

**Identificación, caracterización y agregación de valor de la diatomita
presente en la Formación Tilatá en el municipio de Tuta-Boyacá, para
su aplicación en el campo de la nanotecnología**

Autores:

Mateo Alexandro Bermudez C.

María Camila Cárdenas A.

Directora:

Diana Cristina Ortega Pérez

EAFIT

Escuela de Ciencias

Departamento de Ciencias de la Tierra

Pregrado de Geología

Medellín, Colombia

23 de noviembre del 2021

TABLA DE CONTENIDO

1. Introducción.....	9
2. Hipótesis.....	10
3. Objetivos	11
3.1 Objetivo general	11
3.2 Objetivos específicos	11
4. Metodología.....	11
5. Estado del arte	13
5.1 Génesis y ambientes de formación de la diatomita	13
5.1.2 Condiciones de deposición.....	16
5.1.3 Asociación química y mineralógica de la diatomita	16
5.2 Mercado de la diatomita	17
5.2.1 Panorama mundial del mercado de diatomita	17
5.2.2 Mercado americano.....	19
5.2.3 Mercado nacional	20
5.3 Usos y aplicaciones industriales de la diatomita	22
6. Resultados	24
6.1 Áreas de interés para la diatomita en Colombia.....	24
6.2 Caracterización geologica del municipio de Tuta-Boyacá	25
6.2.1 Localización.....	25
6.2.2 Geología regional	26
6.2.2.1 Marco tectónico	26
6.2.2.2 Estratigrafía	28
6.2.3 Geología local	30

6.2.3.1 Municipio de Tuta	30
6.2.4 Hipótesis de formación geológica de la diatomita presente en el municipio de Tuta-Boyacá	33
6.3 Caracterización de la diatomita (DB01) de la formación Tilatá en el municipio de Tuta	37
6.3.1 Preparación de la muestra DB01	38
6.4 Resultados de las propiedades físicas	42
6.4.1 Análisis de densidad bulk	42
6.4.2 Análisis de densidad específica	43
6.4.3 Análisis de tamaño de partículas por difracción laser (DTP) y área superficial específica (ASE).....	44
6.4.4 Análisis por microscopia de barrido electrónico (SEM) y espectroscopia de energía dispersiva (EDX)	45
6.5 Resultados de análisis químicos	48
6.5.1 Análisis por espectrometría de fluorescencia de rayos X (FRX)	48
6.5.2 Análisis de conductividad eléctrica	49
6.5.3 Análisis de pH	51
6.6 Resultados de análisis mineralógicos	52
6.6.1 Análisis de difracción de rayos X (DRX).....	52
7. Diatomita para su uso como biomineral en la nanotecnología	55
8. Propuesta de una posible ruta de agregación de valor para la diatomita de estudio (Muestra DB01)	60
9. Discusión.....	62
10. Conclusión.....	65
11. Recomendaciones para trabajos futuros	65

12. BIBLIOGRAFÍA67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fotografías SEM porosidad nanométrica de la diatomita..... 13

Figura 2. Ambientes más prolíferos para las algas diatomeas: ambiente marino y ambiente continental lacustre..... 14

Figura 3. Mayores productores mundiales de Diatomita 17

Figura 4. Exportadores de diatomita en Colombia20

Figura 5. Importadores de diatomita en Colombia21

Figura 6. Mapa de depósitos de diatomita en los departamentos de Boyacá, Valle del Cauca y Cundinamarca25

Figura 7. Marco estructural y principales lineamientos del área de estudio27

Figura 8. Mapa Geológico de Tuta-Boyacá, escala 1:5.000..... 30

Figura 9. Columna estratigráfica de diatomitas, municipio de Tuta32

Figura 10. Localización del Volcán de Paipa, ubicado en la mitad de la Cordillera Oriental..... 34

Figura 11. Vista panorámica del edificio piroclástico erosionado del volcán Paipa (primer plano). Rocas más antiguas del Cretácico aparecen en el fondo y alrededor del volcán 35

Figura 12. Representación de la relación de las variables intrínsecas en función del parámetro de desempeño. 37

Figura 13. Flujograma de trabajo para la preparación de la Muestra DB0139

Figura 14. Muestra DB01. 40

Figura 15. Muestra DB-01: tamizado..... 41

Figura 16. Retenidos sobre malla de la Muestra DB01..... 41

Figura 17. Muestra DB-01: prueba de densidad bulk..... 42

<i>Figura 18. Muestra DB-01: prueba de densidad específica</i>	<i>43</i>
<i>Figura 19. Distribución de tamaño de partícula en la Muestra DB01</i>	<i>44</i>
<i>Figura 20. Especies de diatomeas fósiles identificadas en la Muestra DB01.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 21. Imágenes SEM de la especie Aulacoseira granulata en la Muestra DB01....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 22. Análisis químico elemental de la Muestra DB01</i>	<i>48</i>
<i>Figura 23. Muestra DB-01: prueba de conductividad eléctrica.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 24. Muestra DB-01: prueba de potencial de hidrógeno.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 25. Análisis mineralógico en la Muestra DB01</i>	<i>52</i>
<i>Figura 26. Niveles de alistamiento tecnológico</i>	<i>55</i>
<i>Figura 27. Esquema de funcionalización de las frústulas de diatomita con ARNip rotulado</i>	<i>59</i>
<i>Figura 28. Flujograma de la ruta de preparación de diatomita con tratamiento en ácido caliente.....</i>	<i>61</i>

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Tabla comparativa entre depósitos marinos y continentales</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 2. Estadísticas de la diatomita en los Estados Unidos</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 3. Producción mundial de la diatomita.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 4. Exportación nacional de Diatomita.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 5. Importación nacional de Diatomita.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 6. Usos industriales de las tierras diatomáceas</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 7. Resumen estratigráfico generalizada para el departamento de Boyacá, escala 1:25.000.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 8. Resumen de unidades de erupción registradas del volcán de Paipa.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 9. Técnicas de caracterización mineral y propiedades específicas a evaluar en el proyecto</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 10. Resultados de mediciones: densidad bulk</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 11. Resultados de mediciones: densidad específica</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 12. Tamaño de partículas con difracción láser</i>	<i>45</i>
<i>Tabla 13. Composición química de la Muestra DB01.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 14. Resultados de mediciones: conductividad eléctrica</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 15. Resultados de mediciones: potencial de hidrógeno</i>	<i>51</i>
<i>Tabla 16. Resultados de la caracterización mineral de la Muestra DB01</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 17. Aplicaciones en el campo de la nanotecnología.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 18. Composición química de las frústulas antes y después de los tratamientos de purificación</i>	<i>62</i>

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Tabla comparativa de depósitos de diatomita para los departamentos de Boyacá, Cundinamarca y Valle del Cauca.

Anexo B. Mapa geológico de los depósitos del municipio de Tuta, escala 1:5.000.

Anexo C. Artículo de referencia. “Diatomite biosilica nanocarriers for siRNA transport inside cancer cells” de Rea et al. (2014).

Anexo D. Columna litoestratigráfica de la Formación Tilatá, escala 1:500.

RESUMEN

La diatomita es una roca sedimentaria formada por la deposición de microscópicos esqueletos opalinos de algas diatomeas denominados “frústulas”. Este biomaterial, cuenta con características muy interesantes, como lo son la capacidad de absorción, elevada porosidad, alta área superficial, química inerte, amplia disponibilidad en diferentes áreas del mundo, entre otras. Por esta razón, ha sido usada en múltiples aplicaciones industriales (Dirección General de Desarrollo Minero, 2017), sin embargo, este mineral no se ha explotado lo suficiente en el campo de la nanotecnología y en Colombia, actualmente no existen estudios de caracterización relacionados a aplicaciones nanotecnológicas. Por consiguiente, este proyecto buscó identificar departamentos con depósitos de diatomita en Colombia, con el fin de establecer para uno de ellos una hipótesis de formación geológica y caracterizar una muestra seleccionada, para así evaluar de manera teórica su posible viabilidad técnica de uso como nanoportador en la administración de fármacos, para el transporte de ácido ribonucleico pequeño de interferencia (ARNip) en células cancerosas, y en función de esto, generar una propuesta de ruta de agregación de valor para este material.

Para establecer una apropiada ruta de caracterización de la muestra seleccionada, se recurrió a analizar sus propiedades físicas, químicas y mineralógicas por medio de análisis de: densidad bulk y específica, conductividad eléctrica, potencial de hidrogeno, espectrometría de fluorescencia de rayos X, microscopia electrónica de barrido (SEM-EDX), tamaño de partículas con difracción láser, área superficial específica y difracción de rayos X, con el fin de obtener una línea base de sus características sin ningún tipo de procesamiento y permitir la comparación de sus propiedades con el ejemplar usado en la aplicación de referencia.

Los experimentos de laboratorio arrojaron que el tamaño de poro y de partícula, cumplen con los estándares mencionados en el uso de referencia, los resultados de densidad bulk y densidad específica confirman una elevada porosidad, además de que la composición química de la muestra de estudio posee contaminantes en porcentajes similares a los mencionados en el artículo referente, por lo que al comparar los resultados, se prevé que

los procesos de agregación de valor propuestos nos permitirán avalar la muestra de estudio para un posible desarrollo en el uso seleccionado.

Nuestros estudios de caracterización, vigilancia tecnológica y de mercado nos permitieron detectar las tendencias del avance de este material geológico a nivel científico y tecnológico, abordando el desarrollo de un producto nanotecnológico que permitirá generar las bases para un futuro proyecto que valide en la práctica el potencial identificado en el informe actual.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los recursos minerales representan unos de los principales ejes de desarrollo económico mundial y regional, gracias a que permiten satisfacer necesidades particulares y de subsistencia, además de contribuir en el bienestar y la comodidad de las personas (Prieto et al., 2019).

Uno de los recursos minerales industriales de más alto interés es la diatomita, la cual corresponde a una roca sedimentaria de alto contenido silíceo amorfo, formada principalmente por la deposición de los esqueletos opalinos microscópicos de algas llamadas diatomeas, en ambientes marinos y lacustres (Dirección General de Desarrollo Minero, 2017). Estos esqueletos muestran una gran cantidad de poros nanométricos, los cuales son espacios dispuestos y ordenados dentro de la roca, de tal forma que son los responsables de la alta porosidad de la diatomita (Price y Walsh, 2005).

Los depósitos de diatomita pueden representar diferentes usos potenciales, en función de las características dadas por su ambiente de formación; según los usos definidos en la literatura pueden resultar de interés para empresas nacionales empleadoras de diatomita en los productos o procesos filtrantes, de relleno y aislante, entre otros (Monsalva et al., 2010). Por otra parte, se observa un creciente desarrollo de técnicas analíticas asociadas a la caracterización de materias primas minerales cada vez de menor tamaño, lo cual ha llevado a verdaderos avances en la nanociencia y sus posibles aplicaciones directas en los procesos tecnológicos como la nanotecnología (Bozarth et al., 2009). Además, si se logra entender las interacciones y los procesos de formación en

estos sistemas que producen vidrio en entes biológicos, será posible entender más fácilmente la síntesis de nuevos y sofisticados materiales nanoestructurados, con aplicaciones en una gran gama de áreas que van desde la nanotecnología (semiconductores híbridos, celdas solares y materiales cerámicos de alto rendimiento) hasta la biología y biomedicina (biomateriales y estructuras liberadoras de drogas) (Heredia, 2013).

En Colombia, actualmente, se tiene conocimiento de la existencia de este material en los departamentos de Valle del Cauca, Cundinamarca y Boyacá (Naranjo-Merchán et al. 2007). Sin embargo, no existen estudios detallados disponibles sobre la caracterización y/o potencial de uso de estos depósitos de diatomita, y los pocos que existen, generalmente, son realizados por compañías privadas, por lo tanto, no es información de dominio público.

Dado el contexto anterior, mediante la identificación teórica de áreas asociadas a la ocurrencia de depósitos de diatomita en Colombia, este proyecto pretende seleccionar una localidad para la caracterización de las propiedades intrínsecas de una muestra seleccionada, con el objetivo de proponer una ruta de agregación de valor que permita definir de manera preliminar el potencial para ser usado como biomaterial en el campo de la nanotecnología, específicamente en la administración de fármacos.

2. HIPÓTESIS

En Colombia existen depósitos de diatomita que cumplen con las propiedades fisicoquímicas y mineralógicas necesarias para su uso potencial en el campo de la nanotecnología, una vez sean sometidas a diferentes procesos tecnológicos para transformar sus propiedades originales y así convertirse en productos de valor agregado.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Identificar de manera teórica depósitos de diatomita en Colombia para determinar preliminarmente el potencial uso en el campo de la nanotecnología de una muestra seleccionada, mediante estrategias de agregación de valor.

3.2 Objetivos específicos

1. Mapear las zonas con depósitos de Diatomita en Colombia y establecer la hipótesis de formación geológica de un depósito seleccionado según sus características intrínsecas y antecedentes bibliográficos.
2. Establecer un estado del arte de las aplicaciones de la diatomita en el campo de la nanotecnología.
3. Caracterizar la muestra de estudio asociada a la zona seleccionada, mediante una ruta metodológica propuesta y evaluar los resultados de laboratorio obtenidos de acuerdo con los criterios de la aplicación seleccionada.
4. Proponer una ruta teórica de agregación de valor sostenible para el uso definido, en función de los resultados de laboratorio para la muestra seleccionada y el estado del arte asociado a estos materiales geológicos.

4. METODOLOGÍA

Para el logro del primer objetivo específico se propone la siguiente metodología:

1. Realizar una búsqueda de información de los principales municipios con depósitos de diatomita en Colombia, a través de antecedentes bibliográficos y estudios geológico-mineros.
2. Realizar una búsqueda de los títulos mineros de diatomita actualmente vigentes en el territorio colombiano, según el Catastro Minero.
3. Realizar un mapa mediante el uso de ArcGis para los departamentos con presencia de diatomita en Colombia.

4. Establecer una hipótesis de la formación geológica de la diatomita presente en el municipio seleccionado.

Para el logro del segundo objetivo específico se propone la siguiente metodología:

1. Realizar una referenciación con base a artículos científicos, con el fin de determinar el nivel de madurez tecnológica (TRL) para cada una de las aplicaciones de la diatomita en el campo de la nanotecnología.
2. Realizar un cuadro sintético de las aplicaciones de la diatomita en el campo de la nanotecnología y una discusión técnica relacionada al uso recomendado para este caso en específico.

Para el logro del tercer objetivo específico se propone la siguiente metodología:

1. Adquirir una muestra de diatomita asociada a la industria minera del depósito seleccionado.
2. Establecer la ruta de caracterización y determinar las propiedades químicas (composición química por óxidos, pH y conductividad), físicas (tamaños de partículas, tamaños de poros, morfología, área superficial específica y densidad) y mineralógicas (identificación cualitativa y semi cuantitativa de las fases cristalinas presentes), de la muestra de estudio, mediante métodos de laboratorio reportados en la literatura y aplicados en los laboratorios de EAFIT y CECOLTEC S.A.S. Adicionalmente se incluirán criterios como los establecidos por Miguel Ipohorski y Patricia B. Bozzano en el informe “Microscopía Electrónica de Barrido en la caracterización de materiales” (2013), entre otros.
3. Interpretar los resultados obtenidos y definir las propiedades de desempeño que se determinarán para establecer un posible potencial en alguno de los campos de la nanotecnología.

Para el logro del cuarto objetivo específico se propone la siguiente metodología:

1. Referenciar en la literatura las principales estrategias de agregación de valor para este mineral, de acuerdo con la aplicación seleccionada.

2. Analizar y documentar las propuestas teóricas de agregación de valor para la muestra seleccionada, teniendo en cuenta las definiciones estándar a nivel mundial sobre el producto final donde será usado el mineral y los resultados de laboratorio obtenidos, todo esto analizado bajo un contexto de impacto en términos de solución sostenible y sobre los ODS's.

5. ESTADO DEL ARTE

5.1 Génesis y ambientes de formación de la diatomita

La diatomita es una roca de origen sedimentario, caracterizada por la acumulación de esqueletos fósiles de algas diatomeas (Figura 1), donde cada una de estas algas consiste en una pequeña partícula de protoplasma dentro de un esqueleto silicatado, y estas algas al ser organismos en suspensión, cuando su vida llega a su fin, se sumergen hasta el fondo del cuerpo de agua, donde sus partes orgánicas se descomponen dejando un esqueleto silíceo el cual se sedimenta (Instituto Geológico y Minero de España, 1976).

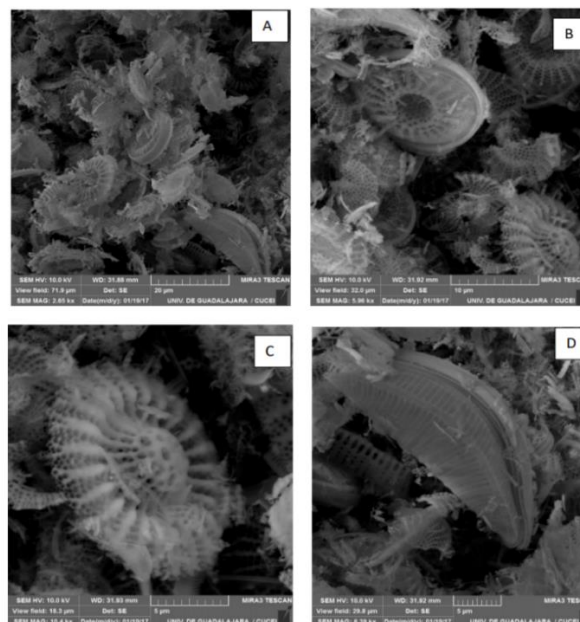


Figura 1. Fotografías SEM porosidad nanométrica de la diatomita. A) Vista a 20µm, B) Vista a 10µm, C) y D) Vistas a 5 µm (García et al., 2007).

La diatomita puede formarse en dos tipos de ambientes: ambiente continental y ambiente marino. En el ambiente continental, aunque están presentes los depósitos de origen

fluvial, los yacimientos más importantes en este medio son principalmente de origen lacustre, donde estos depósitos de algas diatomeas se encuentran presentes en espacios geográficos volcánicos asociados a eventos que en la historia geológica dieron lugar a cuencas de drenaje carentes de sedimentos, mientras que los entornos marinos abarcan desde las profundidades de los océanos hasta la plataforma continental y debido a que las condiciones necesarias para la preservación de estas algas son la cercanía a la costa, necesidad de luz y aporte nutrientes, estos restringen ambientes viables a los primeros 100 a 200 m (Figura 2) (Barrón,1987).

