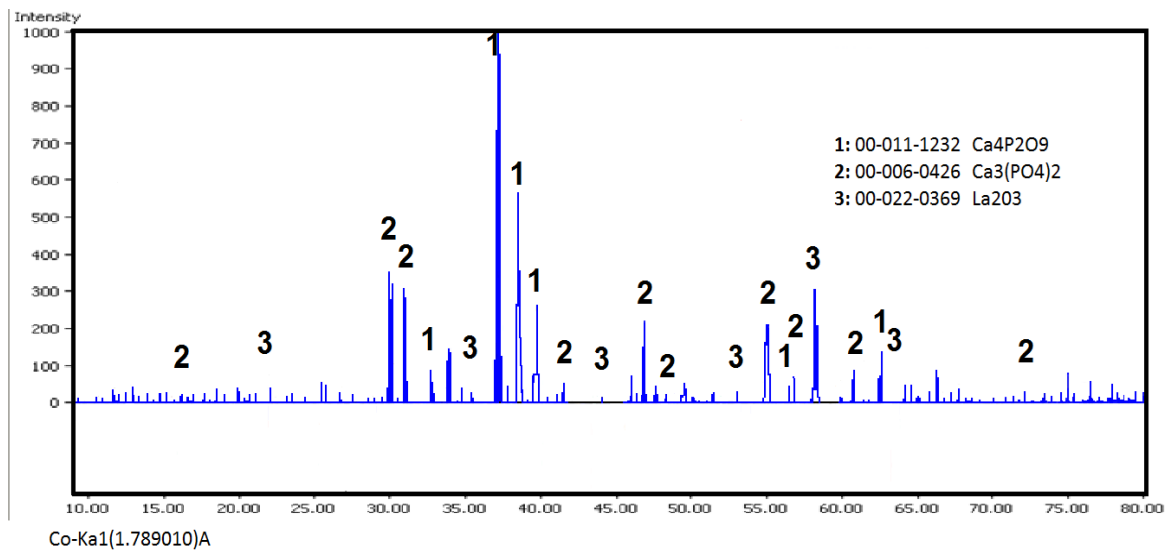


Figura 24 Espectro de difracción de rayos X de la fosforita.

#### MICROSCOPIA ELETRONICA DE BARRIDO Y ESPECTROMETIA DE ENERGIA DISPERSA DE RAYOS- X (EDS)

Como resultado del análisis por microscopia electrónica de barrido (MEB) y de espectroscopia de energía dispersa de rayos – X, se obtuvo el espectro y las imágenes (Mapping) que se presentan y discuten a continuación. En la **Figura 25** se puede apreciar que en el material se presentan elementos en mayor proporción como son el calcio, fósforo, aluminio, manganeso lo cual nos indica que existe un potencial considerable para que puedan ser beneficiados y así adquirir recursos económicos, también se aprecian en menor proporción, hierro, cobre, zinc y algunas tierras raras. **Fig. 25** a) resultado del microanálisis general SEM-EDS b) Imagen general, 2000X, SEM, c) imagen puntual donde fue tomado el microanálisis d) mapping de Distribución de elementos de tierras raras y metales preciosos en la fosforita.

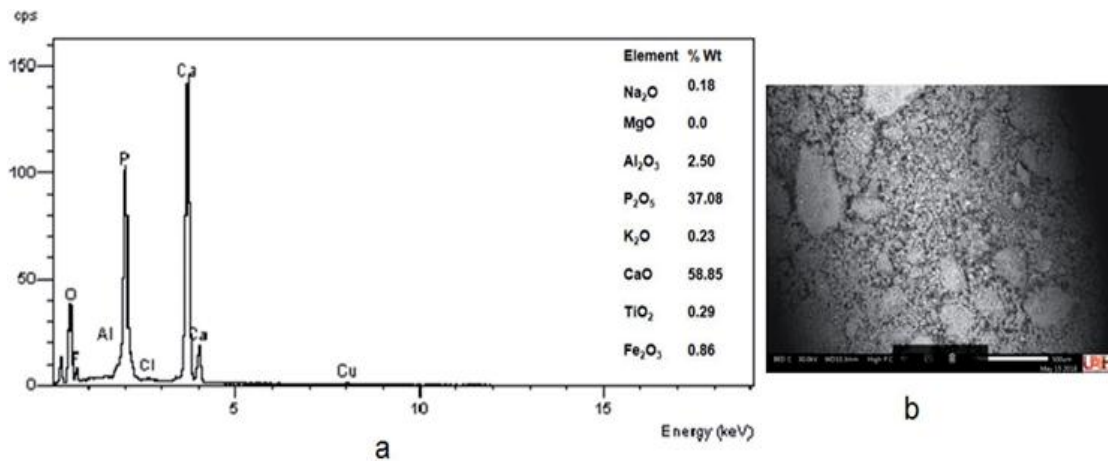


Figura 25 EDS de la fosforita.

#### ESPECTROSCOPIA DE PLASMA ACOPLADO (ICP)

En la **tabla 5, 6 y 7** que se presentan a continuación, muestran la concentración de los compuestos presentes en las muestras analizadas, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaCO<sub>3</sub>, MgO, Na<sub>2</sub>O Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Ca (PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> por Espectroscopia de Plasma Acoplado (ICP); después de la interpretación de los resultados. Estos componentes presentan relevancia ya que su presencia mínima o en exceso, determinan los posibles usos en el sector industrial.

Tabla 5 Composición química de la muestra 1 analizada a través de ICP.

ELEMENTO	%
Al	2.43
Ca	63.53
Na	0
Mg	0
Ti	0.48
Ba	0.15
Au	0
La	0
Fe	0.92

P	36.03
---	-------

*Tabla 6 Composición química de la muestra 2 analizada a través de ICP.*

ELEMENTO	%
Al	32.075
Ca	84.287
Na	0
Mg	11.225
Ti	0.1062
Ba	0.1612
Au	0
La	0
Fe	1.5812
P	47.7375

*Tabla 7 Composición química de la muestra 3 analizada a través de ICP.*

ELEMENTOS	%
Al	2.7872
Ca	76.558
Na	0
Mg	0
Ti	0.0930
Ba	0.1465
Au	0
La	0
Fe	1.6313
P	43.7674

## INTERCAMBIO IONICO

Para realizar el intercambio iónico partimos como base del siguiente mineral, que presenta la siguiente composición. El análisis realizado por ICP-OES se ejecutó tomando el líquido final después del intercambio iónico, y luego se diluyó la muestra tomando 1 ml de solución en 100 ml de agua destilada con un factor de dilución de 1/100.

Con esto, todos los elementos cayeron en un rango de concentración por debajo de 1 ppm para el caso de Au, Ce, Nd, L, Tb, Ge y Yb. Para el resto de los elementos, se tomó una muestra directa utilizando estándares entre 1 y 5 ppm (sin dilución).

