

# 4

## Análisis de resultados y usos de los minerales del departamento

En este capítulo se ahonda en las potenciales aplicaciones de los minerales del departamento de Boyacá, los resultados relevantes de algunas caracterizaciones y la discusión del uso potencial.

### **4.1 Calizas.**

La estabilización con cal hidratada ( $\text{Ca} [\text{OH}]_2$ ) producida de la transformación química de la roca caliza, es ampliamente usada en el mejoramiento de diseño de pavimentos; este tratamiento puede ser usado en varios grados o cantidades dependiendo del objetivo. La cantidad utilizada y forma de aplicación pueden mejorar una vía temporalmente, generando una plataforma de trabajo apta con un mayor grado de respaldado por pruebas de laboratorio y diseños estructurales óptimos, se puede generar la estabilización permanente de un suelo

#### **4.1.1 Estabilización de suelos expansivos.**

A través de la caracterización por DRX, se puede concluir que las rocas calcáreas del departamento de Boyacá tienen un alto potencial en sus contenidos de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) ver Tabla 2, por lo que su factibilidad comercial en usos estabilizantes tendría un alto impacto en la economía regional.

Tabla 2. Resultados difracción de rayos X, para las siete minas objeto de estudio de caliza.

Banco	Formación	Ubicación	DRX	Contenido Calcita 1	Contenido Calcita con cristalinidad
E	Tibasosa	Tibasosa, la carrera	X	88.90%	66.30%
G	Tibasosa	Nobsa, vereda Calerasx	X	85%	55.60%
D1	Tibasosa	Tibasosa, la carrera	X	76.9%	61.4%
B	Tibasosa	Corrales, mina el volador (Acerías)	X	78.1%	56.2%
1	Paja	Moniquira (Vda. Gonzales)	X	80.9%	61.60%
x	Paja	Moniquira (Vda. El cairo)	X	81.8%	77.8%
x	Paja	Villa de leyva (Vda la pedrera)	X	93.3%	91.8%

La estabilización se logra, trasformando la caliza en cal viva. Que se consigue mediante el uso de altas temperaturas sobre el mineral. La temperatura de calcinación varía según el tipo de horno con el que se lleve a cabo el procedimiento, la preparación en hornos cerrados y muflas del proceso de calcinación requiere más tiempo, para este caso se utilizó un horno rotatorio y un tamaño de grano óptimo de caliza de 12.7 y 19.1 milímetros.

El tamaño de grano óptimo de caliza para la calcinación en horno rotatorio es de tamaño 12.7 y 19.1 mm., correspondientes a los tamices  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{3}{4}$ , y en este tamaño se observó el mayor porcentaje de calcinación o calcinación completa, además de mejores rendimientos en cuanto al material cargado y el material que se toma como producto final, con pérdidas aproximadas del 50% del total de este material.

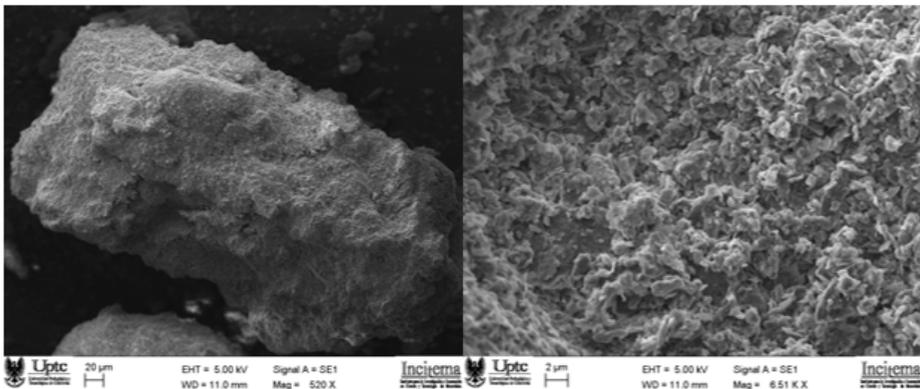
Se concluye de la caracterización mineralógica, microestructural y morfológica de suelos expansivos del altiplano cundiboyacense, que es un material medianamente amorfo, con estructura desordenada

y contenidos altos de fases arcillosas del grupo íltico con elevado potencial de expansividad (a lo largo del perfil litológico de 0.7 metros a 13.3 metros). A partir del ensayo de límites de Atterberg, se pudo corroborar el resultado de la caracterización química y microestructural de los suelos arcillosos, clasificándolo según la norma INV-E 132-13 como suelos de medio, alto potencial expansivo y arcillas de alta plasticidad (CH) en gran parte del perfil estratigráfico, además, de concluir su alta heterogeneidad a lo largo y ancho de perfil por la variación de propiedades a lo largo y en profundidad del mismo, y la disminución de los límites con la adición de cal viva, como se puede observar en la Tabla 3.

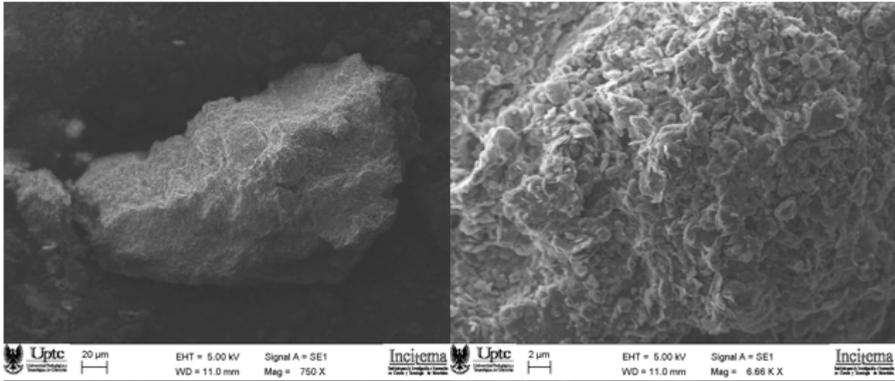
#### 4.1.2 Estabilización de suelos con cal de la mina el Volador en Corrales, manto B.