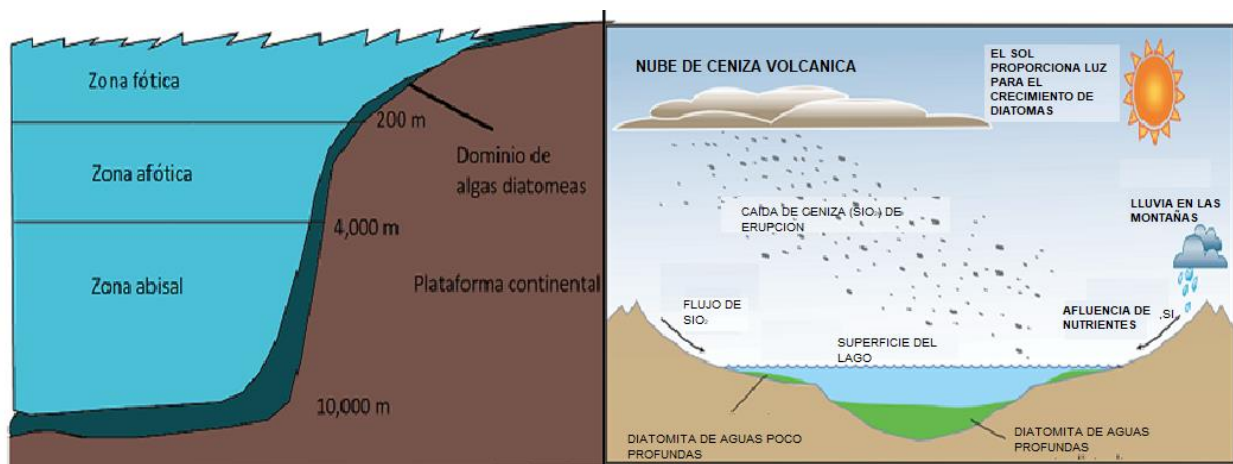


Figura 2. Ambientes más prolíferos para las algas diatomeas: ambiente marino y ambiente continental lacustre (U.S. Geological Survey, 2006).

Los depósitos marinos fueron comúnmente depositados a lo largo de los márgenes continentales con cuencas y plataformas costeras sumergidas, donde las corrientes limítrofes que fueron impulsadas por el viento proporcionaron condiciones ricas en nutrientes al afloramiento dando lugar a un hábitat estable para las algas diatomeas, mediante condiciones estables de temperatura, salinidad, pH, nutrientes y corrientes de agua; mientras que los hábitats lacustres están caracterizados por variaciones significativas en las condiciones mencionadas (Moyle y Dolley, 2003). Diferentes especies de algas diatomeas se desarrollan en aguas fluviales, marinas y lacustres, aunque muy pocas especies son comunes en los tres medios (García et al., 2013).

La tabla 1, presenta un análisis comparativo tomada de Moyle y Dolley (2003) donde se relaciona a las algas diatomeas, sus hábitats y los factores que afectan la formación de depósitos de diatomitas marinas y continentales lacustres:

FACTOR	DEPÓSITOS MARINOS	DEPÓSITOS CONTINENTALES -LACUSTRES
Hábitat	Principalmente formas planctónicas, con menos formas bentónicas; las formas bentónicas son raras en los sedimentos de aguas profundas.	Formas planctónicas y bentónicas en los lagos, pero planctónicas dominantes. Formas bentónicas dominantes en arroyos y suelos.
	Un total de 20.000 taxones marinos y continentales en todo el mundo. Se estima que hay 1.000 especies comunes de agua dulce; entre el 10 y el 30% de las especies lacustres son endémicas.	
	Principalmente márgenes continentales con ciclo de afloramiento, corrientes ricas en nutrientes y corrientes superficiales que dispersan el agua carente de nutrientes en los 100-200 m superiores; también plancton de aguas profundas.	Principalmente pequeños sistemas lacustres asociados a con el vulcanismo que embalsa los sistemas fluviales para formar lagos; requieren un suministro continuo de agua dulce rica en nutrientes y sílice en lagos de baja alcalinidad. También se dan en sistemas fluviales lentos, estanques, pantanos y suelos.
	Estenohalina.	Eurihalina; no excesivamente alcalina.
	Temperatura estable, salinidad, pH, nutrientes, y corrientes de agua.	Amplia variación de la temperatura, la salinidad, el pH nutrientes y corrientes de agua.
Entorno deposicional	Alta productividad de diatomeas; larga duración; mínima dilución clástica y biogénica; la columna de agua permite que las diatomeas lleguen al fondo.	Alta productividad de diatomeas; larga duración, pero más corta que la marina; mínima dilución clástica y dilución biogénica; vulcanismo periódico.
Dilución	La dilución por sedimentos terrígenos cerca de los márgenes continentales o por formas biogénicas como los radiolarios durante la deposición.	Dilución por introducción de exceso de sedimentos clásticos y cenizas volcánicas en las cuencas.
Diagénesis y conservación	La limitada cobertura de sedimentos marinos compacta y elimina el agua, y la lixiviación elimina el exceso de materia orgánica, aumentando así la calidad. El exceso de compactación puede aplastar frústulas y un enterramiento más profundo (>600 m, >50°C) puede recrystalizar la sílice.	Los sedimentos clásticos limitados o la cubierta volcánica compacta eliminan el agua, y la lixiviación elimina el exceso de materia orgánica, lo que aumenta la calidad. El exceso de compactación puede aplastar las frústulas y un enterramiento más profundo (>600 m, >50°C) puede recrystalizar la sílice.
	La conservación se debe principalmente a la sílice en frústulas. Además, la cobertura de sedimentos marinos más jóvenes protege el depósito de diatomeas cuando se eleva y se expone a la intemperie y la erosión.	La conservación se debe principalmente a la sílice de las frústulas. Además, la cobertura por sedimentos terrígenos o flujos volcánicos protegen el depósito de diatomita de la meteorización y la erosión.
Periodo de tiempo geológico	Del Cretáceo temprano al Holoceno.	Del Eoceno al Holoceno.
Período óptimo de deposición	Mioceno.	Mioceno, especialmente el Mioceno medio.

Tabla 1. Comparativa entre depósitos marinos y continentales (Moyle y Dolley 2003).

5.1.2 Condiciones de deposición

Los ambientes de acumulación son los que permiten la deposición de esqueletos opalinos que controlan la contaminación o la degradación del yacimiento. Aunque los yacimientos marinos suelen ser de mayor calidad y contienen mayores recursos debido a su mayor extensión y grosor, la mayoría de las diatomitas conocidas en el mundo son de origen lacustre (Moyle y Dolley, 2003). Por consiguiente, para su crecimiento y sedimentación se incluyen como mínimo estas cinco condiciones:

- Grandes cuencas de escasa profundidad (35 m).
- Abundante aporte de sílice soluble.
- Abundante aporte de elementos nutritivos (fosfatos y nitratos).
- Ausencia de constituyentes tóxicos o inhibidores de su crecimiento en el agua.
- Un aporte mínimo de materiales clásticos sedimentarios.

Después de la deposición, consolidación, diferentes eventos tectónicos y la erosión parcial, es configurada la forma del yacimiento (Instituto geológico y minero de España, 1976).

5.1.3 Asociación química y mineralógica de la diatomita

La diatomita regularmente posee en su estructura elementos mayores (>1%) como el SiO_2 , que a menudo se presenta como el más abundante, generalmente seguido del Al_2O_3 , Fe_2O_3 y K_2O . Así mismo, un componente de elementos menores (entre 0,1 y 1%) tales como: TiO_2 , MgO , Na_2O y CaO , y elementos traza (<0,1%) tales como: P, S, Ni, Zn, Cu, Sr y Bi (Naranjo-Merchán et al. 2007).

Estas se encuentran comúnmente asociadas a minerales como: micas, cuarzo, feldspatos, calcita y minerales arcillosos (Naranjo-Merchán et al. 2007).

5.2 Mercado de la diatomita

5.2.1 Panorama mundial del mercado de diatomita

Hasta el 2018, Estados Unidos, China y Argentina concentraron la mayor parte de la producción de diatomita a nivel mundial, siendo Estados Unidos el mayor productor; y se prevé que continúe esta tendencia en los próximos años. Este representó el 35% de la producción global en 2018, seguidas de China (21%) y Argentina (10%) como se puede visualizar en la figura 3.

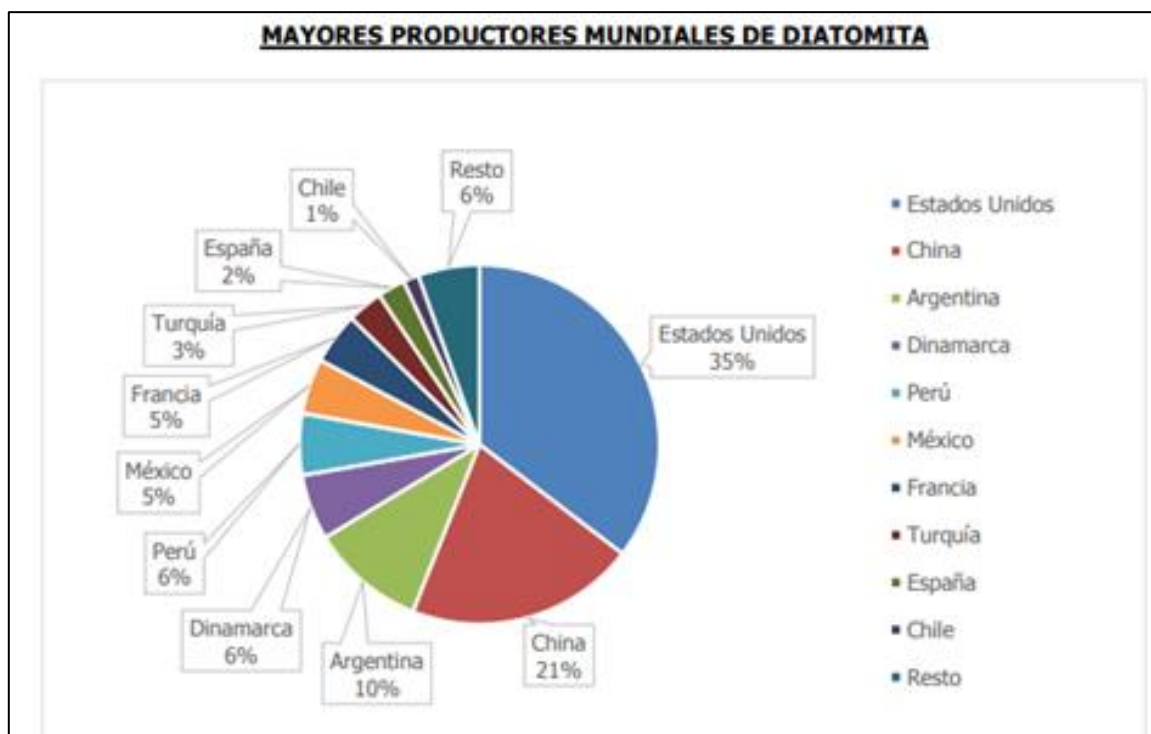


Figura 3. Mayores productores mundiales de Diatomita (Instituto Geológico y Minero de España, 2018).

Siendo Estados Unidos el mayor referente a nivel mundial, en 2020 su producción de diatomita se estimó en 770.000 toneladas con un valor procesado estimado de 260 millones de dólares. Aproximadamente el 60% de la diatomita se utiliza en productos de filtración. El 40% restante se utiliza en absorbentes, rellenos, agregados ligeros y otras aplicaciones. Una pequeña cantidad, menos del 1%, se utiliza para fines farmacéuticos y

biomédicos especializado, como la extracción de ácido desoxirribonucleico (ADN) (U.S. Geological Survey, 2021).

En la tabla 2 se presentan las estadísticas de diatomita en los Estados Unidos desde el 2016 al 2020 (International Organizing Committee for the World Mining Congresses, 2020).

Estadísticas de la Diatomita en los Estados Unidos					
2016-2020					
(Miles de toneladas)					
	2016	2017	2018	2019	2020
Producción	686	768	957	768	770
Importaciones	8	9	9	10	16
Exportaciones	66	87	68	68	67
Consumo Aparente	628	690	898	710	720
Precio (promedio, dólares por tonelada, f.o.b. planta)	280	360	370	370	370

Tabla 2. Estadísticas de la diatomita en los Estados Unidos (Mineral Commodity Summaries, 2021).

La tabla 3 presenta los datos de producción mundial de este material por países desde el 2014 al 2018, además de evidenciar el aumento o disminución de la producción de los principales países productores de diatomita, permitiendo entender estadísticamente su progreso en mercado internacional (World Mining Data, 2020).

Producción mundial de diatomita					
Pais	2014	2015	2016	2017	2018
	m . t	m . t	m . t	m . t	m . t
Algeria	2 426	2 360	2 535	2 439	2 468
Argentina	190 039	60 951	57 113	70 419	72 490
Armenia	20 439	18 915	25 486	23 465	0
Australia	1 679	4 923	1 033	1 085	4
Brazil	5 080	5 530	16 408	16 000	16 000
Chile	31 000	26 186	26 937	27 557	24 736
China	430 000	420 000	400 000	400 000	280 000
Costa Rica	10 851	20 537	20 500	4 218	3 972
Czech Republic	34 000	15 000	26 000	34 000	31 000
Denmark	118 800	127 500	114 400	110 000	99 400
Ethiopia	4 000	4 000	4 000	4 000	5 000
France	90 000	90 000	90 000	90 000	90 000
Iran	9 912	9 500	37	0	0
Kenya	1 195	1 195	1 238	1 406	1 548
Korea, South	65 893	15 310	20 564	133 741	25 902
Mexico	87 849	89 810	109 970	96 474	152 028
Mozambique	78	0	1 305	0	34 200
New Zealand	43 624	0	0	0	0
Peru	151 398	120 672	107 265	96 590	96 532
Poland	590	600	500	500	580
Spain	59 619	47 706	48 231	70 550	70 000
Turkey	61 884	86 656	61 722	169 584	242 789
United States	901 000	832 000	686 000	768 000	957 000
Total	2 321 356	1 999 246	1 821 244	2 120 028	2 205 649

Tabla 3. Producción mundial de la diatomita (World Mining Data, 2020).

5.2.2 Mercado americano

Sobre el continente americano, además de Estados Unidos conocido como el mayor productor de diatomita a nivel mundial, existen yacimientos en otros países latinoamericanos, en donde para el año 2018 Latinoamérica representó alrededor del 17% de la producción mundial de diatomita con un total de 365.758 toneladas, gracias a la producción nacional de países como Argentina, Perú, México, Chile, Costa Rica y Brasil (World Mining Data, 2020).

5.2.3 Mercado nacional

En Colombia, el 100% de la diatomita que es exportada al mercado internacional es utilizada como medio filtrante en la industria de las bebidas, para productos como cerveza, vinos, etc.

El 53,8% de la diatomita es exportada por la empresa Imerys Diatomita Mexico SA. Seguida por Imerys Minerales Chile S.P con un 29,6% y Dry/bag A/S con un 7,3%, etc, como se visualiza en la figura 4. (Veritrade Business, 2021).

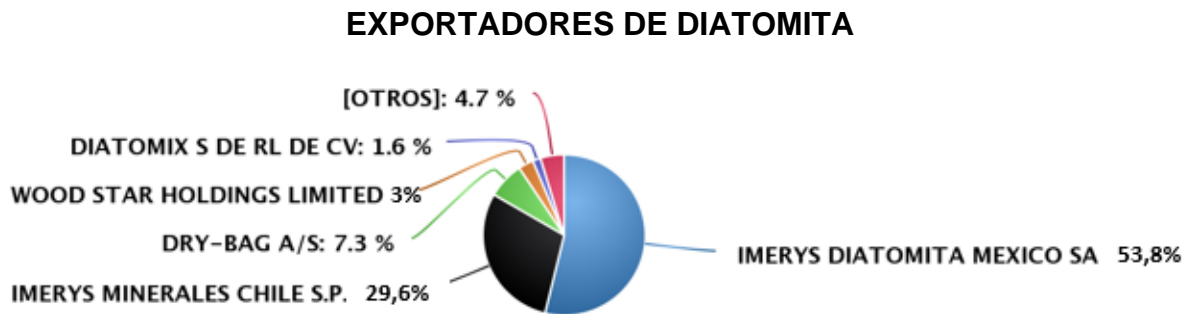


Figura 4. Exportadores de diatomita en Colombia (Veritrade Business, 2021).

Además, se evidencia un volumen exportado total de 1'275.000 kg desde noviembre de 2020 hasta enero de 2021. Con un costo en dólares de 956.807 \$ CIF (Tabla 4).

Exportador	Total registros	Total US\$ CIFTot	%	Total kg	US\$ / kg
IMERYS DIATOMITA MEXICO SA DE CV	39	514.303	53,75%	722.836	0,712
IMERYS MINERALES CHILE S.P.A	9	283.028	29,58%	405.340	0,698
DRY-BAG A/S	3	70.320	7,35%	59.424	1,183
WOOD STAR HOLDINGS LIMITED	1	28.519	2,98%	24.992	1,141
DIATOMIX S DE RL DE CV	1	14.910	1,56%	14.136	1,055
CHEMIRON FRANCE SAS	1	10.975	1,15%	8.976	1,223
ACCIMIN S.A DE C.V	1	10.215	1,07%	18.000	0,568
EP MINERALS, LLC	2	8.187	0,86%	17.690	0,463
BOCONCEPT A/S	5	5.582	0,58%	410	13,623
MANUFACTURERA DENTAL CONTINENTAL, S.A. DE C.V.	1	2.876	0,30%	1.036	2,776
L O TRADING CORP	1	2.381	0,25%	105	22,614
IMERYS FILTRATION FRANCE SAS	1	1.866	0,20%	975	1,914
REFRATECHNIK CEMENT GMBH	1	1.609	0,17%	806	1,996
MERCK SA DE CV	1	723	0,08%	150	4,822
PANREAC QUIMICA S.L.U	1	715	0,07%	36	19,874
SAINT GOBAIN COLOMBIA S.A.S	1	329	0,03%	66	5,018
SIGMA ALDRICH INTERNATIONAL GMBH	3	162	0,02%	1	122,128
MASTER PAINTS & CHEMICAL CORP.	1	71	0,01%	15	4,743
ADOLF WURTH GMBH & CO. KG	1	36	0,00%	6	5,870
Total	74	956.807	100,00%	1.275.000	0,750

Tabla 4. Exportación nacional de Diatomita (Veritrade Business, 2021).

Nacionalmente, la diatomita importada es utilizada en las industrias de bebidas y alimentos por las empresas Bavaria, Postobón y Maíz/Corn como medio filtrante; Pintuco, Sempertex como absorbente de pinturas y caucho; así como refractario para la fabricación de ladrillos por la empresa Erecos, etc. (Manosalva et al., 2010).

Donde el 26,6% de las importaciones son generados por la empresa Química Prodes Sorein SAS, un 17,4% por Bavaria & Cia SCA, seguido por Hergrill y Cia Limitada con un 12,7% etc. (Figura 5) (Veritrade Business, 2021).

IMPORTADORES DE DIATOMITA

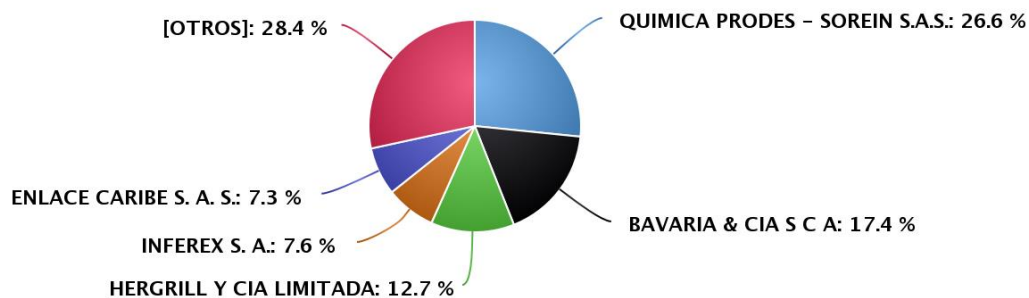


Figura 5. Importadores de diatomita en Colombia (Veritrade Business, 2021).