*Tabla 8 Composición química de la lixiviación del mineral SEDEX, realizada por ICP.*

Análisis de ICP	
Elemento	Ppm
Au	45.93
Pd	1.92
Pt	0.005
Ce	81.79
Nd	56.97
La	51.89
Yb	33.35
Tb	25
Ge	9
Ga	2.5
Sm	1.75
Er	0.9
Eu	0.35

Antes de llevar a cabo los experimentos de intercambio iónico, la fosforita fue caracterizada para conocer su composición y compararla al final del intercambio iónico y, así, evaluar su capacidad

de intercambio para los elementos presentes en los líquidos de lixiviación. La **Tabla 9** muestra los resultados obtenidos mediante ICP y XRF de la composición química de la fosforita, donde se observan contenidos promedio de 36% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, así como la mayoría de los elementos como aluminio y calcio, y elementos menores como óxidos de sodio, potasio, titanio y hierro. (Hernandez-Avila, 2019)

Tabla 9 Composición química promedio de la fosforita antes del intercambio iónico.

Elemento	ICP (wt. %)	XRF (wt. %)
Na <sub>2</sub> O	0	0.16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.43	2.40
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	36.03	36.08
K <sub>2</sub> O	0.15	0.21
CaO	59.99	59.95
TiO <sub>2</sub>	0.48	0.31
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.92	0.89

Por otro lado, las especies minerales identificadas por difracción de rayos X (**Figura 26**) son principalmente fases minerales de calcio y fósforo.

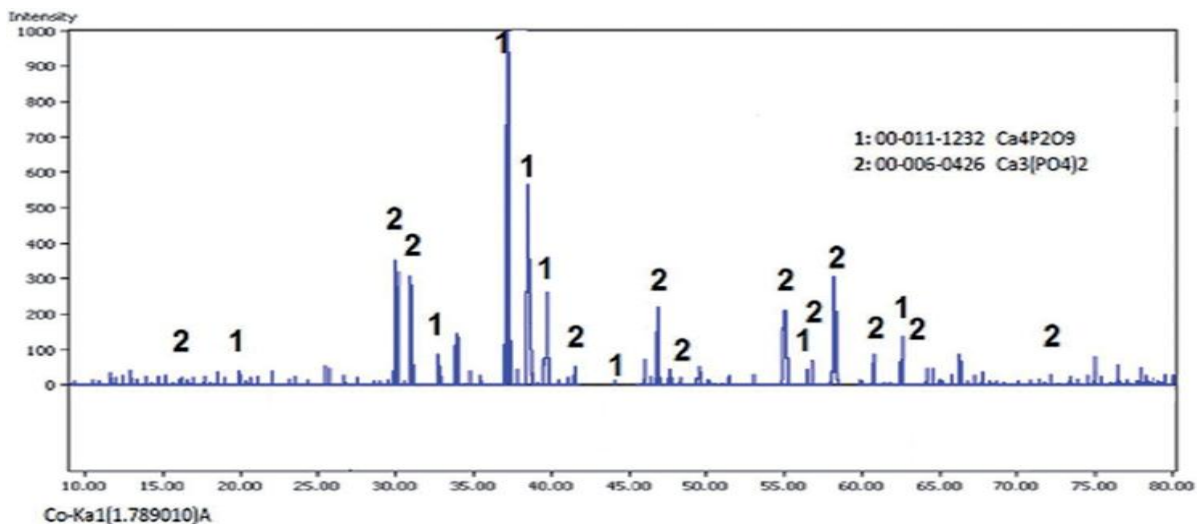


Figura 26 Difractograma de rayos X, antes del intercambio iónico.

Por último, en la **Figura 27**, se puede ver una imagen de partículas de fosforita a malla -400, que fue analizado por SEM-EDS, y aquí, también la presencia de elementos principales de fósforo, aluminio, y óxidos de calcio, así como elementos menores de sodio, titanio de sodio, titanio y hierro, como se muestra en la figura 24a. la partícula de fosforita se muestra en la Figura 24b.

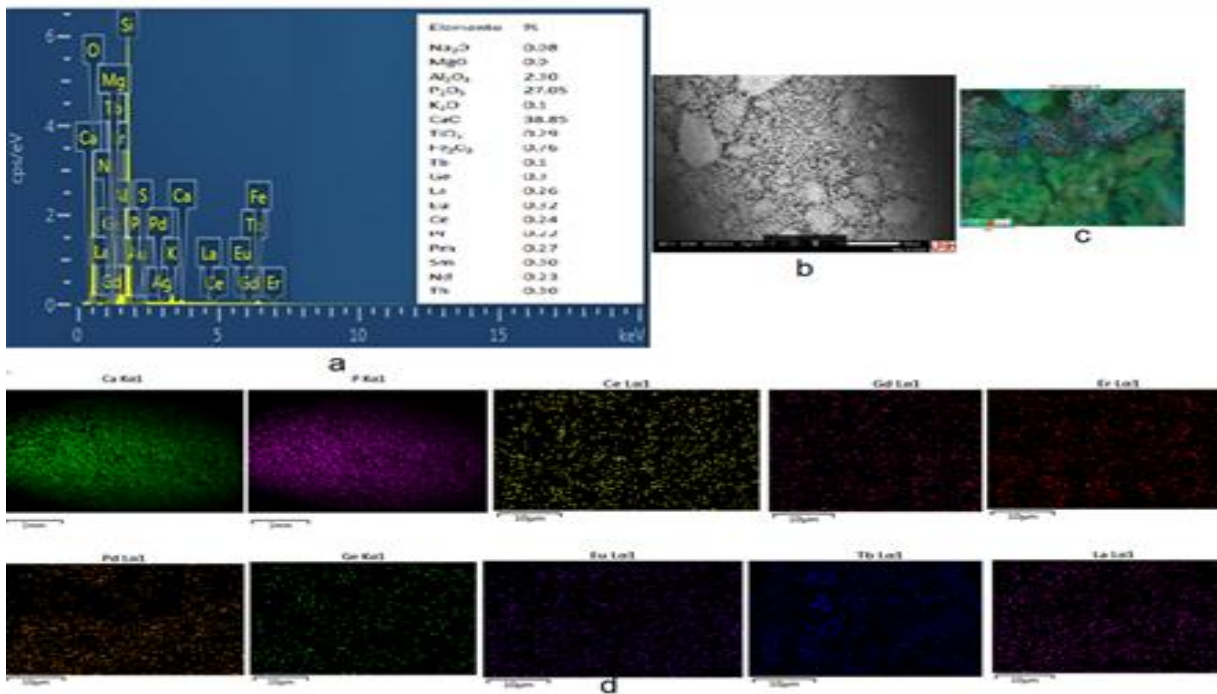


Figura 27 Fotomicrografías de las mallas de fosforita -400 a) microanálisis SEM-EDS y b) imagen general, 2200x, SEM-SE.

Después de realizar el intercambio iónico, utilizando fosforita como mineral absorbente, la solución fue filtrada y analizada mediante ICP, comparando los resultados con la composición inicial de los líquidos de lixiviación. Los resultados se muestran en la **Tabla 10** donde se hace una comparación entre los líquidos de lixiviación originales antes y después del intercambio, así como la eficiencia del intercambio catiónico de este mineral; se observa que, en todos los casos, las eficiencias son mayores al 99% de los elementos intercambiados, lo que permite determinar que la fosforita es un buen absorbente natural para tierras raras y metales preciosos. (Hernandez-Avila, 2019)

Tabla 10 Resultados del intercambio iónico realizado con fosforita (ICP).

