

DIATOMITAS

DIATOMITAS:

**Geología, caracterización y potencial uso industrial
(Boyacá, Colombia)**

**Sandra Rocío Manosalva Sánchez
Wilson Enario Naranjo Merchán**



**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
COLCIENCIAS**

**Sogamoso
2009**

Diatomitas: geología, caracterización y potencial uso industrial (Boyacá, Colombia) / Sandra Rocio Manosalva Sánchez y Wilson Enario Naranjo Merchán. – Sogamoso: Uptc; Colciencias, 2009. 67p.: il. – (Colección investigación Uptc, no. 24) Incluye bibliografía – ISBN 978-958-660-143-6
1. Diatomitas – Boyacá (Colombia). -- 2. Diatomeas – Boyacá (Colombia). – 3. Boyacá (Colombia) - Geología. - I. Manosalva Sánchez, Sandra Rocio. - II. Naranjo Merchán, Wilson Enario. – II. Tit. – III. Ser. CDD 551.09861 / M285

Primera edición, 2009
500 ejemplares

Diatomitas. Geología, caracterización y potencial uso industrial (Boyacá, Colombia)

ISBN 978-958-660-143-6

Colección investigación Uptc; n.º 24

- © Sandra Rocío Manosalva Sánchez, coord.
- © Wilson Enario Naranjo Merchán, coord.
- © Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
- © Colciencias

Alfonso López Díaz, Rector
Wilson Alcides Valenzuela Pérez, Vicerrector Académico
Manuel Humberto Restrepo Domínguez, Director de Investigaciones
José Jairo Espitúa Niño, Decano Facultad Seccional Sogamoso
Héctor Antonio Fonseca Peralta, Director Grupo de Investigación Ingeniería Geológica

Resultado del proyecto de investigación Uptc - Colciencias “Evaluación del uso industrial de diatomitas, sector Tunja-Chivatá (Boyacá, Colombia)”. Código: 1109-332-18816. Realizado por el Grupo de Investigación Ingeniería Geológica.

Coordinación editorial: Yolanda Romero A.
Corrección de estilo: Luis Enrique Clavijo Morales

Libro financiado por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - COLCIENCIAS y la Dirección de Investigaciones de la Uptc

Prohibida la reproducción parcial o total, por cualquier medio, sin la autorización expresa y escrita de los titulares de los derechos de autor.

Impresión:
Grafimpresos
Av. San Martín No. 13A-103
Teléfono: (0*8) 770 6291, Telefax: (0*8) 771 7949
grafimpreso@yahoo.com
Sogamoso - Boyacá - Colombia

*A Santiago, Sara y Sebastian por ser la inspiración
para tratar de ser cada día mejores personas.*

*A nuestros Padres, Francisco y Filomena, Pablo
Enario y Martha Helena, por ser los primeros y
mejores profesores de nuestras vidas.*

Agradecimientos

A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Uptc) y al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (Colciencias), entidades que brindaron el apoyo económico para el desarrollo del proyecto "Evaluación del uso industrial de diatomitas, sector Tunja-Chivatá (Boyacá, Colombia)", código: 1109-332-18816.

Al Grupo de Investigación de Ingeniería Geológica, en especial a los profesores Orlando Vergel y Efraín García, por el apoyo brindado; a los estudiantes del semillero "Minerales Industriales de Colombia" de Ingeniería Geológica, por el entusiasmo y dedicación, en especial a aquellos que fueron becarios, Óscar Gavidia, Carlos Vargas, Yaneth Flórez, Mery Luz Muñoz, Gabriela Jiménez, Leidy Álvarez, Andrea Gaitán, Luis Naranjo, David Sanabria, Omar Pérez y Yannela Albarracín; al técnico del Laboratorio de Petrografía, Carlos Vargas Vargas por ser copartícipe; al grupo de trabajo de la Dirección de Investigaciones, DIN, de la Uptc, por su permanente ayuda en los procesos administrativos.

Contenido

	Página
Presentación	9
1. INTRODUCCIÓN A LAS DIATOMITAS	11
2. GEOLOGÍA DE LOS DEPÓSITOS	21
3. CARACTERIZACIÓN DE LAS DIATOMITAS	35
4. PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE LAS DIATOMITAS	49
5. POTENCIAL USO INDUSTRIAL	59
Bibliografía.....	65

Presentación

Esta publicación entrega parte de los resultados de la investigación "Evaluación del uso industrial de diatomitas, sector Tunja-Chivatá (Boyacá, Colombia)", ejecutada por el *Grupo de Investigación Ingeniería Geológica*, de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, con el apoyo del Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - Colciencias. Contiene información básica sobre qué es una diatomita, cómo se forma, dónde se encuentra y para qué se usa, e involucra la tectónica y estratigrafía de los depósitos, así como la química, la física, la mineralogía y la taxonomía, bases para determinar su aplicación industrial. Los datos presentados corresponden al estudio realizado en los depósitos de Tunja, Siachoque y Chivatá.

En el país, hasta la fecha, no se han publicado estudios detallados de caracterización de diatomitas y su potencial uso, por lo que este libro se constituye en un marco de referencia para el desarrollo de proyectos de diatomita; además, por el desarrollo del proceso metodológico, puede ser utilizado como base para el estudio de otros minerales industriales. En particular, está realizado para los interesados en conocer acerca de materiales versátiles por su diversa aplicación y particulares por su morfología, como lo es la diatomita, o para aquellos que manejen este material y deseen hacer comparaciones o buscar propiedades o aplicaciones industriales específicas.

Capítulo 1

Introducción a las diatomitas

Introducción

Se presentan en este capítulo aspectos generales sobre las diatomitas y diatomeas, se describen los antecedentes de la investigación que permitió obtener los resultados publicados en este libro y se muestra el panorama de la ocurrencia y mercado de las diatomitas, a nivel mundial y nacional, que justificó la realización del estudio sobre este material.

1.1 Diatomitas y diatomeas

Las diatomitas son las rocas, y las diatomeas, sus constituyentes.

La diatomita es una roca silíceas, sedimentaria, constituida por diatomeas; de color blanco a crema, suave al tacto, con una apariencia similar a la tiza, químicamente inerte -en la mayoría de químicos y gases-, porosa (poros $<1\mu\text{m}$), con alta capacidad absorbente y baja densidad aparente ($<1\text{g/cm}^3$), lo que le permite flotar en el agua cuando no está saturada. La baja densidad y la porosidad ($>40\%$) determinan sus usos como material filtrante, como relleno en pinturas, en papel y plásticos, como material aislante térmico y sonoro, como medio catalítico y como soporte cromatográfico, entre otros (Ramos et ál., 2007), (figura 1.1).

Las diatomeas son plantas acuáticas unicelulares, eucariontes y fotosintéticas. Sus estructuras fosilizadas están conformados por ópalo-A, de fórmula $\text{SiO}_2 \times n\text{H}_2\text{O}$, cuyo contenido de agua varía entre 4 y 9% (Dress, 1998).

Con base en el estudio de crecimiento de diatomeas modernas, se sabe que proliferan en medios acuosos, tanto en aguas dulces como marinas; las de agua dulce, en ríos y lagos, pueden formar parte del plancton o del bentos. Las diatomeas son autótrofas, es decir, crecen sintetizando sus materiales a partir de sustancias inorgánicas sencillas, como el CO_2 (Flórez y Lozano, 1999), (figura 1.2).

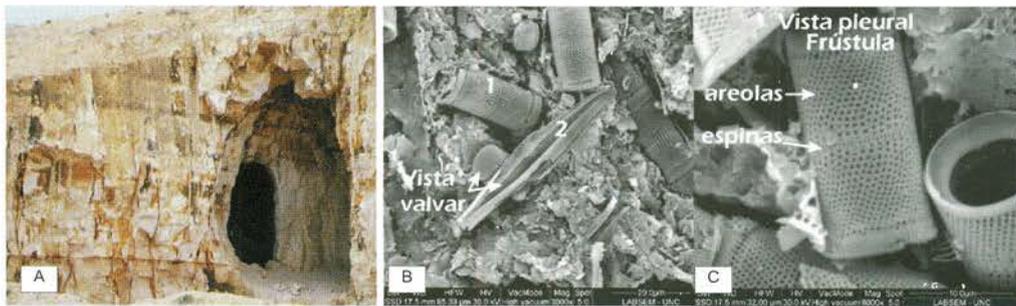


Figura 1.1. A. Diatomita del municipio de Siachoque. B y C. Imágenes en el microscopio electrónico de barrido (MEB) de diatomeas fósiles del área de Chivatá. B. Diatomita compuesta por fragmentos de frústulas de diatomeas y minerales arcillosos, 1-diatomea del orden centrales y 2-diatomea del orden pennales. C. Vista pleural de la frústula de diatomea, en donde se observan las areolas y espinas que unen a las dos valvas.

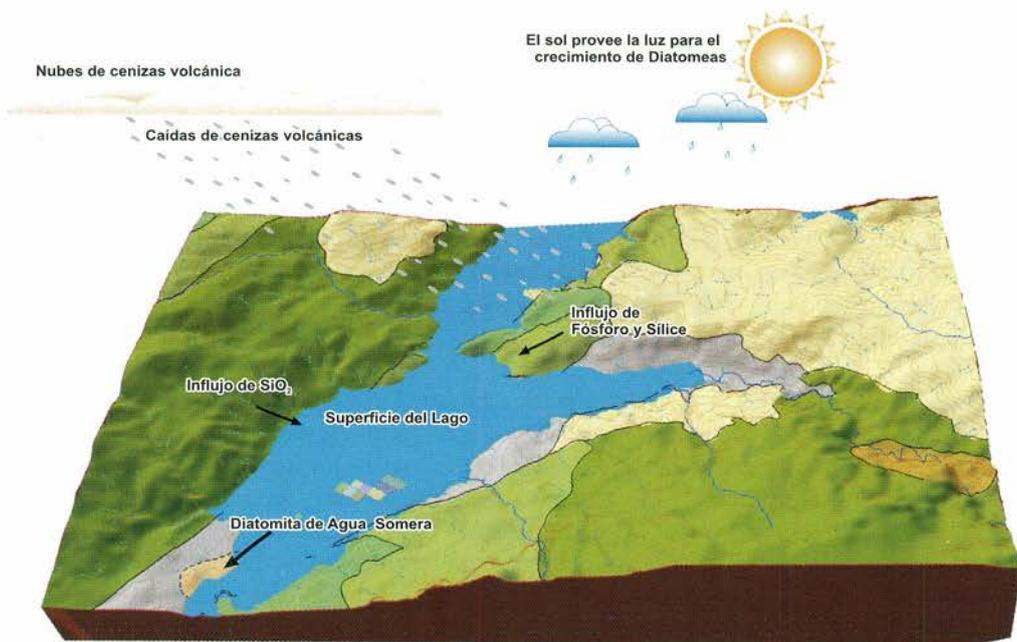


Figura 1.2. Ambiente de formación de las diatomitas. Modelo del área de estudio, sector Siachoque

Estos organismos tienen la capacidad de extraer de su hábitat natural acuoso la sílice con la que forman sus frústulas, y el fósforo, su principal nutriente; la sílice puede provenir de diferentes fuentes: por solución en corrientes, por reacción de las rocas adyacentes con el agua del lago y por el influjo de cenizas volcánicas, y el fósforo, en su mayoría, procede de la meteorización de rocas adyacentes (Dolley & Moyle, 2003).

Cuando las diatomeas mueren se hunden dentro del medio acuoso, formando un sedimento de carácter orgánico; la descomposición del residuo orgánico deja paso a la acumulación de los caparzones silíceos, que se van compactando para convertirse en los depósitos potenciales de diatomita. Acumulaciones de diatomeas en algunos lagos ocurrieron hace miles de años, para producir capas espesas de este material; las diatomeas fósiles más antiguas conocidas son especies marinas del Jurásico inferior; mientras que las de agua dulce aparecieron en el Paleógeno inferior (Round, 1990).

1.2 Antecedentes

La investigación de las diatomitas en el departamento de Boyacá surgió por un interés académico de identificar y conocer la geología, mineralogía y propiedades fisico-químicas de este material, como punto de partida para el desarrollo de prospectos mineros y la participación en el mercado nacional e internacional.

El *Grupo de Investigación Ingeniería Geológica* realizó el proyecto, con el apoyo del *Grupo de Nuevos Materiales y sus Tecnologías de Fabricación*, de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Uptc). El equipo de trabajo estuvo conformado por profesores de las Escuelas de Ingeniería Geológica e Ingeniería Metalúrgica; estudiantes de pregrado, en calidad de semilleros de investigación; estudiantes de posgrado, de las maestrías en Ciencias-Geología, de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL), y Metalurgia, de la Uptc, como asistentes de investigación; por ingenieros que trabajaron como auxiliares y jóvenes investigadores, y por asesores externos de las universidades Nacional de Colombia, Javeriana y Concepción de Chile.

El objetivo principal de la investigación fue evaluar el uso industrial de diatomitas en el sector Tunja-Chivatá (departamento de Boyacá, Colombia); para esto se plantearon los siguientes objetivos específicos: 1) Revisar y evaluar la información existente sobre diatomitas, 2) Determinar el contexto geológico del área e identificar las manifestaciones de diatomitas, 3) Caracterizar física, química y mineralógicamente las diatomitas y 4) Identificar las aplicaciones industriales de las diatomitas.

El área de estudio está ubicada en la parte central de la Cordillera Oriental de Colombia (figura 1.3), en el departamento de Boyacá, entre los municipios de Tunja, Chivatá y Siachoque, con un área de 225 km².

Una síntesis de la información relacionada con la exploración de diatomita en Colombia, generada por universidades y entidades gubernamentales, es la siguiente:

Yacimientos de diatomita en el Valle del Cauca. Ministerio de Minas y Petróleos (Sandoval, 1953). Es el resultado del reconocimiento geológico llevado a cabo en el sector Cartago-Zarzal, al norte del departamento del Valle del Cauca, con el objeto de establecer las condiciones de explotabilidad de los yacimientos existentes en dicha región.

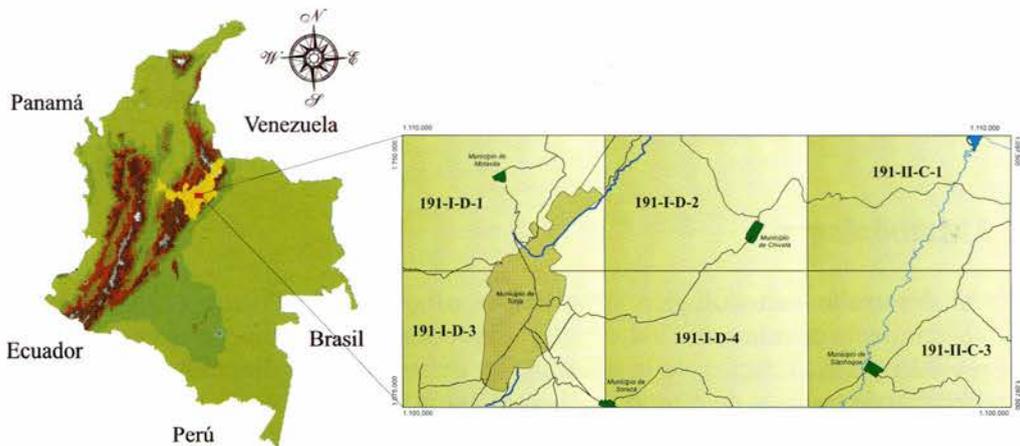


Figura 1.3. Localización del área estudio

Diatomitas. Recursos minerales de Colombia (Cepeda, 1978). Se hace referencia a los yacimientos de diatomita en Colombia, en los departamentos del Valle del Cauca, Cundinamarca, Boyacá y Nariño. Se concluye que en Colombia la producción nacional es menor que la demanda, por lo que se debe importar para suplir las necesidades de la industria.

Yacimientos de tierra de diatomeas de Tunja, Boyacá. Ministerio de Minas y Petróleos (Mutis, 1943). Estudio del yacimiento de tierra de diatomeas situado en la ciudad de Tunja, región de Pie del Alto. Analiza el conjunto de bancos de tierra de diatomeas que está discordante sobre capas de arenisca blanca perteneciente a la parte superior de la Formación Guaduas.

Manifestaciones de diatomitas en la sabana de Bogotá y sus implicaciones económicas, estratigráficas y ambientales. Universidad Nacional de Colombia (Aya y Bello, 1986). Evaluación de los yacimientos de la laguna de La Herrera y la vereda Tibagota, para realizar la caracterización mineralógica, química y física y así determinar el posible uso industrial de las diatomitas de este sector.

Análisis paleoambiental de las diatomitas de Tunja. Universidad Nacional de Colombia (Garzón, 2004). Este estudio analiza las diatomitas formadas en un antiguo lago en la parte sur de Tunja. Identifica 22 especies de diatomeas, de las cuales el 86,3% pertenecen al género *Fragilaria* y el 7,4%, al género *Alucoseira*. Los géneros con menor número de especies fueron *Neidium*, *Rhopalodia* y *Stauroneis*.

Inferencias paleolimnológicas del Holoceno basadas en diatomeas de la laguna Puente Largo, páramo de Frontino, Antioquia. Universidad Nacional de Colombia, Medellín (Lozano, 1999). Estudio paleolimnológico del Holoceno en

Colombia, realizado con base en diatomeas preservadas en sedimentos de la laguna de Puente Largo, donde se identificaron 76 especies de diatomeas, de las cuales el 30.3% pertenece al género *Eunotia*, y el 14.5%, a *Cymbella*. Todas las especies se presentan en un atlas de fotografías.

1.3 Metodología

En el desarrollo metodológico se utilizó la propuesta de Wilson (1994) para el establecimiento de minerales industriales. El proceso comprendió, en su etapa inicial, la revisión y actualización de la información existente sobre diatomitas, y luego, la realización de trabajos de campo que involucraron la identificación y el muestreo de los depósitos. Las muestras colectadas fueron caracterizadas física, química y mineralógicamente, con el fin de establecer su potencial uso industrial (figura 1.4).