Las importaciones se estiman en un total de 1'274.877 kg con un costo en dólares de 955,655 \$ CIF desde noviembre de 2020 hasta enero de 2021, como se evidencia en la tabla 5.

Importador	Total registros	Total US\$ CIFTot	%	Total kg	US\$ / kg
QUIMICA PRODES - SOREIN S.A.S.	12	254.646	26,65%	310.544	0,820
BAVARIA & CIA S C A	19	166.284	17,40%	320.190	0,519
HERGRILL Y CIA LIMITADA	4	121.658	12,73%	183.264	0,664
INFEREX S. A.	3	72.751	7,61%	90.800	0,801
ENLACE CARIBE S. A. S.	3	70.320	7,36%	59.424	1,183
INGREDION COLOMBIA S.A.	1	59.652	6,24%	96.000	0,621
SUCROAL S.A.	3	39.626	4,15%	60.064	0,660
WILLTEX LIMITADA	1	28.519	2,98%	24.992	1,141
SEMPERTEX DE COLOMBIA S A	2	27.092	2,83%	11.880	2,280
CERVECERIA UNION S.A.	3	25.892	2,71%	50.054	0,517
DISTRIBUIDORA DE QUIMICOS INDUSTRIALES S.A.	1	18.992	1,99%	20.203	0,940
ESENTTIA MASTERBATCH LTDA	1	17.013	1,78%	8.853	1,922
SIMONIZ S.A.	2	16.823	1,76%	8.149	2,064
FERRO COLOMBIA S.A.S	2	12.841	1,34%	9.951	1,290
PRODUCTORA DE GELATINA S.A.S	1	10.215	1,07%	18.000	0,568
CRUSARDI SOCIEDAD POR ACCIONES SIMPLIFICADA	5	5.582	0,58%	410	13,623
COMERCIALIZADORA MACRODENT S.A.S	1	2.876	0,30%	1.036	2,776
CARBONES DEL CERREJON LIMITED	1	2.381	0,25%	105	22,614
CARTON DE COLOMBIA S.A.	1	1.609	0,17%	806	1,996
MERCK S.A	4	886	0,09%	151	5,853
Total	70	955.655	100,00%	1.274.877	0,750

Tabla 5. Importación nacional de Diatomita (Veritrade Business, 2021).

El 99,97% de la diatomita importada y exportada se transporta por vía marítima, un 0,02% por vía aérea y el otro 0,01% por vía terrestre.

5.3 Usos y aplicaciones industriales de la diatomita

Dado que se encuentran diferentes términos para el material, se considera necesario dar claridad sobre las expresiones diatomita como nombre otorgado a la roca natural y tierras diatomáceas es la expresión dada a el material comercializado.

Los campos de utilidad de las tierras diatomáceas son bastante amplios, debido a sus características poco comunes, como lo son su estructura porosa, baja densidad aparente, ligera abrasividad, inercia química y alta capacidad de absorción. Las tierras diatomáceas se utilizan en múltiples sectores como la industria de productos químicos, cosméticos y en mayor medida como producto agroquímico para la elaboración de pesticidas, dado su bajo impacto ambiental respecto a otro tipo de materiales (Naranjo-Merchán et al., 2007).

Según el instituto geológico y minero de España (1976) este material también tiene otras aplicaciones como: filtrantes, material de carga y relleno, aislantes, absorbentes, abrasivos, portador de catalizadores, adhesivos, pulimentos y fertilizantes.

Además, es importante mencionar que 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 (Coordinación General de Minería de México, 2013).

En la tabla 6, se muestran los principales usos de las tierras diatomáceas, donde cada uso es enlazado a una determinada propiedad física la cual se usará para una aplicación específica en la industria.

PROPIEDADES FÍSICAS	USO	RAMA INDUSTRIAL
<ul style="list-style-type: none"> Alta porosidad 	<ul style="list-style-type: none"> Filtro-ayuda 	<ul style="list-style-type: none"> Elaboración de productos químicos Industria de la sacarosa Industria de licores, vinos y cervezas Industria farmacéutica Industria de purificación de aguas
<ul style="list-style-type: none"> Alta área superficial 	<ul style="list-style-type: none"> Cargador y aditivos 	<ul style="list-style-type: none"> Industria de pinturas Industria del plástico Industria del caucho Industria del papel Industria de fertilizantes e insecticidas
<ul style="list-style-type: none"> Permeabilidad 	<ul style="list-style-type: none"> Materiales aislantes 	<ul style="list-style-type: none"> Producción de aislantes térmicos
<ul style="list-style-type: none"> Alta capacidad de absorción 	<ul style="list-style-type: none"> Elementos absorbentes 	<ul style="list-style-type: none"> Manejo y almacenamiento de productos químicos peligrosos como ácido fosfórico, sulfúrico y otros Absorbente de nitroglicerina
<ul style="list-style-type: none"> Baja conductividad 	<ul style="list-style-type: none"> Fuente de sílice 	<ul style="list-style-type: none"> Industria de fibra de vidrio
<ul style="list-style-type: none"> Baja abrasividad 	<ul style="list-style-type: none"> Abrasivos 	<ul style="list-style-type: none"> Materiales destinados al pulido de automóviles y metales preciosos pastas dentífricas
<ul style="list-style-type: none"> Intercambio iónico 	<ul style="list-style-type: none"> Análisis cromatográfico 	<ul style="list-style-type: none"> Industria cromatografica

Tabla 6. Usos industriales de las tierras diatomáceas (Borgel, 2007).

Además, si se logra entender las interacciones y los procesos de formación de la diatomita, será posible entender más fácilmente la síntesis de nuevos y sofisticados materiales nanoestructurados, con aplicaciones en una gran gama de áreas que van desde la nanotecnología (semiconductores híbridos, celdas solares y materiales cerámicos de alto rendimiento) hasta la biología y biomedicina (biomateriales y estructuras liberadoras de drogas) (Heredia, 2013).

6. RESULTADOS

6.1 Áreas de interés para la diatomita en Colombia

La identificación de las zonas con depósitos de diatomita en Colombia se desarrolló mediante la recopilación de información geológica de antecedentes bibliográficos relacionados a la ocurrencia, exploración y explotación de este mineral. Apoyándose con información suministrada por la página del Catastro Minero Colombiano y Ministerio de Minas y Energía; obteniendo como resultado que los departamentos con mayores reservas de diatomita son: Boyacá, Cundinamarca y Valle del Cauca; en función de los siguientes municipios (Figura 6):

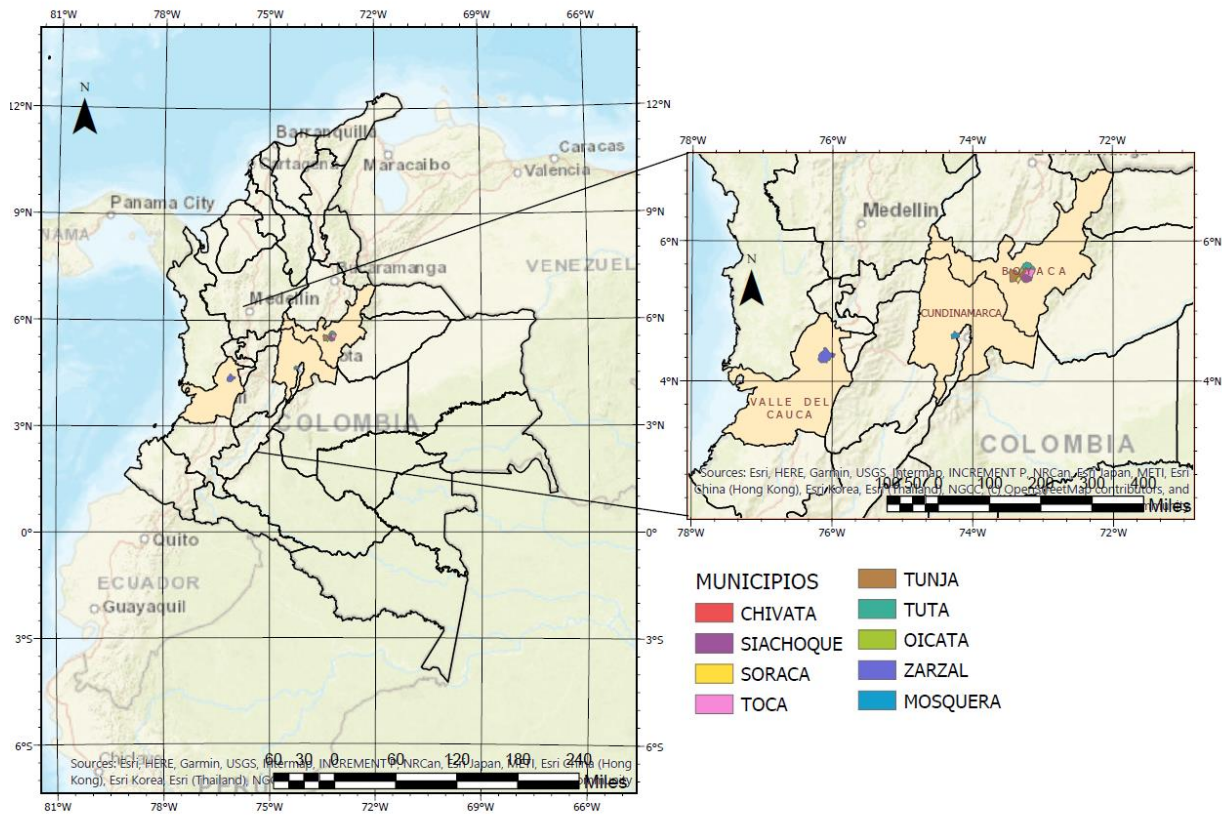


Figura 6. Mapa de depósitos de diatomita en los departamentos de Boyacá, Valle del Cauca y Cundinamarca. Elaborado por los autores.

Para la selección de la zona de estudio, se realizó una síntesis de la información recolectada para los depósitos de diatomita en Colombia teniendo en cuenta atributos como: ambiente de acumulación, formación geológica, espesor del afloramiento, tamaño del depósito, época de acumulación, asociaciones mineralógicas, composición química, taxonomía y recurso estimado para cada depósito (ver anexo A).

Con base a lo anterior, el municipio seleccionado fue “Tuta” en el departamento de Boyacá, ya que este municipio cuenta con depósitos que representan las condiciones de formación más comunes que tiene el país, es decir, de origen lacustre.

6.2 Caracterización geológica del municipio de Tuta-Boyacá

6.2.1 Localización

El municipio de Tuta se encuentra ubicado en el departamento de Boyacá, en las coordenadas 05° 41' 36" norte y 73° 13' 51" oeste (Figura 3). Cuenta con una altura de 2600 msnm, la temperatura media es de 14°C y la precipitación anual es de 935 mm. A una distancia de 26 km del municipio de Tunja. El área municipal es de 165 km², y limita al norte con Sotaquirá y Paipa, al este con Paipa y Firavitoba y al sur con Toca, Oicatá y Cómbita (Moreno, 2017).

6.2.2 Geología regional

6.2.2.1 Marco tectónico

Sobre la Cordillera Oriental se encuentran localizados la mayoría de los depósitos de diatomita existentes en Colombia, cordillera principalmente constituida por aporte de rocas sedimentarias de origen marino y continental. Los depósitos de diatomita están presentes en la formación Tilotá, unidad que yace discordantemente sobre las formaciones Churuvita, Conejo y Plaeners del periodo Cretácico Tardío (Manosalva et al., 2009).

La interacción de las placas oceánicas Nazca y Caribe con la placa continental suramericana dio como resultado la evolución tectónica de la Cordillera Oriental de Colombia. Al oriente de la zona de subducción de los Andes, a partir del periodo Cretácico se desarrolló una cuenca de backarc dominada por una sedimentación marina. A finales del Cretácico y a lo largo del periodo Paleógeno, la acreción de la Cordillera Occidental transformo esta cuenca de backarc en una cuenca de foreland con sedimentación en ambientes transicionales de llanuras costeras a continentales. Durante el periodo Neógeno la acreción de los terrenos conocidos como Chocó, Baudó y Panamá ocasionaron la inversión de la cuenca y deformación de la Cordillera Oriental, de esta manera, depósitos erosionales fueron conservados en la Formación Tilotá (Cooper et al., 1995).

Desde el punto de vista estructural, los depósitos de diatomita están localizados en cuencas sedimentarias intramontañas que corresponden estructuras sinclinales que permitieron la formación de lagos, ambiente propicio para la proliferación de diatomeas

(Manosalva et al., 2009). Regionalmente están presentes las fallas de Soapaga y Boyacá ambas al oriente de tuta que se han considerado como fallas de cabalgamiento, relacionadas con la amortiguación al sur de la Falla Bucaramanga como se puede evidenciar en la figura 7 (Boinet et al., 1989).

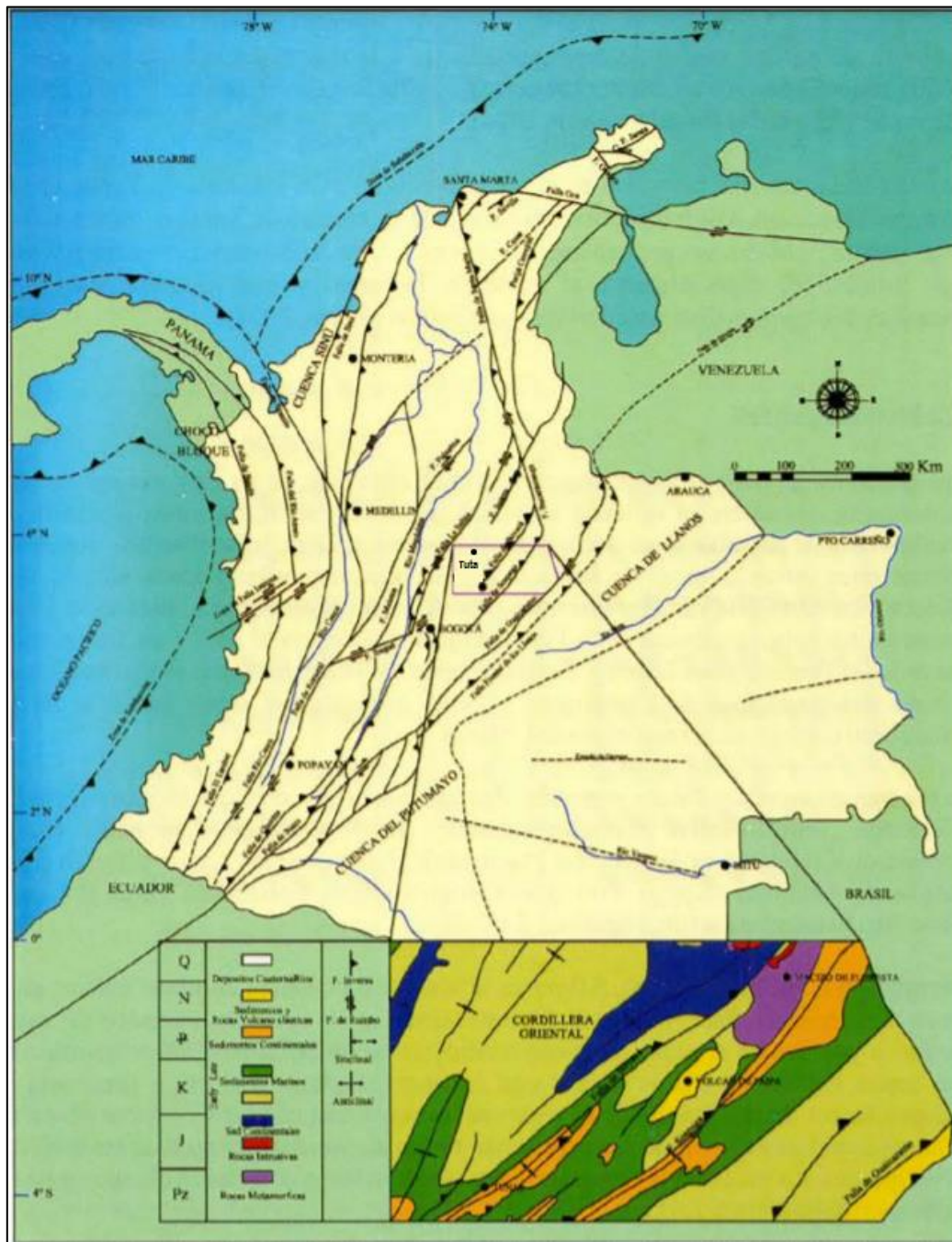


Figura 7. Marco estructural y principales lineamientos del área de estudio (modificado de Acosta, 2002).

La falla de Boyacá se encarga de dividir dos diferentes provincias morfoestructurales; en dirección noroccidente se encuentra un bloque tectónico levantado, compuesto por rocas con edades de los periodos Jurásico y Cretácico al que pertenecen amplias estructuras como lo son el sinclinal de Arcabuco y sinclinal de Los Medios, mientras que hacia el suroriente se encuentra un bloque tectónico hundido con paisaje ondulado que corresponde a la depresión del Chicamocha, donde son evidentes plegamientos cortos y estrechos, frecuentemente volcados por acción de la gravedad (Farelo y Parra, 2004).

6.2.2.2 Estratigrafía

La mayoría de los depósitos de diatomita pertenecen a épocas Plioceno – Pleistoceno, los cuales son caracterizados por rellenos aluviales, lacustres y acumulaciones glaciales, que en muchos casos se entrelazan entre sí, dando lugar a la formación de depósitos mixtos que yacen discordantemente sobre formaciones infrayacentes. Los depósitos en Boyacá debido a su posición estratigráfica son atribuidos a edades del Plioceno-Holoceno (Van Der Hammen, 1960); entre los que se encuentra la formación de interés, la Formación Tilatá la cual está constituida por arenas cuarzosas, limolitas y arcillolitas con intercalaciones de lignito y ceniza volcánica rica en plagioclasa y sanidina (Ver anexo D), discordantemente sobre areniscas de la Formación Bogotá en dirección al sector de Tunja, suprayacente en las rocas de las Formaciones Cacho, Guaduas, Labor y Tierna, y Plaeners, en zonas cercanas al casco urbano del municipio de Siachoque; formaciones que yacen discordantemente sobre las lodolitas presentes en la Formación Conejo, en el municipio de Chivatá (Manosalva et al., 2009).