ELEMENTO	CONTENIDO ANTES DEL INTERCAMBIO (ppm)	CONTENIDO DESPUES DEL INTERCAMBIO (ppm)	EFICIENCIA DEL INTERCAMBIO (%)



Au	45.93	0	100
Ce	81.79	0.037	99.95
La	51.89	0.017	99.97
Nd	56.97	0.02	99.96
Pd	1.92	0	100
Yb	33.35	0.001	99.99
Ge	9	0	100
Gd	1.4	0.008	99.43
Tb	0.25	0	100
Sm	1.75	0	100
Er	0.9	0	100
Eu	0.35	0	100
Pt	0.005	0	100

Asimismo, los sólidos obtenidos después del intercambio iónico fueron separados y secados para ser posteriormente analizados mediante XRD. Las especies minerales identificadas por difracción de rayos X (**Figura 28**) son fases mayoritarias como cuarzo, anortoclasa, ortoclasa, albita, berlinita y silicoaluminatos. De manera similar, se nota la presencia de tierras raras, como lantano y cerio, y metales preciosos que fueron todos adsorbidos por este mineral.

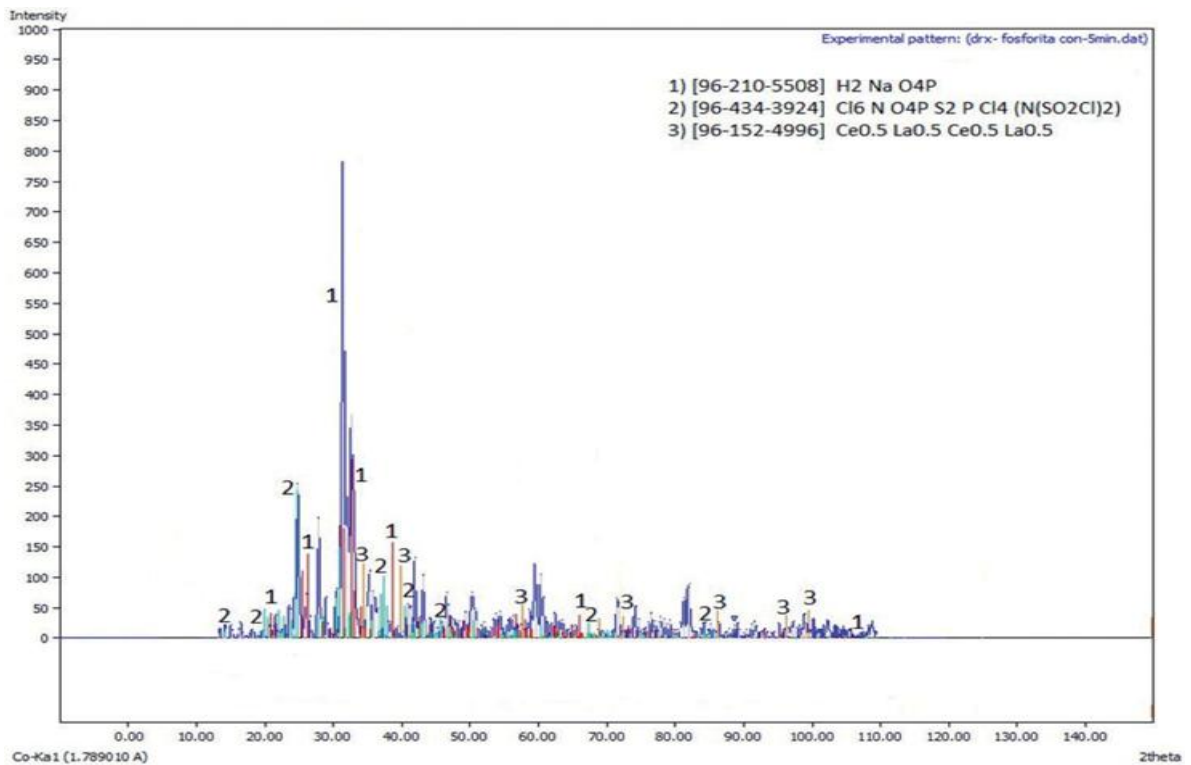


Figura 28 Difractograma de rayos X de Fosforita tras el intercambio iónico.

Finalmente, la **Figura 29** muestra la imagen de las partículas de fosforita después de realizar el intercambio iónico con los licores de lixiviación de un mineral tipo SEDEX, donde se muestra la composición del punto semicuantitativo y el mapeo de rayos X de los elementos. Esto verifica que efectivamente los elementos mencionados fueron absorbidos en el mineral.

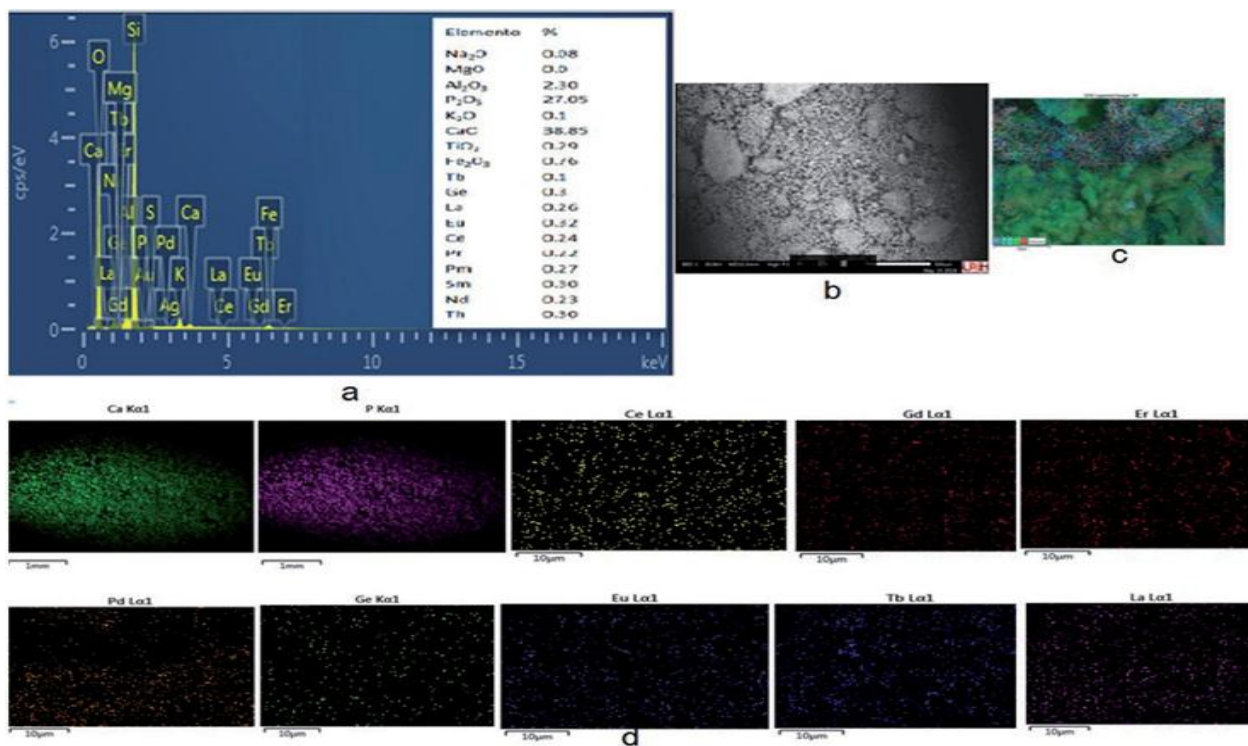


Figura 29 Micrografías de la fosforita tras el intercambio iónico, a) microanálisis SEM-EDS; b) imagen general, 2000x, SEM; c) imagen puntual donde se tomó el microanálisis; y d) cartografía de distribución de elementos de tierras raras y metales preciosos.