Figura 1.4. Proceso metodológico

1.4 Panorama mundial de la diatomita

Las reservas mundiales de diatomita se estiman en 920 millones de toneladas, de las cuales, 250 millones se encuentran en Estados Unidos, y son equivalentes a alrededor de 460 veces la producción global actual (Dolley, 2008); en el 2007 la producción fue de 2.020.000 toneladas. Los principales países productores fueron Estados Unidos de América (41%), China (21%), Dinamarca (12%), Japón (6%), Francia (4%), México (3%) y otros como Alemania, España, Chile, Rumania, República Checa y Perú, con una producción por país menor al 3% (Dolley, 2008), (tabla 1.1).

Tabla 1.1. Producción y reservas de diatomita a nivel mundial, datos de 2006 y 2007

PAÍS	PRODUCCIÓN EN MILES DE TONELADAS		RESERVAS EN MILES DE TONELADAS	
	2006	2007	2006	2007
ESTADOS UNIDOS	799	830	250.000	500.000
CHINA	420	420	110.000	410.000
DINAMARCA	235	240	N.D.	N.D.
JAPÓN	130	130	N.D.	N.D.
FRANCIA	75	75	N.D.	2.000
MÉXICO	60	60	N.D.	2.000
ALEMANIA	54	55	N.D.	N.D.
REPÚBLICA CHECA	40	40	4.500	4.800
PERÚ	35	35	2.000	5.000
ESPAÑA	35	35	N.D.	N.D.
CHILE	30	27	N.D.	N.D.
OTROS PAISES	61	73	N.D.	N.D.

N.D.=No disponible

Fuente: U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2008.

En Estados Unidos, los más grandes yacimientos de diatomita se encuentran en los estados de California, Nevada, Oregon, Washington y Arizona. En Europa, en Francia, Dinamarca, España, Alemania y República Checa. En África, en Algeria, Suráfrica y Kenia. En Asia, en Japón, Corea del Sur y China. En Latinoamérica, en México, Brasil, Argentina, Chile, Perú y Costa Rica (Breese, 1994), (figura 1.5).

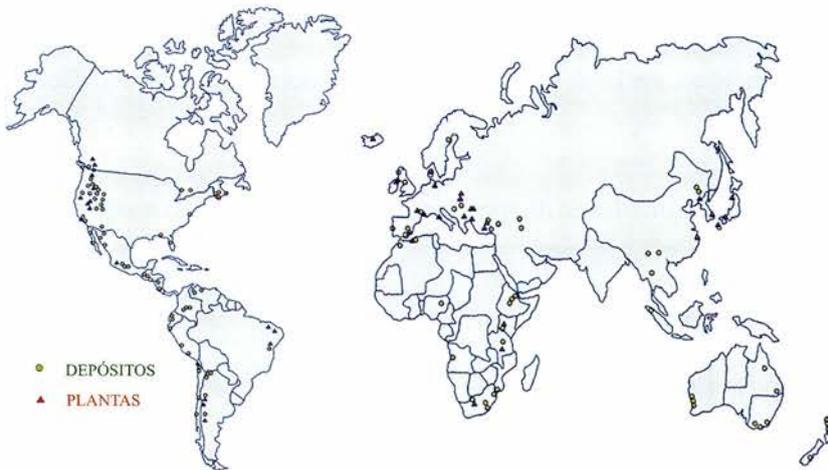


Figura 1.5. Localización de los depósitos y plantas de procesamiento de diatomitas

El principal uso de la diatomita es como material filtrante para la clarificación y purificación de líquidos en procesos químicos, metalúrgicos, de alimentos, farmacéuticos, de bebidas y del petróleo; la diatomita, debido a su estructura porosa y composición química inerte, retiene partículas disueltas, en suspensión o coloidales del líquido filtrado, sin modificar las características físico-químicas del producto final. Otra aplicación notable de la diatomita es como material de relleno en las industrias de: pinturas, lacas, papel, insecticidas, plásticos, fertilizantes, varillas de soldadura, tintas de impresión, explosivos y revestimiento dental. También se ha ampliado su uso a la industria de la construcción, produciendo bloques livianos y estructuras aislantes del calor y del frío (Dolley, 2008), (figura 1.6).

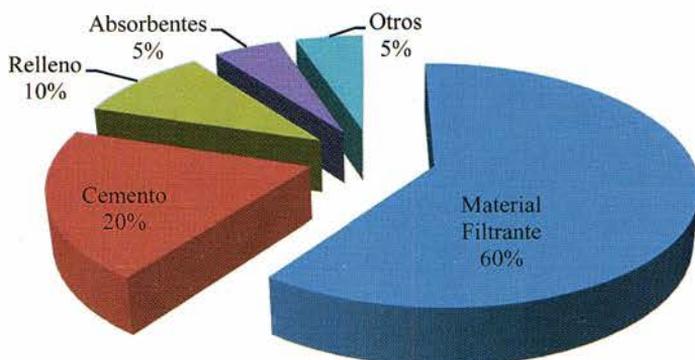


Figura 1.6. Aplicación de la diatomita en Estados Unidos para el año 2008

El valor promedio por tonelada de diatomita beneficiada, vendida por los productores estadounidenses durante 2007, fue de US\$237, 8% más que en el año 2006. Los precios de la diatomita se incrementaron en el 2007 con respecto al año anterior, así: en filtros, un 33%; para relleno, un 11%; para absorbente y aislamiento, un 10% (Dolley, 2008), (tabla 1.2).

Tabla 1.2. Valores promedio de diatomita por tonelada, según sus usos

Usos	2006 US\$	2007 US\$
Absorbente	37	41
Cemento	3	9
Rellenos	395	438
Filtros	264	352
Aislamiento	44	49

Fuente: Dolley, 2008

1.5 Panorama nacional de la diatomita

Yacimientos de diatomita en Colombia se tienen referenciados en Zarzal-Obando-Cartago-La Victoria, en el Valle del Cauca; en la Laguna de La Herrera, en Cundinamarca; en Tunja-La Uvita-Chinavitá-Oicatá, en Boyacá; en Nariño y en la Sabana de Bogotá y sus alrededores (Cepeda, 1978), (figura 1.7).

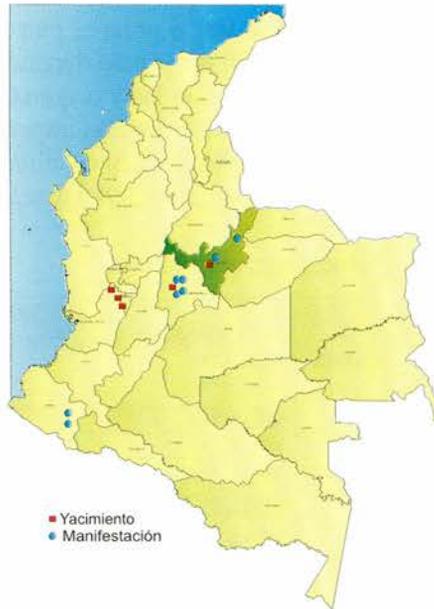


Figura 1.7. Localización de los yacimientos y manifestaciones de diatomita en Colombia

En Boyacá existen ocho licencias de exploración para diatomitas, en los municipios de Chivatá y Siachoque, con un área total de 1.291 ha, las cuales fueron otorgadas entre el 2005 y el 2008 (Gobernación de Boyacá-Secretaría de Minas, 1997).

En Colombia, la diatomita importada es utilizada en las industrias de bebidas y alimentos (Bavaria, Postobón, Maíz/Corn), como medio filtrante; como absorbente y relleno, en las industrias químicas, de pinturas y del caucho (Pintuco, Sempertex), y como refractario para la fabricación de ladrillos de este tipo (Erecos), en la proporción indicada en la figura 1.8.

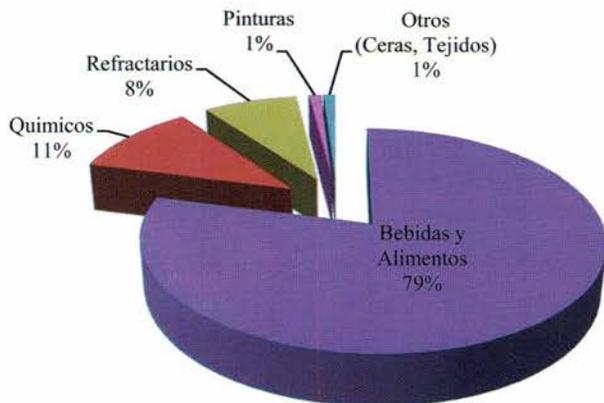


Figura 1.8. Consumo de la diatomita importada en Colombia para el año 2008

En el 2007 se importaron 2.603 toneladas, a precios entre ochocientos mil y dos millones de pesos la tonelada; la variación del precio dependió de los requerimientos particulares de la industria nacional, de la cantidad y origen (Ministerio de Comercio, 2008). El Ministerio de Comercio reportó 86 empresas importadoras que adquieren la diatomita con nombres comerciales como Kieselguhr o Celite, de países como Estados Unidos, México y Chile. En el 2008 se importaron 2.983 toneladas (tabla 1.3).

Tabla 1.3. Importaciones de diatomita en el año 2008

EMPRESA	PAÍS PROCEDENCIA	CANTIDAD (kg)	VALOR FOB (\$)
SOCIEDAD DE REPRESENTACIONES INTERNACIONALES	MÉXICO	20	11.500
HERGRILL Y CIA LTDA.	MÉXICO	13.109	44.446.658
BAVARIA S.A.	MÉXICO	1.186.779	1.029.050.588
CERVECERÍA UNIÓN S.A.	MÉXICO	99.290	86.089.872
SEMPERTEX DE COLOMBIA S.A.	MÉXICO	7.560	27.524.100
SIMONIZ S.A.	MÉXICO	2.974	8.473.200
CERVECERIA DEL VALLE S.A.	MÉXICO	9.875	8.562.900
MATERIALES INDUSTRIALES S.A.	ESTADOS UNIDOS	105.000	31.499.047
COMPAÑIA GLOBAL DE PINTURAS S.A.	ESTADOS UNIDOS	5.647	19.739.136
G&G SUCESORES Ltda.	ESTADOS UNIDOS	1	96.600
PINTURAS TONNER Y CIA. Ltda.	ESTADOS UNIDOS	3.629	6.377.900
PURE Co LTDA.	ESTADOS UNIDOS	19.051	10.172.900
C.I DE AZÚCAR Y MIELES S.A.	ALEMANIA	1.280	347.300
MERCK S.A.	ALEMANIA	15	984.687
RECKITT BENCKISER COLOMBIA S.A. U.A.P.240	ALEMANIA	21.450	36.082.400
GELCO S.A.	CHILE	45.400	40.185.600
INFEREX S.A.	CHILE	799.700	87.409.027
QUÍMICA INTERNACIONAL S.A. QUINTAL S.A.	CHILE	45.400	47.511.100
INDUSTRIAS DEL MAIZ S. A. CORN PRODUCTS	CHILE	454.026	367.055.019
POSTOBÓN S.A.	CHILE	43.811	41.114.018
QUÍMICA PRODES S.A.	CHILE	90.800	77.427.200
ENLACE CARIBE Ltda.	DINAMARCA	28.560	70.614.600
ELEMENTOS QUÍMICOS LTDA.	ESPAÑA	12	450.800
ITEMA LTDA. Operaciones Integrales	ARGENTINA	3	5.934

Fuente: Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, 2008.

Capítulo 2

**Geología de los depósitos de
diatomitas**

Geología

Entender el contexto geológico en donde se encuentran los depósitos de diatomitas permite la exploración de este material en áreas adyacentes o en otras regiones con características similares. En este capítulo se describen aspectos estratigráficos y estructurales, relacionados con los depósitos.

2.1 Tectónica regional

Los depósitos de diatomitas se localizan en la Cordillera Oriental de Colombia, constituida principalmente por rocas sedimentarias de origen marino y continental. Las diatomitas aparecen en la Formación Tilatá, unidad discordante en medio de una secuencia del Cretácico Superior que ha sido cartografiada como Formaciones Churuvita, Conejo y Plaeners.

La evolución de la Cordillera Oriental de Colombia ha sido comprendida como el resultado de la interacción de las placas oceánicas de Nazca y el Caribe con la placa continental Suramericana. Desde el Cretácico se desarrolló como una cuenca *backarc* al oriente de la zona de subducción de los Andes, dominada por una sedimentación marina. A finales del Cretácico y durante el Paleógeno, la acreción de la cordillera occidental cambió el escenario a una cuenca *foreland* con sedimentación en ambientes transicionales de llanuras costeras a continentales. En el Neógeno la acreción de los terrenos Chocó, Baudó y Panamá generaron la inversión de la cuenca y deformación de la Cordillera Oriental; depósitos erosionales fueron preservados en la Formación Tilatá (Cooper et ál., 1995).

Estructuralmente, los depósitos se localizan en cuencas sedimentarias intramontañas que corresponden con estructuras sinclinales, que permitieron la formación de lagos, proliferación de diatomeas y formación de diatomitas.

Regionalmente se presentan las Fallas de Soapaga y Boyacá, la primera al oriente y la segunda al occidente de la zona de estudio. Siguiendo el lineamiento nororiente de las fallas principales, se encuentran las fallas de Chivatá y la Falla de Siachoque, de tipo inverso, al occidente y al oriente respectivamente (figura 2.1).

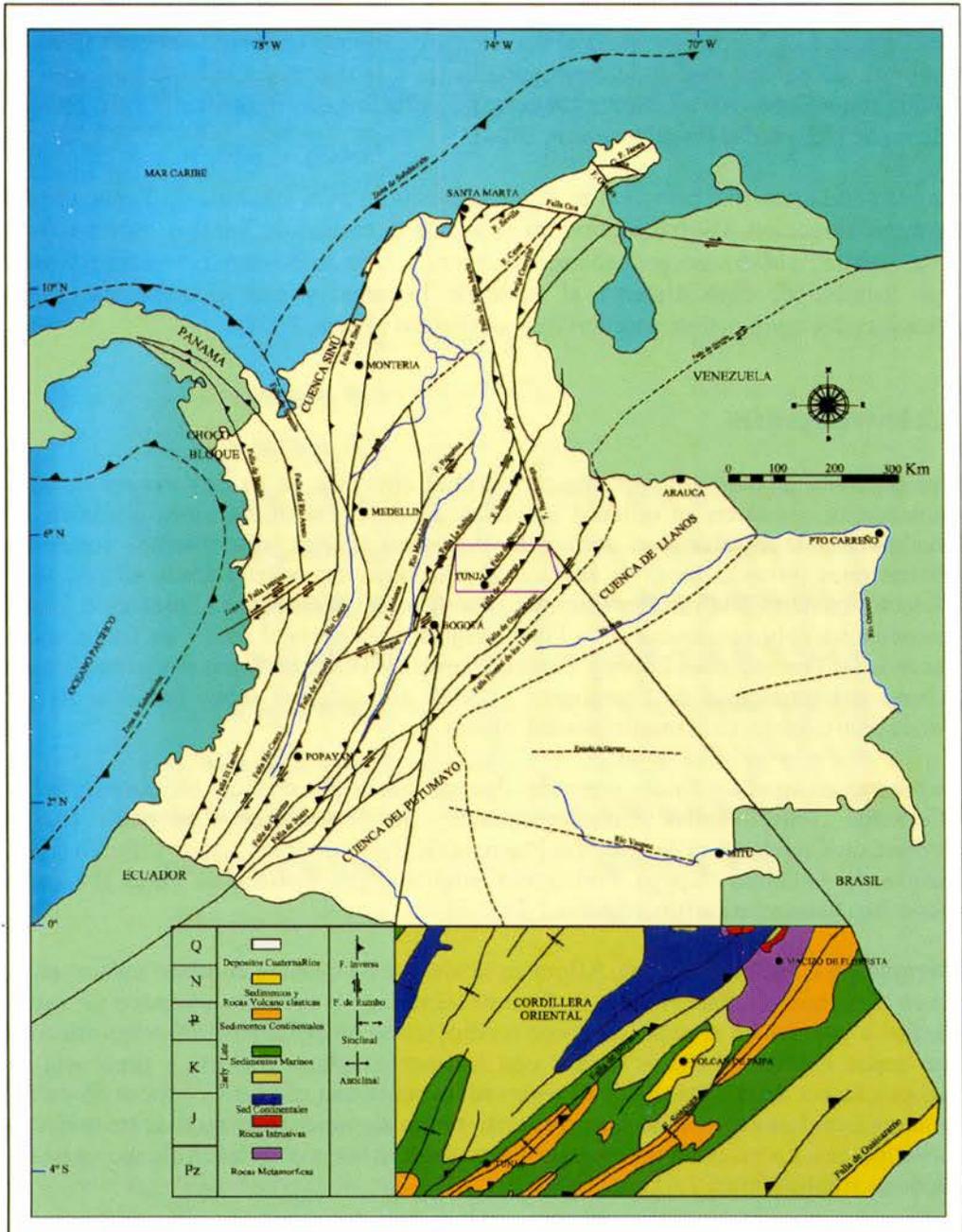


Figura 2.1. Marco estructural y principales lineamientos del área de estudio
Fuente: Acosta, 2002

La falla de Boyacá separa dos provincias morfoestructurales distintas; hacia el noroccidente un bloque tectónico levantado, compuesto por rocas de edad Jurásica y Cretácica, que conforman estructuras amplias, como el anticlinal de Arcabuco y el sinclinal de Los Medios; y hacia el suroriente un bloque tectónico hundido (área de estudio), de paisaje ondulado, correspondiente a la depresión del Chicamocha, en donde son notorios los plegamientos cortos y estrechos, frecuentemente volcados por acción de la gravedad (Farelo y Parra, 2004).