La Tabla 7 presenta un resumen referente a las unidades litoestratigráficas aflorantes, en donde son evidenciados los aspectos físicos generales referentes, las cuales están representadas cronológicamente por Formación Churuvita (Kch), Formación Conejo (Kc), Formación Plaeners (Kpl), Formación Labor y Tierna (Kit), Formación Guaduas (Kpgp), Formación Cacho (KTg), Formación Bogotá (Pgb), Formación Tilatá (NgQt), Vulcanitas (NgQv) y Depósitos Cuaternarios (Q) (Manosalva et al., 2009). De acuerdo con esta información se puede deducir que únicamente la Formación Tilatá presenta afloramientos de diatomita en esta región

Formación	Composición	Descripción / Grano		Espesor (m)	Edad
Depósitos Cuaternarios	Arenas	Depósitos de: Río Chicamocha, Quebrada El Salitre Pantano de Vargas, Lago Sochagota			
	Limos				
	Arcillas				
Vulcanitas (NgQv)	Depósitos piroclásticos				
	Domos de composición traquítica				
	Intercalaciones de depósitos sedimentarios				
Formación Tilatá (NgQt)	Arenas cuarzosas	Capas medias a gruesas. Oxidos de hierro	Grueso a fino	150	Plioceno a Pleistoceno
	Limolitas y arcillolitas abigarradas				
	Capas de lignito				
	Ceniza volcánica ricos en sanidina y plagioclasa				
Formación Bogotá (Pgb)	Areniscas cuarzosas y de líticos	Capas delgadas a medias	Fino a grueso	250 y 500 en la Sabana	Paleoceno tardío a Eoceno
	Limolitas y arcillolitas				
	Abundantes óxidos rojizos				
Formación Guaduas (KPgg)	Arcillolitas y limolitas	Capas medias a muy gruesas		500	Maestrichtiano hasta Paleoceno.
	Areniscas cuarzosas; intercalación de las anteriores	Capas medias a delgadas. Oxidos de hierro	Fino		
	Arenisca cuarzosa con laminación lenticular a cruzada	Capas gruesas masivas. Matriz arcillosa	Fino		
	Mantos de carbón	Abundantes			
Formación Labor-Tierna (Klt)	Arenisca cuarzosa	Capas medias a muy gruesas	Grueso a fino.	100	
Formación Los Pinos (Klp)	Limolitas negras a verdes	Capas medias y muy gruesas		100	
	Liditas silíceas	Delgadas a muy delgadas			
	Areniscas cuarzosas	Capas medias a delgadas. Niveles de ichnofósiles			
	Arcillolitas				
	Limolitas				
Calizas lumaquéllicas e impregnaciones de sales					
Formación Plaeners (Kpl) (Grupo Guadalupe)	Liditas silíceas fracturadas	Paquetes blandos. Capas delgadas a medias intensamente fracturadas. Niveles de fosforitas y fósiles		100	No correlacionable con F. Plaeners de la Sabana
Formación Conejo (Kc)	Shales negros	Capas medias a muy gruesas		165	Coniaciano a Santoniano
	Areniscas cuarzosas	Capas delgadas	Fino		
	Limolitas				
	Calizas				
Grupo Churuvita (Kch)	Shale negro			215	Cenomaniano a Turoniano
	Areniscas cuarzosas	Niveles de glauconita, moscovita, fósiles	Fino		
	Calizas				
Une (Ky).	Areniscas cuarzosas (laminación cruzada)	Óxido de hierro	Grueso a fino. En algunos niveles conglomerática	510	Albiano Superior a Cenomaniano
	Shale pardo a gris	Capas finas y gruesas			
Tibasosa (Kt)	Shales grises oscuros	Ricos en restos de fósiles		132 - 150	Albiano medio a Albiano Superior
	Calizas				
	Areniscas				

Tabla 7. Resumen estratigráfico generalizado para el departamento de Boyacá, escala 1:25.000 (Velandia, 2003)

6.2.3 Geología local

6.2.3.1 Municipio de Tuta

Según la plancha 191-II-A-4, los afloramientos de diatomita en el municipio de Tuta exhiben esporádicos niveles de ceniza, lignito, capas gruesas a muy gruesas de arenas cuarzosas y capas de lodolitas que hacen parte del techo de la Formación Tilatá. Presentando un recurso estimado de aproximadamente 1´195.346 toneladas (Manosalva et al., 2009).

La figura 8 presenta la delimitación de los recursos de Tuta mediante una línea morada, los puntos verdes están asociados a perforaciones con presencia de Diatomitas, y los puntos rojos representan perforaciones exploratorias.

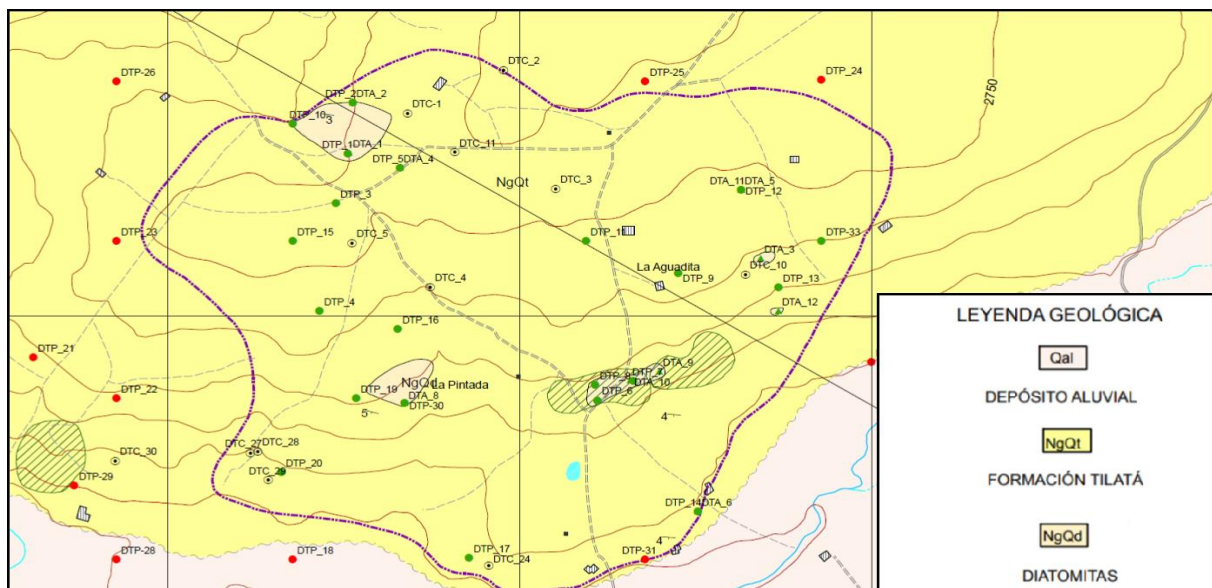


Figura 8. Mapa Geológico de Tuta-Boyacá, escala 1:5.000 (extraído de la plancha 191-II-A-4, 2009, anexo B).

En el municipio de Tuta aflora el miembro superior de la Formación Tilatá, formación con edad Plioceno – Pleistoceno que presenta capas gruesas a muy gruesas de diatomitas, masivas, con colores naranja muy pálido, naranja grisáceo con ocasionales impregnaciones de óxidos de hierro (limonita) formando en ocasiones laminas ferruginosas, duras, y onduladas; también son frecuentes las interestratificaciones de capas medias a gruesas de lodolitas limosas, pardo moderado a pardo amarillento oscuro

y rara vez se encuentra interestratificada con capas medias de arenitas de grano fino a muy fino. La Formación Tilatá limita en contacto discordante con la Formación Plaeners y depósitos Cuaternarios. Estructuralmente, el depósito de diatomita se localiza rellenando un sinclinal, formando una cuenca intermontaña que limita al este con escarpes de la Formación Une y la Falla de Soapaga y al oeste por el eje de un anticlinal volcado, en cuyo núcleo afloran rocas de la Formación Churuvita, estructuras que favorecieron en gran medida a la posterior deposición de la Formación Tilatá, de la cual se presume sea más espesa al oeste y se acuña hacia el este (Manosalva et al., 2009).

En algunas perforaciones realizadas en el municipio de Tuta, se presentaron paleosuelos a 2,7 m y 3,5 m de profundidad, los cuales se componen de lodolitas mezcladas con abundante materia orgánica (Figura 9). Estos paleosuelos son claros indicadores de períodos de colmatación del paleolago, en donde se desarrolló suelo orgánico en diferentes niveles dentro de la sucesión de diatomitas (Manosalva et al., 2009).

EDAD	FORMACIÓN	SEGMENTO	ESPESOR ACUMULADO (m)	ESCALA GRÁFICA	LITOLOGÍA	DESCRIPCIÓN		
						DESCRIPCIÓN EN CAMPO	ANÁLISIS PETROGRÁFICO	TAXONOMÍA
NEOGENO - CUATERNARIO PLIOCENO - PLEISTOCENO?	T I L A T Á	DTP2 - 1	1,40m		<p>Diatomita color naranja muy pálido con menor lodolita frecuentemente de color naranja grisáceo y ocasional pardo amarillento pálido, con frecuentes inclusiones de cuarzo y ocasionales impregnaciones de óxido de hierro. Pobremente consolidado.</p>	<p>67 % Diatomeas 25% Minerales acillosos con presencia de óxido de hierro. 5% Opacos 3% Cuarzo Trazas de <i>espículas</i>.</p>	<p><i>Aulacoseira granulata</i>: 99%, tamaños de 8,7 -14micras. <i>Pinnularia gibba</i> : 1%, en fragmentos.</p>	
		DTP2 - 2	2,30m		<p>Diatomita color pardo amarillento moderado con lodolita frecuentemente de color pardo amarillento moderado y ocasional pardo moderado, con ocasionales impregnaciones de óxido de hierro color pardo claro y frecuentes inclusiones de micas. Pobremente consolidado.</p>	<p>65% Diatomeas 32% Minerales arcillosos con presencia de óxido de hierro 2% Cuarzo 1% Opacos Trazas de <i>rafe</i> , micas (moscovita)</p>	<p><i>Aulacoseira granulata</i>: 96%, tamaños de 9 a 15 micras. <i>Pinnularia gibba</i> : 1%, en fragmentos. <i>Staurosirella oldenburgiana</i>: 3%, tamaños de 14 -18 micras.</p>	
		DTP2 - 3	3,5m		<p>Diatomita color naranja grisáceo, con lodolita frecuentemente de color naranja amarillento oscuro y ocasional pardo amarillento moderado; estructura masiva, frecuentes impregnaciones de óxido de hierro. Moderadamente consolidado.</p>	<p>60 % Diatomeas. 35% Minerales arcillosos con presencia de óxido de hierro. 3% Cuarzo 2% Opacos Trazas de ópalo, micas (moscovita).</p>	<p><i>Aulacoseira granulata</i>: 99%, tamaños 10 - 14, 5 micras. <i>Pinnularia gibba</i> :1%, en fragmentos.</p>	
			4,20m		<p>Paleosuelo de color pardo amarillento oscuro y contenido de materia orgánica con lodolita frecuentemente de color pardo moderado. Pobremente consolidado.</p>			
CONVENCIONES						INGEOMINAS - UPTC		
	Diatomita		Restos de raíces	DEPÓSITO DE DIATOMITAS - TUTA PERFORACIÓN 2 (DTP_2)				
	Lodolita		Concreciones de óxidos de hierro	COORDENADAS				
	Arenisca		Paleosuelo	X: 1.102.763 N	Y: 1.114.834 E	Z: 2.773 msnm		
	Conglomerado		Óxidos de hierro	ELABORÓ:		FECHA:		
	Suelo orgánico			GRUPO INGENIERÍA GEOLÓGICA		1 Septiembre de 2009		
	Paleosuelo							

Figura 9. Columna estratigráfica de diatomitas, municipio de Tuta (Manosalva et al., 2009).

6.2.4 Hipótesis de formación geológica de la diatomita presente en el municipio de Tuta-Boyacá

La formación de diatomita en el municipio de Tuta puede ser atribuida a aportes de sílice asociados a cenizas volcánicas provenientes del volcán de Paipa, acumuladas en cuencas lacustres, en donde gracias a estas cenizas se dieron las condiciones propicias para la proliferación de diatomeas, puesto que estas algas unicelulares tienen la capacidad de extraer de su hábitat la sílice con la que forman sus frústulas (Dolley y Moyle, 2003). Es posible relacionar estas cenizas al volcán de Paipa debido a que presentan una relación mineralógica rica en anortoclasas y sanidinas, mineralogía observada también en los depósitos piroclásticos del mismo volcán (Pardo et al., 2005).

El volcán de Paipa de época Plioceno-Pleistoceno se encuentra en la Cordillera Oriental a una altura de 2780 msnm (figura 10). Este volcán es de tipo piroclástico, donde sus producciones de facies volcánicas van de ignimbritas, depósitos de caída “Lapilli”, piedra pómez y aguas geotérmicas, representadas por una lava compuesta de riolita y traquita (Pardo et al., 2005).

Pardo et al. (2005) definieron dos épocas de erupciones con un resultado de 14 unidades separadas estratigráficamente. A la primera erupción ocurrió en la Periodo Paleogeno tardío, se le dio el nombre del Volcán Paipa, y yace como resultado de la interacción del magma con el agua externa que produjo un edificio piroclástico, seguido de columnas eruptivas de piedra pómez que alcanzaban grandes alturas relleno los valles; por otra parte, otra unidad de erupción se depositó por la ocurrencia de este mismo proceso donde da un origen a formaciones de roca tipo Lapilli. Los flujos piroclásticos se extendieron hacia el SW y el NE por un colapso de columnas, así, transportando el basamento metamórfico afuera del volcán, y la aglutinación de bloques de Lapilli, con una descripción de material tipo ignimbritas masivas y mal clasificadas. Ya al finalizar se comprendieron periodos de emisiones de flujo piroclástico de piedra pómez sobre el flanco noreste del edificio y una evacuación de volumen de la cámara magmática cercano a 6 km³, que podría potenciar el hecho del colapso de la caldera (Pardo et al., 2005).

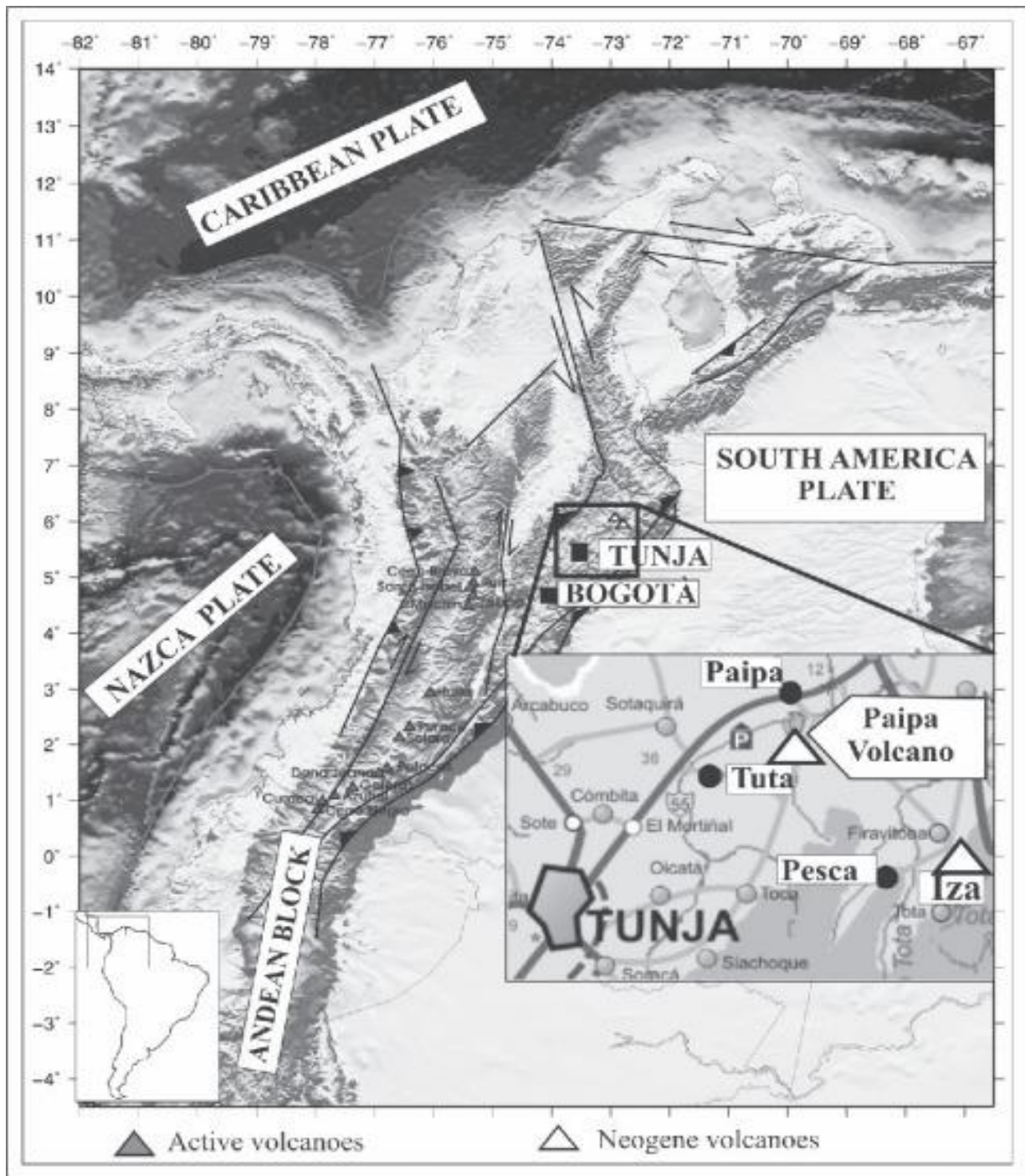


Figura 10. Localización del Volcán de Paipa, ubicado en la mitad de la Cordillera Oriental (Pardo et al., 2005).