## DIATOMITA

### ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

En la **tabla 11** Se muestran los datos obtenidos del análisis granulométrico aplicado al mineral de diatomita, el cual se agregó al juego de tamices para posteriormente instalarlos en un RO-TAP, y por los propios mecanismos que ejerce el equipo se hizo pasar la mayor cantidad de mineral en cada malla.

Tabla 11 Porcentaje acumulativo en las mallas de la muestra.

ABERTURA DEL TAMIZ	ABERTURA (MICRAS)	PESO (gr)	% PESO RETENIDO EN LA MALLA	ACUMULATIVO (%)
+80	177	0	0	
-80+100	149	12.1	0.60	100
-100+120	125	143.1	7.17	99.36

-120+150	150	356.09	17.82	92.21
-150+200	74	478.54	23.93	74.4
-200+230	63	741.65	37.09	50.47
-220+325	44	188.48	9.42	13.38
-325	44	79.3	3.96	3.96
TOTAL		1999.26	1000	

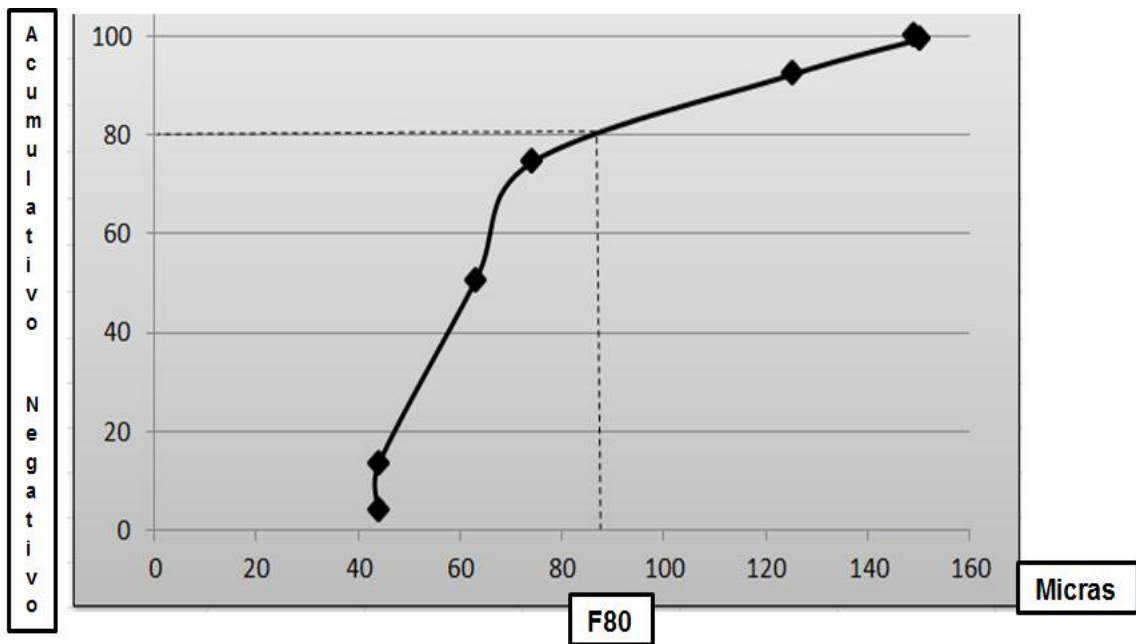


Figura 30 Grafica de retención de partículas.

#### DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Las especies minerales identificadas por Difracción de Rayos X (**figura 31**), en la que se puede observar la presencia de fases minerales mayoritarias como cuarzo, albita, berlinita.

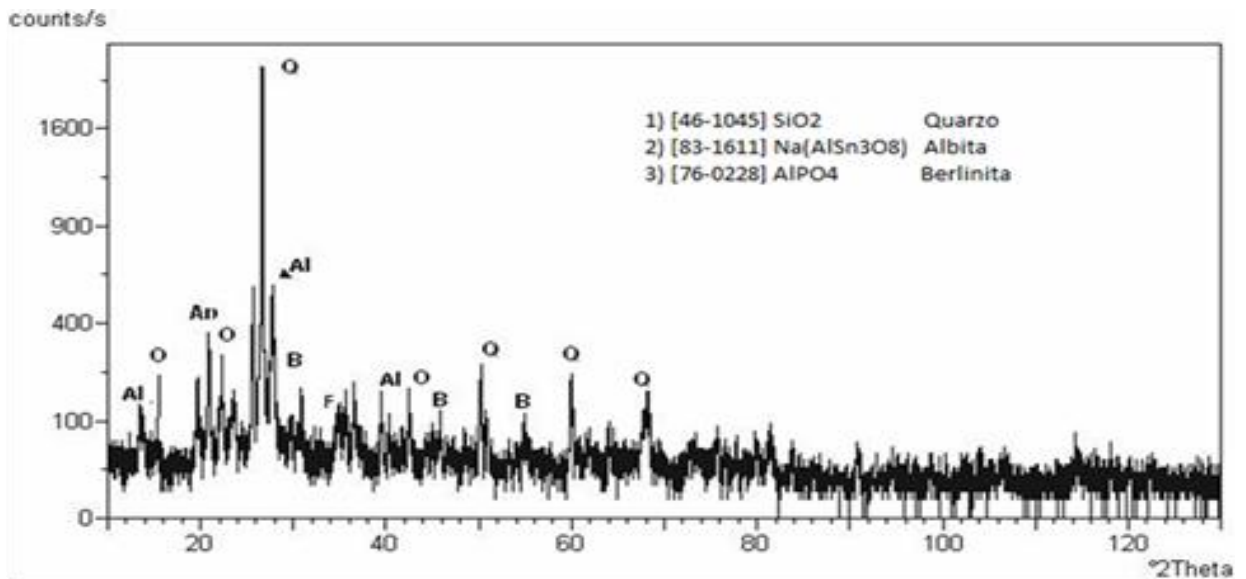


Figura 31 Especies Minerales identificadas por Rayos X.

#### MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO Y ESPECTROSCOPIA DE ENERGIA DISPERSA DE RAYOS – X (EDS)

Una vez realizado el análisis por microscopía electrónica de barrido (MEB) y de espectroscopia de energía dispersa de rayos – X a la diatomita, como resultado se obtuvo el espectro y las imágenes (Mapping) que se presentan y discuten a continuación.