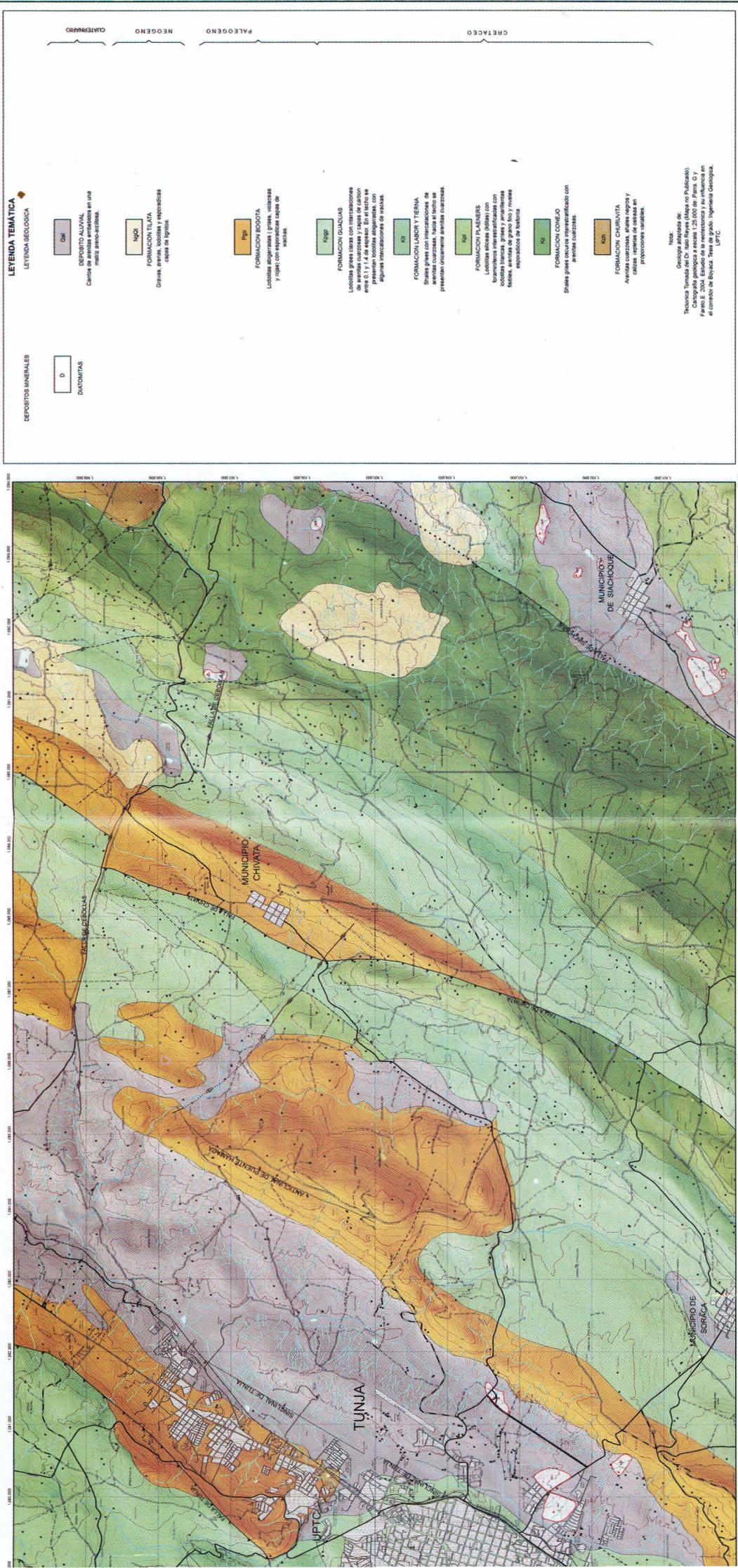
La estructura regional principal en el área de estudio es el sinclinal de Tunja, el cual presenta dirección SW-NE; comienza al sur de la ciudad de Tunja y termina en la localidad de El Manzano, probablemente contra la falla de Boyacá. Este sinclinal es de tipo asimétrico, especialmente al norte de la zona, y está afectado por fallas transversales que han dislocado sus flancos (Farelo y Parra, 2004).

2.2 Estratigrafía

Los depósitos de diatomita pertenecen a la era Cenozoica, en su mayoría son de edad cuaternaria; consisten en rellenos aluviales, lacustres, acumulaciones glaciales, en muchos casos entrelazados, formando depósitos mixtos, discordantes sobre las formaciones infrayacentes. En Boyacá, por su posición estratigráfica, son de edad Plioceno-cuaternario (Van Der Hammen, 1960); se encuentran en la Formación Tilatá, discordantes sobre areniscas de la Formación Bogotá hacia el sector de Tunja, sobre rocas de las Formaciones Labor y Tierna, Plaeners y Tilatá, en zonas aledañas al casco urbano del municipio de Siachoque, y están discordantes sobre lodolitas de las Formaciones Conejo, en el municipio de Chivatá.

Se reconocen aspectos físicos generales de cada una de las unidades litoestratigráficas aflorantes, representadas cronológicamente por Formación Churuvita (Kch), Formación Conejo (Kc), Formación Plaeners (Kpl), Formación Labor y Tierna (Kit), Formación Guaduas (Kpgp), Formación Bogotá (Pgb), Formación Tilatá (NgQt) y Depósitos Cuaternarios (Q), (figuras 2.2 y 2.3).

Formación Churuvita (Kch). Aflora en la vía que de Chivatá conduce a Toca, en el sector denominado San Francisco. En este sector se observa una sucesión de capas medias a gruesas de arenitas de grano medio, pardo amarillentas, interestratificadas con capas medias de shales negros con laminación plano paralela y presencia de algunos lentes de arenita; hacia el techo se presenta una capa muy gruesa de caliza lumaquélica. Las capas de arenita presentan forma sigmoidal y en su base se observan talashinoides. La sucesión presenta un decrecimiento hacia el techo en el espesor de las capas de arenita (figura 2.4).



LEYENDA TEMÁTICA

LEYENDA GEOLOGICA

DEPOSITOS MINERALES

DIATOMITAS

DEPOSITO ALUVIAL
Cuerpo de arena embudo en una parte del conito.

FORMACION BOBOTA
Litolias argilosas y grases, volcánicas y rhyolitas con capas de lavas.

FORMACION TILATA
Gravas, arenas, litolias y esquistosicas capas de lignitos.

FORMACION GUACUAS
Litolias grases claras con intercalaciones de arenas concavas y capas de carbon en las partes superiores. Presentan algunas litolias argilosas, con algunas intercalaciones de lavas.

FORMACION LABOR Y TERNA
Shales grases con intercalaciones de arenitas y litolias argilosas, que presentan laminarmente arenitas cruzadas.

FORMACION PLAINERS
Litolias silíceas (litias) con laminaciones interstratificadas con arenitas, arenitas de grano fino y niveles separados de bolsones.

FORMACION COMBO
Shales grases sacros interstratificados con arenitas cruzadas.

FORMACION CHURUBITA
Arenitas sacros con intercalaciones y capas de lavas de gran tamaño en proporciones variables.

Nota:
Geología adaptada de:
Tronquera Tomasa del '62, 'Hito Páez (Mapa no Publicado).
Escala 1:250,000. Estado de conservación de los datos: O y P.
Folios E-2004. Estado de conservación de los datos: en estudio.
El conito de Boyacá. Tesis de grado. Ingeniería Geológica. UPTC.

UPTC
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

Evacuación del uso industrial de diatomitas, sector Tunja-Chivata (Boyacá, Colombia), con. 198-06

Mapa Geológico - Depósitos de Diatomitas

Actualización Geológica Geológica
Grupo de Investigación Geología Económica
Diseño y Diagramación
Oscar Arrianda O. Gaviria
2008

MAPA INDICE DE LOCALIZACION

Escala 1:25,000

Proycción Transversa de Mercator, Estado Internacional 1989
Datum Horizontal Observatorio Astronómico de Bogotá
Origen de coordenadas: 4° 59' 34.27" N
Falso meridiano (métrico): E = 1,000,000
N = 1,100,000

BASE CARTOGRAFICA

Carretera Pavimentada
Carretera Sin Pavimentar
Carretera Sin Pavimentar Ancha
Camino
Canal
Drainaje
Rios
Cruce de Nivel
Cruce de Nivel Intermedia
Vía Ferrea
Quebrada

CONTROL DE CAMPO

Pozo Pequeño
Depósitos delimitados
Estación de Campo
Punto de Muestreo Petrográfico
Edificaciones
Escaleras
Área Constituida

MINERIA

Mina Activa
Mina Inactiva
Cuello
Cañón

RUMBOS Y BUZAMIENTOS

Capa Inclinada
Capa Horizontal
Capa Vertical
Capa Invertida

ESTRUCTURAS PLEGADAS

Construcción definida
Sicinal cubierto
Sicinal sin cubierto
Sicinal con cubierto infero
Sicinal con cubierto superior
Anticlinal
Anticlinal cubierto
Anticlinal con cubierto
Anticlinal con cubierto infero
Anticlinal con cubierto superior

CONTACTOS

Falla Definida
Falla Infría
Falla Cubierta
Falla Inversa
Falla Inversa Infría
Falla Inversa Infría
Falla de umbo dorsal
Falla de umbo dorsal cubierta
Falla de umbo dorsal
Falla de umbo sinusal
Falla de umbo sinusal cubierta

Figura 2.2. Mapa geológico, área de estudio, ubicación de los depósitos de diatomitas identificados.

Sistema	Serie	Piso	Unidad Litoestratigráfica	Espesor (m)	Litología	Descripción	
			Formación				
NEÓGENO	Plioceno		Lacustre	50		Están constituidos por sucesiones de lodolitas, algunas plásticas con intercalaciones de diatomita que van hasta 10 m de espesor.	
			Tilatá	150		Conjunto de 150 m de capas de gravas, lodolitas, arenas y esporádicos lignitos.	
	Eoceno	Bogotá	120		Sucesión monótona de 120m de lodolitas abigarradas (grises, violáceas y rojas) con esporádicos bancos de arenisca arcillosa.		
		Cacho	250		Compuesta por areniscas cuarzosas, de color amarillo a pardo oscuro, de grano fino a medio en la parte superior de la secuencia y grueso en los niveles inferiores, presentándose en ocasiones localmente conglomerática, hacia la parte intermedia de este nivel se halla un horizonte de arcillolitas grises y blancas.		
PALEOGENO			Guaduas	175		Compuesta por una sucesión de lodolitas grises claras con intercalaciones de areniscas cuarzosas, de grano fino y mantos de carbón entre 0.1 y 1.4 m de espesor. En el techo existe un conjunto de lodolitas abigarradas, con algunas intercalaciones de areniscas arcillosas de grano fino.	
			Labor y Tierna	117		Sucesión de lodolitas grises, con intercalaciones de areniscas grises claras de grano fino, en capas delgadas a medias, algunas con conchas. Hacia el techo se presenta una sucesión de 50 m de areniscas grises claras, blancuzcas y amarillentas, de grano fino a medio, interestratificadas con delgados niveles de lodolitas y limolitas grises claras.	
			Plaeners	105		Conjunto de capas de lodolitas silíceas (líditas) con foraminíferos, vertebras y escamas de peces interestratificada con lodolitas blancas, grises y amarillentas fisiles y areniscas de grano fino y esporádicos niveles de fosforita.	
			CRETÁCEO SUPERIOR	Conejo	265		Sucesión de areniscas en capas de 3 a 8 m intercalados con shales gris oscuro a amarillentos.
				Cenomaniano	Churuvita	405	

Figura 2.3. Columna estratigráfica generalizada del área Tunja-Siachoque

Formación Conejo (Kc). Se encuentra bien expuesta en la carretera que de Chivatá conduce a Toca, a 1 km del sector denominado El Pino (figura 2.4). Allí se presentan shales grises a amarillentos con laminación ondulada continua y presencia de aislados lentes de arenita, interestratificados con capas delgadas a medias sigmoidales de arenita de grano fino silíceas, bien cementadas y con estratificación cruzada. Las arenitas presentan abundantes fósiles.

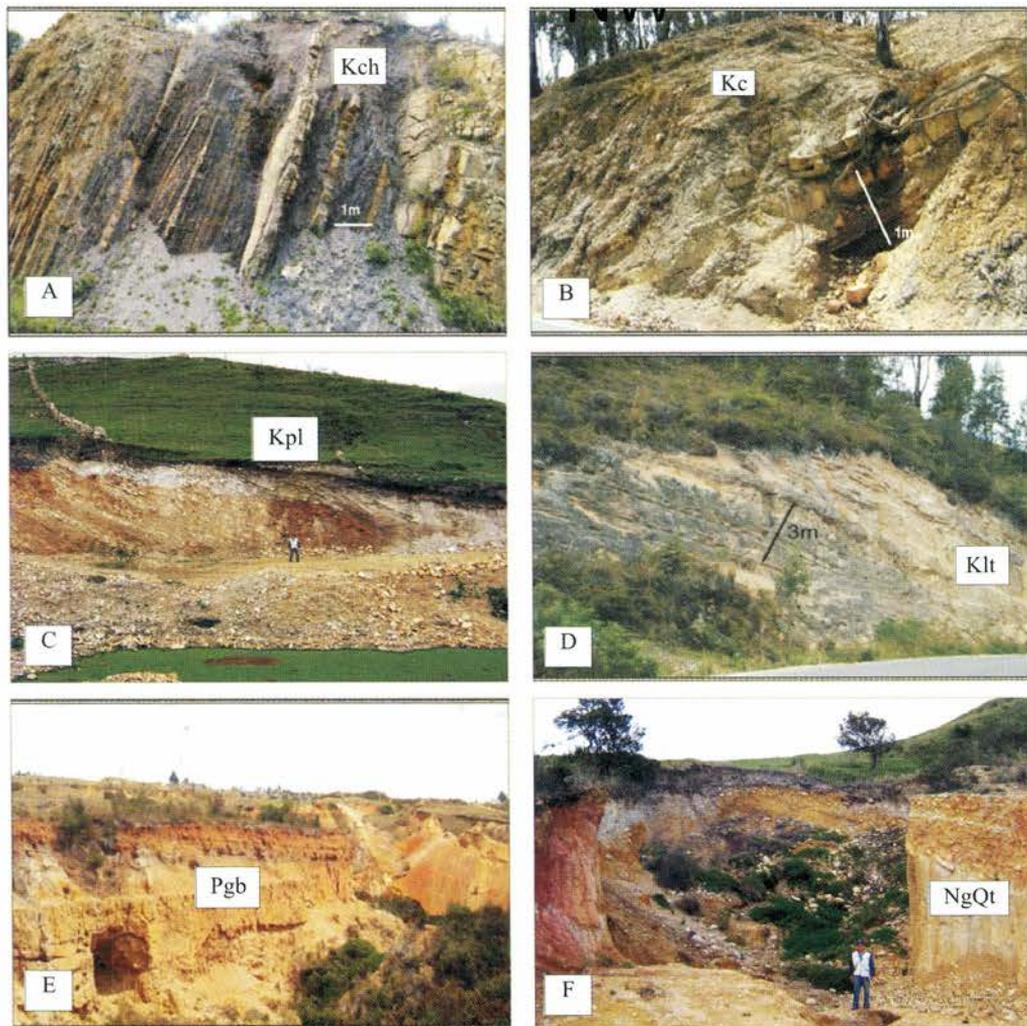


Figura 2.4. Unidades litoestratigráficas del área de estudio. **A.** Formación Churuwita, vía Chivatá-Toca. **B.** Formación Conejo, vía Chivatá-Toca. **C.** Formación Plaeners, municipio de Siachoque, vereda Santa Cecilia. **D.** Formación Labor y Tierna, vía Chivatá-Toca. **E.** Formación Bogotá, sector Alto de Tunja. **F.** Formación Tiltatá, municipio de Siachoque, vereda El Cerezo.

Formación Plaeners (Kpl). En la vía que de Chivatá conduce a Toca, en el sector El Pino, se observaron conjuntos de capas delgadas de lodolitas silíceas muy meteorizadas, con foraminíferos; es característico el fracturamiento en forma prismática. Las lodolitas silíceas están interestratificadas con capas delgadas de lodolitas fisiles blancas caoliníticas, grises y amarillentas, y capas medias de arenitas de grano fino altamente fracturadas debido al fallamiento en la zona. La mayor parte de la secuencia está intensamente replegada (figura 2.4).

Formación Labor y Tierna (Klt). Se encuentra expuesta en la vía que de Chivatá conduce a Toca, en la vereda de Siatoca, en donde se observan capas medias a gruesas, de forma sigmoidal, de arenita de grano fino, amarillentas, con óxidos de hierro en superficies discontinuas; las capas de arenitas están interestratificadas con lodolitas amarillentas (figura 2.4).

Formación Guaduas (Kpgp). Aflora en la carretera Chivatá-Toca, como una sucesión de lodolitas grises, con delgadas intercalaciones de areniscas friables con niveles de carbón que se encuentran hacia la parte media; presenta un espesor promedio de 175 m.

Formación Bogotá (Pgb). En el área se reconoce un miembro inferior denominado Cacho, compuesto por areniscas cuarzosas, de color amarillo a pardo oscuro, de grano fino a medio en la parte superior de la secuencia, y grueso en los niveles inferiores, presentándose en ocasiones localmente conglomerático. Es muy frecuente la estratificación cruzada y las marcas de corriente en los niveles superiores. Hacia la parte intermedia de este nivel se halla un horizonte de lodolitas grises y blancas. El miembro superior de la Formación Bogotá se inicia con un banco de arenisca de color violáceo, de grano medio, con delgadas intercalaciones de lodolitas blancas con tonalidades amarillas, grises y violetas. Sobre este banco descansa un paquete grueso de areniscas amarillentas de grano fino muy compactas, bien cementadas; seguidas por lodolitas grises muy compactas con tonos violáceos, rojizos, y blancos (figura 2.4).

Formación Tilatá (NgQt). En el carretable que de Siachoque conduce a la vereda Siachoque Bajo se encuentran cantos redondeados de arenisca pobremente seleccionados, embebidos en una matriz areno-limosa, color amarillo (figura 2.4).

La parte superior de la Formación Tilatá aflorante en el área de estudio corresponde con una sucesión de lodolitas grises, pardas y rojizas con presencia de material carbonoso, interestratificadas con capas medias a gruesas de areniscas de grano muy fino y areniscas de grano medio a grueso, algunas veces conglomeráticas; en el techo se presentan capas muy delgadas a gruesas de óxidos de hierro y capas gruesas a muy gruesas de diatomitas; se ha interpretado el ambiente de formación como fluvial-lacustre.