La segunda erupción ocurre durante el Periodo Neógeno temprano con el resurgimiento de la caldera formando presencia de domos que emitían magmas alcalinos traquíticos y riolíticos alrededor de la caldera, a consecuencia de los colapsos de estos mismos domos

ocurren movimientos piroclásticos introduciéndose en los afluentes adyacentes, a su vez, una fragmentación explosiva generó una capa de ceniza rica en sanidina y plagioclasa (Pardo, 2004) con 10 a 25 % de Lapilli lejos de los respiraderos generando aglomeración en toda la región. Siguiendo con un periodo de erupciones explosivas por la interacción del magma con el agua y deposición formando ignimbritas, con preservación de Lapilli acrecionales en facies distales llenando depresiones topográficas. Aunque los procesos erosivos de alta energía generan una restricción espacial, el colapso de las columnas sugiere una deposición intercalada (Pardo et al., 2005), evidenciada en figura 11:

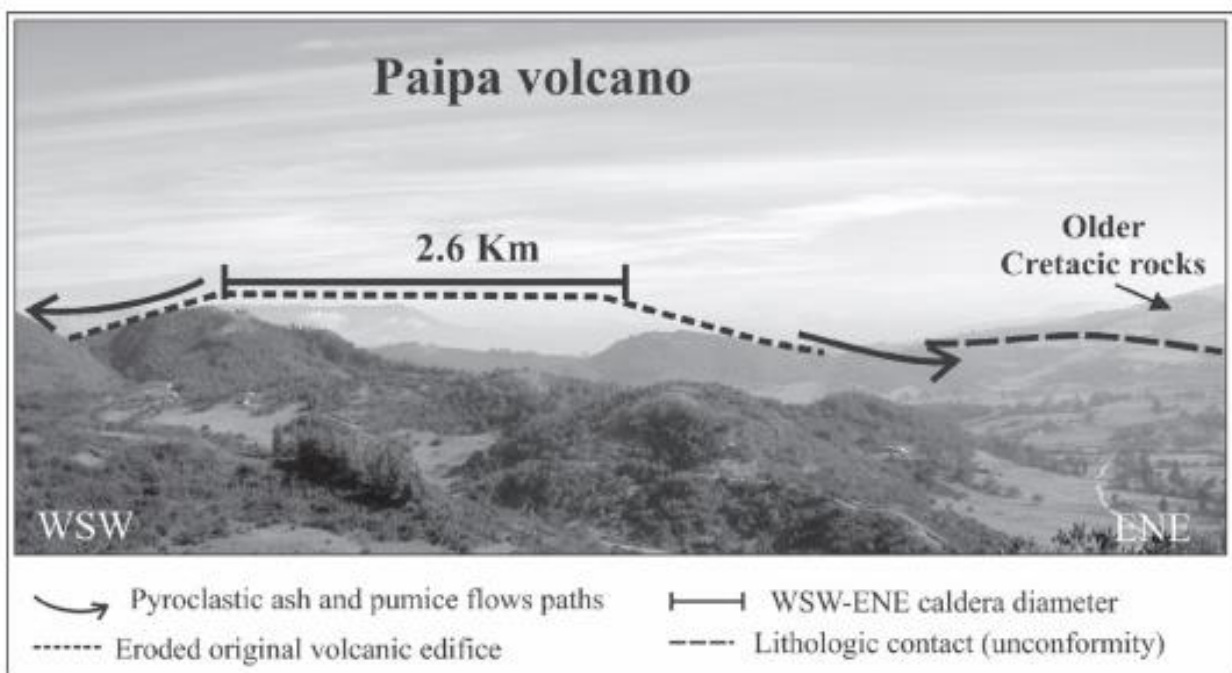


Figura 11. Vista panorámica del edificio piroclástico erosionado del volcán Paipa (primer plano). Rocas más antiguas del Cretácico aparecen en el fondo y alrededor del volcán (Pardo et al., 2005).

Para los segmentos estratigráficos del volcán de Paipa, se puede concluir que el inferior es principalmente piroclástico y el segmento superior es principalmente epiclástico. El segmento inferior rellena paleo-valles y no se encuentra en más de 1 km² de superficie, con un espesor máximo de 4 m. Los municipios de Paipa y Tuta evidencian además una asociación de facies de caldera para estos depósitos volcánicos (Pardo et al., 2005).

A continuación, en la tabla 8, se presenta un resumen de unidades de erupción registradas, productos asociados y posibles mecanismos de erupción. Las erupciones están separadas por tiempos de erosión, acumulación fluviolacustre y formación de suelos, que conforman las facies epiclásicas de las unidades eruptivas (Pardo, 2004).

EPOCA Y EDAD		UNIDAD	PRODUCTOS VOLCÁNICOS, MECANISMO DE TRANSPORTE Y ACUMULACIÓN
Segunda época eruptiva	Posterior a 1.8 Ma	II.10	Caidas de ceniza y pómez intercaladas con flujos piroclásticos de pómez, ceniza y bloques de líticos no-juveniles originados por colapso de columnas. Se tienen 13 fases registradas separadas por láminas de limolitas.
		II.9	Flujo de ceniza, pómez y bloques de pómez y líticos accidentales originados por colapso de columnas. En zonas distales se acumularon las caídas de ceniza.
		II.8	Flujo de ceniza, pómez y bloques de pómez y líticos accidentales originados por colapso de columnas. En zonas distales se acumularon las caídas de ceniza con lapilli acrecional.
		II.7	Sucesión de una fase de oleadas piroclásticas de facies planas y de olas de arena, fase de caídas de ceniza, fase de blast por voladura de domo y fase de oleadas de facies masivas.
	2.5-2.1 Ma	II.6	Flujo de ceniza y bloques originado por colapso de domo
		II.5	Flujo de ceniza y bloques originado por colapso de domo, y caídas de ceniza violeta con abundantes lapilli acrecional
		II.4	Flujo de ceniza y pómez originado por colapso de columna y caída de cenizas desde la nube acompañante
		II.3	Flujo de ceniza y bloques originado por colapso de domo, y caídas de ceniza negra con lapilli acrecional
		II.2	Flujo de bloques y ceniza originado por colapso de domo
		II.1	Domos intracaldéricos, traquíticos a riolíticos de afinidad alcalina, con cristales de anortoclasa, sanidina, poikilocristales y glomerocristales de feldspatos alcalinos con núcleos de oligoclasa, cristales accesorios de hastingsita, titanobiotita y trazas de augita, esfena y magnetita.
	Colapso de la caldera		
Primera época eruptiva (Posterior a Eoceno tardío)	I.4	Flujo piroclástico de pómez y ceniza con alto contenido de vesículas. Químicamente son riolitas y fueron originados por colapso de columnas de erupción.	
	I.3	Flujos piroclásticos de ceniza y pómez con alto contenido de fragmentos líticos accidentales y <i>armored lapilli</i> . Posiblemente originado por <i>boiling over</i> .	
	I.2	Flujos piroclásticos de pómez y ceniza en zonas proximales que varían a lo largo de los valles a flujos de ceniza y pómez con la distancia desde la fuente. Fueron originados por colapso de columnas de erupción	
	I.1	Flujos piroclásticos de ceniza y pómez con textura cristalovitrea, con cristales y glomerocristales de anortoclasa, sanidina, hastingsita, esfena y circón en una matriz de vidrio con shards tricuspales aplastados. Al tope disminuye el grado de soldadura. Químicamente son riolitas de afinidad alcalina y fueron originados por colapso de columnas de erupción.	

Tabla 8. Resumen de unidades de erupción registradas del volcán de Paipa (Pardo, 2004).

6.3 Caracterización de la diatomita (DB01) de la formación Tiltatá en el municipio de Tuta

Teniendo en cuenta la zona seleccionada para el estudio, localizada en el municipio de Tuta (lo cual fue mencionado en el capítulo anterior), y en vista de las restricciones actuales para realizar las visitas de campo, por causa de la contingencia nacional por el COVID-19, se procedió a ubicar una muestra procedente de esta zona en la colección de muestras de depósitos minerales no metálicos que se tiene en la Litoteca del Departamento de Geología de la Universidad EAFIT. La muestra se identificó como DB01.

A continuación, se presentan los resultados del procedimiento de caracterización mineral, que incluye la aplicación de una serie de técnicas analíticas con la finalidad de dar caracterización a la muestra de estudio en términos de sus propiedades intrínsecas: físicas, químicas y mineralógicas para adquirir una línea base de las características del mineral asociado al depósito (figura 12), con el fin de a partir de ellas establecer para trabajos futuros cuales son las posibles rutas de caracterización en función de la aplicación presentada en el objetivo 4.

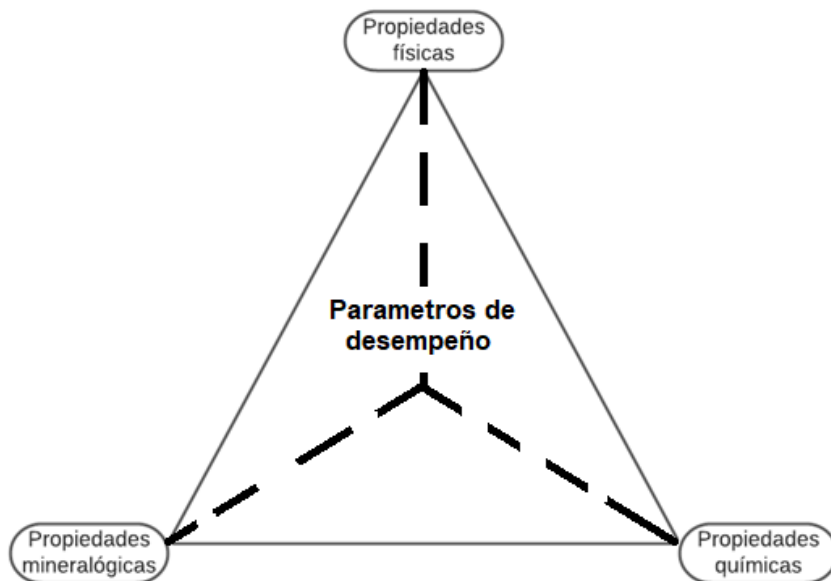


Figura 12. Representación de la relación de las variables intrínsecas en función del parámetro de desempeño.

La tabla 9 presenta las propiedades intrínsecas y fisicoquímicas asociadas a las técnicas analíticas empleadas.

Propiedades intrínsecas	Propiedades fisicoquímicas	Técnicas
Propiedades químicas	Composición química por óxidos	Fluorescencia de rayos x
	Composición elemental por microscopia electrónica de barrido con energía dispersiva de rayos x	Microscopia electrónica de barrido con EDX
	pH natural	pH-metro
Propiedades físicas	Conductividad eléctrica	Conductímetro
	Densidad bulk	Norma ASTM C 29
	Densidad específica	Picnómetro
	Distribución de tamaño de partícula	Difracción láser
Propiedades mineralógicas	Composición mineralógica	Difracción de rayos X

Tabla 9. Técnicas de caracterización mineral y propiedades específicas a evaluar en el proyecto.

6.3.1 Preparación de la muestra DB01

Se presenta el flujograma de trabajo llevado a cabo para realizar la preparación y pruebas de laboratorio para la muestra DB01 (Figura 13).

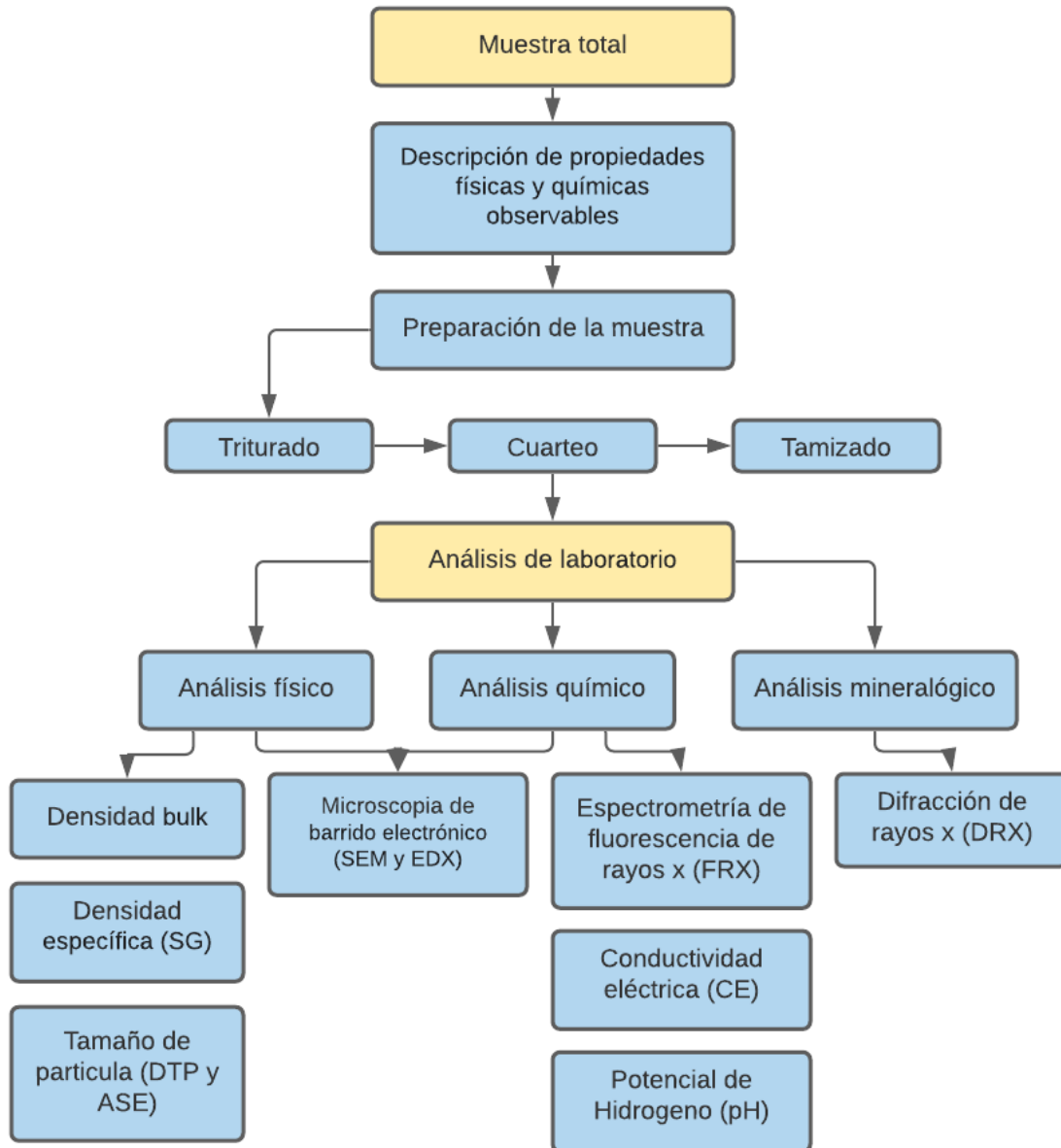


Figura 13. Flujograma de trabajo para la preparación de la Muestra DB01.

A continuación, se presenta la descripción de los procedimientos aplicados en la preparación de la muestra:

La Muestra DB01 inicialmente es descrita a nivel macroscópico (figura 14), como una roca fina y porosa de aspecto margoso color blanco que posteriormente se trituró, pulverizó, cuarteó y tamizó para seleccionar la fracción de estudio y almacenar una contramuestra, que estará reservada en la litoteca de la universidad EAFIT.

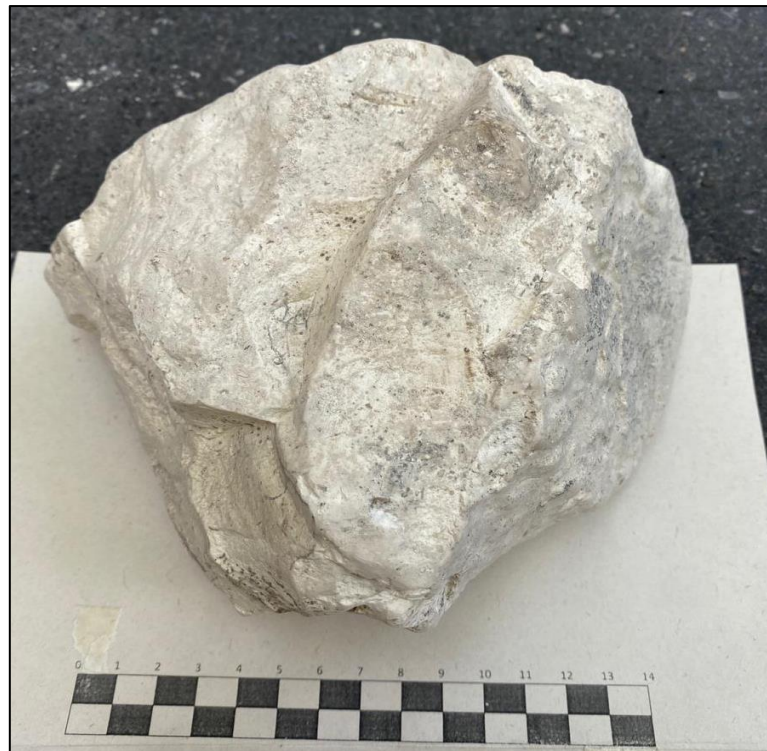


Figura 14. Muestra DB01.

En el presente trabajo fueron implementados los tamices de laboratorio 100 (150 micrómetros) y 230 (63 micrómetros) tipo ASTM con la finalidad de separar 200 gramos de la Muestra DB01 en tamaños superiores a 150 micrómetros, inferiores a 63 micrómetros y tamaños entre los dos mencionados (figura 15).



Figura 15. Muestra DB-01: tamizado.

Sobre la figura 16, fueron graficados los porcentajes retenidos por el tamiz para la Muestra DB01. La mayor proporción de material abarca tamaños menores a 63 micrómetros y corresponde al 89,7% de la masa total, el 6.3% abarca tamaños entre 150 y 63 micrómetros y por último el 3.8% con tamaños mayores a 150 micrómetros.

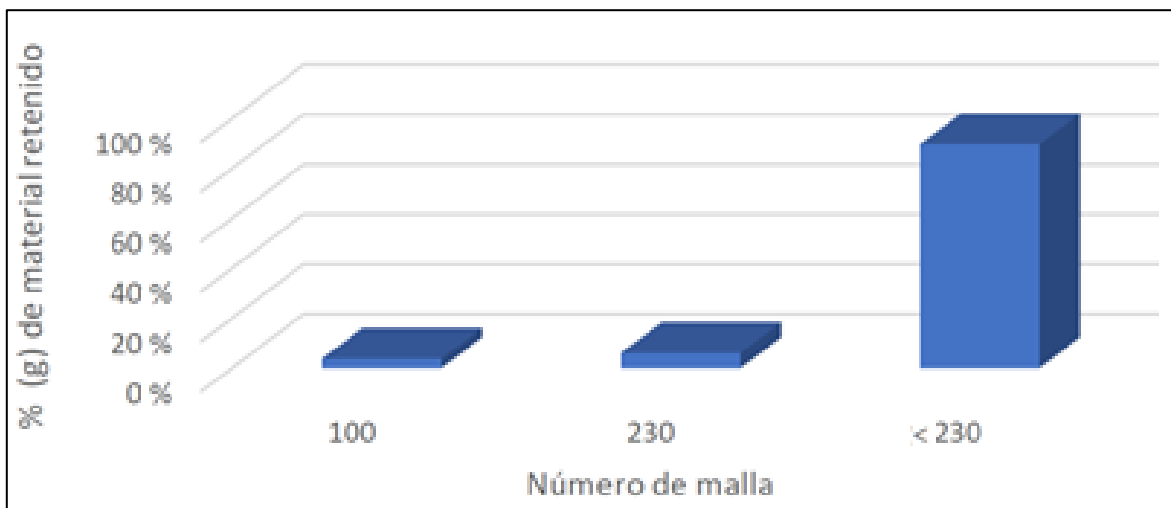


Figura 16. Retenidos sobre malla de la Muestra DB01.

Los datos reportados a continuación sobre la Muestra DB01, corresponden a un total de 10 resultados obtenidos de manera experimental: 4 de estos fueron realizados en los laboratorios de la universidad EAFIT por los autores del presente proyecto, que corresponden a pruebas de densidad bulk, pH, densidad específica, y conductividad

eléctrica. Los otros 6 datos fueron obtenidos en el laboratorio de CECOLTEC SAS, que corresponden a espectrometría por fluorescencia de rayos X (FRX), microscopía electrónica de barrido con energía dispersiva de rayos X (SEM, EDX), distribución de tamaño de partículas por dispersión láser (DTP), área superficial específica (ASE) y difracción de rayos X (DRX).