En la **Figura 32** se puede apreciar que en el material se presentan elementos con mayor potencial en concentración como el calcio, titanio, hierro y magnesio lo cual nos indica que existe una cantidad considerable para que puedan ser beneficiados, principalmente el titanio el cual se presenta en los picos más altos del espectro seguido del calcio, esto nos deja un nuevo panorama para poder tomar decisiones en los posibles usos de estos elementos, también se aprecian en menor proporción, oro, cobre, zinc, silicio y algunas tierras raras.

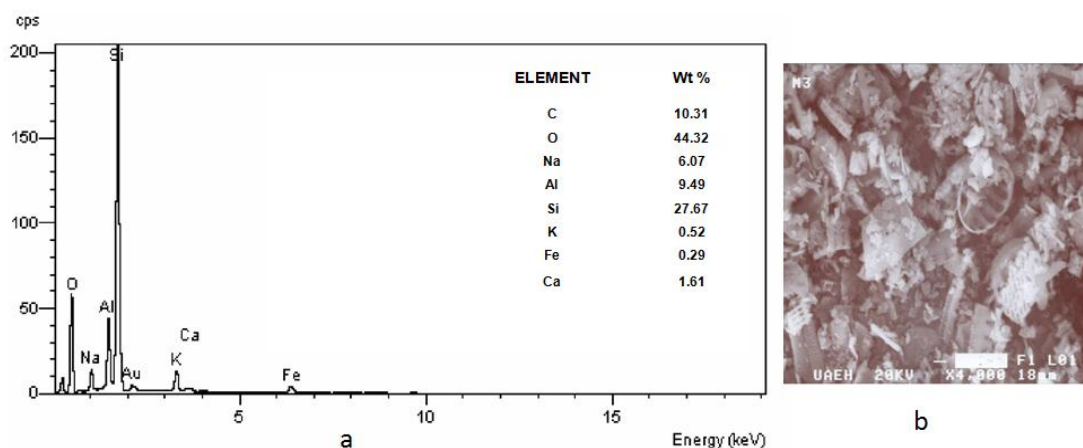


Figura 32 EDS Diatomita.

### ESPECTROSCOPIA DE PLASMA ACOPLADO (ICP)

En la **tabla 12** se resumen los resultados obtenidos por ICP y FRX de los elementos contenidos en la diatomita, las cuales presentan contenidos promedio de 76.68 % de silicio, así mismo se presentan contenidos mayoritarios de alúmina, hematita, óxido de sodio, óxido de magnesio, óxido de calcio y elementos minoritarios como el óxido de sodio y el titanio

Tabla 12 Composición química de la Diatomita.

Elemento	ICP Wt%	FRX Wt%
Na <sub>2</sub> O	0.61	0.923
MgO	1.79	1.87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.63	7.77
SiO <sub>2</sub>	76.00	77.36
K <sub>2</sub> O	2.41	1.2
CaO	0.85	1.04
TiO <sub>2</sub>	0.50	0.348
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.95	2.35

### ABSORCIÓN DE ACEITE

Los resultados obtenidos de la prueba absorción de aceite se muestran en la **tabla 13**, dichos resultados indican que la muestra de diatomita tuvo un porcentaje de absorción de aceite

representativo, lo cual nos indica que tiene un amplio potencial en las aplicaciones industriales que se dedican a la absorción de líquidos.

*Tabla 13 Valores de absorción de aceite de las muestras analizadas.*

MUESTRA	ABSORCION DE ACIETE
Mezcla	41.35

#### INTERCAMBIO IONICO

En primer lugar, antes de realizar los experimentos de intercambio iónico, se caracterizó el mineral de diatomita para evaluar, finalmente, su capacidad de intercambio. La **Tabla 14** resume los resultados obtenidos por ICP y XRF de los elementos originales contenidos en la diatomita, presentando contenidos medios del 76,68% de silicio, así como contenidos mayoritarios de alúmina, hematites, óxido de potasio, óxido de magnesio, óxido de calcio, y elementos menores como óxido de sodio y titanio. (Hernandez-Avila, 2019)

*Tabla 14 Composición química promedio de la diatomita antes del intercambio iónico.*

Elemento	ICP (wt. %)	XRF (wt. %)
Na <sub>2</sub> O	0.61	0.923
MgO	1.79	1.87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.63	7.77
SiO <sub>2</sub>	76.00	77.36
K <sub>2</sub> O	2.41	1.2
CaO	0.85	1.04
TiO <sub>2</sub>	0.50	0.348
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.95	2.35

Asimismo, las especies minerales presentes en la diatomita fueron identificadas por difracción de rayos X (**Figura 33**), observándose la presencia de fases minerales mayoritarias como cuarzo, albita y berlinita.

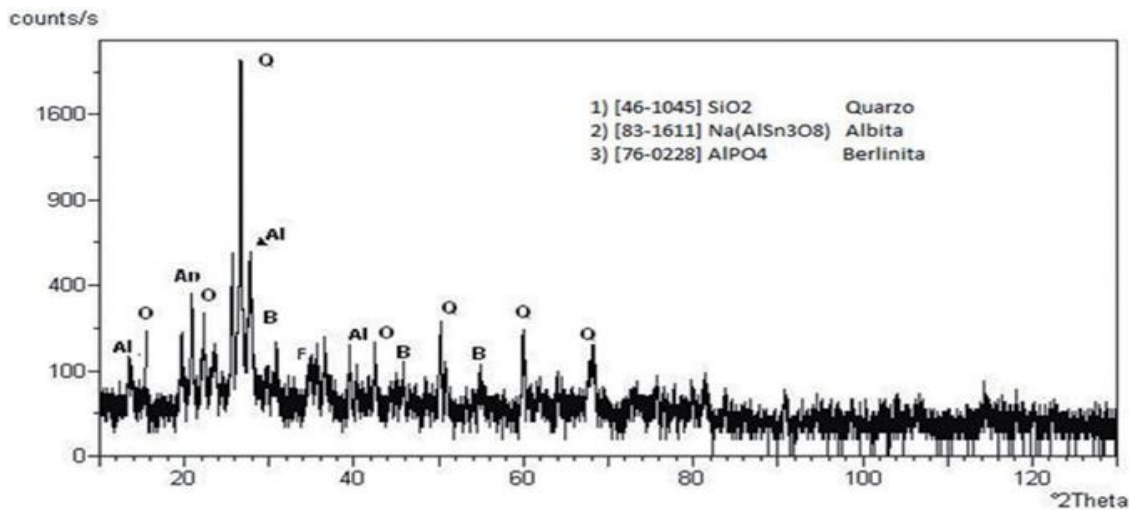


Figura 33 Difractograma de rayos X de diatomita, antes del intercambio iónico..

Por último, en la **Figura 34**, se muestra una imagen de una partícula de diatomita en malla -400, en la que se realizó un análisis por SEM-EDS. La presencia de elementos principales como silicio, aluminio, sodio, magnesio, potasio y hierro son característicos de la diatomita.

Asimismo, en la Figura 52b se puede ver una micrografía de la partícula de diatomita en la que se observan las propiedades características de las diatomeas del material.