La reorganización del material se puede identificar no solo a través de análisis químicos sino en fotografías de alta resolución con aumentos de 500X a 6000X Figura 17, mostrando orientaciones preferentes del material en su microestructura, obtenido con el microscopio de barrido electrónico con que cuenta el Incitema de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

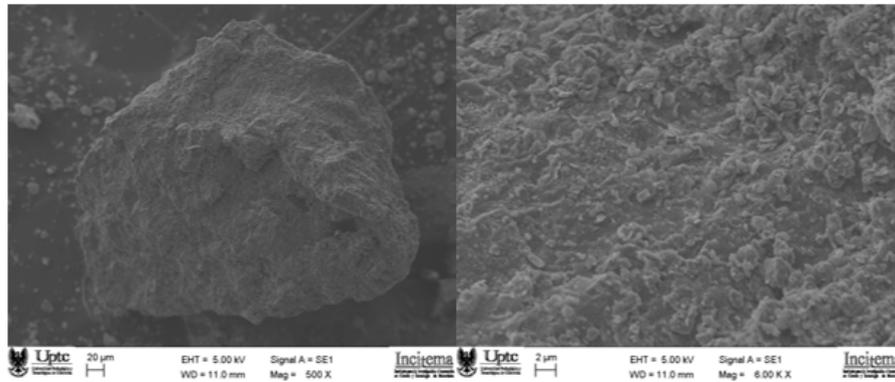
Para este caso particular, se generó estabilización de suelos con cal de la mina el Volador en Corrales, manto B, que se muestran en las imágenes obtenidas por MEB de Figura 17.



a)



b)

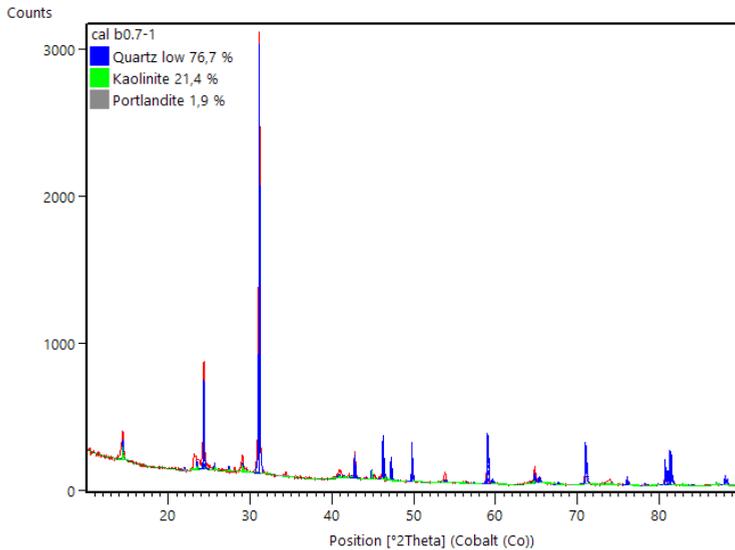


c)

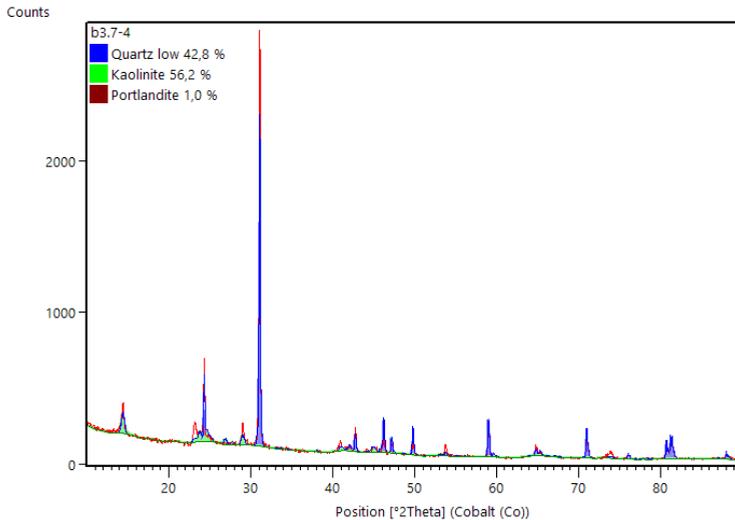
Figura 17. Muestras de arcilla estabilizadas con cal a distintas profundidades, analizadas en el microscopio de barrido electrónico. (a). Nivel litológico 0.7-1 metros, con aumentos de 520X y 6511X. b) Nivel litológico entre 3.7-4 metros, con aumentos de 750X Y 6000X. (c) Nivel litológico entre 13 y 13.3 metros, con aumentos de 500X y 6000X.

El análisis de difracción de rayos X, Figura 18, fue de vital importancia en el proyecto, porque a través de este se pudo constatar el reordenamiento que generó la adición de Cal ( $\text{CaO}$ ) a los suelos expansivos, haciendo reaccionar las fases arcillosas ílticas y cerrando sus espacios microestructurales, llevándolos a una fase caolinítica donde los iones libres del agua no interactúan con la estructura arcillosa y no generan una expansión libre del material en un nivel macro, observando en la figura b que la cantidad de caolinita alcanza un considerable 56.2%.

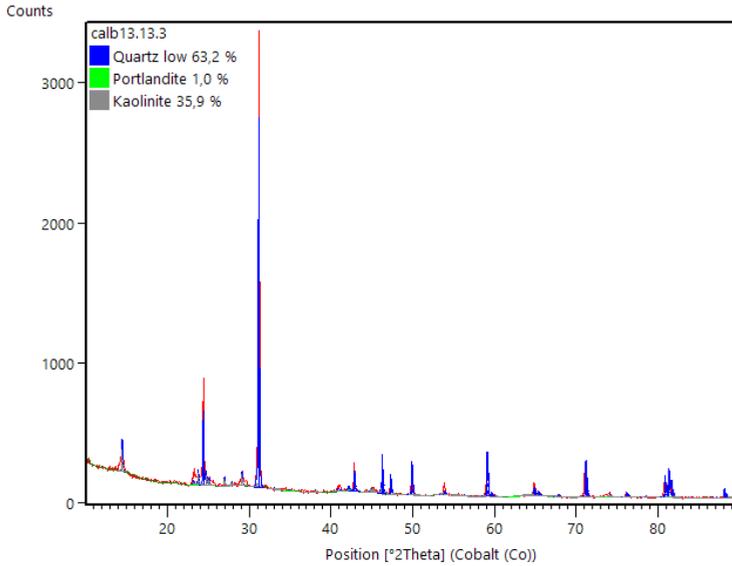
Se presenta la estabilización con cal de la mina El Volador como ejemplo, señalando que las calizas enmarcadas en el estudio presentan comportamientos semejantes y cumplirán con el objetivo deseado de estabilizar.



a) Nivel litológico 0.7-1 m contenidos de Cuarzo y fases arcillosas de Caolinita, de óxido de Calcio.



b) Nivel litológico 3.7-4 m. contenidos de Cuarzo y fases arcillosas de Caolinita, contenidos de óxido de Calcio.



c) Nivel litológico 13- 13.3 m. contenidos de Cuarzo y fases arcillosas de Caolinita, contenidos de óxido de Calcio.

Figura 18. Perfiles de difracción de rayos X (DRX) en partículas <0.075 mm, mezclas suelo + cal manto B. (a). Nivel litológico 0.7-1 m contenidos de Cuarzo y fases arcillosas de Caolinita, de óxido de Calcio b) Nivel litológico 3.7-4 m. contenidos de Cuarzo y fases arcillosas de Caolinita, contenidos de óxido de Calcio c) Nivel litológico 13- 13.3 m. contenidos de Cuarzo y fases arcillosas de Caolinita, contenidos de óxido de Calcio.