6.4 Resultados de las propiedades físicas

6.4.1 Análisis de densidad bulk

En la norma ASTM C 29 se define la densidad total como la masa de un volumen unitario, la cual incluye el volumen de las partículas individuales y el volumen de vacíos entre las partículas.



Figura 17. Muestra DB-01: prueba de densidad bulk.

Las mediciones se realizaron según la norma ASTM C 29 en la balanza Mettler bajo condiciones de laboratorio a temperatura ambiente (figura 17), arrojando los siguientes resultados por duplicado presentados en la tabla 10:

Resultados
0,25 kg/ m ³
0,24 kg/ m ³

Tabla 10. Resultados de mediciones: densidad bulk.

Obteniendo un valor promedio de $0,25 \text{ kg/m}^3$ que puede estar relacionado tanto a que la masa unitaria se encontraba en estado suelto durante el procedimiento como a el elevado volumen de poros característico de la diatomita.

6.4.2 Análisis de densidad específica

Según la norma I.N.V.E –128–07, la gravedad específica es la relación entre la masa de un cierto volumen de sólidos a una temperatura dada y la masa del mismo volumen de agua destilada y libre de gas, a la misma temperatura.



Figura 18. Muestra DB-01: prueba de densidad específica.

Las mediciones se realizaron según la norma I.N.V.E –128–07 mediante el uso de un picnómetro, bajo condiciones de laboratorio a temperatura ambiente (figura 18), arrojando los siguientes resultados por duplicado presentados en la tabla 11:

Resultados
2,194
2,618

Tabla 11. Resultados de mediciones: densidad específica.

Estimando un valor promedio de 2,406; valor que indica que el material se encuentra en estado suelto. Es decir, que su densidad es baja.

6.4.3 Análisis de tamaño de partículas por difracción laser (DTP) y área superficial específica (ASE)

La difracción láser mide las distribuciones de tamaño de partícula mediante la variación angular de la intensidad de la luz dispersada cuando un rayo láser pasa a través de una muestra de partículas dispersas (Malvern Panalytical, 2020).

Para estas mediciones se empleó el difractómetro Mastersizer, usando el parámetro dispersante en Dry arrojando los siguientes resultados a partir de la figura 19:

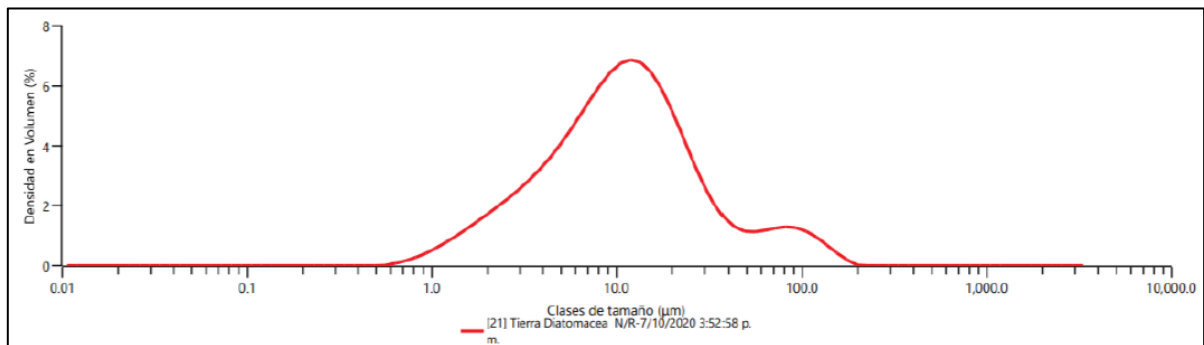


Figura 19. Distribución de tamaño de partícula en la Muestra DB01 (Cecoltec SAS, 2020).

Se puede observar que la tendencia de la distribución de tamaños de la muestra de estudio es bimodal lo cual se evidencia por los dos picos de la curva de distribución de tamaños; se puede definir una población muy significativa de partículas entre 0,6 y 40

µm, y una segunda población en proporción menor, entre los 40 y 200 µm. Además, se presencia una tendencia univariante, con una segunda curva menos pronunciada respecto al eje Y (densidad de volumen), aspecto que es otorgado a una posible ineficiencia en el pulverizado de la muestra.

Los resultados de dicha curva se interpretaron de manera complementaria identificando los valores de los diámetros Dv 10, Dv 50, DV 90 y DV 100, que indican el tamaño (µm) a través del cual pasaría el 10, el 50, el 90 o el 100% de la población de dichas partículas; lo cual puede entenderse con el siguiente ejemplo: el 50% de las partículas para la muestra analizada presenta un tamaño menor a 10, 7 µm y de la misma manera se interpretan los datos complementarios presentados en la tabla 12.

Tamaño de partículas con difracción laser	
Dv (10)	2,76 µm
Dv (50)	10,7 µm
Dv (90)	40,1 µm
Dv (100)	185 µm

Tabla 12. Tamaño de partículas con difracción láser (Cecoltec SAS, 2020).

También por medio de este análisis se determinó un área de superficie específica de 892,8 m²/kg. Valor que indica una elevada área superficial asociada tanto a el tamaño de las partículas como al volumen de poros presente en la muestra, ya que a mayor volumen de poros mayor área superficial específica.

6.4.4 Análisis por microscopia de barrido electrónico (SEM) y espectroscopia de energía dispersiva (EDX)

Mediante el análisis SEM se determina la morfoespecie, el tamaño promedio de partícula y poro, además de los intersticios y la disposición de los esqueletos de diatomeas y relleno o no de las cavidades porosas. Y el análisis EDX, se emplea para cuantificar los óxidos en puntos precisos donde se quiera analizar la composición (Borgel, 2007). Para este caso, el foco del EDX se usará para verificar de manera puntual, la composición elemental en algunos sitios asociados a las frústulas de diatomeas para identificar la

composición de materiales finos que existan o se encuentren rellenando estas cavidades porosas y determinar que mineral arcilloso está presente o si es material diatomáceo fino que también puede rellenar estos poros.

Para este análisis, se empleó el microscopio de barrido electrónico de referencia XL de Phenom-World, arrojando los siguientes resultados a partir de las figuras 20, 21 y 22:

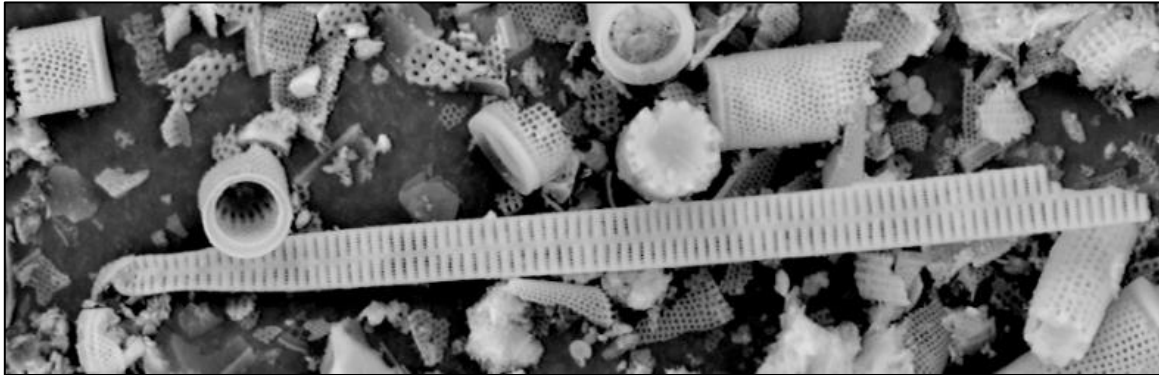


Figura 20. Especies de diatomeas fósiles identificadas en la Muestra DB01 (Cecoltec SAS, 2020).

Las morfologías presentes en la figura 20, revelan la presencia de frústulas diatomeas con diferente forma, donde fácilmente se observa el predominio general de diatomeas con apariencia cilíndrica sobre cualquier otra morfología presente.

Se identificó en la muestra las principales familias de diatomeas y se describe la especie más abundante: **Aulacoseira Granulata**.

La *Aulacoseira granulata* posee frústulas cilíndricas, valvas circulares y la gran mayoría de ejemplares se encuentran unidas formando así cadenas largas o cortas (figura 21. A y D). La unión entre las valvas cercanas se da mediante espinas que se encuentran en sus bordes (figura 21. B, C y D), las espinas se encuentran en la base de la valva y se incrustan en la valva más cercana. Los poros presentes en las frústulas tienen un diámetro entre 556 nm y 720 nm y están organizados en filas rectas o diagonales (figura 21. A, B, C y D). La superficie de las valvas es plana (figura 21. C y E) presentando un diámetro de 6.21 μm y la longitud de las frústulas separadas es de aproximadamente 14 μm .

Esta especie se desarrolla en sustrato arcilloso, sobre y alrededor de vegetación acuática sumergida ya sea en ríos, lagos y estanques con un pH alcalino que oscila entre 6.3 y 8.2 en ambientes eutróficos con temperaturas desde 15 hasta 30°C (Guadalupe et al., 2005).

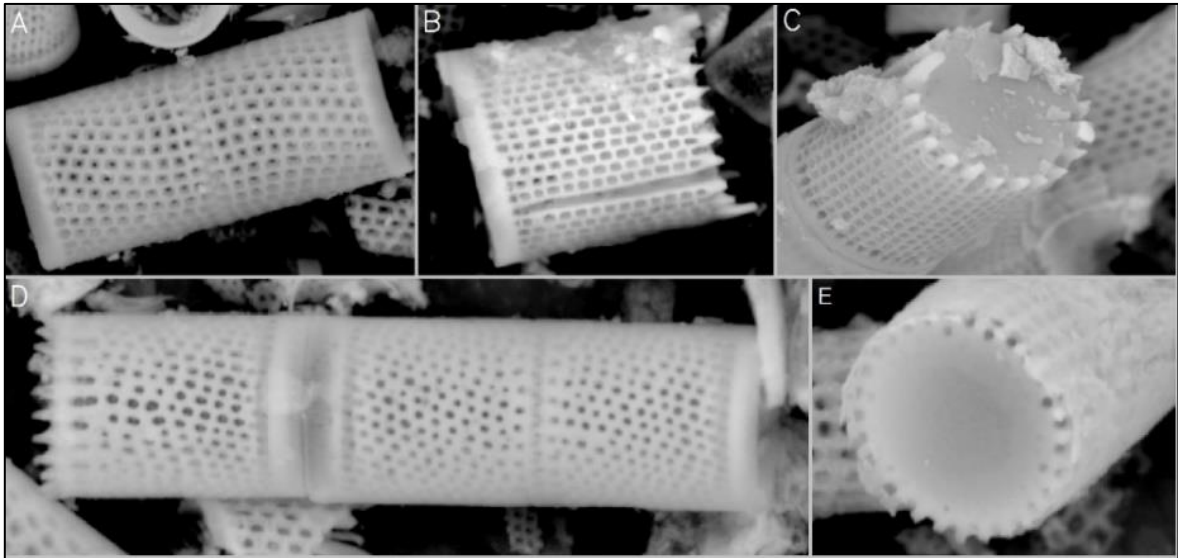


Figura 21. Imágenes SEM de la especie *Aulacoseira granulata* en la muestra DB01. A. cadena de diatomeas cilíndricas. B y C. Espinas que unen las valvas. D. Vista de sutura entre diatomeas. E. Vista a detalle de la valva (Cecoltec SAS, 2020).

De manera complementaria y mediante el análisis de espectroscopía de energía dispersiva (EDX) se determinó que la composición química elemental de las frústulas de diatomeas encontradas en la Muestra DB01 (figura 22) está compuesta principalmente por silicio y oxígeno, además de algunos elementos trazas como el Na y Al que pueden estar relacionados con la presencia de algunos minerales arcillosos mientras que el S puede ser asociado a cenizas volcánicas procedentes del volcán de Paipa.

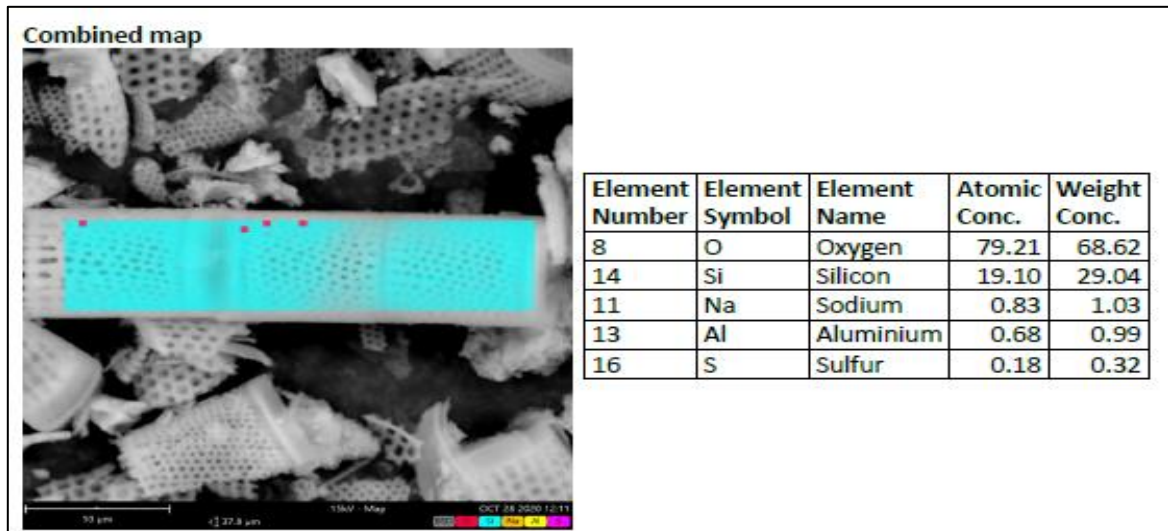


Figura 22. Análisis químico elemental de la Muestra DB01, área de una frústula de diatomea (zona azul) en el SEM (Cecoltec SAS, 2020).

6.5 Resultados de análisis químicos

6.5.1 Análisis por espectrometría de fluorescencia de rayos X (FRX)

La fluorescencia de rayos X es una técnica espectroscópica que tiene como finalidad principal el análisis químico elemental, tanto cualitativo como cuantitativo, de los elementos comprendidos entre el flúor (F) y el uranio (U) (Naranjo-Merchán et al. 2007).

Las mediciones se realizaron mediante el uso del espectrómetro de fluorescencia de rayos X de dispersión de energía, Epsilon 4 y con base en los datos suministrados por el análisis químico elemental (tabla 13), se definieron los elementos presentes en la muestra de la siguiente manera:

- Elementos mayores (>1%): SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 .
- Elementos menores (0,1-1%): SO_3 , CaO , P_2O_5 , TiO_2 , K_2O Y MnO .
- Elementos traza (<0,1%): SrO , NiO , CuO , ZrO_2 , Cr_2O_3 , ZnO Y PbO .

Elemento	Nombre	Concentración	Unidad
<i>Al₂O₃</i>	Aluminio	7.376	%
<i>SiO₂</i>	Silicio	85.666	%
<i>P₂O₅</i>	Fosforo	0.688	%
<i>SO₃</i>	Azufre	0.992	%
<i>K₂O</i>	Potasio	0.417	%
<i>CaO</i>	Calcio	0.951	%
<i>TiO₂</i>	Titanio	0.472	%
<i>Cr₂O₃</i>	Cromo	62.7	ppm
<i>MnO</i>	Manganeso	0.351	%
<i>Fe₂O₃</i>	Hierro	3.032	%
<i>NiO</i>	Níquel	101.5	ppm
<i>CuO</i>	Cobre	80.4	ppm
<i>ZnO</i>	Zinc	59.9	ppm
<i>SrO</i>	Estroncio	165.8	ppm
<i>ZrO₂</i>	Zirconio	75.9	ppm
<i>PbO</i>	Plomo	12.8	ppm

Tabla 13. Composición química de la Muestra DB01 (Cecoltec SAS, 2020).

6.5.2 Análisis de conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) de una disolución puede definirse como la capacidad de ésta para transmitir la corriente eléctrica y es proporcional al contenido de iones solubles (Andrades et al., 2015).



Figura 23. Muestra DB-01: prueba de conductividad eléctrica.

Las mediciones se realizaron para determinar la capacidad del material para dejar pasar corriente eléctrica a través de él, mediante el uso de un conductímetro, bajo condiciones de laboratorio a temperatura ambiente (figura 23), arrojando los siguientes resultados por duplicado presentados en la tabla 14:

Resultados
0,0005769 S/cm
0,00054285 S/cm

Tabla 14. Resultados de mediciones: conductividad eléctrica.

Se estimó un valor promedio de 0,00055988 S/cm. Sin embargo, al carecer de una muestra con la cual realizar una comparación relativa y de esta forma determinar si este valor es alto o bajo, se considera este resultado como una medida de línea base sobre la cual posteriormente será necesario comparar estos resultados con una muestra de interés, además de un análisis químico de qué tipo de iones solubles están presentes.

6.5.3 Análisis de pH

La acidez está condicionada por la presencia de protones (H+) o hidrogeniones (H₃O+) en el suelo, donde los resultados de pH menores a 7 corresponden a suelos ácidos, y mayores a 7 a suelos alcalinos (Andrades et al., 2015).



Figura 24. Muestra DB-01: prueba de potencial de hidrógeno.

Las mediciones se realizaron por el método potenciométrico para determinar el grado de acidez del material, mediante el uso de un pH metro, bajo condiciones de laboratorio a temperatura ambiente (figura 24), arrojando los siguientes resultados por duplicado presentados en la tabla 15:

Resultados
7,34 (24,1°C)
7,34 (23,9°C)

Tabla 15. Resultados de mediciones: potencial de hidrógeno.

Estimando un valor promedio de 7,34, lo que corresponde a un pH neutro-alcalino para la muestra DB01.

6.6 Resultados de análisis mineralógicos

6.6.1 Análisis de difracción de rayos X (DRX)

La difracción de rayos X es una de las técnicas más eficientes para determinar y cuantificar las especies mineralógicas de cualquier material, además de otras propiedades análogas (Vargas, 2007).