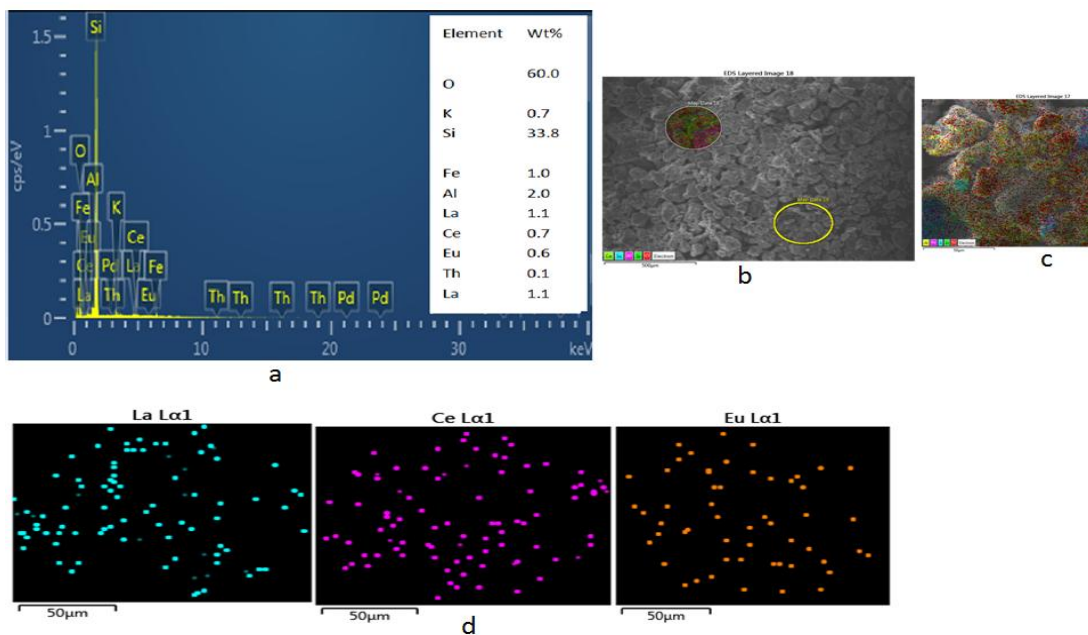


Figura 34 Micrografías de la diatomita -400 malla, a) microanálisis SEM-EDS y b) imagen general, 4000x, SEM-SE.



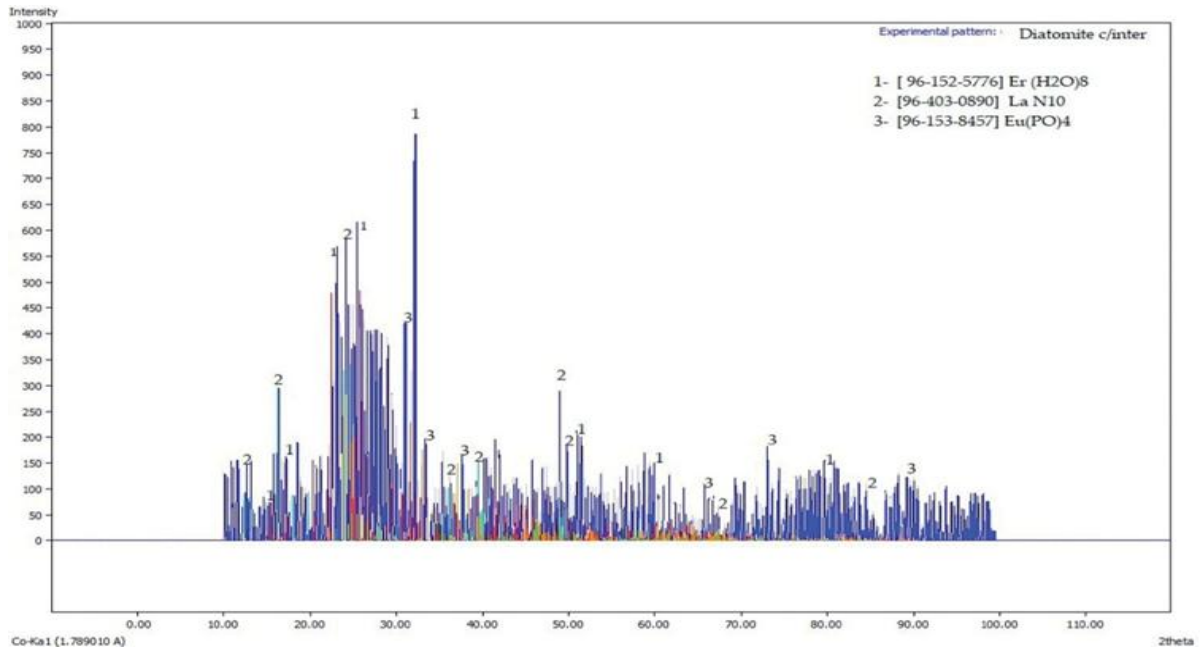
Después de realizar el intercambio iónico, el mineral de diatomita fue caracterizado para conocer los elementos intercambiados y así calcular la capacidad de intercambio iónico de este mineral. Los resultados se muestran en la **Tabla 15**, donde se hace una comparación entre los lixiviados originales y después del intercambio a través del análisis ICP. Asimismo, se muestra el % de eficiencia del intercambio catiónico y como resultado se puede ver qué. (Hernandez-Avila, 2019)

*Tabla 15 Resultados del intercambio iónico realizado con diatomita (ICP).*

ELEMENTO	CONTENIDO ANTES DEL INTERCAMBIO IONICO (ppm)	CONTENIDO DESPUES DEL INTERCAMBIO IONICO (ppm)	EFICIENCIA DEL INTERCAMBIO IONICO (%)
Au	45.93	0	100
Ce	81.79	0.003	99.996
La	51.89	0.004	99.99
Nd	56.97	0.008	99.99
Pb	1.92	0	100
Yb	33.35	0.001	99.997
Ge	9.0	0	100
Gd	1.4	0.03	97.86
Tb	0.25	0	100
Sm	1.75	0	100
Er	0.9	0	100
Eu	0.35	0.003	99.14
Pt	0.005	0	100

La diatomita muestra una eficiencia de intercambio para los metales preciosos del 100%, así como para el Pd, Ge, Tb, Sm y Er. Los otros elementos muestran una eficiencia superior al 99%, no así para el Gd, ya que su eficiencia de intercambio es del 97.86%, lo cual corrobora que la diatomita tiene una eficiencia de intercambio para este tipo de metales.

Asimismo, las especies minerales fueron identificadas por difracción de rayos X (**Figura 35**), observando la presencia de fases minerales mayoritarias como cuarzo, anortoclasa, ortoclasa, albita y berlinita; así como la presencia de tierras raras como Er, La y Eu.



*Figura 35 Difractograma de rayos X del material de diatomita, tras el intercambio iónico.*

Finalmente, la **Figura 37** muestra la imagen de una partícula de diatomita después del intercambio iónico con los licores de lixiviación de un mineral tipo SEDEX, donde se puede observar la composición puntual semicuantitativa y la distribución de elementos por mapeo de rayos X, se puede concluir que los elementos presentes en los licores de lixiviación fueron efectivamente absorbidos en las partículas de diatomita.