Tabla 3. Resumen límites suelos estabilizados con cal del manto B y clasificación

Barreno N°- Prof. (m)	Límites suelos estabilizados con cal del manto B y clasificación					Clasificación USC	
	Límite Líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad (%)	Índice de liquidez			
(0,70/0,95)	32	26	6	-1.1	<b>C</b>	<b>L</b>	
(3,70/4,00)	48	32	16	-0.5	<b>M</b>	<b>L</b>	
(13.13.3)	37	23	14	-0.3	<b>C</b>	<b>L</b>	

El análisis de límites de Atterberg a la mezcla de suelos arcillosos con contenidos corregidos del 4.4% de óxidos de Calcio por el contenido de Calcio útil de cada uno de los subproductos, arrojó que

la estabilización o reorganización de las macropartículas del material arcilloso, reduce la expansividad en gran medida, generando una nueva clasificación para estos suelos como arcillas de baja plasticidad (CL), y clasificándolos como materiales de baja y media expansividad según la norma INV- E 132-13, con límites líquidos entre el 28% y el 41%, como se muestra en la Tabla 3.

## 4.2 Carbón.

Las Pruebas de caracterización de los carbones unitarios, se realizaron bajo los procedimientos de las siguientes normas (ASTM, 2010): Muestreo y preparación de muestra, ASTM D-346, y D-2013; Humedad (HT), ASTM D-3173; Cenizas (Cz), ASTM D-3174; Materia Volátil (M.V.), ASTM D-3175; Carbono fijo (C.F.), ASTM D-3176; Índice de Hinchamiento Libre (FSI), ASTM D-720; Azufre (S), ASTM D-2492, Poder calorífico (PC), ASTM D-2015; El cálculo de los análisis en diferentes bases se hace bajo la norma ASTM-D 3180.

En la Tabla 4, se registran los resultados de las muestras analizadas, para determinar: Air Dry Loss (Pérdidas por secado al aire) (ADL), Humedad Residual (HR), Humedad Total (HT), Cenizas (Cz), Materia Volátil (M.V.), Carbono Fijo (C.F.), Free Swelling Index (Índice de Hinchamiento Libre) (F.S.I) y Azufre (S); determinados en Base Como Se Recibe (CSR), en Base Seca (BS) y en Base Seca Libre de Cenizas (BSLCz), de acuerdo con las normas ASTM D 3180; la clasificación por rango, se hace con base en la tabla de clasificación internacional, Tabla 5, de la norma ASTM D 388, además de las propiedades de los carbones gasificables.

Tabla 4. Resultados de Análisis Próximos en diferentes bases según norma ASTM -D 3180.

Cálculo de resultados	Como se recibe								Base seca			Base seca libre de cenizas		Rango del carbón según norma ASTM D388
	(BCSR)								(BS)			(BSLCz)		
	ADL %	HR %	HT %	Cz %	M.V. %	C.F. %	F.S.I.	S %	CZ %	M.V. %	C.F. %	M.V. %	C.F. %	
M1	0.97	5.87	6.78	9.06	40.84	44.23	1	0.74	8.00	39.78	43.17	39.66	43.05	Subituminoso
M2	1.55	7.32	8.76	14.86	41.07	36.75	0.5	1.61	13.78	39.99	35.67	39.78	35.46	Subituminoso
M3	0.29	1.13	1.42	12.58	30.26	56.03	5	0.89	11.57	29.25	55.02	29.10	54.87	Lignito
M4	1.55	2.28	3.79	7.66	38.19	51.87	2	0.51	6.64	37.17	50.85	37.08	50.76	Subituminoso
M5	0.50	2.01	2.50	16.61	34.97	46.41	1	1.55	15.59	33.95	45.39	33.74	45.18	Lignito

Tabla 5. Propiedades de los Carbones gasificables - bajo rango

<i>Intervalos</i>	<i>Humedad</i>	<i>Materia volátil</i>	<i>Carbono fijo</i>	<i>Cenizas</i>	<i>Azufre</i>
<i>Lignitos</i>					
Valores mínimos	8.3	28	24.4	9.2	0.2
Valores máximos	12.5	50.8	40	52	5.5
<i>Subbituminosos</i>					
Valores mínimos	2.4	22	24.5	6.3	0.2
Valores máximos	20.2	51.8	53.1	50.4	2.1

Fuente: (Kumabe, 2007)

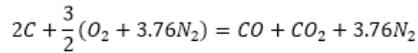
Con base en los antecedentes nacionales e internacionales, se proyecta la adaptación del proceso de gasificación de los carbones de Boyacá, para implementarlo experimentalmente en la industria ladrillera. A partir del estudio analítico del proceso de gasificación y del análisis térmico en horno túnel, se hace el cálculo estequiométrico para conocer la producción de gas con carbones de Boyacá. Finalmente se desarrolla la técnica y la tecnología, para producir gas de síntesis, en reactor de lecho fijo a nivel de laboratorio, de planta prototipo a nivel de laboratorio y en planta piloto a nivel industrial. También comprende la experimentación a nivel de laboratorio, para producir carbón activado a partir de carbones minerales del departamento de Boyacá; los resultados indican que es factible obtener este producto, con posibilidad de optimización, para usos en tecnologías limpias, tratamiento de aguas ácidas de minería y aguas residuales, recuperación de metales y demás.

#### **4.2.1 Estudio analítico del proceso de gasificación de carbones de Boyacá.**

El análisis estequiométrico indica que todos los carbones analizados, promedio, se pueden gasificar. En promedio la relación de masa es del 27.51%; es decir, que a partir de 275 gramos de carbón se obtiene un kilogramo de gas; la energía del gas equivale al 18.11% de la del carbón, cuando la composición promedio del gas es 19.63% CO, 6.54% CO<sub>2</sub> y 73% N<sub>2</sub>, obtenida por combustión incompleta con deficiencia de aire.

El estudio analítico de la gasificación se hace a nivel estequiométrico, para calcular la producción de gas de bajo poder calorífico, ver Tabla

6., a partir de carbón, por combustión incompleta a condiciones normales, La reacción química del proceso, es:



A nivel industrial, este proceso se optimiza mezclando o substituyendo el aire por vapor de agua para minimizar los contenidos de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y nitrógeno (N<sub>2</sub>) en las emisiones; en consecuencia, aumenta la capacidad energética debido al incremento en la producción de monóxido de carbono (CO) e Hidrógeno (H<sub>2</sub>), de acuerdo con la reacción (señalada), para obtener un gas de poder calorífico medio.