En el valle en que el que encuentra el municipio de Siachoque, en las márgenes del río Tocavita, aflora una sucesión lacustre de lodolitas grisáceas, con intercalaciones de diatomitas que forman una terraza de unos 30 m sobre el nivel del río. Existe una transición gradual entre arcillas y diatomitas; las capas inferiores son lodolitas y las superiores, diatomitas.

En el municipio de Chivatá, los depósitos de diatomita yacen discordantes sobre lodolitas silíceas (liditas) de la Formación Plaeners y lodolitas grises fisiles de la Formación Conejo. Se encuentran 100 m por encima de los depósitos de Siachoque y

Tunja, y correspondieron con depósitos de lagos de origen glacial, dada su morfología y la presencia de bloques erráticos de morrenas que conformaron el cierre del lago.

En el área de estudio, los ambientes de depósito que se tienen para este material son ácuos: marinos, lacustres o de corriente (Flórez y Lozano, 1999). Se plantea un origen lacustre para los depósitos de diatomitas estudiados, soportado por el tipo de diatomeas y la topografía del terreno: pendiente suavemente inclinada, limitada por escarpes.

Los otros posibles ambientes de depósito, como el Marino, son descartados por la posición estratigráfica y la poca extensión lateral de los depósitos; en el caso de corrientes, es poco factible que se hubiese conservado diatomitas de características homogéneas, sin estructuras de corriente, interstratificaciones visibles y en espesores superiores a 5 m.

2.3 Depósitos de diatomitas

Se identifican trece manifestaciones de diatomitas: ocho en el municipio de Siachoque, tres en Tunja y dos en Chivatá. En cada depósito se describe la litología aflorante, se realiza un muestreo aleatorio en canal y se delimita por inspección visual.

Diatomitas Tunja. Al suroriente de la ciudad de Tunja existen tres depósitos de diatomitas, discordantes sobre lodolitas varicoloreadas de la Formación Bogotá; las capas exhiben una dirección preferencial NE; se localizan en el flanco oriental del sinclinal buzante de Tunja, al suroriente de la ciudad, en sectores como Xativilla, La Macarena y el barrio Patriotas (DST1), la Doble Calzada (DST2) y el barrio El Curubal (DST3), (figura 2.5). Estos depósitos tienen extensiones que van desde 4,9 hasta 60,6 ha; los espesores máximos expuestos varían entre 5 y 8 m.

Las diatomitas del sector Xativilla (DST1) son de color crema a blanco, localmente rojizas; su densidad es baja, lo que indica que están poco contaminadas con minerales arcillosos, y están mezcladas con óxidos de hierro y materia orgánica (raíces y restos vegetales). Este depósito es homogéneo de densidad.

Las diatomitas encontradas en el sector denominado la Doble Calzada (DST2) son de color blanco y crema, tienen locales impregnaciones de óxidos de hierro, están mezcladas con arcillas blancas, lo que les confiere una mayor densidad, y muestran diversos grados de calidad (color y densidad), la cual varía en toda la extensión del depósito.

Las diatomitas en el barrio El Curubal (DST3) hacen parte de un depósito discontinuo e irregular en el que se pueden encontrar afloramientos compuestos por diatomitas con óxidos de hierro hasta una mezcla con arenas blancas de grano muy fino.

Estas zonas están definidas en el Plan de Ordenamiento Territorial como zonas de asentamientos urbanos, sin embargo, el depósito de la doble calzada fue explotado de manera ilegal y artesanal con arranque mecánico de pico y pala. En el sector Xativilla existen amplias urbanizaciones fundadas sobre este material en particular; la vegetación que se destaca en esta zona es, básicamente, de eucaliptos.

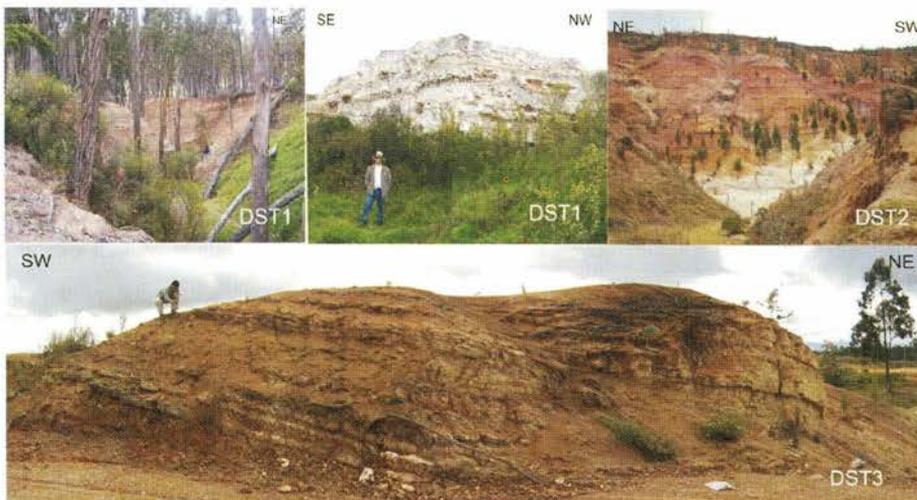


Figura 2.5. Depósitos de diatomitas, Tunja. DST1, sector Xativilla. DST2, vía doble calzada Tunja-Bogotá; DST3, barrio el Curubal

Diatomitas Siachoque. Existen ocho manifestaciones, cinco de las cuales se concentran en la zona suroccidental al casco urbano, conformando, al parecer, un solo depósito. Se encuentran estratificadas con una dirección NE-SW, discordantes sobre rocas de las Formaciones Labor y Tierna y Plaeners. Se disponen paralelas a la falla de Siachoque y muy cercanas a este lineamiento. Corresponden a acumulaciones discontinuas, debido a la erosión del río Tocavita. Son zonas onduladas, con áreas aproximadas de 1 a 15 ha y espesores expuestos de 1 a 5 m (figura 2.6).



Figura 2.6. Depósitos de diatomita - Siachoque

Los depósitos que se encuentran al suroccidente del casco urbano del municipio, en el sector denominado El Llanito (DSS1), son homogéneos y de colores claros crema a blanco, con una densidad muy baja; presentan mayor continuidad y menos contaminación de minerales arcillosos que los aflorantes al noreste del área, en el sector denominado Piedra de Cruz. Estos han sido explotados en túneles de manera artesanal, dejando grandes socavones e inestabilidad del terreno a medida que avanza la intervención.

En el sector Piedra de Cruz (DSS7) se observan niveles estratificados con lodolitas. Estos depósitos están mezclados con minerales arcillosos, óxidos de hierro (limonita) y materia orgánica. La capa vegetal que cubre estos depósitos tiene espesores menores a 1 metro, y la vegetación que predomina sobre el material corresponde a eucalipto y pinos, principalmente. La zona de Siachoque es generalmente agrícola, aunque existen algunas intervenciones mineras, como son receberas, en donde aflora la Formación Plaeners.

Diatomitas Chivatá. Existen dos manifestaciones de diatomitas al oriente del casco urbano del municipio de Chivatá, depositadas discordantes sobre rocas de la Formación Conejo. Se encuentran en los sectores denominados El Pino (DSC1) y San José (DSC2), al occidente de la falla de Siachoque; uno de ellos está afectado por fallas locales. La extensión de estos depósitos es de 3 a 5 ha, los espesores expuestos varían de 1 hasta 5 m y están cortados por canales de escorrentía (figura 2.7).

Las diatomitas de la vereda San José (DSC2) se encuentran a 500 m del río Cormichoque; son de color blanco a amarillo rojizo, por los altos contenidos de óxidos de hierro. La capa vegetal por sectores es casi nula, característica que permite hacer una delimitación parcial del depósito.



Figura 2.7. Depósitos de diatomita - Chivatá

La del sector El Pino (DSC1) es blanca a crema. En este depósito existe un frente de extracción de 5 m de alto por 10 m de ancho, que facilitó la descripción y análisis del material; además, los controles estructurales que ofrece la formación adyacente (Formación Plaeners) sirven para delimitar el yacimiento. En este depósito se tiene una

descripción detallada de la secuencia de diatomitas-lodolitas, mediante canales y perforaciones. El espesor varía entre 5 y 15 m (figura 2.8). El depósito está constituido por diatomitas de color blanco a amarillento, siendo más claras en el techo y más oscuras en la base; en general, presenta frecuentes inclusiones de cuarzo, moscovitas, limonita y materia orgánica.

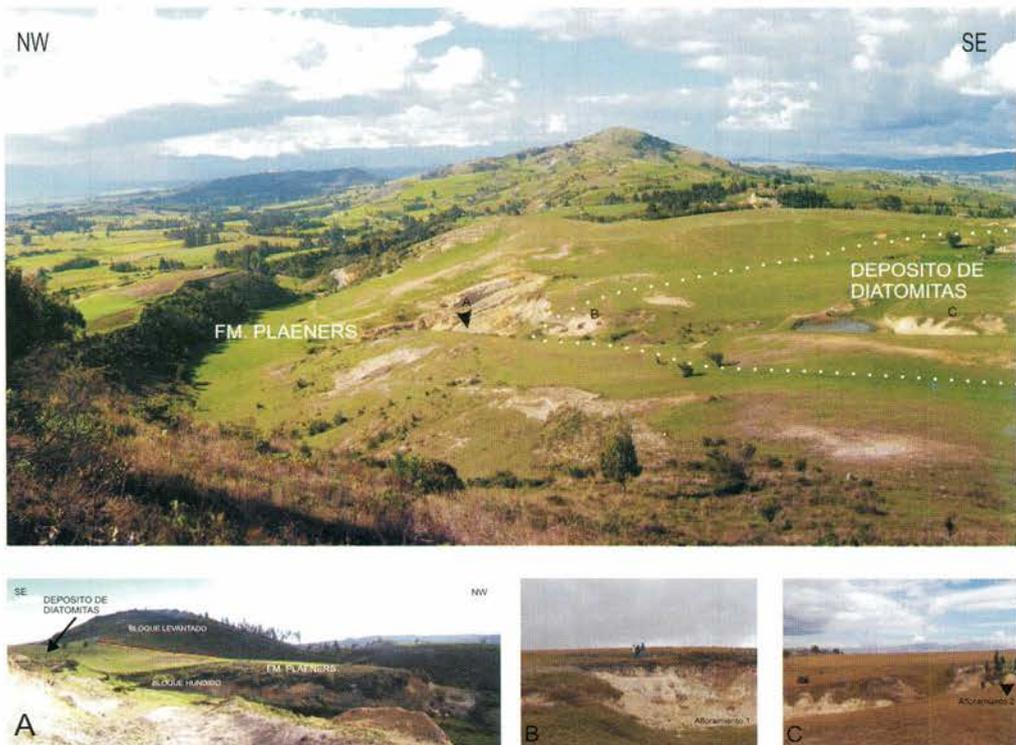


Figura 2.8. Panorámica del depósito de diatomitas DSCI, sector El Pino, limitado por lodolitas silíceas de la Formación Plaeners; en las figuras A, B y C se observan los afloramientos de diatomitas

La sucesión es en su mayoría homogénea; no se observa estratificación, se presenta un ligero incremento, a profundidad, en la granulometría del cuarzo de fracción arena fina a muy gruesa en las perforaciones. En el afloramiento se observa un horizonte (de 20 cm de espesor) con un color rojo amarillento por concentración de óxidos de hierro. Localmente, en las perforaciones se encontraron fragmentos de pedernal de hasta 3 cm de diámetro, mezclados con diatomita (figura 2.9).

En la base se encuentran lodolitas limosas amarillentas, que constituyen el límite estéril del depósito; el contacto de las diatomitas con las lodolitas es gradual. En el techo se presenta una cobertura de capa vegetal con restos de materia orgánica y diatomita menor de 1 m.

La columna (figura 2.9) muestra el color representativo en cada segmento analizado. Los colores quedaron definidos por inspección visual de las muestras, mediante la carta de colores de Munsell; cada color está definido por los tres atributos denominados: HUE = tono, VALUE= claridad y CHROMA = nitidez. Entre más pura sea la diatomita, más blanco es su color, tonalidades amarillentas son debidas a la presencia de óxidos de hierro; localmente se presentan parches negros de materia orgánica.

EDAD	FORMACIÓN	ESPESOR (m)	LITOLOGÍA	MUESTRA	COLOR	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIONES
NEOGENO - CUATERNARIO? PLIOCENO - PLEISTOCENO? L A C U S T R E		0,57		DP6 - 1	HUE 2.SY 7/2	Diatomita blanco crema con ocasionales parches pardo amarillentos de limonita. Frecuente moscovita y ocasionales cuarzos de tamaño limo hasta arena de grano medio. Presenta materia orgánica (restos de raíces de hasta 2 cm de longitud). Moderadamente consolidada. Terrosa.	Presenta fracturas rellenas de limonita
		1,14		DP6 - 2	HUE 2.SY 7/3		
		1,71		DP6 - 3	HUE 2.SY 8/2		
		2,28		DP6 - 4	HUE 2.SY 8/6		
		2,85		DP6 - 5	HUE 5Y 8/2		
		3,42		DP6 - 6	HUE 2.SY 7/2		
		3,99		DP6 - 7	HUE 2.SY 8/1		
		4,56		DP6 - 8	HUE 2.SY 8/2		
		5,13		DP6 - 9	HUE 2.SY 7/2		

Figura 2.9. Descripción litológica de perforación realizada en el depósito de diatomitas en Chivatá

Capítulo 3

**Caracterización de las
diatomitas**

Caracterización

Las diatomitas se caracterizan mediante análisis químicos, mineralógicos y físicos. Los resultados deben permitir determinar la calidad del material. La comparación con las características de yacimientos que han sido explotados en el mundo a escala industrial identificará la potencialidad minera e industrial del área de estudio.

Proceso de caracterización. Se elabora un diagrama donde son determinados aspectos taxonómicos de las diatomeas fósiles. El proceso de las técnicas de laboratorio sirve de base para el estudio de otros materiales con presencia de fracción arcilla.

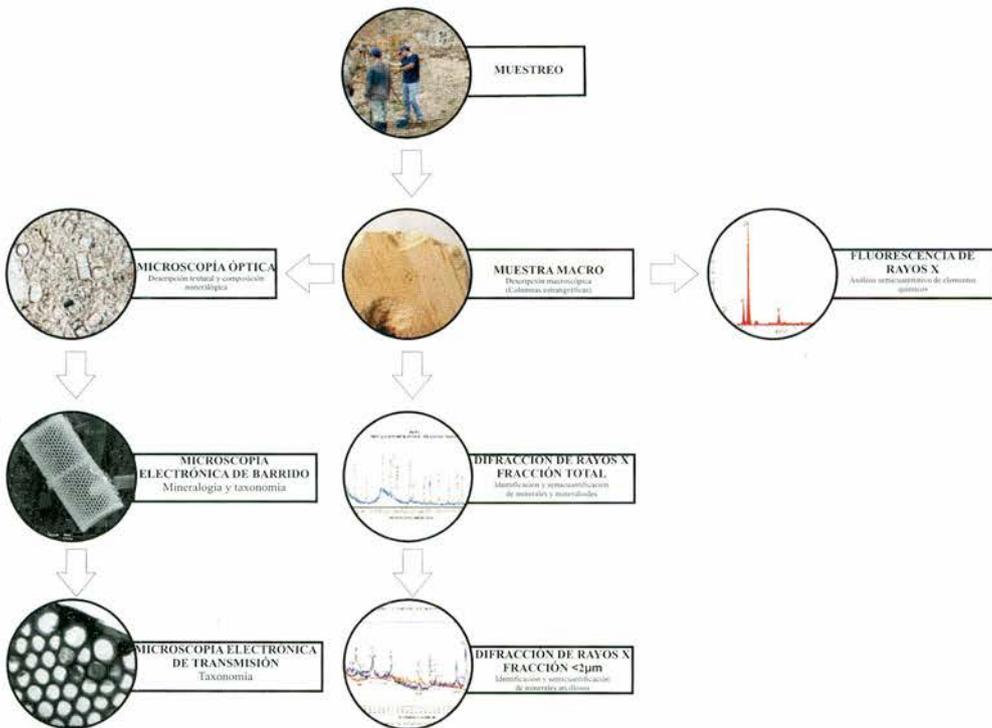


Figura 3.1. Proceso de caracterización química, mineralógica y taxonómica de diatomitas.

Las muestras se recolectan mediante canales y perforaciones en cada una de las manifestaciones. En el laboratorio se procede a triturar, homogenizar, cuartear, pesar, codificar y almacenar las muestras para los diferentes análisis (figura 3.2).



Figura 3.2. Preparación de las muestras para los diferentes análisis

3.1 Caracterización química

La diatomita es una roca de composición silíceas. La sílice (SiO_2) es el componente de los esqueletos de las diatomeas fósiles, constituyente fundamental de esta roca. Otros elementos, como aluminio, potasio, hierro, calcio y magnesio, entre otros, pueden estar presentes en minerales arcillosos, carbonatos y óxidos de hierro, accesorios comunes en la roca. Entre mayor sea el porcentaje de sílice, se considera más limpia la diatomita de contaminantes; sin embargo, hay que analizar estos resultados con la mineralogía, ya que la sílice no es solo el elemento fundamental de los esqueletos de diatomeas, sino también lo es del cuarzo.

Análisis químicos se realizan por fluorescencia de rayos X (FRX) para la roca total y por energía dispersiva de rayos X (EDX) para las diatomeas en particular. Estas técnicas determinan los elementos químicos presentes en la diatomita, a excepción de los elementos livianos y transuránicos.

Composición química en muestra total. Los elementos mayores identificados en la diatomita del área estudiada -Siachoque, Tunja y Chivatá- fueron: sílice, aluminio, hierro y potasio (>1%). Como elementos menores (entre 0,1 y 1%) están: titanio, magnesio, sodio y calcio. Y como elementos traza (<0,1%) están: P, S, Ni, Zn, Rb, Zr, Cu, Sr y Bi (tabla 3.1). El depósito de Siachoque (DSS2) presenta el mayor contenido de sílice y el menor en hierro, en relación con las otras manifestaciones de diatomita analizadas.