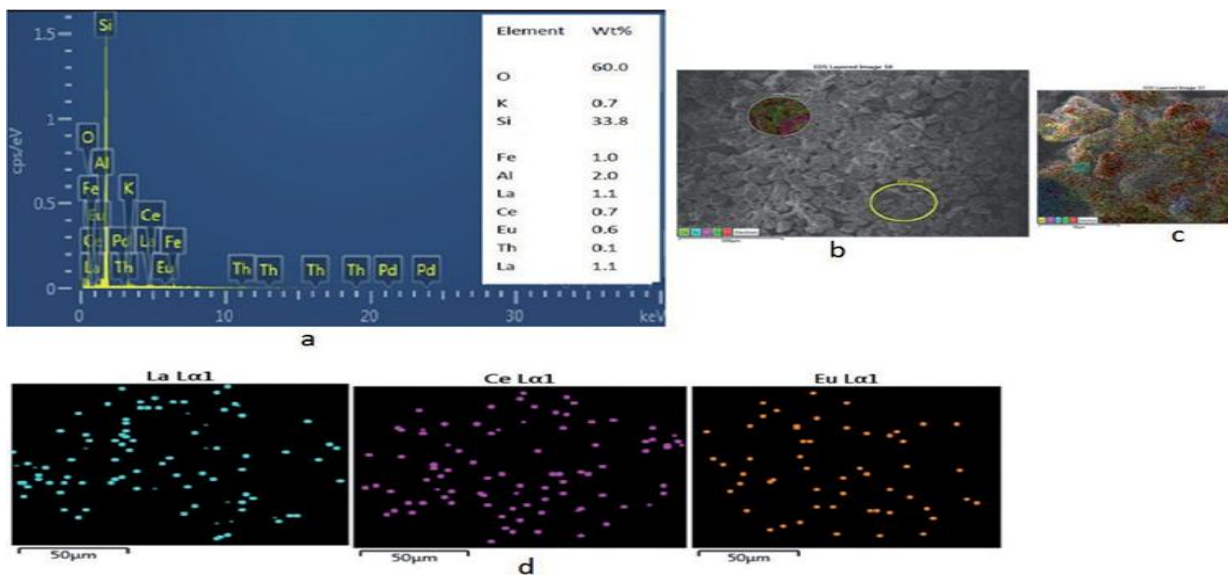


Figura 36 Micrografía de la diatomita malla -400, a) microanálisis SEM-EDS; b y c) imagen general, SEM-SE; Y d) mappins.

Tabla 16 Capacidad de intercambio catiónico (CIC), por elemento, del mineral utilizado para la eliminación de metales preciosos, metales pesados y elementos de tierras raras.

ELEMENTO	FOSFORITA % DE CIC	DIATOMITA % DE CIC
Au	100	100
Ce	99.95	99.996
La	99.97	99.99
Nd	99.96	99.99
Pd	100	100
Yb	99.99	99.99
Ge	100	100
Gd	99.43	97.86
Tb	100	100
Sm	100	100
Er	100	100
Eu	100	99.14
Pt	100	100

## CONCLUSIONES

1. Las muestras caracterizadas por ICP, correspondientes a la fosforita, presentan una concentración de Calcio por arriba del 63% lo que es deseable para muchas de sus aplicaciones industriales como lo son las alimentarias, farmacéutica, fertilizantes, etc.
2. Las especies minerales identificadas por Difracción de rayos - X son óxido de lantano, y fosfato cálcico; sin embargo, el Óxido de Lantano fue muy llamativo al hacer este análisis y haber encontrado esta especie.
3. Las variaciones en la composición química obtenida por las distintas técnicas de caracterización, se deben principalmente a la exactitud de los equipos y la manera en que estos interactúan con la muestra para realizar la medición.
4. Los elementos encontrados por el análisis microscopia electrónica de barrido (MEB) y de espectroscopia de energía dispersa de rayos – X a la diatomita fueron muy atractivos para los posibles usos que se le pueden dar sobre todo en el caso del calcio, titanio y el magnesio, que como vio con anterioridad en la sección de resultados, estos elementos presentaron gran concentración en el mineral.
5. En el análisis a la diatomita por microscopia electrónica de barrido (MEB) y de espectroscopia de energía dispersa de rayos – X, el titanio que se presentó tiene un interés muy ambicioso para las aplicaciones que puede tener este elemento en las industrias, como las aleaciones para uso de tecnologías en las prótesis que es donde se ve la mayor aplicación de este material.
6. Por otro lado los resultados obtenidos respecto al magnesio en el análisis a la diatomita por microscopia electrónica de barrido (MEB) y de espectroscopia de energía dispersa de rayos – X, resultó con una concentración en el mineral de gran importancia para posibles aplicaciones en aleaciones, medicamentos, suplementos alimenticios, fertilizantes, alimentos para animales etc.
7. Para el calcio obtenido en el análisis a la diatomita por microscopia electrónica de barrido (MEB) y de espectroscopia de energía dispersa de rayos – X, tuvo un potencial significativo para

poder ser beneficiado del mineral para usos en la industria farmacéutica, suplemento alimenticio, fertilizantes, alimento para ganado etc.

8.- Los resultados preliminares en el intercambio catiónico de metales pesados, metales preciosos y tierras raras, a través del uso de minerales porosos no metálicos, muestran una buena eficiencia, ya que en la mayoría de los casos se obtuvieron recuperaciones superiores al 99%, excepto para algunos elementos. en el caso de la fosforita, el valor más bajo fue para el Gd con una eficiencia del 99.43%; y en el caso de la diatomita, el Gd presentó una eficiencia del 97.86% en el intercambio (**Tabla 16**). Por lo tanto, se puede concluir que estos absorbentes naturales pueden ser utilizados con alta eficiencia para el intercambio de estos metales, destacando también que, en la mayoría de los casos, el Gd presentó recuperaciones superiores al 90% y para el caso de los metales preciosos, fue superior al 99% para todos los minerales utilizados. (Hernandez-Avila, 2019).