Las mediciones se realizaron mediante el uso del difractómetro de rayos x, Modelo Aeris en el laboratorio de Cecoltec, obteniendo el gráfico de difracción presente en la figura 25:

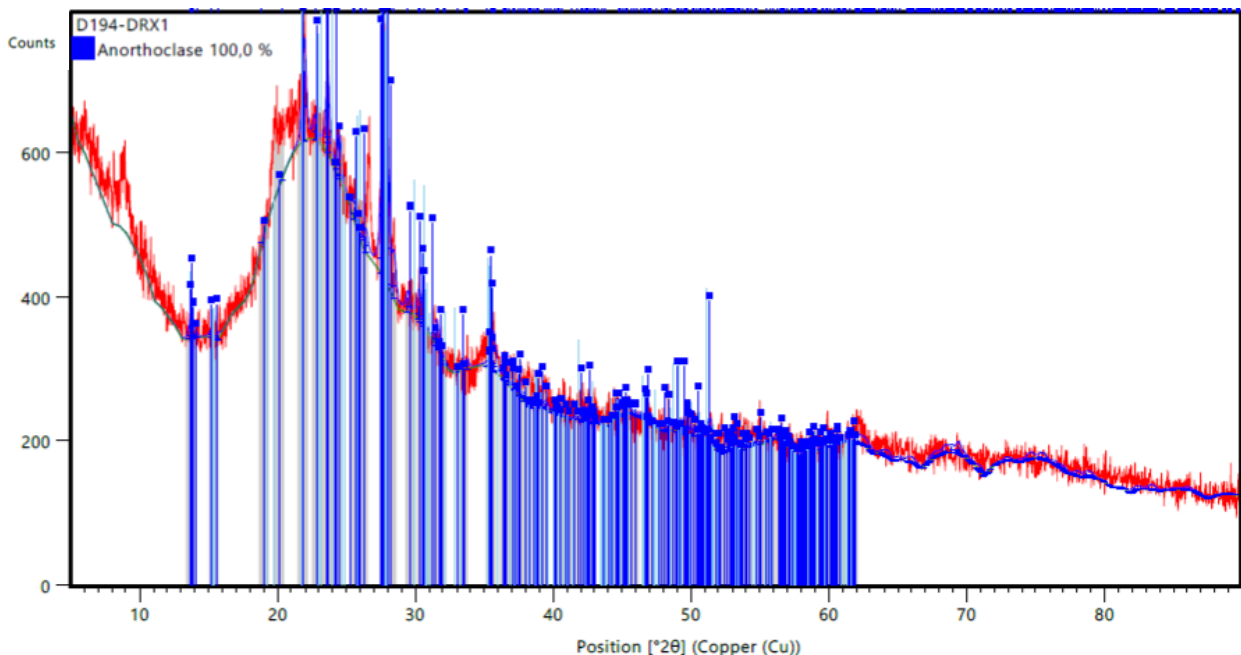


Figura 25. Análisis mineralógico de la Muestra DB01 (Cecoltec SAS, 2020).

Debido a que la fase asociada a la diatomita es amorfa, no tendría una reflexión directa en estos picos, pues la difracción refleja índices asociados a estructuras cristalinas; de esta forma, el mineral identificado se asocia con un feldespato del tipo “Anortoclasa (100%)”, lo que puede estar relacionado a la concentración de Al_2O_3 y CaO obtenida en

el análisis químico. Además, la fase cristalina no puede asociarse a una concentración específica de Na_2O , debido a que el equipo utilizado no presenta un nivel de detección que permita su identificación.

El background, que es el “ruido” que da la curva, puede suponerse asociado a la fase amorfa, sin embargo, esta no se confirmó.

La tabla 16 consolidada con los datos obtenidos de la caracterización realizada para la Muestra DB01, la cual permite una mejor interpretación de los resultados:

Resultados de interés	Muestra DB01	Unidades
Composición química (%)		
SiO ₂	85.666	%
Al ₂ O ₃	7.376	%
Fe ₂ O ₃	3.032	%
SO ₃	0.992	%
CaO	0.951	%
P ₂ O ₅	0.688	%
TiO ₂	0.472	%
K ₂ O	0.417	%
MnO	0.351	%
SrO	165.8	ppm
NiO	101.5	ppm
CuO	80.4	ppm
ZrO ₂	75.9	ppm
Cr ₂ O ₃	62.7	ppm
ZnO	59.9	ppm
PbO	12.8	ppm
Conductividad eléctrica		
	0,00055988	S/cm
pH		
		7,34
Densidad bulk		
	0,25	kg/m ³
Densidad específica		
		2,406
Distribución de tamaño de partículas		
Dv (10)	2,76	µm
Dv (50)	10,7	µm
Dv (90)	40,1	µm
Dv (100)	185	µm
Área de superficie específica		
	892,8	m ₂ /kg
Mineralogía		
Anortoclasa	100	%
Nota: No se expone la identificación de fases amorfas (% dominante real) presentes en la muestra debido a la técnica utilizada.		

Tabla 16. Resultados de la caracterización mineral de la Muestra DB01.

7. DIATOMITA PARA SU USO COMO BIOMINERAL EN LA NANOTECNOLOGÍA

Para esta sección se empleó la metodología de vigilancia tecnológica y de mercado, la cual consistió en el análisis de referentes científicos y tecnológicos que utilizaran la diatomita para diferentes aplicaciones en el campo de la nanotecnología.

La búsqueda de información se realizó a partir de diversos artículos consultados en el campo de aplicación de productos comerciales de diatomita para su uso en la nanotecnología; esto permitió detectar las tendencias de desarrollo de conocimiento a nivel científico y tecnológico (figura 26). Adicionalmente, se aplicó un análisis en términos del grado de alistamiento tecnológico (TRL), el cual consistió en clasificar cada una de las aplicaciones nanotecnológicas presentes en la tabla 17 con respecto a uno de los 9 niveles de madurez tecnológica que se extienden desde los principios básicos de una nueva tecnología hasta sus pruebas con éxito en un entorno real (COLCIENCIAS, 2017).

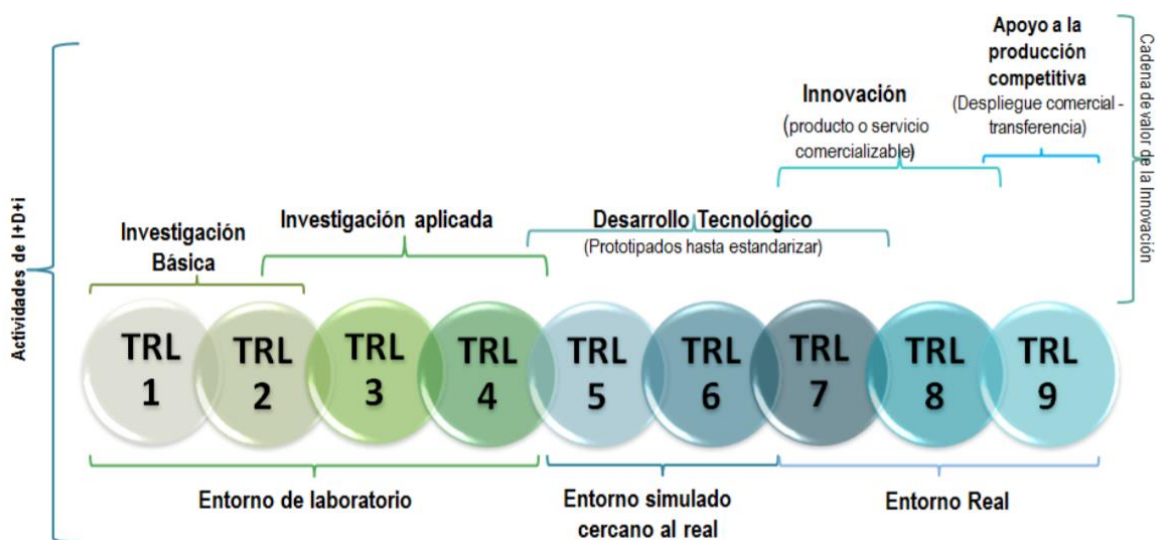


Figura 26. Niveles de alistamiento tecnológico (Colciencias, 2017).

En la tabla 17 se otorga un nivel de madurez tecnológica para cada una de las aplicaciones mencionadas, donde el uso de las frústulas diatomeas en el campo de la nanoestructuración 3D, la administración de fármacos, la adsorción de metales pesados y la clasificación de partículas y microfluidos presenta un TRL nivel 4, siendo validados en un entorno de laboratorio; mientras que su uso en la detección de gases,

inmunodiagnósticos y como cristal fotónico natural tiene un TRL nivel 3, representando un avance en términos experimentales de laboratorio y finalmente, a su uso como biosensor le fue otorgado un TRL nivel 2, puesto que, únicamente se ha presentado la formulación de la idea.

Recientemente, el uso de este material geológico ha demostrado una alta rentabilidad debido a que su manipulación no requiere de materiales costosos ni instrumentos sofisticados. Su principal atributo son las frústulas, siendo estas una fuente de nanomateriales de sílice que presentan una gran diversidad en sus dimensiones, debido a que su morfología difiere de una especie a otra, proporcionando un gran margen para la elección de una especie en particular que se adapte a un requisito específico en la creación de nanocompuestos tridimensionales deseados (Mishra et al., 2017). Las frústulas entonces demuestran ser particularmente útiles como material nano-intermedio (es decir, un material que ha sido obtenido a partir de la modificación de una materia prima original y que a su vez se convierte en una materia prima para un proceso posterior en el campo de la nanotecnología) al ser usado en diversos campos como las ciencias de la salud, el medioambiente y la industria electrónica.

A continuación, en la tabla 17 se presenta el resumen de la información analizada respecto a los avances en las aplicaciones nanotecnológicas mediante el uso de las frústulas diatomeas.

POTENCIAL NANOTECNOLOGICO	RESUMEN	TRL	REFERENCIA
Biosensor	Las frústulas diatomeas y su característica capacidad filtrante, puede ser controlada mediante la supervisión del tamaño de sus poros, por tanto la incorporación de estas frústulas diatomáceas en una Cámara específica de un biosensor podría llegar a conseguir un tráfico selectivo de moléculas y debido a su naturaleza extremadamente refractiva, estas frústulas amplifican la señal pudiendo ser usadas como sonda fluorescente.	2	Mishra, M., Arukha, A. P., Bashir, T., Yadav, D., & Prasad, G. B. K. S. (2017). All New Faces of Diatoms: Potential Source of Nanomaterials and Beyond. <i>Frontiers in Microbiology</i> , 8, 1–8.
Nanoestructuras 3D	Las frústulas de las diatomeas como plantillas porosas para metales nobles en el desarrollo de estructuras a escala nanométrica.	4	Losic, D., Mitchell, J. G., & Voelcker, N. H. (2006b). Fabrication of gold nanostructures by templating from porous diatom frustules. <i>New Journal of Chemistry</i> , 30(6), 908.
Cristal fotónico natural	Las frústulas diatomeas debido tanto a su composición silíceas como a sus geometrías 3D altamente simétricas, muestran características ópticas peculiares como cristales fotónicos.	3	De Stefano, L., Maddalena, P., Moretti, L., Rea, I., Rendina, I., De Tommasi, E., Mocella, V., & De Stefano, M. (2009). Nano-biosilica from marine diatoms: A brand new material for photonic applications. <i>Superlattices and Microstructures</i> , 46(1–2), 84–89.
Administración de fármacos	Las algas diatomeas han demostrado ser un sustituto del clásico silice sintético usado en farmacéutica, pues estas frústulas pueden modificarse inorgánicamente para transformarse así en un instrumento potencial en la liberación sostenida de fármacos.	4	Phogat, S., Saxena, A., Kapoor, N., Aggarwal, C., & Tiwari, A. (2021). Diatom mediated smart drug delivery system. <i>Journal of Drug Delivery Science and Technology</i> , 63, 102433.
Detección de gases	La emisión fotoluminiscente en las frústulas diatomeas se puede ver afectada por las más mínimas modificaciones en el entorno gaseoso circundante, alentando así a la investigación de las diatomeas como transductores biológicos de bajo coste para para la detección de especies gaseosas.	3	Lettieri, S., Setaro, A., De Stefano, L., De Stefano, M., & Maddalena, P. (2008b). The Gas-Detection Properties of Light-Emitting Diatoms. <i>Advanced Functional Materials</i> , 18(8), 1257–1264.
Adsorción de metales pesados	Las frústulas diatomeas son adsorbentes eficaces en la remoción de iones pesados como Pb en el agua, considerando de esta manera el uso de estas algas como un proceso competitivo y eficaz en la eliminación de metales pesados en cantidades de trazas.	4	Al-Degs Y, Khraisheh MA, Tutunji MF. Sorption of lead ions on diatomite and manganese oxides modified diatomite. <i>Water Res.</i> 2001 Oct;35(15):3724-8.
Clasificación de partículas y Microfluidos	La biosilice presente en las frústulas diatomeas proporciona a sus poros angulosidad, rigidez e inercia, características que dan a estas algas la capacidad de captación y clasificación de partículas en superficies más allá de las capacidades de otros microbios.	4	Losic, D., Mitchell, J. G., & Voelcker, N. H. (2009c). Diatomaceous Lessons in Nanotechnology and Advanced Materials. <i>Advanced Materials</i> , 21(29), 2947–2958.
Inmunodiagnosticos	Las frústulas diatomeas pueden adaptarse químicamente para para unir a ella anticuerpos y moléculas bioactivas.	3	Mishra, M., Arukha, A. P., Bashir, T., Yadav, D., & Prasad, G. B. K. S. (2017). All New Faces of Diatoms: Potential Source of Nanomaterials and Beyond. <i>Frontiers in Microbiology</i> , 8, 1–8.

Tabla 17. Aplicaciones en el campo de la nanotecnología. *El amarillo representa la aplicación seleccionada para este estudio.

De acuerdo con la información recopilada, se seleccionó la aplicación de interés para evaluar el potencial preliminar de la muestra de estudio, relacionada al uso en administración de fármacos, capaz de superar limitaciones farmacéuticas convencionales como complejidad, costos elevados e implicación de productos químicos y residuos tóxicos.

De acuerdo con Maher et al. (2018), las frústulas diatomeas presentan numerosas ventajas al ser comparadas con las micropartículas sintéticas de sílice usadas en la actualidad, lo que las convierte en un prometedor portador de fármacos debido a su gran disponibilidad en muchas áreas del mundo, elevada área superficial, baja densidad, porosidad a escala nanométrica, nula toxicidad, química superficial modificable, entre otras.

Aunque la diatomita, a diferencia de las frústulas de diatomeas cultivadas, es un material más barato producido en toneladas por la industria minera, sorprendentemente, se había utilizado de manera escasa en la industria de la biomedicina (Rea et al., 2014).

En el sistema inmune, el ARNip es una clase de ARN bicatenario interferente con una longitud de 20 a 25 nucleótidos, y a su vez una poderosa herramienta molecular para el tratamiento del cáncer, pero su administración es ineficaz debido a la dificultad de penetrar la membrana celular. El nanoconjugado de ARNip-diatomita puede ser muy adecuado para la administración de terapias a las células cancerosas. Esta aplicación impulsa el uso de nanopartículas de diatomita para el transporte de pequeños ácidos ribonucleicos interferentes (ARNip) dentro de las células cancerosas epidermoides humanas (Rea et al., 2014).

En esta aplicación, nanoportadores de diatomita porosa, con un diámetro promedio menor a 450 nm, son bioconjugados con ácido ribonucleico interferente pequeño (ARNip) para probar su capacidad de administración de fármacos (figura 27). El ARNip es un método poderoso para silenciar genes asociados con una variedad de condiciones patológicas, sin embargo, su administración sistémica es ineficaz debido a la dificultad de penetrar la membrana celular; su combinación con nanovectores (liposomas, oro,

de la nanomedicina que esta aplicación se desarrollará en el objetivo número cuatro, asociado a la agregación de valor de este interesante material.

En términos de la relación de esta aplicación con los ODS's (objetivos de desarrollo sostenible) como uno de los impactos fundamentales y de contribución a estrategias de carácter mundial, se puede establecer una asociación directa con al menos 3 de los objetivos de desarrollo sostenible, los cuales son: El ODS 3. "Salud y bienestar", contribuyendo al campo de la biomedicina para el tratamiento de enfermedades como el cáncer, el ODS de innovación debido a que introduce novedades y que se refiere a modificar elementos ya existentes y el ODS 12. "Producción y consumo responsable", debido a los bajos costos que genera el uso de este material y su mínimo impacto ambiental al requerir pocos procesamientos en su producción.

8. PROPUESTA DE UNA POSIBLE RUTA DE AGREGACIÓN DE VALOR PARA LA DIATOMITA DE ESTUDIO (MUESTRA DB01)

Se conoce como agregación de valor a los procesamientos que involucran la transformación de materias primas para generar un producto o readecuar uno ya existente (Espinoza et al., 2020). En la actualidad, el desarrollo de la ciencia ha permitido manipular la materia a escalas nanométricas, lo que se conoce como nanotecnología.

La diatomita natural generalmente está contaminada por residuos orgánicos y óxidos inorgánicos. Las aplicaciones biomédicas requieren fuertes tratamientos de purificación de microcapas para obtener sílice pura como material seguro y biocompatible (Rea et al., 2014).

Teniendo en cuenta las características de procesamiento empleadas en las evaluaciones de laboratorio del artículo de referencia "Diatomite biosilica nanocarriers for siRNA transport inside cancer cells (Rea et al., 2014)" e información complementaria de la literatura, se define que la ruta de agregación de valor más representativa para la muestra de estudio debe relacionarse con el procesamiento de la muestra para eliminar las diferentes impurezas (minerales asociados) y la modificación superficial para proveer las

características físico-químicas requeridas para evaluar su posible desempeño en la aplicación definida.

A continuación, se presenta la ruta de preparación de la muestra y las técnicas de caracterización empleadas en el artículo “Diatomite biosilica nanocarriers for siRNA transport inside cancer cells (Rea et al., 2014)”:

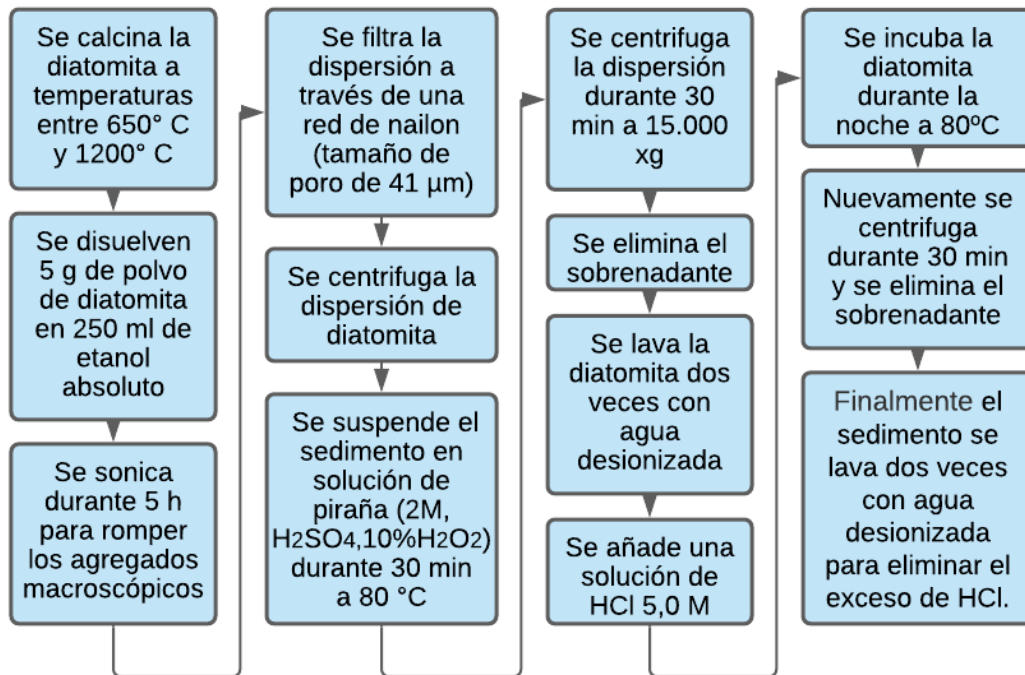


Figura 28. Flujograma de la ruta de preparación de diatomita con tratamiento en ácido caliente según Rea et al (2014) en el artículo “Diatomite biosilica nanocarriers for siRNA transport inside cancer cells”.