Tabla 3.1. Composición química de las diatomitas en Tunja, Siachoque y Chivatá (FRX)

Elemento	TUNJA		SIACHOQUE		CHIVATÁ	
	DST1 (%)	DST2 (%)	DSS1 (%)	DSS2 (%)	DSC1 (%)	DSC2 (%)
SiO ₂	88,45	81,59	73,12	89,78	73,45	77,50
Al ₂ O ₃	8,97	14,56	20,40	9,22	18,02	17,20
TiO ₂	0,25	0,42	0,59	0,12	0,68	0,54
K ₂ O	0,30	0,87	1,89	0,44	2,24	1,46
CaO	0,06	0,05	0,22	0,11	0,18	0,27
P ₂ O ₅	0,04	0,04	0,05	0,03	0,06	0,06
Fe ₂ O ₃	1,69	1,81	2,18	0,84	4,22	2,66
MgO	0,30	0,42	0,59	0,27	0,67	0,63
Na ₂ O	0,19	0,14	0,44	0,16	0,36	0,36
Ni	-	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02
S	0,05	0,02	0,03	0,03	0,05	0,04
Zr	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02
Sr	-	-	0,01	-	0,01	0,01
Rb	-	0,01	0,02	-	0,01	0,01
Zn	0,01	-	0,02	-	0,01	-

Comparando la composición química de la diatomita de Boyacá con la de otros yacimientos a nivel mundial (tabla 3.2), se determina que los depósitos presentan una composición que se encuadra dentro de los rangos de otros yacimientos actualmente explotados, representando así un interés comercial.

Tabla 3.2. Composición química de diatomitas en bruto de yacimientos en el mundo

Elemento (en %)	Dethlingen Alemania	New South Wales Australia	Nevada USA	Palmira Ecuador	Sechura Perú	Boyacá Colombia
SiO ₂	52,4-78,4	60,3-92,6	79,55-86,00	66,58-90,14	38,59-67,36	73,12-89,78
Al ₂ O ₃	0,94-4,16	2,2-21,9	1,82-5,27	1,14-14,25	3,91-13,80	8,97-20,40
Fe ₂ O ₃	1,60-8,00	0,57-6,15	0,44-2,12	0,33-4,12	0,99-4,20	0,84-4,22
TiO ₂	0,10-8,00	0,10-0,97	0,07-0,73	0,03-0,48	0,17-0,75	0,12-0,59
P ₂ O ₅	0,02-1,08	0,05-0,27	0,06-0,13	0,01-0,25	0,06-5,53	0,03-0,06
CaO	0,22-1,48	0,05-11,70	0,34-1,26	0,15-2,50	1,95-11,54	0,06-0,27
MgO	0,01-0,76	0,26-1,54	0,39-1,30	0,14-2,47	1,06-4,01	0,27-0,63
Na ₂ O	0,00-0,56	0,05-0,87	0,24-1,31	0,20-1,57	3,32-8,18	0,14-0,44
K ₂ O	0,23-1,13	0,11-1,51	0,22-0,41	0,08-1,21	1,13-2,11	0,30-2,24
S	0,00-6,00	0,10-1,30	-	-	-	0,02-0,05

Fuente: Lorenz y Gwosdz, 2004 y datos del presente estudio.

Microanálisis químicos. Análisis puntuales de las frústulas de diatomeas con el detector de energía dispersiva (EDX) en el microscopio electrónico de barrido (MEB) y en el microscopio electrónico de transmisión (MET) presentaron sílice como elemento principal y aluminio en valores que oscilaron entre el 10 y el 15%, producto de la adhesión de minerales arcillosos (figura 3.3)

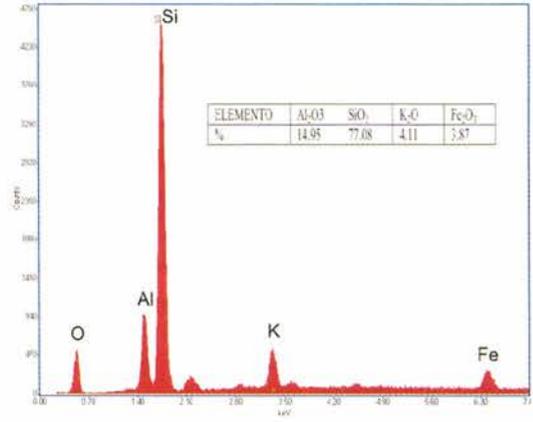


Figura 3.3. Análisis químico puntual (EDX) de la frústula de diatomea en el MEB

En el microscopio de transmisión se observó que las frústulas de diatomeas están compuestas por sílice, en concentraciones mayores al 98%, con trazas de aluminio (figura 3.4); la presencia de este último elemento en las otras muestras analizadas por MEB indica una clara asociación a minerales arcillosos. El cobre es de la rejilla en la cual está colocado el material.

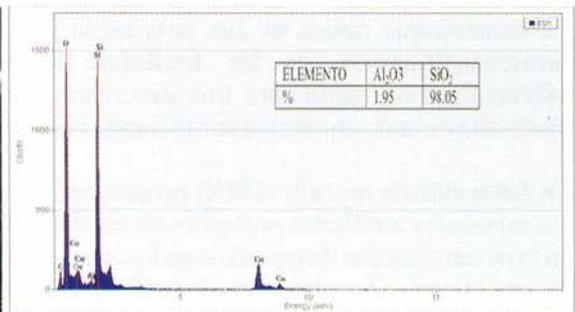


Figura 3.4. Análisis químico puntual (EDX) de la frústula de diatomea en el MET

Los resultados del microanálisis químico (EDX) de las frústulas en el MET muestran una composición silicea. El SiO₂ está entre el 89% y 99%, con significativas cantidades de Al, Fe, Ti, Mn, P, Cu, N, C, álcalis y tierras alcalinas, incluyendo carbono orgánico dentro de la estructura, que puede servir para propósitos de datación por radiocarbono (Dress, 1998), (tabla 3.3).

Tabla 3.3. Composición química del ópalo-A de las frústulas de diatomeas de Chivatá (EDX en el MEB)

ELEMENTOS (en %)	ÓPALO-A			DIATOMEAS FÓSILES -BOYACÁ
	PLANTAS	SUELOS	GEOLÓGICO	
SiO ₂	82,2-87,2	76,4-90,5	85,8-96,5	91,13
Al ₂ O ₃	0,02-0,70	0,84-4,70	T-3,22	6,58
Fe ₂ O ₃	T-0,56	0,18-0,13	0,08-1,85	0,51
CaO	T-1,55	0,10-2,04	0,09-0,96	-
K ₂ O	T-0,90	0,14-0,97	0,75	1,78
C	5,78	0,86	-	-

T=Trazas (<0,01%). Fuente: Dress, 1998 y datos del presente estudio.

Estudios recientes confirman que el aluminio está asociado con la frústula de la diatomea. Puede existir una incorporación estructural del aluminio dentro del esqueleto silíceo. Se puede presentar un rápido enriquecimiento de las frústulas en la interface sedimento-agua (Koning et ál., 2006).

3.2 Caracterización mineralógica

Mineralógicamente, las diatomitas están compuestas por ópalo, constituyentes de las frústulas de diatomeas, y por minerales accesorios, como cuarzo, minerales arcillosos, hematita, limonita y calcita, entre otros; estos accesorios varían de un depósito a otro. Las diatomitas pueden ser analizadas por microscopía óptica y difracción de rayos X en fracción total y menor a 2 µm.

La microscopía óptica de luz polarizada y transmitida permite la identificación y semicuantificación de las frústulas de diatomeas y minerales asociados; adicionalmente, suministra una descripción textural, en cuanto a forma y tamaño promedio de cada uno de los componentes identificados.

La difracción de rayos X (DRX) proporciona la identificación y semicuantificación de los minerales arcillosos presentes en las diatomitas; minerales arcillosos importantes en la determinación de procesos de beneficio, ya que son los principales contaminantes de este material. Los procesos de beneficio llevan a un aumento en la concentración de ópalo, ya que para aplicaciones específicas, como filtración, estos minerales generan disminución de la porosidad y permeabilidad.

La difracción de rayos X (DRX) se realiza en dos tipos de montajes: 1) En muestra en polvo para la identificación de todos los minerales presentes, sin previo ordenamiento de los planos cristalográficos, y 2) En muestra orientada para la identificación de los minerales arcillosos, analizando la fracción menor a 2 µm. Se sigue la rutina de análisis propuesta por Thorez (2003), trabajando para cada muestra un montaje y tres tratamientos de la fracción menor a 2 µm orientados: natural, solvatado con etilen glicol y calentada a 110 °C y 500 °C.

Mineralogía total. Las diatomitas del departamento de Boyacá están compuestas, en orden de abundancia, por ópalo (compuesto de las frústulas de diatomeas y espículas), minerales arcillosos y sericita, cuarzo, goethita y limonita. Los minerales arcillosos se presentan conformando agregados. Como minerales trazas (menores al 1%) están: plagioclasa, anortoclasa, circón, fragmentos de vidrio y líticos de lodolitas silíceas (tabla 3.4, figura 3.5).

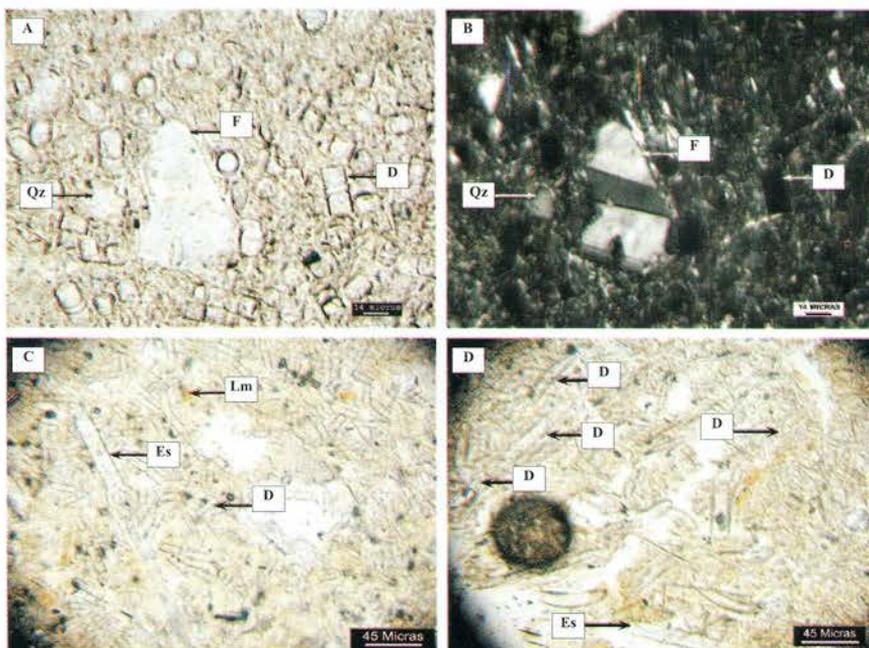


Figura 3.5. Imágenes en sección delgada. A, B. Diatomita Chivatá. C. Diatomita Tunja. D. Diatomita Siachoque. D: Diatomeas, Qz: Cuarzo, F: Feldespato (Plagioclasa), Es: Espiculas, Lm: Limonita

Tabla 3.4. Composición mineralógica de los depósitos de diatomitas

COMPOSICIÓN	TUNJA		SIACHOQUE		CHIVATÁ	
	DST1 %	DST2 %	DSS1 %	DSS2 %	DSC1 %	DSC2 %
Diatomeas (ópalo)	67	46	65	80	65	67
Espiculas (ópalo)	3	14	1	9	TR	TR
Sericita y minerales arcillosos	21	31	23	8	28	24
Cuarzo	4	3	3	TR	5	3
Goethita y limonita	3	1	5	3	2	1
Feldespatos	1	1	1	TR	-	2
Circón	-	-	1	TR	-	2
Leucóxeno	-	-	1	TR	-	-
Fragmentos de vidrio	1	4	TR	TR	-	1
Líticos de lodolitas silíceas	-	-	-	-	TR	-

TR=Trazas (<1%)

Industrialmente la diatomita puede denominarse tierra de moler, por tener minerales arcillosos en cantidades mayores al 10% (Lorenz y Gwosdz, 2004). Los resultados de mineralógicos muestran proporciones similares a otros yacimientos de diatomita, explotados a nivel mundial (tabla 3.5).

Tabla 3.5. Composición mineralógica del material en bruto de yacimientos en el mundo

COMPOSICIÓN MINERALÓGICA (%)	ALEMANIA (DETHLINGEN)	ESPAÑA (GUADALQUIVIR)	AUSTRALIA (NEW SOUTH WALES)	PERÚ (SEGURA)	COLOMBIA (BOYACÁ)
Diatomeas (ópalo)	44 – 72	38 – 70	26 – 74	30 – 60	46 - 80
Cuarzo	5 – 27	7 – 10	1 – 28	10 – 20	3 – 5
Minerales arcillosos	0 – 1	TR – 32	4 – 50	0 – 30	8 – 31
Feldespato	1 – 6	TR	TR	0 – 17	RTR - 2
Calcita	-	8 - 46	TR	0 – 18	-

Fuente: Lorenz y Gwosdz, 2004 y datos del presente estudio.

El tamaño de las diatomeas es variable, depende de la especie predominante y de lo fracturadas que estén. Minerales como cuarzo y feldespato presentan una tendencia de tamaño limo, con máximos en fracción arena muy fina y fina (tabla 3.6).

Tabla 3.6. Tamaño en μm de los componentes de las diatomitas

COMPONENTES	TAMAÑO (μm)	TUNJA		SIACHOQUE		CHIVATÁ	
		DST1	DST2	DSS1	DSS2	DSC1	DSC2
Diatomeas	Máximo	275	225	28	265	47	200
	Mínimo	5	5	3	4	8	5
	Tendencia	15	29	13	19	13	10
Cuarzo	Máximo	113	143	163	225	149	250
	Mínimo	5	4	8	5	5	5
	Tendencia	23	14	38	38	17	35
Fragmentos de vidrio	Tendencia	50	90	10	-	-	-
Feldespatos	Tendencia	-	85	58	35	25	-
Líticos de lodolitas silíceas	Tendencia	51	100	-	80	14	-
Circón	Tendencia	-	20	-	-	-	-

La presencia de plagioclasas zonadas, anortoclasas y cuarzos euhedrales y con bahías (figura 3.6), en diferentes muestras de diatomita, son indicadores del aporte de material volcánico hacia el lago, que se depositó, probablemente, en forma de cenizas. Aporte que pudo provenir del vulcanismo de Paipa, dada la clara asociación mineralógica con los fenocristales de anortoclasa observados en los depósitos de flujos piroclásticos en los alrededores del volcán, de acuerdo con Hernández y Osorio (1990) y Pardo y Alfaro (2005).

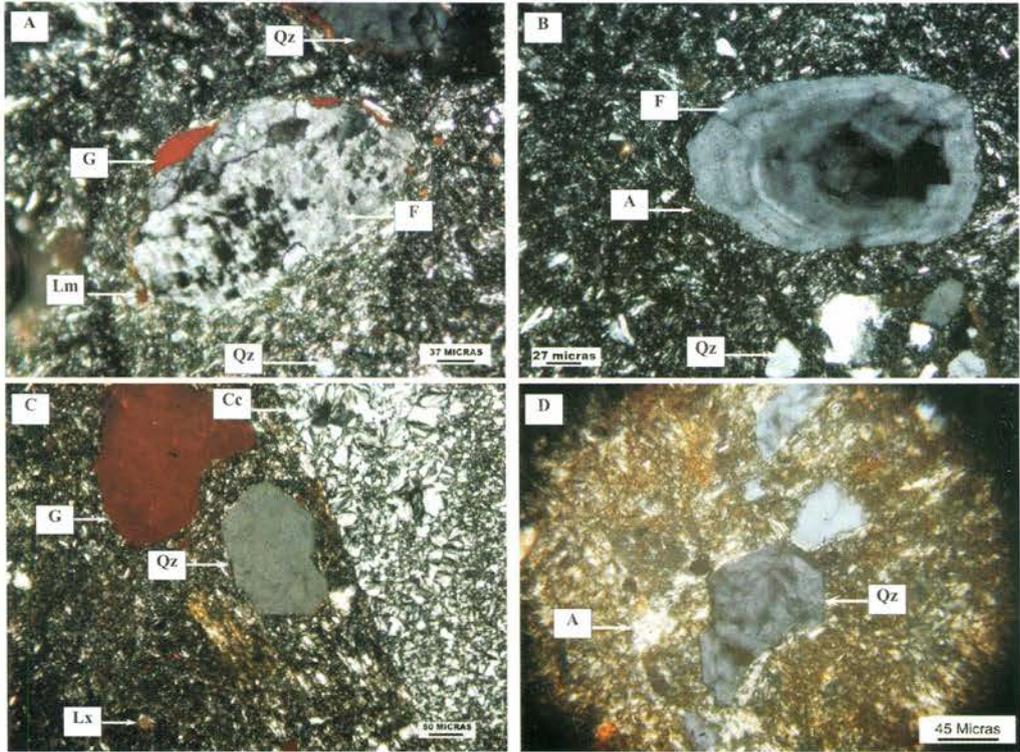


Figura 3.6. Imágenes de diatomitas en sección delgada, nicoles cruzados. **A.** Anortoclasa (F) con superficies de disolución, inclusiones de cuarzo (Qz) e impregnaciones de goethita (G) y limonita (Lm). **B.** Plagioclasa zonada (F), típico mineral de origen volcánico, minerales arcillosos (A). **C.** Cuarzo euhedral (Qz), nótese a la derecha litico de perdnal compuesto por calcedonia (Cc), leucógeno (Lx). **D.** Cuarzo euhedral (Qz) y minerales arcillosos (A).

Mineralogía de arcillas. A través de la difracción de rayos X se identificó ópalo y varios tipos de minerales arcillosos: esméctita, caolinitas, illitas e interestratificados 10-14. También se observó cuarzo y micas (figura 3.7). El montaje en lámina orientada permitió realizar una semicuantificación. Las características de los minerales identificados en la diatomita, a través de los difractogramas realizados en muestras orientadas, fueron las siguientes:

Ópalo A. Reconocible por un difuso y amplio espectro centrado a 4.1Å (Jones y Segnit, 1971). En los difractogramas analizados de montajes orientados se identificó un amplio espectro difuso centrado en la región entre 3.4Å y 4.6Å .