Tabla 6. Resultados del análisis estequiométrico para gasificación de los carbones probados

MUESTRA	CARBÓN			COMPOSICIÓN GAS BAJO PODER CALORÍFICO (GBPC)						GBPC			RELACIÓN MASA	RELACIÓN ENERGÍA
	CF (%)	CF (Kg)	PC (Kcal/Kg)	CO		CO <sub>2</sub>		N		(m <sup>3</sup> )	(Kg)	PC (Kcal)	(Kg-carbón)	(PC-GBPC)
				(m <sup>3</sup> )	(%)	(m <sup>3</sup> )	(%)	(m <sup>3</sup> )	(%)				(Kg-syn-gas)	(PC-carbón)
	M1	82.71	0.8271	6540	1.1579	19.6	0.3860	6.54	4.3561	73.8	5.900	3.68	1217.7	0.2712
M2	75.24	0.7524	5920	1.0534	19.6	0.351	6.54	3.9626	73.8	5.367	3.35	1107.7	0.2981	0.1871
M3	83.97	0.8397	7510	1.1756	19.6	0.391	6.54	4.4224	73.8	5.989	3.74	1236.2	0.2671	0.1646
M4	87.84	0.8784	6678	1.2298	19.6	0.409	6.54	4.6262	73.8	6.265	3.91	1293.2	0.2553	0.1937
M5	78.92	0.7892	6665	1.1049	19.6	0.368	6.54	4.1565	73.8	5.629	3.51	1161.9	0.2842	0.1743

Fuente: Autores

#### 4.2.2 Análisis termodinámico para cocción de cerámicos con gas de síntesis, en horno.

Termodinámicamente, la mayor cantidad de la energía de operación del sistema se requiere para calentar el horno cuando el proceso se inicia desde temperatura ambiente. Una vez que la carga estática acumula la energía térmica suficiente para llevar a cabo el proceso de cocción, esta masa solo requiere energía para la reposición de las pérdidas de calor por convección sobre las paredes externas del horno.

El 72,15% del calor total requerido por el sistema, corresponde a la energía absorbida por la masa estática; es decir, aproximadamente  $\frac{3}{4}$  partes de la energía de operación del sistema se requiere para calentar el horno y mantenerse con las condiciones térmicas

necesarias para la producción; el 24,58% corresponde a la energía absorbida por la masa dinámica, en movimiento y transformación de energía; y el 3,27% corresponde a las pérdidas totales, que incluyen, la convección sobre las paredes externas del horno y el enfriamiento de la masa dinámica al salir del horno.

### 4.2.3 Caracterización geométrica del horno.

Este procedimiento comprende el dimensionamiento y la definición de las zonas térmicas del horno para el proceso de cocción. En la Figura 19, se identifican siete puntos en diferentes partes del horno; cuatro que indican las entradas (material crudo al horno, aire secundario para combustión, aire de enfriamiento y alimento del combustible) y tres que indican las salidas (gases de combustión, aire de recuperación de calor y material cocido).

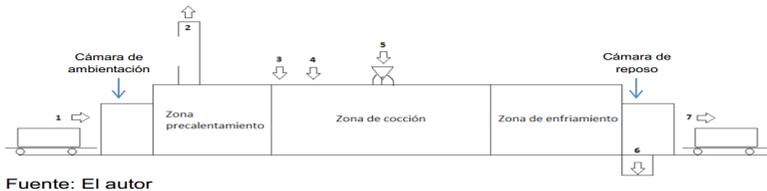


Figura 19. Descripción geométrica y térmica del proceso de cocción en horno túnel.

Convenciones:

1. Alimento de materia cruda al horno
2. Gases de combustión que salen por chimenea
3. Entrada de aire secundario para combustión
4. Entrada de aire de enfriamiento
5. Alimento de combustible y aire de enfriamiento
6. Salida de aire de recuperación a secador
7. Salida de material cocido y residuos de combustión

De la energía total del sistema, solo se pierde por convección sobre las paredes externas del horno el 6%, lo que indica que el diseño térmico del horno es de alta eficiencia.

Del 100% de la energía total requerida por la carga dinámica, el 72,74% es aprovechado para el proceso de cocción de los cerámicos estructurales que entran como carga en verde, luego la eficiencia del horno es elevada.

Del total del calor absorbido por los componentes de la carga dinámica durante el proceso de cocción en el horno, se pierde el 13,1, cuando la carga sale del horno y se enfría hasta alcanzar la temperatura del medio ambiente. Sin embargo, este porcentaje de pérdidas de calor con respecto a la energía total del sistema, solo equivale, al 4,46% de donde se deduce la eficiencia térmica del proceso.

El total de carbón suministrado al proceso, aporta una energía que se distribuye para el proceso de cocción de la carga cerámica en un 30,28% y para reposición de las pérdidas totales, un 4,28%. El calor restante (65,69%), es arrastrado por los gases, para su aprovechamiento por recirculación dentro del horno en la zona de precalentamiento, y para inyectarlo a las cámaras de secado.

Con base en el análisis de equivalencia energética, entre el carbón y el gas de síntesis (bajo poder calorífico), se concluye que es viable la sustitución del combustible, ya que el gas de síntesis mejora la eficiencia térmica en un 18,2%, lo cual se refleja a la viabilidad económica.

Ambientalmente, la sustitución del carbón por gas de síntesis, en el proceso de cocción de cerámicos en horno túnel, minimiza los siguientes factores de contaminación:

- ✓ Producción de cenizas volantes durante la combustión.
- ✓ Aislamiento térmico por deposición de cenizas sobre la carga cerámica, lo cual aumenta tiempos de cocción y consumo de combustible.
- ✓ La combustión de carbón pulverizado, genera un alto porcentaje de inquemado por combustión incompleta, lo cual implica, pérdida de combustible y reducción de la eficiencia energética del proceso.
- ✓ El contenido de azufre en el carbón produce  $\text{SO}_2$  durante el proceso, el cual forma parte de los gases de combustión; esta emisión se elimina con la combustión con gas de síntesis.

La producción de cenizas dentro del horno requiere, de la remoción, manejo, y acopio, lo que conllevará a impactos ambientales a nivel de emisiones de gas particulado y contaminación de aguas por lixiviado, entre otros, además de los impactos económicos.

#### 4.2.4 Pruebas de gasificación con carbones de Boyacá.

Las pruebas de gasificación, tanto en el gasificador prototipo como en planta piloto, se realizaron con carbones de la provincia Centro de Boyacá; en los dos casos, mediante los ensayos, se determinó su poder gasificación.

La composición química del gas de síntesis obtenido en cada una de las pruebas registra presencia de CO, con aproximación al 70% de la composición de un gas pobre, este indicador define la viabilidad técnica del proceso de gasificación con posibilidades de aplicación a nivel industrial.

Los altos contenidos de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>, además del CO, registrados en el análisis de composición de los gases de combustión, mediante el análisis Orsat, indican que el proceso de gasificación del carbón debe ser optimizado, ajustado a las condiciones de operación para que se lleven a cabo las reacciones de combustión incompleta que rigen el proceso.