Términos clave:

- Calcinar: Someter al calor una materia para que, al descomponerse, desprenda todas las sustancias volátiles.
- Sonicar: es el acto de aplicación de la energía del sonido (generalmente ultrasonidos) para agitar las partículas de una muestra, con diversos fines científicos o industriales.

- Centrifugar: es un método por el cual se pueden separar sólidos de líquidos de diferente densidad por medio de una fuerza giratoria.
- Incubar: Mantener una temperatura y humedad óptima garantizando también otras condiciones tales como el contenido de dióxido de carbono (CO₂) y oxígeno presentes en una muestra.

En el artículo, los espectros EDX mostraron cambios en la composición química de las muestras: las intensidades de los contaminantes correspondientes a calcio, hierro y aluminio disminuyeron, mientras que el contenido de sílice aumentó, como se evidencia en la tabla 18.

Compounds	Before purification treatment (%)	After purification treatment (%)
SiO ₂	92.1	94.6
Al ₂ O ₃	3.3	2.7
K ₂ O	1.0	0.8
CaO	1.8	0.9
Fe ₂ O ₃	1.8	1.0

Tabla 18. Composición química de las frústulas antes y después de los tratamientos de purificación (Rea et al., 2014).

Esta información es clave para la selección del procesamiento, puesto que, la muestra DB01 cuenta con picos de contaminantes similares, lo que infiere un posible resultado análogo.

9. DISCUSIÓN

Teniendo en cuenta los procesos de agregación de valor requeridos para el uso de las nanopartículas de diatomita como portadores no tóxicos para el transporte de ARNip en células cancerosas y las propiedades de la muestra de estudio DB01 correspondientes a ambiente de formación y caracterización, se discutieron las posibles asociaciones y resultados esperados para su evaluación preliminar como materia prima para este uso específico.

Tras la identificación de los departamentos con depósitos de diatomita en Colombia, se concluyó que Cundinamarca y Boyacá disponen de diatomita perteneciente a la Formación Tilatá, ubicada en el Altiplano Cundiboyacense en la Cordillera Oriental, donde actualmente se desarrollan la mayoría de las solicitudes y títulos mineros para este mineral, según el Catastro Minero Colombiano (2020). Mientras que, la diatomita presente en el departamento de Valle del Cauca pertenece a una formación distinta (Fm Zarzal) ubicada en la Cordillera Occidental. De esta forma se seleccionó el municipio de interés, correspondiente a Tuta ubicado en el departamento de Boyacá.

Asimismo, se propone la hipótesis de la evolución de la formación de los depósitos de Tuta, donde según la literatura, el aporte de sílice para la proliferación de las diatomeas pudo provenir de la segunda erupción del volcán de Paipa, lo que generaría la colmatación de los lagos adyacentes y su posterior paso a la formación de depósitos erosionales, conservados en la Formación Tilatá, la cual comprende la diatomita estudiada de la Muestra DB01.

Para la ruta de agregación de valor se tuvo en cuenta el artículo de referencia “Diatomite biosilica nanocarriers for siRNA transport inside cancer cells” donde Rea et al. (2014) ratifica el uso de diatomita para el silenciamiento de genes en células cancerosas, argumentado en la posible modificación de la superficie de estas frústulas diatomeas mediante procesos de purificación.

Por consiguiente, para evaluar su uso preliminar en esta aplicación, se caracterizaron las propiedades intrínsecas de la muestra de estudio, mediante análisis de pH, densidad bulk, densidad específica, CE, FRX, SEM, DTP y DRX; dando como resultado que los contaminantes como el hierro y el aluminio presentes en la muestra pueden ser disminuidos mediante procesos de calcinación y tratamientos en ácido caliente, aumentando a su vez el porcentaje de sílice (Rea et al., 2014).

En cuanto al tamaño de poro y de partícula analizados mediante las pruebas SEM y DTP, la Muestra DB01 cumple con los estándares mencionados por Rea et al. (2014) (<450 nm y <40 μ m, respectivamente), además de que los resultados de baja densidad bulk y

específica confirman la alta porosidad de la muestra, cualidad eficiente para su desarrollo en esta y otras aplicaciones pioneras del futuro, como el uso de diatomita en la elaboración de microcápsulas para la administración oral de fármacos y nanopartículas de albúmina-lípido (DNP) para la administración intravenosa en aplicaciones in vivo (Rea et al., 2014). La prueba DTP además, arrojó resultados que indican una elevada área superficial, datos que se asocian a su taxonomía predominante *Aulacoseira Granulata*. Del mismo modo, los resultados de pH y conductividad eléctrica también respaldan nuestra premisa, puesto que la muestra arroja una medida neutro-alcalina y una conductividad baja, datos que son favorecidos por su ambiente de formación.

El propósito de este proyecto no sólo es mencionar la metodología para abordar proyectos con este alcance específico, sino también incentivar a futuros geólogos y empresas a la exploración de la diatomita en Colombia, con el objetivo de impulsar el desarrollo de más investigaciones que permitan desarrollar investigaciones aplicadas con miras a el desarrollo de productos tecnológicos en base a este importante material, entre ellos permitiendo el entendimiento de las interacciones y los procesos de formación del biosilice por organismos biológicos, según el reconocimiento de sus características poco comunes, como lo son su toxicidad nula, estructura porosa, baja densidad aparente, ligera abrasividad, inercia química, alta capacidad de absorción y gran disponibilidad en muchas áreas del mundo, permitiendo acceder más fácilmente al desarrollo de sofisticados materiales nanoestructurados.

Es valioso mencionar, que el uso de diatomita como insumo en la producción de productos innovadores, no sólo permite satisfacer necesidades particulares y de subsistencia, sino que también representa unos de los principales ejes de desarrollo económico mundial, lo que permite su competencia en el mercado actual, según su explotación y producción. Se confirma, además, que la demanda de este biomineral se ve influenciada por su progreso en el mercado internacional (tabla 3), debido a su aumento anual en la exportación de los principales países del mundo, como lo es por ejemplo Estados Unidos (tabla 2); además de proporcionar un gran margen para la elección de una especie en particular que se adapte a un requisito específico, debido a

la gran diversidad en sus dimensiones, donde su forma difiere de una especie a otra, permitiendo su uso en aplicaciones como biosensores, nanoestructuras 3D, cristales fotónicos naturales, detección de gases, adsorción de metales pesados, clasificación de partículas y microfluidos e inmunodiagnósticos (tabla 17).

Aunque es necesario estimar la viabilidad técnico-económica de los procesos requeridos en etapas piloto e industrial, se estima que su aporte en la innovación de la nanotecnología y más específicamente en el de la biomedicina, puede ser de alto impacto, al tiempo que abre una línea de desarrollo comercial en un insumo mineral que actualmente no registra desarrollos comerciales de alto valor agregado en Colombia, promoviendo de esta forma el avance hacia un país más sostenible.

10. CONCLUSIÓN

Con base en los procesos de caracterización realizados sobre la Muestra DB01, se propone que en Colombia pueden existir depósitos de diatomita que cuenten con las propiedades fisicoquímicas y mineralógicas que permiten abordar desarrollos de productos de base nanotecnológica específicamente como insumo nanoportador no tóxico en la administración de fármacos para el transporte de ARNip en células cancerosas, una vez sean sometidos a procesos de agregación de valor como los mencionados en este estudio y, de ser necesarios complementados con los requeridos según variaciones específicas en su composición mineralógica de las muestras usadas para este fin.

11. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

- Realizar actividades de exploración y/o de geología de detalle en campo de los diferentes sitios en Colombia con ocurrencia de Diatomitas, con el fin de complementar la información recopilada en el presente estudio, de manera que se logren precisar aspectos cartográficos, descripciones geológico-mineras que permitan definir con mayor

precisión características de los ambientes de formación y asociaciones más relevantes, lo cual es determinante para establecer usos potenciales.

- Caracterizar los depósitos de diatomita en los departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca, para determinar su posible ruta de agregación de valor, en miras de desarrollar nuevos potenciales de uso para las diatomitas presentes en estas regiones.

- Complementar la caracterización mineralógica realizada en este proyecto, mediante análisis de laboratorio de TGA (análisis termogravimétricos) y DRX, que permitan identificar de manera exacta el tipo y la cantidad de cada fase amorfa y cristalina presente en la muestra de estudio.

- En términos de las pruebas de laboratorio, complementar los análisis realizados con los requeridos a nivel del desempeño esperado y aplicar mediciones con validez estadística.

- Identificar tratamientos complementarios de purificación para diatomitas, con el fin de minimizar el contenido de impurezas que reduzcan la viabilidad de este material en el uso industrial, para la muestra de estudio, una vez se tengan los nuevos resultados de mineralogía por TGA y DRX.

- Validar de forma experimental, a escala de laboratorio, la ruta de agregación de valor, presentada en el proyecto presente, con el ideal de continuar el desarrollo de esta línea innovadora de uso de la diatomita como insumo mineral nanotecnológico en Colombia.

- Dar a conocer el potencial de la diatomita en Colombia en entidades educativas y gubernamentales, con el fin de incrementar el interés por su uso y desarrollo tecnológico, con el fin de aumentar su producción en el mercado nacional y competir en un futuro a nivel internacional.

12. BIBLIOGRAFÍA

ACOSTA, J. (2002) Estructura, Tectónica y Modelos de 3D del Piedemonte Occidental de la Cordillera Oriental y del Valle Medio del Magdalena, Colombia. Bogotá: Publicaciones Especiales del Ingeominas, N.o 25.

Al-Degs Y, Khraisheh MA, (2001) Tutunji MF. Sorption of lead ions on diatomite and manganese oxides modified diatomite.

Andrades, M., Moliner, A., Masaguer, A. (2015). Métodos didácticos para análisis de suelos. Universidad de la Rioja.

ASTM C 29/C 29M-97, Standard Test Method for Bulk density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate, Vol 04.02 American Standards of Testing of Materials, Edition 2003.

Aw M.S., Simovic S., Yu Y., Mensah J.A., Losic D., (2012) Porous silica microshells from diatoms as biocarrier for drug delivery applications, Powder Technol. 22352–58.

Barron, J.A., (1987), Diatomite-environmental and geologic factors affecting its distribution, in Hein, J.R., ed., Siliceous sedimentary rock-hosted ores and petroleum: New York, Van Nostrand Reinhold, p. 164–178.

Bozarth, A., Maier, U.G., Zauner, S. (2009). Diatoms in biotechnology: modern tools and applications. Applied Microbiology and Biotechnology, 82(2), 195-201.

Boinet, T., Bourgois, J., Mendoza, H., Vargas, R. (1989). La Falla de Bucaramanga (Colombia): Su función durante la Orogenia Andina. Revista Norandina, Bogotá, Vol. 11, pp. 3-10.

Borgel, I., (2007). Caracterización del yacimiento de diatomita de Loma Larga, municipio de Acatlán, Hidalgo y evaluación de sus aplicaciones alternas: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México.

Cooper, M.; Adisson, F.; Álvarez, R.; Coral, M.; Graham, R.; Hayward, A.; Howe, S.; Martínez, J.; Naar, J.; Peñas, R.; Pulham, J.; Tabora, A. (1995): "Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia". AAPG Bulletin, 79 (10): 1421-1443.

COLCIENCIAS. (2017). Guía técnica para el reconocimiento de centros de desarrollo tecnológico y centros de innovación y productividad. Reconocimiento de actores, 1–43.

Coordinación general de minería de México, (2013). Perfil de mercado de la diatomita.

De Stefano, L., Maddalena, P., Moretti, L., Rea, I., Rendina, I., De Tommasi, E., Mocella, V., & De Stefano, M. (2009). Nano-biosilica from marine diatoms: A brand new material for photonic applications. *Superlattices and Microstructures*, 46(1–2), 84–89.

Dirección General de Desarrollo Minero. (2017). Perfil de mercado de la diatomita. Secretaría de Economía. (México).

Dolley, T., & Moyle, P. (2003). History and Overview of the U.S. Diatomite Mining Industry, with Emphasis on the Western United States. USGS, 2209(E), 1–8.

Espinoza, O., Moreira, L., & Luna, L. (2020). Agregación de valor en emprendimientos de economía popular y solidaria. *Dilemas contemporáneos: Educación, Política y Valores*, 1–17.

Farelo, E. y Parra, G. (2004): Estudio de la neotectónica y su influencia en el corredor industrial de Boyacá. Tesis de grado: Ingeniería Geológica. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Fisher R.V., Schmincke, H.U., (1984). *Pyroclastic rocks*. SpringerVerlag (Eds.), New York. 409 p.

García, J. G., Real, J. R., Guzmán, C. G., & Coromoto, B. C. (2007). Caracterización de nano estructuras de tierras diatomáceas y su uso potencial en la descontaminación del agua.

García, M., Heredia, A., Figueira, E., (2013). Sílice de las algas diatomeas (clase Bacillariophyceae) como material complejo y su importancia nanotecnológica. *La granja*. Ecuador.

Guadalupe, M., Gabriel, J., Garduño, G., Cañetas, J., & Ortega, M. (2005). Diatoms of three bodies of water from wetlands Jilotepec-Ixtlahuaca, Estado de México. *Hidrobiológica*, 15(No. 1), 1-26.

Hammen, T., & Perada, A. (1956). Ministerio de Minas y Petróleos. Investigación de algunos importantes yacimientos de diatomea caolin y arcillas de la Sabana de Bogotá, 1-32.

Heredia, A., (2013). Sílice de las algas diatomeas como material complejo y su importancia natotecnológica. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

IMERYS-Minerals, (2015). <http://www.perfiltra.com/pages/minerals>.

INGEOMINAS. (2009). Mapa geológico de diatomitas Tuta (Boyacá).

Instituto geológico y minero de España. (1976). Estudio Económico Y Tecnológico Para Explotación Y Aprovechamiento De Las Rocas Industriales.

Instituto geológico y minero de España. (2018). Diatomita y trípulin.

International Organizing Committee for the World Mining Congresses. (2020). World Mining Data 2020 (N.o 35).

Ipohorski, M., & Bozzano, P. (2013). Microscopía electrónica de barrido en la caracterización de materiales. *Ciencia e investigación*, 63(3), 43–53.

Lettieri, S., Setaro, A., De Stefano, L., De Stefano, M., & Maddalena, P. (2008b). The Gas-Detection Properties of Light-Emitting Diatoms. *Advanced Functional Materials*, 18(8), 1257–1264.

Losic, D., Mitchell, J. G., & Voelcker, N. H. (2006b). Fabrication of gold nanostructures by templating from porous diatom frustules. *New Journal of Chemistry*, 30(6), 908.

Losic, D., Mitchell, J. G., & Voelcker, N. H. (2009c). Diatomaceous Lessons in Nanotechnology and Advanced Materials. *Advanced Materials*, 21(29), 2947–2958.

Maher S., Kumeria T., Aw M.S., Losic D., (2018) Diatom silica for biomedical applications: recent progress and advances, *Adv. Healthc. Mater.* 71800552.

Malvern Panalytical, (2020) Análisis de tamaño de partículas con difracción de láser. <https://www.malvernpanalytical.com/es/products/technology/lightscattering/laser-diffraction>.

Manosalva, S., Perez, F., Gavidia, O., Porras, J., Gaitan, N., Alvarez, L., & Farfan, J (2009). cartografía y caracterización de diatomitas sector Siachoque – Tuta, departamento de Boyacá. *Ingeominas*, 1-134.

Manosalva, S., Amaya, E., Gil, M., Pérez, F., Perez, O., & Martinez, M. (2010). Cartografía y caracterización de diatomitas sector Tunja-Soracá-Oicatá-Tuta, departamento de Boyacá. *Ingeominas*, 1-134.

MINISTERIO DE TRANSPORTE, INSTITUTO NACIONAL DE VIAS I.N.V. E – 128 – 07. Bogotá D.C: INVIAS, 2013.

Mishra, M., Arukha, A. P., Bashir, T., Yadav, D., & Prasad, G. B. K. S. (2017). All New Faces of Diatoms: Potential Source of Nanomaterials and Beyond. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1–8.

Moreno, E. (2017). Evaluación económica de los impactos ambientales generados en el proyecto de explotación de carbón mineral en la vereda agua blanca del municipio de Tuta, departamento de Boyacá. Facultad de ciencias contables, económicas y administrativas, 1–87.

Moyle, P., & Dolley, T. (2003). With or Without Salt - a Comparison of Marine and Continental-Lacustrine Diatomite Deposits. *Contributions to Industrial-Minerals Research*, D, 1-8.

Naranjo-Merchán, W., Gaviria-Melo, S., Manosalva-Sánchez, S., (2007). Mineralogía y Geoquímica de Diatomitas (Boyacá, Colombia): *Geología colombiana*, 32, pp. 77-88. Bogotá.

PARDO, N. 2004. Estratigrafía de las vulcanitas asociadas al volcán de Paipa, municipios de Paipa y Tuta, Departamento de Boyacá, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Trabajo de grado. Inédito. 163 p. Bogotá.

Pardo, N., Cepeda, H., Jaramillo, J, M, (2005). The Paipa Volcano Eastern Cordillera of Colombia, South america: Volcanic stratigraphy. *Earth sciences research journal*. Vol 9, No. 1, 3-18.

Phogat, S., Saxena, A., Kapoor, N., Aggarwal, C., & Tiwari, A. (2021b). Diatom mediated smart drug delivery system. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 63, 102433.

Price, M., Walsh, K., (2005). *Pocket Nature Rocks And Minerals*. (Gran Bretaña). Editorial Dorling Kindersley.

Prieto R., G., Guatame, C. L. y Cárdenas, S. C. (comps). (2019). Recursos minerales de Colombia, vol. 1. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Rea, I., Martucci, N. M., De Stefano, L., Ruggiero, I., Terracciano, M., Dardano, P., Migliaccio, N., Arcari, P., Taté, R., Rendina, I., & Lamberti, A. (2014). Diatomite biosilica nanocarriers for siRNA transport inside cancer cells. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects*, 1840(12), 3393–3403.

Sandoval, J. (1953). Yacimientos de diatomita en el Valle del Cauca. *Ministerio de Minas y Petroleos*, 31-58.

U.S. Geological Survey, (2021), Mineral commodity summaries 2021: U.S. Geological Survey, 200 p.

Valencia, A. (2014). Utilización de diatomitas para desalinizar aguas de mar. *Universidad Nacional de San Agustín*, 1–81.

VAN DER HAMMEN (1960): Estratigrafía del Terciario y Maastrichtiano continentales y tectogénesis de los Andes Colombianos. *Servicio Geológico Nacional, Informe 1279*.

Vargas, E., Jiménez, G., & Naranjo, W. (2007). CARACTERIZACIÓN DE DIATOMITA POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 4(1), 1–4.

Veritrade Business. (Enero de 2021). Veritrade Business página web. Obtenido de <https://business2.veritradecorp.com/es/mis-busquedas>