Caolinita. Identificable por su secuencia de reflexiones armónicas de 7.3Å (001) y 3.6Å (002), ambas asimétricas (la primera extendiéndose hacia 9Å y la segunda hacia 3.4Å) y estables después de glicolación; pero al ser calentada a 500°C desaparecen las reflexiones debido a la completa deshidroxilación y destrucción del mineral.

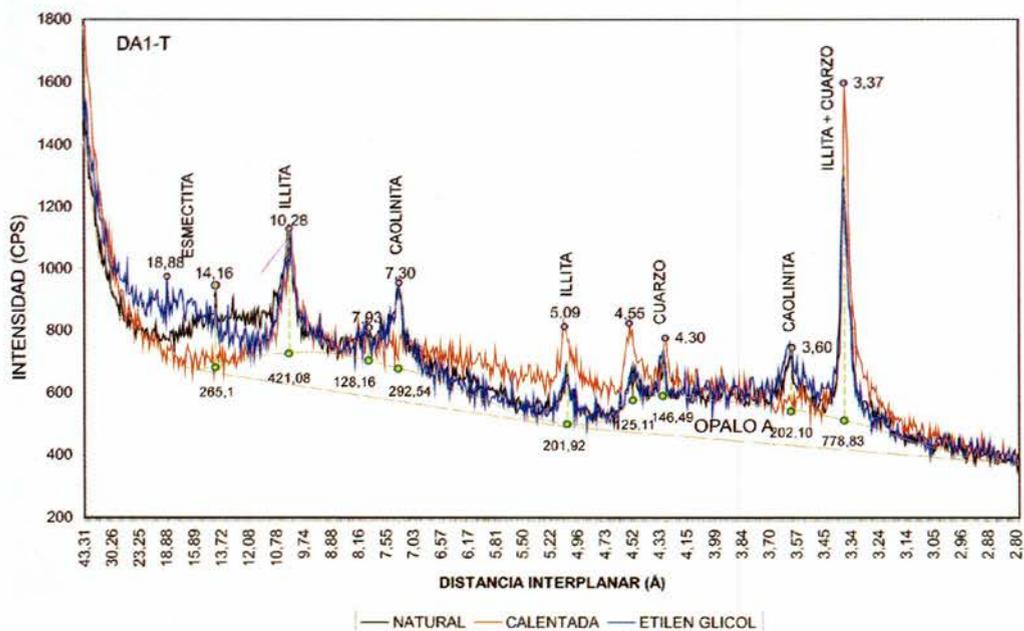


Figura 3.7. Identificación de minerales y mineraloides. Se presenta el valor de la intensidad para cada reflexión.

Illita. Se caracterizó por presentar en montajes orientados las siguientes reflexiones basales: 10,2 Å (001), 5,1 Å (002) y 3,3 Å (003); las reflexiones, una vez glicolada la muestra, se mantienen estables, pero al calentar la muestra aumenta ligeramente la intensidad de la reflexión de 10,2 Å, en este caso, debido a la presencia de esméctita.

Esméctita. Se caracterizó por presentar en el montaje natural una reflexión basal de 13 Å a 16 Å, que solvatada con etilen glicol pasa a 18 Å, y calentada a 500 °C se cierra a 10 Å.

A partir de los difractogramas de las muestras orientadas se realizó una semicuantificación de los minerales presentes en el afloramiento y la perforación, el cálculo se hizo con base en los valores de intensidad (cuentas/segundo) de las reflexiones basales de los minerales dominantes (figura 3.8 y tabla 3.7).

Los depósitos de Tunja y Siachoque muestran un predominio de ópalo y cuarzo en la fracción arcilla. Los depósitos de Chivatá son los que tienen mayor cantidad de minerales arcillosos.

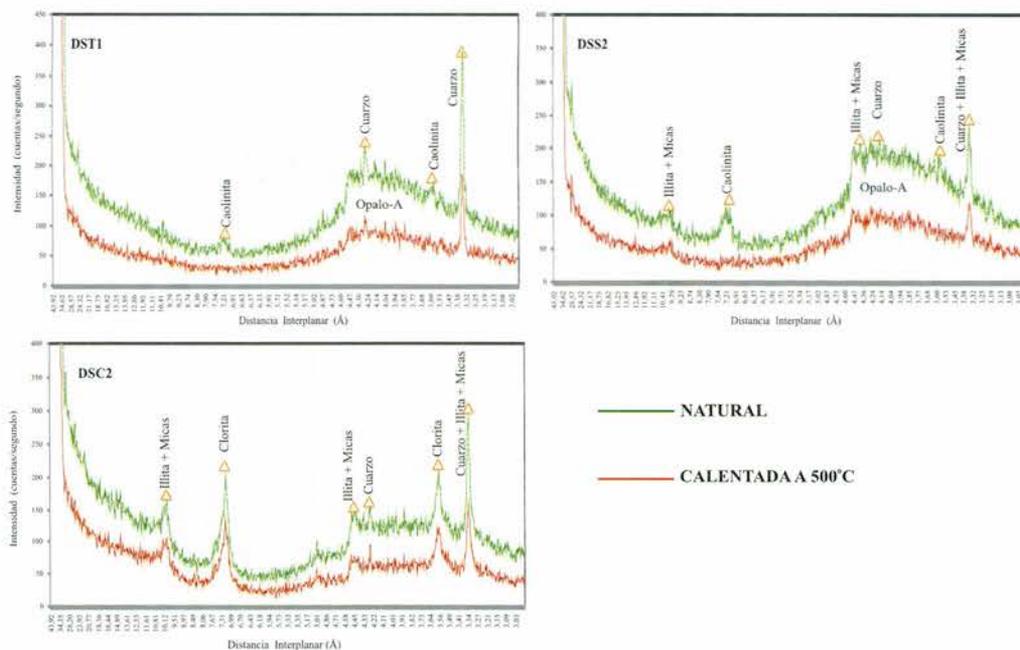


Figura 3.8. Difractogramas de muestras orientadas. Se observan las reflexiones basales de los minerales arcillosos identificados, nótese el espectro difuso entre 3,4 y 4,6 Å del ópalo.

Tabla 3.7. Cuantificación mineralógica por difracción de rayos X de la fracción arcilla (<math>< 2 \mu\text{m}</math>)

Composición	TUNJA		SIACHOQUE		CHIVATÁ	
	DST1 (%)	DST2 (%)	DSS1 (%)	DSS2 (%)	DSC1 (%)	DSC2 (%)
Illita	-	16	19	15	29	17
Caolinita	20	13	16	19	27	-
Clorita	-	-	-	-	-	33
Esméctita	-	8	-	6	21	10
Cuarzo	80	63	65	60	23	40

3.3 Taxonomía

Se realiza una identificación de las principales familias de diatomeas fósiles; su sistemática taxonómica se establece según Spiniello (1996), Flórez y Lozano (1999) y Oliva (2005) y con la colaboración de Carlos Rivera, de la Universidad Javeriana (tabla 3.8). El análisis se realiza por microscopía óptica y electrónica. Las muestras analizadas son lavadas por centrifugación con peróxido de hidrógeno, con el fin de eliminar la materia orgánica; el montaje se realiza tomando una alícuota de 0,5 ml con

una pipeta del material en suspensión y transfiriéndolo a un portaobjetos, dejando evaporar el agua a temperatura ambiente; al final se adiciona Naphrax (I.R=1.74) para su observación en el microscopio.

En Boyacá, las muestras analizadas presentaron una predominancia de diatomeas cilíndricas del orden Centrales, correspondientes al género *Aulacoseira*, y en menor proporción, al orden Pennales, de los géneros *Fragilaria*, *Gomphonema* y *Staurosirella* (tabla 3.9, figuras 3.9, 3.10 y 3.11).

Tabla 3.8. Sistemática taxonómica de diatomeas fósiles identificadas

CLASE	ORDEN	FAMILIA	GÉNERO	ESPECIES
COSCINODISCOPHYCEAE: Diatomeas céntricas	AULACOSEIRALES (CENTRALES)	AULACOSEIRACEAE	<i>Aulacoseira</i> . Thawaites, 1848	<i>Aulacoseira granulata</i> (Ehrenberg) Simonsen.
FRAGILIARIOPHYCEAE: Diatomeas pennadas sin rafe	FRAGILARIALES	FRAGILIARIACEAE	<i>Staurosirella</i> Williams & Round 1987	<i>Staurosirella pinnata</i> Ehrenberg <i>Fragilaria pinnata</i>). <i>Staurosirella</i> sp1 <i>Staurosirella</i> <i>leptostauron</i> (Ehrenberg).
BACILLARIOPHYCEAE: Diatomeas pennadas con rafe	NAVICULALES	PINNULARIACEAE	<i>Pinnularia</i> . Ehrenberg, 1843.	<i>Pinnularia cf major</i> (Nitzsch) Enrenberg
		NAVICULACEAE	<i>Navicula</i> . Bory de St. Vincent, 1822.	<i>Navicula radiosa</i>
	CYMBELLALES	CYMBELLACEAE	<i>Cymbella</i> . Agardh, 1830.	<i>Cymbella naviculiformis</i> (Averswald) Cleve
		GOMPHONEMA	<i>Gomphonema</i> Ehrenberg nom. Cons. Agrardh, 1832	<i>Gomphonema</i> sp3.
	BACILLARIALLES	BACILLARIA	<i>Nitzschia</i>	<i>Nitzschia</i> sp.
	ACHNANTHALES	ACHNANTHACEAE	<i>Achnanthes</i> Bory de St. Vincent, 1822.	<i>Achnanthes</i> sp.

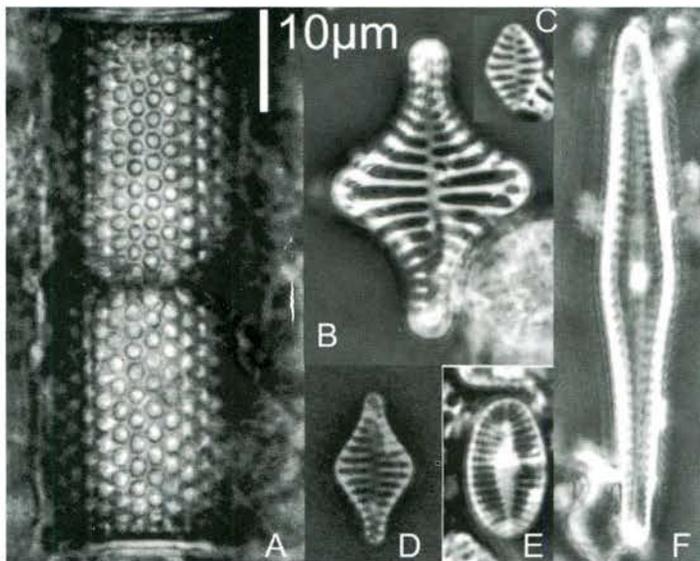


Figura 3.9. Imágenes de diatomeas fósiles identificadas por microscopía óptica. **A.** *Aulacoseira granulata* (Ehrenberg). **B.** *Staurosirella leptostauron* (Ehrenberg). **C.** *Staurosirella pinnata* (Ehrenberg). **D.** *Staurosirella* sp1. **E.** *Achnantes* sp1. **F.** *Gomphonema* sp3.

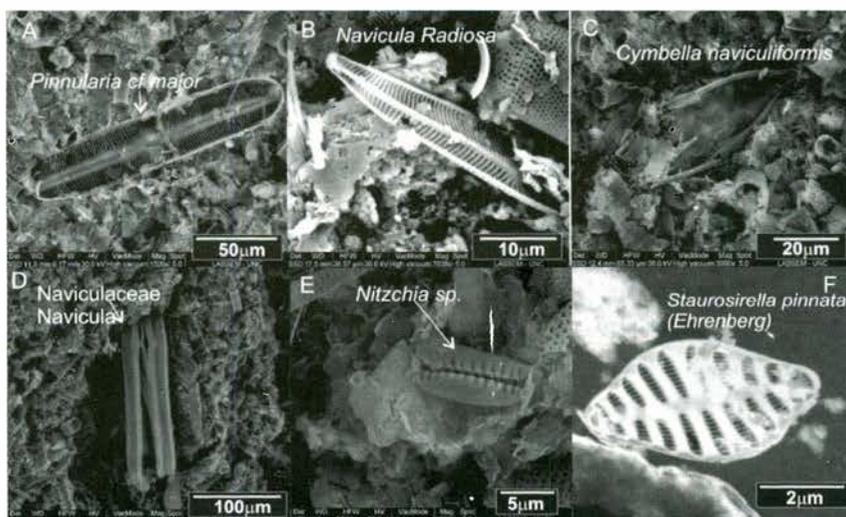


Figura 3.10. Diferentes especies de diatomeas fósiles identificadas en MEB.

Tabla 3.9. Análisis taxonómico porcentual de los géneros identificados.

Género	TUNJA		SIACHOQUE		CHIVATÁ	
	DST1 %	DST2 %	DSS1 %	DSS2 %	DSC1 %	DSC2 %
<i>Aulacoseira</i>	95	37	87	77	97	91
<i>Pinnularia</i>	2	7	6	5	3	3
<i>Cymbella</i>	2	2	3	9	-	2
<i>Stausirella</i>	1	36	-	1	-	4
<i>Gomphonema</i>	-	9	-	-	-	-
<i>Synedra</i>	-	2	TR	-	-	-
<i>Eunotia</i>	-	7	4	6	-	-
<i>Achnantaes</i>	-	-	TR	-	-	-
<i>Fragilaria</i>	-	-	-	2	-	-

TR=TRAZAS

El tamaño promedio de las frústulas de diatomeas varía según la especie. En la *Aulacoseira granulata*, cada individuo tiene una longitud entre 10 y 24 μm ; en algunos casos, la unión de ellos forma cadenas de hasta 100 μm . La especie más grande observada es la *Pinnularia* cf. *major*, con una longitud de hasta 256 μm (figura 3.10-A); en contraste, la más pequeña es la *Stausirella pinnata*, con una longitud de la valva de 3 μm .

Es importante describir la especie más abundante, para el caso, la *Aulacoseira granulata* (figura 3.11), con el propósito de realizar mediciones geométricas del manto, valvas y, en especial, de las areolas, parámetros importantes en el análisis de porosidad y aplicación industrial.

Aulacoseira granulata (Ehrenberg) Simonsen. Es la especie de diatomea más abundante en los depósitos estudiados. Las frústulas son cilíndricas, están unidas formando cadenas rectas y largas (figura 3.11 A) y poseen valvas circulares. La unión entre valvas vecinas se da mediante espinas que se encuentran en el borde (figura 3.11 B y D), que están ensanchadas en la base y se incrustan en la valva adyacente; existen espinas largas, de 15 a 22 μm (figura 3.11 E), que se acoplan en surcos longitudinales que se encuentran entre las líneas de las areolas del manto de la diatomea vecina. Las areolas del manto están dispuestas en hileras diagonales, con una densidad de 15 a 20 areolas en 10 μm . El diámetro de las areolas es menor a 0,5 μm , siendo en promedio del orden de 0,2 μm . La superficie de la valva es plana o con areolas dispersas (figura 3.11 D). El diámetro de la valva está en el rango de 10 a 15 μm y la longitud de la frústula está entre 10 y 24 μm .

Esta especie crece en sustrato lodoso, sobre y alrededor de vegetación acuática sumergida. Vive en lagos, estanques y ríos, en ambientes de agua dulce, con concentraciones de sal muy restringidas. El pH se sitúa entre 6,3 y 9, en ambientes con alta concentración de nutrientes (eutrófica) y temperaturas entre 15 y 30 $^{\circ}\text{C}$. (Oliva, 2005). En general, la *Aulacoseira granulata* tiene una distribución muy amplia; en Europa la reportan mucho en lagos profundos, mientras que en Colombia se ha encontrado más en lagos relativamente someros (Rivera, 2006).

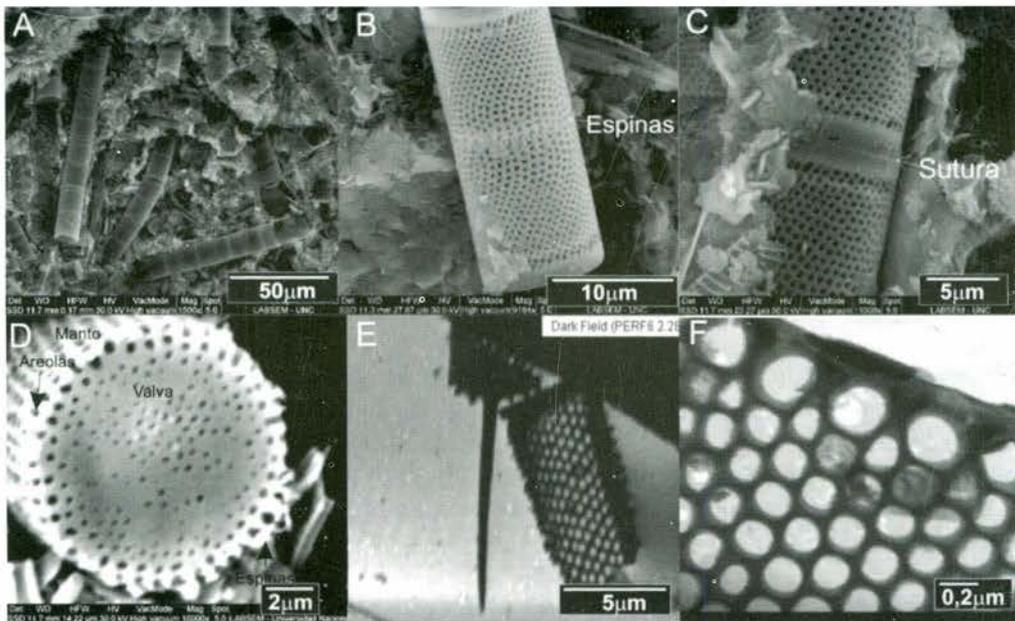


Figura 3.11. *Aulacoseira granulata*, (Ehrenberg) Simonsen. A, B, C y D (Imágenes MEB), E y F (Imágenes MET). A. *Aulacoseira granulata*, especie dominante. Diatomeas cilíndricas que forman cadenas largas. B. Vista pleural, detalle de las espinas cortas que unen las valvas. C. Vista pleural en donde se observa la sutura o cingulo. D. Areolas del manto y de la valva, en el borde de la valva se observan espinas cortas. E. Tipo de espina larga. F. Detalle de las areolas en el manto.