Es necesario realizar los análisis en el orden: Dióxido de Carbono, Oxígeno, Monóxido de Carbono, para que no haya lugar a lecturas erróneas por falsas señales.



Figura 20. Sistema de gasificación a nivel de laboratorio.

El resultado final del proceso de gasificación a nivel de laboratorio está conformado por: un reactor de lecho fijo, para realizar procesos basados en pirólisis de carbón, con posibilidad de realizar pruebas con diferentes tipos de agentes (gases) gasificadores o activantes del carbón, un sistema de enfriamiento, limpieza de gases de combustión y almacenamiento, basado en el principio de sello de agua.

A partir de los resultados obtenidos en las pruebas de gasificación, tanto en gasificador prototipo, ver Figura 20, como en planta piloto, se concluye, con base en los resultados del análisis Orsat, que el proceso es técnicamente viable y susceptible de optimización. Del mismo modo se analizó el sistema de alimentación de carbón a la planta piloto para evidenciar problemas de homogeneidad, en composición, volumen y propiedades fisicoquímicas de la carga. Como resultado, el gas presenta un alto rango de variación en las temperaturas durante el proceso de combustión. Como solución a esta problemática, se propone la fabricación de briquetas de carbón.

Las proporciones de las mezclas carbón - biomasa, preparadas para la producción de briqueta, son: 100% carbón, 75% carbón + 25% biomasa, 50% carbón + 50% biomasa, 25% carbón + 75% biomasa y 100% biomasa. Las granulometrías del carbón fueron: por debajo de malla 30 (0.595 mm), por debajo de malla 16 (1.19 mm) y por debajo de malla 8 (2.38 mm).

Como resultado del diseño, se obtuvieron briquetas cilíndricas de base esférica con agujero pasante sobre el eje longitudinal; esta geometría garantiza alta área superficial para mayor contacto con el agente gasificante.

El resultado final del proceso de gasificación a nivel de laboratorio, está conformado por: un reactor de lecho fijo, para realizar procesos de combustión, y gasificación de carbón con inyección de aire o  $\text{CO}_2$  como agentes gasificadores y un sistema de enfriamiento y limpieza de gases de combustión, conformado por dos intercambiadores de calor (uno de carcasa y tubos y otro de bandejas); el proceso culmina con el almacenamiento de los gases de combustión, en un gasómetro de diseño basado en el principio de sello de agua. El sistema cuenta con puntos de muestreo para análisis Orsat. ver Figura 21.



Figura 21. Planta prototipo de gasificación a nivel de laboratorio.

### **4.3 Diatomitas.**

Para el caso de las diatomitas se desarrollaron prototipos de cerámicas porosas aplicados en sistemas de filtración de aguas superficiales, con los cuales se obtuvieron excelentes resultados en la retención de material particulado (sólidos suspendidos totales – SST y sólidos totales – ST), disminución de turbidez, color, acidez total, hierro total y cloruros.

#### **4.3.1 Elaboración de cerámicas porosas a partir de diatomitas utilizando el método de réplicas mediante espumas de poliuretano.**

Las cerámicas y membranas porosas elaboradas de materiales naturales de bajo costo, tales como diatomitas y caolines, en la actualidad se han convertido en tema de investigación e interés debido a sus múltiples aplicaciones tecnológicas como los sistemas de filtración, catálisis, craqueo catalítico de hidrocarburos, agroindustria, fertilizantes, lechos filtrantes para agua y gases, como soporte para bioremediación de suelos y aguas entre otras aplicaciones, permitiendo explotar su rentabilidad (Jang-Hoon Ha et

al. 2014; Jang-Hoon Ha et al, September 2013; Jang-Hoon Ha et al, December 2013). A las Diatomitas se les realizó análisis por técnicas como SEM, EDS como se muestra a continuación.

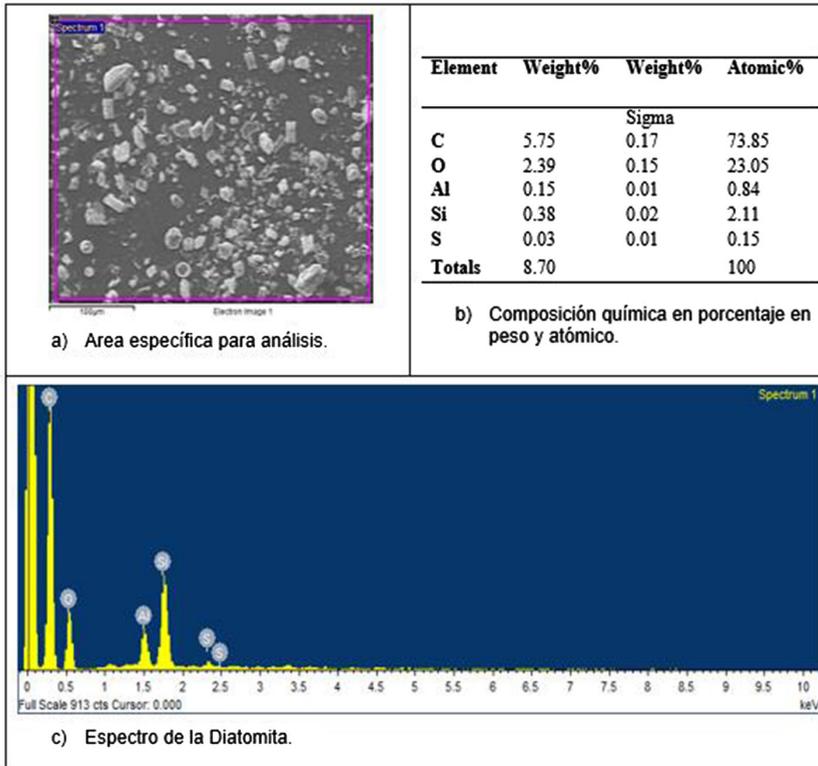


Figura 22. Microanálisis por EDS de la Diatomita.

En la Figura 22, se evidencia: a) El área donde se fijó el haz de electrones para la determinación elemental puntual por EDS, b) La composición en porcentaje en peso y atómico de la Diatomita, y c) El espectro del mismo material.

### 4.3.2 Propiedades mecánicas.

Se realizó el montaje y se analizó una probeta de cada una de las muestras sinterizadas, mediante el ensayo de flexión en la Máquina Universal de ensayos Electromecánica universal de 500 KN (Marca: MICROTTEST, Modelo: EM2/500/FR), en donde se determinaron las propiedades mecánicas a la resistencia a la flexión, evidenciándose la carga y módulo de rotura del material (Norma ISO 10545-4, 2004), ver Figura 23.