## BIBLIOGRAFIA

- Battarbee RW, J. V. (2001). *Diatoms. In: Tracking environmental change using lake sediments Vol 3: Terrestrial, algal and siliceous indicators.* eds Smol JP, Birks HJB, Last W. Recuperado el 2024
- Chacón-Baca E, B.-C. H.-F. (2002). *70 Ma nonmarine diatoms from northern Mexico.* Recuperado el 2024
- Chavez, F. N. (Septiembre de 2018). *Scribd.* Recuperado el 2024, de Scribd:  
<https://es.scribd.com/document/423825014/CURSO-YACIMIENTOS-NO-METALICOS>
- DIGMAN, R. &. (1963). Late Pleistocene diatoms from the arica area Chile, CIT. (78), 69-72. Recuperado el 2024
- Dirección General de Desarrollo Minero. (2018). *Perfil de Mercado de la Fosforita.* Recuperado el 2024, de Perfil de Mercado de la Fosforita:  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/419270/Perfil\\_Fosforita\\_2018\\_\\_T\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/419270/Perfil_Fosforita_2018__T_.pdf)
- F, H. (1930). *Bacillariophyta (Diatomeae).* Recuperado el 2024
- Formulación química.* (s.f.). Recuperado el 2024, de Formulación química:  
<https://www.formulacionquimica.com/La2O3/>
- Frederic, K. L. (1975). *Diatome.* Industrial Minerals & Rocks. Recuperado el 2024
- Garrido Hernández, M. (s.f.). *"Modelo tridimensional geológico estructural de la mina La Negra de Fosforita de México s. a., en el municipio de Pacula, Hidalgo". 2013, (Tesis de grado Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México.* Recuperado de  
<https://repositorio.unam.mx/contenidos/233747>. Recuperado el 2024, de  
[https://repositorio.unam.mx/contenidos/modelo-tridimensional-geologico-estructural-de-la-mina-la-negra-de-fosforita-de-mexico-s-a-en-el-municipio-de-pacula-hid-233747?c=LjPMlj&d=true&q=:\\*&i=11&v=1&t=search\\_0&as=0](https://repositorio.unam.mx/contenidos/modelo-tridimensional-geologico-estructural-de-la-mina-la-negra-de-fosforita-de-mexico-s-a-en-el-municipio-de-pacula-hid-233747?c=LjPMlj&d=true&q=:*&i=11&v=1&t=search_0&as=0)
- Geologyscience. (2023). *Geologyscience.* (Diatomita, Productor) Recuperado el 2024, de Geologyscience:  
<https://es.geologyscience.com/rocks/sedimentary-rocks/non-clastic-sedimentary-rock/diatomite/>
- Goren, R. B. (2002). *Scandinavian journal of metallurgy.* Recuperado el 2024
- Grupo Fosfatos. (s.f.). *Grupo Fosfatos Agrominerales.* Recuperado el 2024, de Grupo Fosfatos Agrominerales: <http://fosfatos.gl.fcen.uba.ar/index.php/generalidades/usos-e-importancia/>
- Gutiérrez, I. M. (2013). *YACIMIENTOS DE FOSFATOS: ORIGEN, UBICACIONES, APLICACIONES DE LOS DERIVADOS DE FOSFATOS Y DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO, 2013. (Tesis de grado licenciatura, UNIVERSIDAD DE CANTABRIA).* Repositorio Digital. Obtenido de  
<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/10902/3722/1/IMG.pdf>
- Harben, P. W. (2002). *The Industrial Minerals HandyBook 4th Edit.* (P. M. Holmes, Ed.) Recuperado el 2024

- Harwood DM, G. R. (1990). 26. *LOWER CRETACEOUS DIATOMS FROM ODP LEG 113 SITE 693 (WEDDELL SEA). PART 2*. Recuperado el 2024
- Hernandez-Avila, J. S.-M.-R.-S.-V.-A.-L. (2019). *Use of Porous no Metallic Minerals to Remove Heavy Metals, Precious Metals and Rare Earths, by Cationic Exchange*. Recuperado el 2024, de <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=NJYtEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA203&dq=Use+of+Porous+no+Metallic+Minerals+to+Remove+Heavy+Metals,+Precious+Metals+and+Rare+Earths,+by+Cationic+Exchange&ots=N3-iVhV5JC&sig=Gg4LRR7vfCW70l76xKZRIJnMxE#v=onepage&q=Use%20of>
- Huerta, D. (2010). *Diatomita, que es y cuales son sus principales usos*. Recuperado el 2024, de Diatomita, que es y cuales son sus principales usos: <https://davidhuerta.typepad.com/blog/2010/10/diatomita-que-es-y-cuales-son-sus-principales-usos.html>
- International Plant Nutrition Institute (IPNI). (s.f.). *Roca fosfórica*. Recuperado el 2024, de Roca fosfórica: [http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/87987AB4CE177BBC85257BBA0059D2C2/\\$FILE/NSS-ES-19.pdf](http://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/87987AB4CE177BBC85257BBA0059D2C2/$FILE/NSS-ES-19.pdf)
- INTERTEK TOTAL QUALITY ASSURED. (s.f.). *Intertek Total Quality Assured*. Recuperado el 2024, de Intertek Total Quality Assured: <https://www.intertek.es/quimicos/analisis-icp/>
- James Dwight Dana, E. S. (1997). *Dana's New Mineralogy* (8 th ed.). Wiley-Interscience; Edición Subsequent. Recuperado el 2024
- JC, K. (2003). *Araphid and monoraphid diatoms*. In: *Freshwater Algae of North America*. Wehr JD, Sheath RG. Recuperado el 2024
- Krammer K, L.-B. H. (1991). *Süsswasserflora von Mitteleuropa. Bacillariophyceae 2/3. Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae*. Recuperado el 2024
- L. L. Bahls, E. E. (1984). *Ecology and Distribution of major diatom ecotypes in the Southern fort union coal, Region of Montana*. U.S, Geol. Recuperado el 2024
- Medlin, L. K. (1997). *Is the origin of diatoms related to the end-Permian mass extinction?*. Recuperado el 2024
- Minerales, T. P. (2015). *Prezi*. Recuperado el 2024, de Prezi: <https://prezi.com/pn3k6bx75fex/trabajo-practico-sobre-minerales/>
- Piedras, R. y. (2012). *Slideshare*. Recuperado el 2024, de Slideshare: <https://es.slideshare.net/villasevil/fosforita-piedras-rocas-mineralesn7>
- QuimiNet. (2006). *QuimiNet*. Recuperado el 2024, de QuimiNet: <https://www.quiminet.com/articulos/tipos-de-abonos-fosfatados-potasicos-y-compuestos-2560584.htm>
- R, S. (1979). *The diatom system: Ideas on phylogeny*. Recuperado el 2024

- RIVERA R., P. (1968). *Sinopsis de las diatomeas de la Bahía de concepción, Chile*. Guyana. Recuperado el 2024
- Round FE, C. R. (1990). *The diatoms: biology & morphology of the genera.*, Cambridge University Press. Recuperado el 2024
- Spalletti, L. A. (s.f.). *Academia*. Recuperado el 2024, de Academia:  
[https://www.academia.edu/30057964/ROCAS\\_FOSF%C3%81TICAS\\_ROCAS\\_FOSF%C3%81TICAS\\_FOSFORITAS\\_FOSFORITAS](https://www.academia.edu/30057964/ROCAS_FOSF%C3%81TICAS_ROCAS_FOSF%C3%81TICAS_FOSFORITAS_FOSFORITAS)
- Stoermer EF, J. M. (2003). *Centric Diatoms*. In: *Freshwater Algae of North America*. eds Wehr JD, Sheath RG. Recuperado el 2024
- Stoermer EF, S. J. (1999). *Applications and uses of diatoms: prologue*. *The diatoms: applications for the environmental and earth sciences*. Recuperado el 2024
- Subsecretaría de Minería. (2017). *Perfil de Mercado de la Diatomita*. Recuperado el 2024, de Perfil de Mercado de la Diatomita:  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/287797/Perfil\\_Diatomita\\_2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/287797/Perfil_Diatomita_2017.pdf)
- Trappe, J. (1998). *Phanerozoic Phosphorite Depositional Systems: A Dynamic Model for a Sedimentary Resource System*. Recuperado el 2024