Capítulo 4

Propiedades físico-químicas

Propiedades físico-químicas

La diatomita posee propiedades físicas y químicas que permiten aplicaciones imposibles en otro tipo de material de composición silíceas; se distingue por su baja densidad, gran porosidad, alto poder de absorción y excelente capacidad filtrante; propiedades que, junto con la distribución de tamaño de partícula, área superficial y color, son determinadas con el fin de identificar el potencial uso industrial.

Análisis de laboratorio. Se diseña un diagrama para el estudio de las diatomitas, que sirve de base para el análisis de otros minerales industriales (figura 4.1).

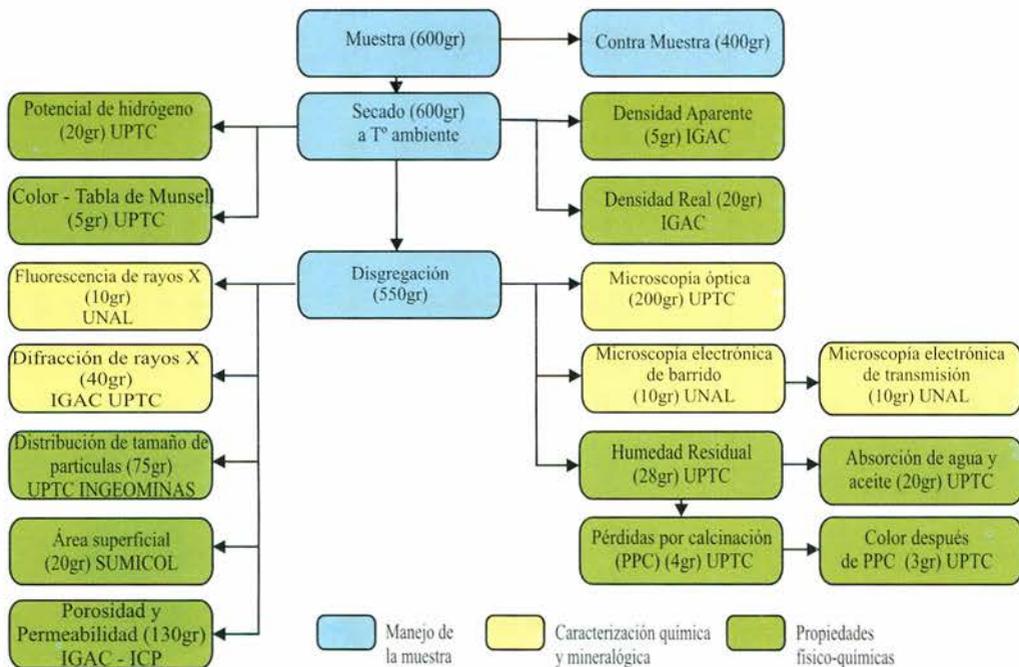


Figura 4.1 Proceso de caracterización de la diatomita

4.1 Densidad

Una de las propiedades que más distingue a la diatomita es su baja densidad aparente, menor que la del agua. Se determinaron las densidades aparente y real de la diatomita en los municipios de Tunja, Siachoque y Chivatá; la aparente, definida por la relación peso-volumen de bloques de material, y la real, calculada por el método de picnometría (tabla 4.1).

Tabla 4.1. Densidades aparente y real de las diatomitas

Densidad	TUNJA		SIACHOQUE		CHIVATÁ	
	DST1	DST2	DSS1	DSS2	DSC1	DSC2
Aparente (gr/cm ³)	0,45	0,68	0,57	0,74	0,52	0,73
Real (gr/cm ³)	2,07	2,12	2,04	1,95	2,27	2,03

La densidad aparente varía por: 1) El tipo de diatomeas (especies) y su relación de areolas (poros), 2) El contenido de accesorios, como cuarzo y minerales arcillosos, y 3) El grado de compactación del material (tabla 4.2).

Tabla 4.2. Comparación de la densidad aparente de las diatomitas en estudio con yacimientos en otros países

PAÍS YACIMIENTO	España Guadalquivir	Australia New South Wales	Colombia Boyacá
Densidad aparente (g/cm ³)	0,59-1,05	0,34-0,95	0,45-0,74

Fuente: Lorenz y Gwosdz, 2004 y datos del estudio.

Por su parte, la densidad real es más uniforme, ya que representa la densidad de las partículas, en este caso del ópalo, como mineraloide predominante, y de los otros minerales presentes (tabla 4.3).

Tabla 4.3. Densidades reales de los componentes de la diatomita

COMPONENTES	Ópalo biogénico	Cuarzo	Esméctita	Illita	Caolinita
Densidad Real (gr/cm ³)	2,1 – 2,3	2,6	1,6 (deshidratada) 2,7 (hidratada)	2,6	2,5 – 2,6

Fuente: Bessoain, 1985.

4.2 Distribución de tamaño de partícula (DTP)

El análisis granulométrico tiene en cuenta el tamaño de las partículas y la proporción en que estas se encuentran. El nombre de partícula se da a una unidad sólida separable, que puede ser de composición simple o compuesta; si las partículas se mantienen firmemente unidas se les denomina agregados. La distribución de tamaño de partícula se puede realizar por difracción láser, utilizando el principio físico de la

dispersión de las ondas electromagnéticas, con muestreo de luz láser a bajo ángulo (LALLS).

En los depósitos de Tunja, Siachoque y Chivatá, las partículas predominantes, en este caso diatomeas, están en la fracción entre 2 y 45 μm (tamaño limo), y la fracción arcilla es menor o igual a un 10% (figura 4.2 y tablas 4.4 y 4.5).

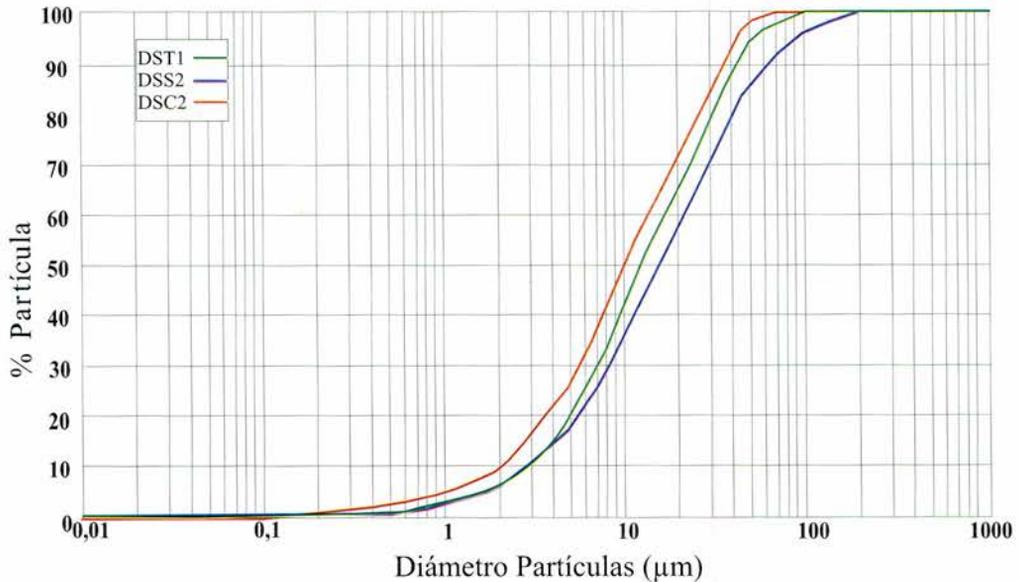


Figura 4.2. Distribución de tamaño de partícula en los depósitos de diatomita

Tabla 4.4. Distribución de tamaño de partícula por rangos de la diatomita

Tamaño de partícula	TUNJA		SIACHOQUE		CHIVATÁ	
	DST1 %	DST2 %	DSS1 %	DSS2 %	DSC1 %	DSC2 %
>45 μm	5	7	10	15	10	5
45 – 15 μm	35	30	40	35	40	35
15 – 2 μm	52	55	40	44	40	50
< 2 μm	8	8	10	6	10	10

Las frústulas de las diatomeas, según la microscopía electrónica, está en la fracción de 10 a 24 μm , que corresponde, según la DTP, a un 50% del material; sin embargo, algunas frústulas están en tamaños menores a 10 μm , rotas por compactación (tabla 4.5).

Tabla 4.5. Porcentaje de partículas por volumen menor o igual al tamaño indicado

% de partículas por volumen menor o igual al tamaño indicado	TUNJA		SIACHOQUE		CHIVATÁ	
	DST1	DST2	DSS1	DSS2	DSC1	DSC2
75%	20 μm	16 μm	16 μm	30 μm	22 μm	17 μm
50%	11 μm	8 μm	9 μm	15 μm	11 μm	10 μm
25%	6 μm	4 μm	4 μm	7 μm	5 μm	5 μm

4.3 Porosidad y permeabilidad

El interés que encierra el estudio del flujo en un medio poroso está en relación directa con los procesos industriales; en el caso de las diatomitas representa un factor importante en los procesos de filtración de bebidas, donde tiene su principal aplicación. El cálculo de porosidad y permeabilidad se realizó en el equipo Automated Core Measurement System (CMS-300), que utiliza el gas de helio a una presión de confinamiento de 800 psi y aplica la Ley de Boyle, para medir el volumen sólido de la muestra (ICP, 2008).

Estas propiedades se obtuvieron para muestras naturales y calcinadas a 900 °C del depósito de Siachoque, observándose un aumento en la muestra calcinada del 40% en la porosidad y del 215% en la permeabilidad (tabla 4.6). Los resultados permiten identificar un uso potencial del material en procesos industriales de absorción y filtración (Lorenz y Gwosdz, 2004).

Tabla 4.6. Porosidad efectiva y permeabilidad de las diatomitas

	CHIVATÁ	SIACHOQUE	
	DSC1	DSS1-N	DSS1-C
Porosidad (%)	41	35	49
Permeabilidad (md)	4,2	2,0	6,3

md: milidarcy

La permeabilidad calculada fue al aire. Como el sistema filtrante es principalmente en medios húmedos, es necesario estimar la permeabilidad con líquidos.

4.4 Diámetro de poros

A través del porosímetro de mercurio se realiza la medición del tamaño; esto se consigue inyectando mercurio a una muestra del material y aumentando luego, hidráulicamente, la presión. La disminución del mercurio es igual al que invadió los poros; se mide en función de la presión aplicada.

El diámetro de poros es importante en la retención de particulado contaminante. En los depósitos de diatomita estudiados se determinó, a través del porosímetro de mercurio,

que entre el 75 y 95% de las frústulas tienen poros con diámetros menores a 2 μm (figura 4.3 y tabla 4.7).

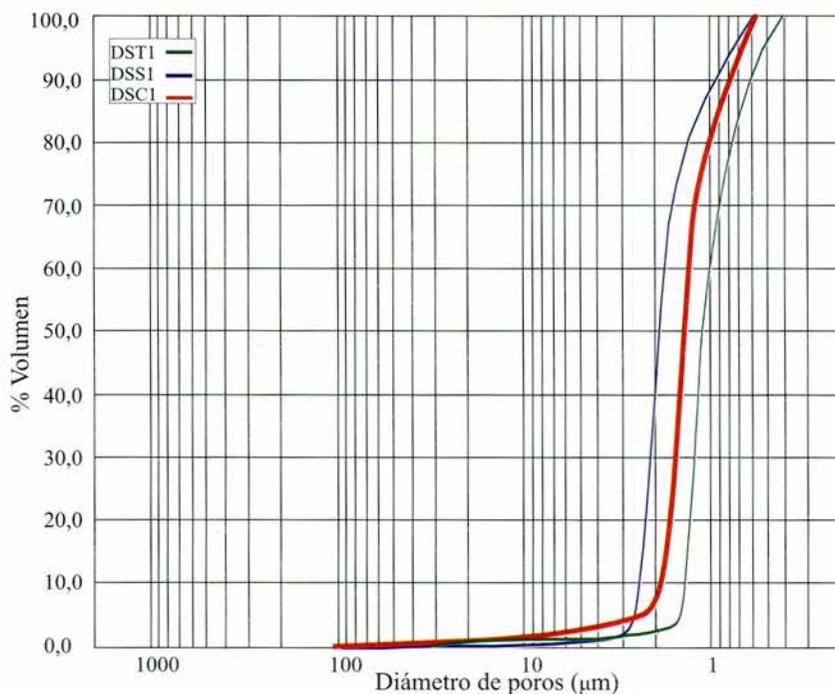


Figura 4.3. Relación del diámetro de poros en los depósitos de diatomitas

Tabla 4.7. Diámetro de poros en las diatomitas

Diámetro de poros	TUNJA		SIACHOQUE		CHIVATÁ	
	DST1 %	DST2 %	DSS1 %	DSS2 %	DSC1 %	DSC2 %
10-100 μm	1	13	1	3	1	2
2-10 μm	23	53	2	17	3	10
1-2 μm	56	16	74	70	55	63
0,4-1 μm	20	19	23	100	41	24

4.4 Área superficial

Su determinación se realiza por adsorción de N_2 a temperatura constante. El área superficial promedio de las muestras analizadas es de 38,6 m^2/g , valor que se encuentra en concordancia con los promedios de otros yacimientos en el mundo (tablas 4.8 y 4.9).

Tabla 4.8. Área superficial de las diatomitas por BET

	TUNJA		SIACHOQUE		CHIVATÁ	
	DST1	DST2	DSS1	DSS2	DSC1	DSC2
Área superficial específica (m ² /g)	34,6	38,7	30,0	24,4	37,6	39,0

Tabla 4.9. Área superficial de la diatomita en bruto en diferentes yacimientos

PAÍS YACIMIENTO	España Guadalquivir	Alemania Dethlingen	Colombia Boyacá
Área superficial (m ² /g)	18,9 – 69,0	8,6 – 42,0	24,4 – 39,0

Fuente: Lorenz y Gwosdz, 2004 y datos del estudio.

4.5 Humedad residual y absorción

Humedad. El contenido de humedad de un material se da en términos de porcentaje y es la cantidad de agua que el material pierde al ser llevado al horno a una temperatura constante ($110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$), por un tiempo que es determinado por la variación de su peso. El contenido de humedad influye en las propiedades físicas, tales como: peso, densidad y conductividad eléctrica. Los porcentajes de humedad son altos por el poder de absorción natural de la diatomita (tabla 4.10). En la industria se manejan humedades de la diatomita menores al 1% (Celite), por tanto, este material tiene que secarse naturalmente o en horno.

Tabla 4.10. Humedad residual de las diatomitas de los depósitos

	TUNJA		SIACHOQUE		CHIVATÁ	
	DST1	DST2	DSS1	DSS2	DSC1	DSC2
Humedad residual (%)	5,51	5,74	3,73	7,05	5,68	5,34

Absorción. La capacidad de absorción está directamente relacionada con la porosidad y área superficial. La absorción es un proceso físico. El cálculo se realiza midiendo el volumen necesario para saturar con agua o con aceite un peso conocido de material seco. Este método permite determinar la absorción en porcentajes, y se da cuando se forma una pasta blanda al adicionar cuidadosamente gota a gota el aceite o el agua a la muestra de material (diatomita), homogenizando suavemente, norma ASTM D 1483-84 - Método Gardner-Coleman. La cantidad de aceite o de agua necesaria para formar la pasta se usa para calcular el valor del porcentaje de absorción. La absorción de agua es ligeramente mayor que la de aceite en todos los casos (tabla 4.11), esto se debe a la mayor viscosidad del aceite. Se contrastan los resultados con yacimientos en otros países (tabla 4.12).

Tabla 4.11. Absorción de las diatomitas de los depósitos

	TUNJA		SIACHOQUE		CHIVATÁ	
	DST1	DST2	DSS1	DSS2	DSC1	DSC2
Absorción de agua (%)	158	92	84	144	113	125
Absorción de aceite (%)	156	91	80	136	105	120

Tabla 4.12. Absorción de la diatomita en bruto en diferentes yacimientos

PAÍS YACIMIENTO	España Guadalquivir	Australia New South Wales	Colombia Boyacá
Absorción de agua (%)	115 - 504	30 - 164	84 - 158
Absorción de aceite (%)	117 - 562	18 - 108	80 - 156

Fuente: Lorenz y Gwosdz, 2004 y datos del estudio.

4.6 Pérdidas por calcinación y color

Cuando un material es llevado a temperaturas por encima de los 900 °C se presentan las pérdidas por calcinación, por deshidratación, deshidroxilación y destrucción total de la materia orgánica presente en la muestra; estas pérdidas se dan en términos de porcentaje (tabla 4.13).

Tabla 4.13. Pérdidas por calcinación (PPC) de las diatomitas de los depósitos

	TUNJA		SIACHOQUE		CHIVATÁ	
	DST1	DST2	DSS1	DSS2	DSC1	DSC2
PPC (%)	8,3	8,4	10,4	7,9	8,7	7,9

Color. Se establece en las muestras de diatomita, antes y después de calcinarse, por comparación con las tablas de Munsell, utilizadas internacionalmente como suplementos de los colores, para expresar relaciones específicas entre ellos y permitir tratamientos estadísticos de los datos (figura 4.4 y tabla 4.14).



Figura 4.4. Color de la diatomita. A. Muestra antes de calcinar. B. Muestra después de calcinar.