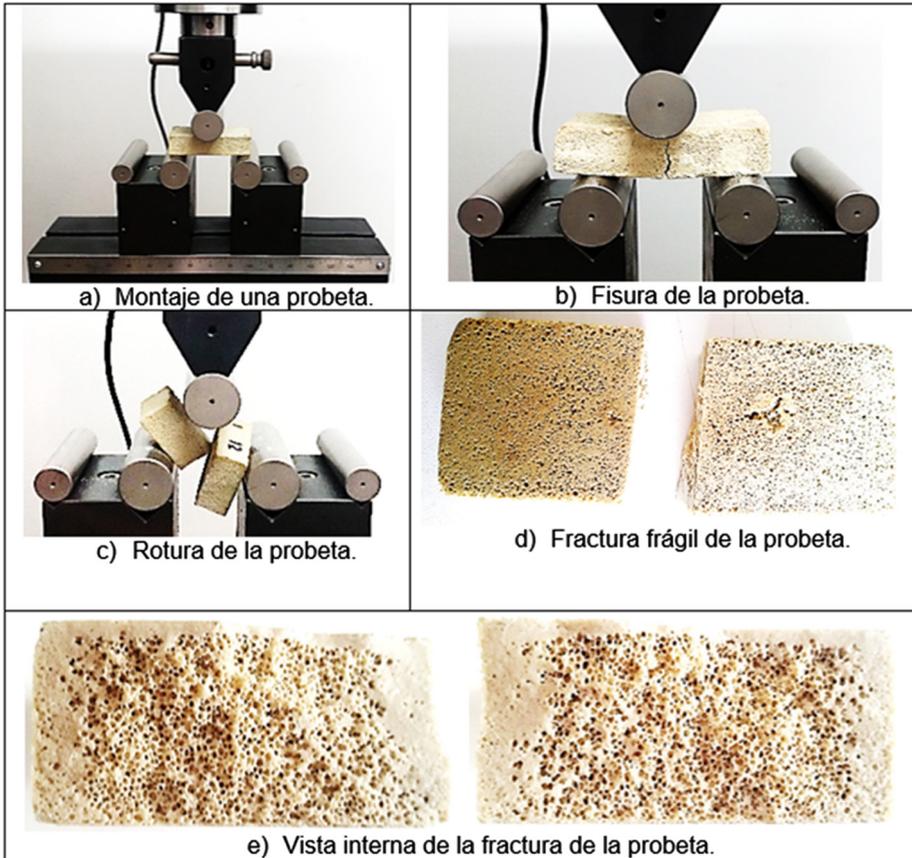


Figura 23. Montaje de una probeta de cada muestra  
Fuente: Autores

El análisis morfológico de la porosidad para las cerámicas elaboradas reportó tamaños de poros abiertos e interconectados entre  $1.567 \mu\text{m}$  y  $10.26 \mu\text{m}$ , lo que indica que estas cerámicas porosas pueden ser usadas para tratamiento de aguas residuales, como la eliminación de turbidez, eliminación de materia orgánica y sólidos suspendidos, también, para activar dicha porosidad con nutrientes (sodio, nitrógeno, potasio), y aplicarlas a cultivos verticales, permitiendo tener soporte de suelos de poco espesor, para lograr el anclaje de las raíces al interior de los micro y macroporos. Así mismo, los resultados de la resistencia mecánica y en especial a la flexión, como se muestra en la Tabla 7, permiten identificar que las cerámicas porosas elaboradas, presentan una estabilidad mecánica óptima para este tipo de materiales porosos.

Tabla 7. Parámetros iniciales de la máquina universal y mordazas.

Probeta	Área (mm <sup>2</sup> )	Distancia entre brazos (mm)	Diámetro punzón (mm)	Velocidad ensayo (N/s)	Tensión máxima (MPa)	Fuerza máxima (kN)
1	834.080	30	30	200	2.430	2.027
2	731.240	30	30	200	1.742	1,274
3	1110.000	30	30	200	0.958	1.064
4	867.140	30	30	200	1.809	1.568
5	1192.800	30	30	200	0.920	1.097
6	1196.000	30	30	200	0.626	0.748

Las cerámicas porosas a base de caolín y tierras diatomáceas de la región de Boyacá elaboradas por el método de réplica usando espumas de poliuretano, reportan propiedades mecánicas, morfológicas y físico-cerámicas, dentro de los rangos admisibles para ser usadas en las aplicaciones tecnológicas propias de este tipo de materiales micro y macroporosos, ver tabla 8.

Tabla 8. Resultados del ensayo de flexión a las muestras 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

Muestra	1	2	3	4	5	6
Fuerza de rotura (N)	3547.25	2229.5	1489.6	2240	1567.14	1190
Resistencia a la flexión (N/mm <sup>2</sup> o MPa)	13.3	8.36	5.06	6.94	5.33	4.46

Los seis tipos de densidades de espuma usados, se analizaron por medio de microscopía óptica para la elaboración de filtros. En la Figura 24, se presentan las espumas de poliuretano y las microestructuras de las cerámicas porosas. A la izquierda se la porosidad de las seis espumas de poliuretano empleadas como matriz para la elaboración de las cerámicas porosas y a la derecha se reportan las micrografías de las seis cerámicas porosas, con una morfología en forma de panal, con distribución y tamaños de poro homogéneos.

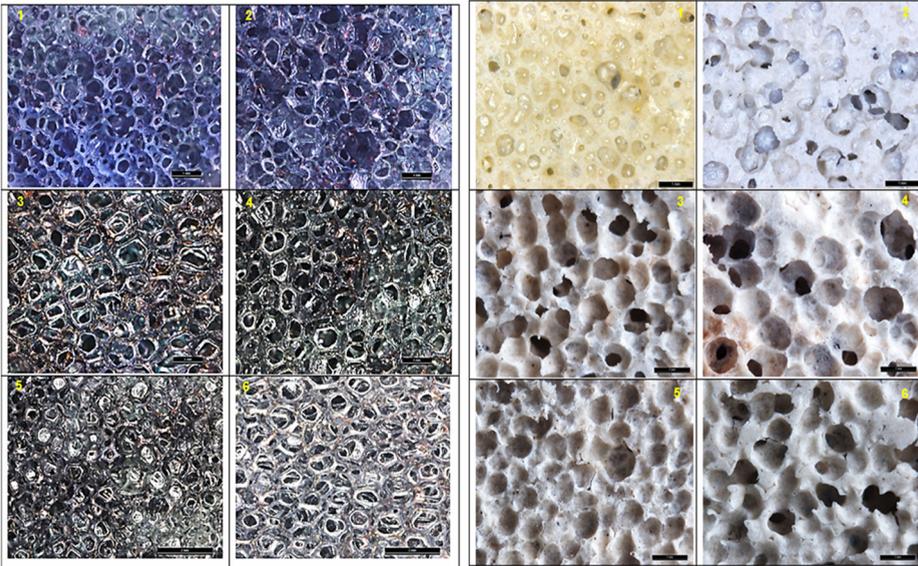


Figura 24. Microestructura de las seis Espumas de poliuretano vs Microestructura de la porosidad de las cerámicas.

### 4.3.3 Propiedades térmicas y tortuosidad.

Estas propiedades tienen una importancia mayor cuando se desea utilizar el material como aislante. Los valores de conductividad térmica y la dificultad al paso de algún tipo de fluido, indican un valor alto en la tortuosidad generada por la alta porosidad de las muestras. Esto se debe a que la fracción de volumen de poros internos contienen aire, lo cual hace que la transferencia de calor a través de estos sea ineficiente y lenta. Estas propiedades térmicas, la alta porosidad y tortuosidad de las muestras conducen a que estas cerámicas porosas sean propiamente utilizadas como aislantes térmicos y acústicos. Así mismo, aplicados en sistemas de microfiltración de aguas y aceites, en la bioremediación de aguas y suelos, y como soporte para catalizadores, entre otros.

En la Tabla 9, se registraron los resultados del ensayo electroquímico para determinar las resistencias del electrolito y de las muestras sumergidas dentro del electrolito, con el fin de determinar el factor de formación (F) y junto con el resultado del factor de porosidad poder calcular la tortuosidad de cada muestra

Tabla 9. Resultados de la prueba de tortuosidad a las seis muestras.

Muestra	Resistencia del electrolito ( $\Omega$ )	Resistencia de la muestra con el electrolito ( $\Omega$ )	$\Delta V_{\text{teórico}}$ (V)	$\Delta V_{\text{real}}$ (V)	Factor de formación (F)
1	640	680	10.2	10	1.0625
2	705	750	11.25	10.3	1.0638
3	659	695	10.425	10.5	1.0591
4	859	862	12.93	12.4	1.0034
5	780	804	12.06	11.2	1.0307
6	788	796	11.94	13.7	1.0101

Las cerámicas porosas, como las observadas en la Figura 25, pueden ser usadas para la fabricación y elaboración de medios porosos con aplicaciones tecnológicas hacia la industria de los aislamientos térmicos, aislantes acústicos, siendo responsable del amortiguamiento el aire que se aloja en las porosidades, a causa de la baja conductividad térmica del aire.

En general, para los prototipos de filtros cerámicos porosos: Se obtuvieron porcentajes de absorción de agua importantes con respecto a las dimensiones de los mismos, esto es debido en gran medida a la morfología de las espumas (forma, tamaño y distribución de los poros interconectados en la matriz cerámica) ofreciendo gran cantidad de espacios e interconexiones porosas, en los que se quedan atrapados materiales particulados, así como metales pesados y otras impurezas gracias a las propiedades del caolín.



Figura 25. Filtros cerámicos sinterizados.

#### 4.3.4 Capacidad filtrante.

En los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados a las muestras de aguas sin filtrar y filtradas por los diferentes prototipos de filtros cerámicos, y el filtro patrón elaborado de solo barbotina por colado en un molde de yeso, ver Tabla 10, se determinó que el pH tiene un papel fundamental en las reacciones que pueden darse en dicho medio, interfiriendo en cierta medida los agentes físicos (sólidos suspendidos como arena, arcilla y otros), químicos (pH), sustancias tóxicas, metales pesados como (Ar, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, cianuro) y sustancias orgánicas antropogénicas (fenoles, benceno, pesticidas, grasas, aceites y otros) y biológicos (microorganismos como virus, polio, eco, coxsackie, adenovirus, reovirus y hepatitis, bacterias coliformes fecales, salmonella, shigella, campylobacter y *Vibrio cholera*; protozoarios). En este caso, las aguas tienden a ser un poco alcalinas y están dentro del intervalo entre 6 - 9 establecido por

la resolución N.0631, siendo favorables para la mayoría de procesos microbiológicos y el desarrollo de la vida, ya valores por fuera de estos límites indican alto riesgo para la salud y el ecosistema propio del agua.

Es concluyente la alta eficiencia de las cerámicas porosas para retener sólidos suspendidos totales y los sólidos totales presentes en las muestras de aguas analizadas, lo que depende de la porosidad característica de dicho filtro. Adicionalmente, se observa una reducción significativa en el color de dicha muestra de agua. Se aprecia una alta eficiencia de los filtros cerámicos al retener Hierro total de las muestras de agua analizadas, lo que es una propiedad característica del caolín. Igualmente, se aprecia una disminución en los niveles de turbidez, acidez total y cloruros en las muestras de aguas filtradas. En conclusión, estos filtros cerámicos no solo sirven para ser aplicados en sistemas de filtración, sino también, en otras funciones tecnológicas como aislamientos acústicos y térmicos en diversos procesos industriales.

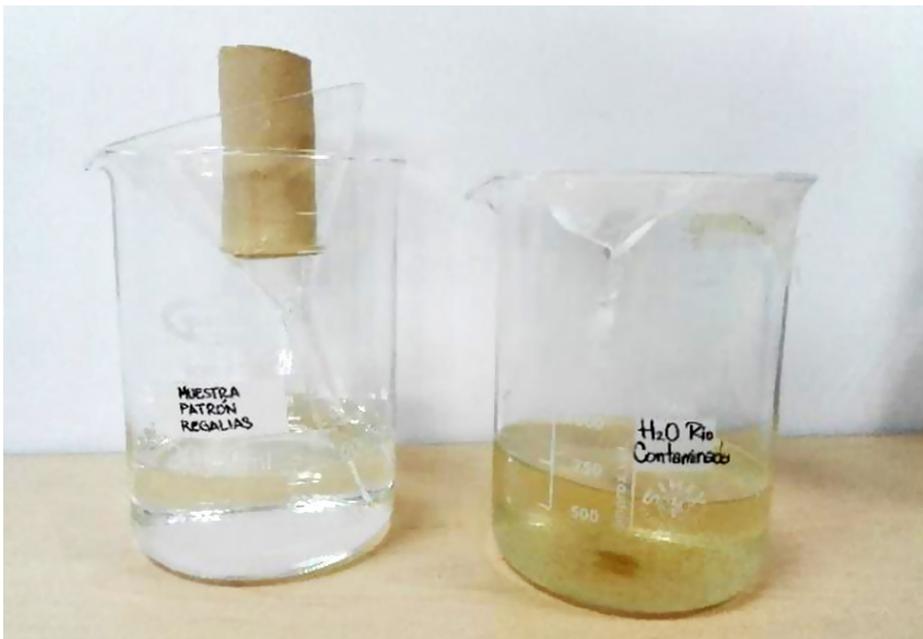


Figura 26. Filtración del embudo patrón.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede afirmar que las cerámicas porosas son adecuadas para ser utilizadas como filtros retenedores de material particulado y materia orgánica disuelta en el agua, como se evidencia en el cambio de tonalidad en la Figura 26, y Tabla 10. Parámetros y resultados de los análisis fisicoquímicos de aguas y ST, SST, SDT de acuerdo al “Standard Methods”, con fines a la purificación de estos ríos y que en última instancia mediante otros procesos complementarios propios de dichas plantas de tratamiento pueda el agua llegar a ser potable y apta para el consumo humano, aplicable en sistemas de riego en cultivos o en procesos industriales donde sea importante reutilizar grandes cantidades de aguas resultantes de algunos procesos de lavado, con el fin de generar beneficios económicos para dichas empresas y coadyuvar con el medio ambiente. El filtro patrón de barbotina colado en un molde de yeso fue usado como punto de comparación con respecto a los seis filtros elaborados por el método de réplica, de tal manera, que su porosidad es del orden nanométrico y micrométrico primordialmente, por ende, su eficiencia en general, es más alta con respecto a la eficiencia de los seis filtros cerámicos.