Tabla 4.14. Color de las diatomitas al natural y calcinada de los depósitos

	TUNJA		SIACHOQUE		CHIVATÁ	
	DST1	DST2	DSS1	DSS2	DSC1	DSC2
Color natural	10YR 8/2	10YR 8/2	10YR 8/2	10YR 7/3	10YR 8/3	10YR 8/2
	Pardo muy pálido					
Color calcinado	2.5Y 8/2	2.5Y 8/2	2.5Y 8/2	N9	5YR 8/1	10YR 8/2
	Amarillo pálido			Blanco	Gris rosado	Pardo muy pálido

4.7 Potencial de hidrógeno (pH)

Expresa las concentraciones de ion hidronio en las soluciones acuosas. En las muestras analizadas el pH es de tipo ácido y está en concordancia con el que se presenta en otros yacimientos que han sido explotados en el mundo (tablas 4.15 y 4.16).

Tabla 4.15. Potencial de hidrógeno de las diatomitas de los depósitos

	TUNJA		SIACHOQUE		CHIVATÁ	
	DST1	DST2	DSS1	DSS2	DSC1	DSC2
pH	3,6	3,8	3,9	3,6	4,4	4,4

Tabla 4.16. Potencial de hidrógeno de la diatomita en bruto en diferentes yacimientos

PAÍS YACIMIENTO	Alemania Lüneburger Heide	Australia New South Wales	Colombia Boyacá
pH	2,8 – 5,4	5,4 – 8,2	3,6 – 4,4

Fuente: Lorenz y Gwosdz, 2004 y datos del estudio.

Capítulo 5

Potencial uso industrial

Potencial uso industrial

La diatomita presenta propiedades físico-químicas especiales, como baja densidad aparente ($<0,6\text{g/cm}^3$), alta porosidad efectiva ($>50\%$), diámetros de poros $<2\mu\text{m}$, capacidad de absorción de agua ($>100\%$) y composición química inerte. Propiedades que generan un amplio espectro de aplicaciones (figura 5.1).

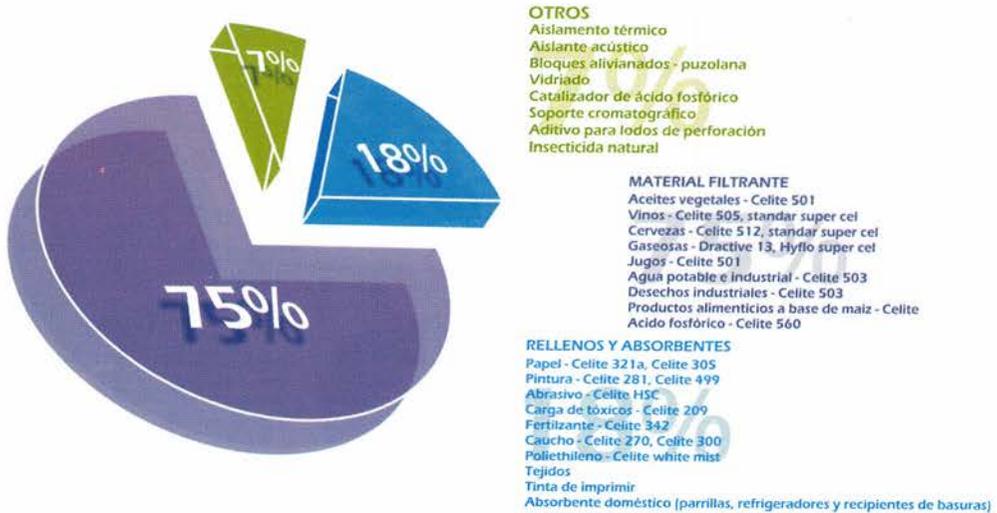


Figura 5.1. Usos industriales de las diatomitas

Los usos industriales pueden ser evaluados por dos métodos: 1) Comparación con los "data technical sheet" requeridos para los diferentes aplicaciones, y 2) Experimentación y realización de pruebas de laboratorio e industriales con empresas. Con el primer método se establece el potencial uso industrial, y con el segundo se determina la aplicación experimental.

Los principales usos de la diatomita son: 1) Elemento filtrante para purificación de cerveza, vino, licores azucarados, zumos y aceites comestibles; 2) Absorbente;

3) Soporte de catalizadores; 4) Plaguicida, fertilizante y acondicionador de suelos; 5) Carga en pinturas, plásticos, caucho, papel, pasta y moldes dentales; 6). Aporte de sílice para el cemento portland; 7) Elaboración de silicatos sintéticos (zeolitas); 8). Productos aislantes o ignífugos, y 9) Abrasivo suave para pasta de dientes y pulido de la plata.

Para su aplicación se requiere, generalmente, de un beneficio por vía seca o húmeda. Para filtración, por ejemplo, consiste en los procesos de secado, trituración, molienda, clasificación y calcinación próxima al punto de fusión de la sílice amorfa, que puede ser sin o con fundente, generalmente carbonato sódico (Alves, 2002), que elimina la materia orgánica y reduce el área superficial, aumentando la permeabilidad.

5.1. Filtración

El uso más generalizado de las diatomitas es como material filtrante. Cuando a un líquido con impurezas se le agrega diatomita, esta se acumula a un lado del medio filtrante, formando una capa porosa con múltiples e intrincadas vías de tránsito; en los finísimos poros que constituyen la estructura de las frústulas de diatomeas, las impurezas son retenidas por absorción mecánica y retiradas del filtrado. Como tal lo emplean las industrias cervecera, de gaseosas, de azúcar y de la glucosa de maíz (Moreno y Tobón, 2006). Recientemente, la industria de jugos de fruta ha aumentado la demanda nacional por este auxiliar filtrante. Bavaria, Postobón y Manuelita importan este material con el nombre comercial de Diactive 13 o Hyflo Supercel (legiscomex, 2008), con las siguientes especificaciones (tabla 5.1).

Tabla 5.1. Propiedades físico-químicas de material importado para filtración de bebidas

COMPOSICIÓN QUÍMICA	Diactive 13 %	Hyflo Supercel %	Diatomita Natural, Boyacá
SiO ₂	87,76	87,99	73,12 – 89,78
Al ₂ O ₃	2,83	3,21	8,97 – 20,40
K ₂ O	0,60	0,60	0,30 – 2,24
Fe ₂ O ₃	0,72	1,00	0,84 – 4,22
TiO ₂	0,17	0,33	0,12 – 0,59
MgO	0,17	0,17	0,27 – 0,63
Na ₂ O	2,02	2,02	0,14 – 0,44
CaO	2,10	2,52	0,06 – 0,27
Color	Blanco	Blanco	Crema
Apariencia	Talco	Talco	Talco
Densidad aparente (gr/cm ³)	0,44	0,32	0,45 – 0,74
Retenido en malla 150	2,2%	2,3%	< 4,5%
pH	9,6	9,6	3,6 – 4,4
Densidad real (gr/cm ³)	2,3	2,3	2,3
Pérdidas por calcinación en %	0,2	0,2	7,9 – 10,4
Permeabilidad (md)	0,6	1,3	2,0 – 4,2

Fuente: Moreno y Tobón, 2006; Technical Data Celite y Estudio.

Es necesario un proceso de beneficio para cumplir con las especificaciones requeridas en la industria: que disminuya el contenido de minerales arcillosos y eleve el tenor de diatomeas.

5.2 Pinturas

Una de las características principales de la diatomita es el efecto de matear las pinturas, debido a su gran absorción de aceite, controlando el brillo y resplandor. Además, sus diminutas partículas forman una estructura o armazón reforzado dentro de la película de pintura, aumentando su duración (Ramos et ál., 2007). En la industria nacional, Píntuco importa el material con el nombre comercial de Carfill, el cual presenta las siguientes especificaciones (tabla 5.2).

Tabla 5.2. Propiedades físico-químicas del material importado para pinturas

COMPOSICIÓN QUÍMICA	Carfill	Diatomita natural, Boyacá
SiO ₂	75,30	73,12 – 89,78
Al ₂ O ₃	13,2	8,97 – 20,40
K ₂ O	4,58	0,30 – 2,24
Fe ₂ O ₃	0,51	0,84 – 4,22
MgO	0,17	0,27 – 0,63
Na ₂ O	4,18	0,14 – 0,44
CaO	0,62	0,06 – 0,27
PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS		
Color	Blanco	Crema
Densidad aparente (gr/cm ³)	0,25	0,45 – 0,74
Retenido en el tamiz 325 (%)	0,18	5 - 15
pH	6,5-8,0	3,6 – 4,4
Densidad real (gr/cm ³)	2,3	2,3
Absorción	137	80 – 156
% Porosidad	87	35 – 41

Fuente: *Technical Data Carfill - Pintuco y Estudio.*

En el caso de pinturas, la principal restricción para su uso es la coloración crema-rojiza, producto de los óxidos de hierro presentes, contaminantes que se deben eliminar en un proceso de beneficio.

5.3 Caucho

En la elaboración de cauchos es utilizada la diatomita como material de carga. Las empresas Dupont y Sempertex la usan para la elaboración de retenedores de caucho y como relleno reforzante. El material es importado bajo el nombre de Cellite 300 (Moreno y Tobón, 2006), con las siguientes especificaciones (tabla 5.3).

Tabla 5.3. Composición físico-química de material importado para caucho

COMPOSICIÓN QUÍMICA	Celite 300 (%)	Diatomita Boyacá (%)	Diatomita sedimentada (%)
SiO ₂	89,6	73,12 – 89,78	92,027
Al ₂ O ₃	4,0	8,97 – 20,40	4,455
Fe ₂ O ₃	1,3	0,84 – 4,22	0,734
P ₂ O ₅	0,2	0,03 – 0,06	0,608
MgO	0,6	0,27 – 0,63	0,199
Na ₂ O+ K ₂ O	3,3	0,41 – 1,07	0,273
CaO	0,5	0,06 – 0,27	1,593
TiO ₂	0,2	0,12 – 0,59	0,110

Fuente: *Technical Data Celite y Estudio*

La diatomita en estado natural no cumple con los requerimientos establecidos para su uso en el caucho, por lo que se requieren procesos de beneficio que disminuyan el contenido de aluminio, representado por minerales arcillosos, y la proporción de los elementos menores, como hierro y fósforo, a valores por debajo del 1%.

5.4 Relleno

Su uso como relleno es amplio, los más notables son presentados en la tabla 5.4, a excepción de la pintura y el caucho, que ya fueron analizados.

Tabla 5.4. Propiedades físicas de diatomitas para diferentes usos como material de relleno

Usos	Papel	Pesticidas	Fertilizantes	Polietileno	Abrasivos	Diatomita Natural Boyacá
Propiedades						
Color	Gris	Gris	Gris	Blanco	Blanco	Crema
pH máx.	6,6	6,2	7,1	9,5	9,4	4,4
% retenido malla 325	8,0	0,5	5,0	0,1	0,1	15
% retenido malla 140	0,5	Trazas	0,5	-	-	4,5
Promedio de tamaño de partícula (micras)	1,0-8,0	-	-	3,5	10,0	1,0 - 5,0
Densidad Real (g/cm ³)	2,1	2,1	2,1	2,3	2,3	2,3
Porosidad %	65,0	65,0	65,0	65,0	65,0	35 – 41

Fuente: *Breese, 1994 y Lorenz y Gwosdz, 2004.*

Para cada aplicación específica se requiere un proceso de beneficio de la diatomita, que disminuya la cantidad de minerales arcillosos, cuarzo y óxidos de hierro, concentrando las diatomeas, lo cual se refleja en el mejoramiento de su color y en el aumento de su porosidad y permeabilidad.

En el caso del papel, el polietileno y los abrasivos, el tamaño de partícula no se ajusta y, por tanto, la diatomita tiene que ser clasificada. El tratamiento por flujo-calcinación, en el caso de abrasivos, hace que la partícula tenga el efecto abrasivo requerido para el pulido de automóviles.

5.5 Otras aplicaciones

Aislante térmico. Las propiedades térmicas de la sílice y la porosidad de la frústula hacen de la diatomita un excelente aislante térmico en un rango de temperaturas que van desde el frío hasta el punto de fusión de la sílice amorfa, en torno a los 1.200 °C. Por su baja densidad aparente, además, es una materia prima preferida en la fabricación de ladrillos y morteros aislantes.

Bloques alivianados. La diatomita, por su baja gravedad específica, es utilizada en la fabricación de piezas alivianadas que reduzcan la carga portante de las estructuras, mejorando además su resistencia a la abrasión química.

Absorción de líquidos. Por ser químicamente inertes y exhibir una gran área superficial por unidad de masa, las tierras de diatomeas son excelentes portadoras y dispersantes de productos químicos. En agua, la diatomita es capaz de absorber hasta 2,5 veces su peso. De este modo, líquidos de transporte riesgoso, como los ácidos sulfúrico o fosfórico, pueden ser convertidos en un polvo de porteo considerablemente más seguro.

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.
- AYA, P. y Bello, N. (1986): *Manifestaciones de diatomitas en la sábana de Bogotá y sus implicaciones económicas*. Tesis de grado: Geólogo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Departamento de Geociencias.
- ALFARO, C. (2005): *Alteración hidrotermal en el sistema geotérmico de Paipa..* Bogotá: Ingeominas.
- ALVES Franca, S. y Adao Benvindo, D. (2002): *Beneficiamento de Diatomita da Bahía*. CETEM.
- BREESE, R. (1994): "Diatomite". En: *Industrial Minerals and Rocks*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc, Littleton, Colorado.
- BESSOAIN, E. (1985): *Mineralogía de arcillas de suelos*. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura..
- COOPER, M.; Adisson, F.; Álvarez, R.; Coral, M.; Graham, R.; Hayward, A.; Howe, S.; Martínez, J.; Naar, J.; Peñas, R.; Pulham, J.; Taborda, A. (1995): "Basin Development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia". *AAPG Bulletin*, 79 (10): 1421-1443.
- CEPEDA, H. (1978): *Diatomitas. Recursos Minerales de Colombia*. Bogotá: Publicaciones Especiales del Ingeominas. Págs. 173-177.
- DOLLEY, T. (2008): *Diatomite*. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. Disponible en: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/diatomite/mcs-2009-diato.pdf>. [Consultado el 01 de febrero de 2009].
- DOLLEY, T & Moyle, P. (2003): *History and Overview of the U.S. Diatomite, Mining Industry, with Emphasis on the Western United States*. Bulletin 2209-E, USGS. Disponible en: <http://pubs.usgs.gov/bul/b2209-e/>. [Consultado el 01 de febrero de 2009].
- DRESS, L. (1998): "Elemental Distribution in the Light Mineral Isolate of Soil Separates". *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42: 976-978.
- 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.
- FLÓREZ, M. y Lozano, G. (1999): *Silicofósiles altoandinos*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia - COLCIENCIAS - BID.
- GARZÓN, M. (2004): *Análisis paleoambiental de las diatomitas de Tunja*. Tesis de grado: Geología. Universidad Nacional de Colombia.
- GOBERNACIÓN DE BOYACÁ, SECRETARÍA DE MINAS (1997): *Inventario geológico minero del departamento*. Tunja, 558p.
- HERNÁNDEZ, G. y Osorio, O. (1990): *Geología, análisis petrográfico y químico de las rocas volcánicas del suroccidente de Paipa (Boyacá, Colombia)*. Tesis de grado: Geólogo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Departamento de Geociencias. 1990.

- ICP-ECOPETROL (2008): Análisis petrofísicos básicos, muestras de diatomitas. Laboratorio de análisis petrofísicos. Piedecuesta, Santander.
- INGEOMINAS (1998): *Mapa Geológico, plancha 191, Tunja*. V. 1.0. Bogotá.
- JONES, J. y Segnit, E. (1971): "The nature of opal". *J. Geol. Soc. Aust.* 18: 57-58.
- KONING, E.; Gehlen, M.; Flank, A.; Clas, G.; Epping, E. (2006): "Rapid Post-Mortem Incorporation of Aluminum in Diatom Frustules: Evidence From Chemical and Structural Analyses". *Marine Chemistry Journal*.
- LORENZ, W. y Gwosdz, W. (2004): *Manual para la evaluación geológica-técnica de recursos minerales de construcción*. Hanr. over, Alemania.
- MORENO, D. y Tobón, A. (2006): *Evaluación de alternativas para el uso industrial de tierras diatomáceas contaminadas en el proceso de filtración en Gaseosas Lux S.A.* Bogotá: Universidad América, Departamento de Ingeniería Química.
- MINISTERIO DE COMERCIO, INDUSTRIA Y TURISMO (2008): www.mincomercio.gov.co. Consultado el 30 de noviembre de 2008.
- MUTIS, V. (1943): Yacimiento de tierra de diatomeas de Tunja, Boyacá. Informe N.º 270. Ingeominas.
- OLIVA, M. (2005): "Caracterización diatomológica en tres cuerpos de agua de los humedales de Jilotepec-Ixtlahuaca, Estado de México". En: *Hidrobiológica*, volumen 15. México.
- PARDO, N y Alfaro, C. (2005): Caracterización de cenizas volcánicas por microscopía electrónica para determinar mecanismos eruptivos. Caso Volcán de Paipa, Boyacá. X Congreso Colombiano de Geología. Bogotá. 2005.
- RAMOS, V.; Egeuz, H.; Ladines, L.; Carrión, Paúl (2007): *Perspectivas de la explotación y aplicación de tierra de diatomeas en la Península de Santa Elena*. Disponible en: <http://www.minas.upm.es/relext/Red-Cyted-XIII/web-rimin/rimin1/III-Jornadas-San-Juan/RamosVeronica.pdf>. [Consultado el 30 de abril de 2007].
- ROUND, F. (1990): *The Diatoms. Biology and Morphology of the Genera*. University of Cambridge.
- SANDOVAL, J. (1953): *Yacimientos de diatomita en el Valle del Cauca*. Informe N.º 930. Ingeominas.
- SPINIELLO, P. (1996): "Las diatomeas marino-costeras de Venezuela". *Caribbean Journal of Science*, 32(4): 331-347.
- THOREZ, J. (2003): Seminario-Taller, "Practical XRD Analysis of Clay Minerals".
- VAN DER HAMMEN (1960): *Estratigrafía del Terciario y Maastrichtiano continentals y tectogénesis de los Andes Colombianos*. Servicio Geológico Nacional, Informe 1279.
- WILSON, J. (1994): *Industrial Clay Case Study*. Indiana. USA. Ed. Exeter. 446 p.

Este libro se terminó de publicar
el día 13 de noviembre de 2009