Tabla 10. Parámetros y resultados de los análisis fisicoquímicos de aguas y ST, SST, SDT de acuerdo al “Standard Methods”.

Muestra	pH	ST mg/L	SST mg/L	SDT mg/L	Color Pt/Co	Turbidez mg/L	Acidez total mg/L	Alcalinidad total mg/L	Cloruros (Cl) mg/L	Dureza cálcica mg/L	Dureza total mg/L	Dureza Mg	Hierro (Fe) mg/L	Sulfatos (SO <sub>4</sub> ) <sup>2-</sup> mg/L
Resolución N.063 L.	6.00 – 9.00	-	90.00	-	-	-	AR	AR	AR	AR	AR	-	AR	AR
Agua sin filtrar	7.60 ±0.05	637.53 ±0.7	306 ±1	165.33 ±0.57	413.33 ±1.52	73.66 ±1.52	32.7 ±1.47	87.06 ±1.15	37.31 ±1.25	98.8 ±0.69	115.33 ±1.33	16.53 ±2	0.23 ±0.005	23.33 ±0.57
Filtro cerámico 1	8.33 ±0.04	207.16 ±0.7	9 ±1	168 ±1	10 ±1	3 ±1	21.6 ±2.12	96.66 ±1.51	28.76 ±1.83	112.53 ±1.17	115.13 ±0.9	2.6 ±1.92	0.10 ±0.005	27 ±1
Filtro cerámico 2	8.35 ±0.04	236.23 ±0.7	5 ±0.57	189 ±1	17.33 ±0.57	4.66 ±1.15	23.33 ±1.98	108.03 ±1.09	26.91 ±0.28	106.66 ±0.92	113.73 ±1.4	7.06 ±2.27	0.11 ±0.005	26 ±1
Filtro cerámico 3	8.28 ±0.02	269 ±1	4 ±1	196.66 ±1.52	35.33 ±1.15	1.33 ±0.57	24.9 ±2.11	104.26 ±1.15	26.5 ±1.95	104.26 ±1.80	113.5 ±1.17	9.23 ±1.4	0.17 ±0.01	25 ±2
Filtro cerámico 4	8.34 ±0.02	263.66 ±0.57	17 ±1	166 ±1	29.33 ±1.52	6.66 ±1.15	24.2 ±1.4	104.3 ±1.57	26.83 ±1.66	104.63 ±0.9	115.46 ±1.4	10.83 ±1.85	0.1 ±0.005	28.33 ±1.52
Filtro cerámico 5	8.44 ±0.03	198.33 ±0.57	24.66 ±2	138 ±1	14.66 ±1.52	1.33 ±0.57	24.93 ±0.55	108.4 ±1.2	26.5 ±0.25	100.26 ±1.28	114.2 ±0.91	13.93 ±1.3	0.11 ±0.01	28.33 ±1.52
Filtro cerámico 6	8.41 ±0.09	295.33 ±0.57	51.66 ±1.52	205 ±1	35.66 ±0.57	5 ±1	23.63 ±1.32	105.16 ±0.85	26.08 ±0.76	100.93 ±1.4	113.13 ±0.5	12.2 ±1.9	0.1 ±0	24.33 ±2.08
Filtro patrón	8.43 ±0.1	174.66 ±0.57	11 ±1	127.66 ±1.52	48.33 ±1.52	4 ±1	26.8 ±0.98	96.2 ±0.72	26.28 ±0.64	109.13 ±1.02	109.36 ±0.81	0.23 ±0.8	0.02 ±0.005	30.33 ±0.57

## **4.4 Mineral de hierro.**

### **4.4.1 Reducción de hematita a magnetita y generación de piedra abrasiva**

La hematita encontrada en la mina Quebrada Honda, vereda Quebrada Honda; municipio de Paipa, Boyacá-Colombia, posee un manto para explotar apreciable, con buenas propiedades. Llevando a cabo el proceso de reducción, se obtiene un material llamado “Magnetita” cuyo uso es más amplio que el mineral hematita como se explica a continuación.

La magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) en forma de nano partícula, ha encontrado diversas aplicaciones en el campo de la biomedicina en fenómenos como la hipertermia y el transporte selectivo de fármacos, ambos de prometedor futuro en la terapia del cáncer, en el mejoramiento por contraste de las imágenes por resonancia magnética (Picasso G, et al. 2012) nanoparticles based on magnetite have been prepared by sol-gel and precipitation methods. In the first case two variants have been applied: by growing of sol starting from nitrate precursor and ethylene glycol as dissolvent and to control the reduction process and force hydrolysis and steric control prepared from ferrum sulfate precursor and sodium citrate. In the second case the starting material was sulfate precursor, amonium hydroxide as precipitaing agent and ethylene glycol as surfactant. The samples have been characterized by X-ray diffraction technique (XRD y en la industria para fabricación de imanes, piedras para pulir entre otros.

La magnetita obtenida en el proceso de reducción en el horno Linder, ver Figura 27, muestra resultados confiables debido a que en el horno se puede controlar la temperatura, el tiempo, el volumen de inyección de CO. Si se observa con detenimiento en la prueba de la muestra tratada a  $900^\circ\text{C}$  en el horno linder con inyección de CO, es claro que se obtiene un óxido de hierro tipo magnetita con un porcentaje bastante alto (88.5%), ver Figura 28.



Figura 27. Horno Linder

El análisis realizado a la muestra por DRX, Tabla 11, reveló tener gran cantidad de óxidos de hierro tipo magnetita como componente principal, evidencia de que el material sometido a reducción consiguió una buena eficiencia en sus procesos; en menor proporción existe presencia de otros materiales en la muestra, donde se resaltan silicatos ricos en hierro, posiblemente debido a impurezas relacionadas como óxidos de silicio tipo cuarzo que reaccionaron con parte del material ferroso presente en la muestra, presentados de manera porcentual, basados en la búsqueda y comparación sobre los patrones, Figura 29, de difracción de los minerales en la muestra. En la Figura 30, se observa el resultado de la comparación de los patrones de difracción resultantes.

*Caracterización de la magnetita por DRX muestra a 900°C.*

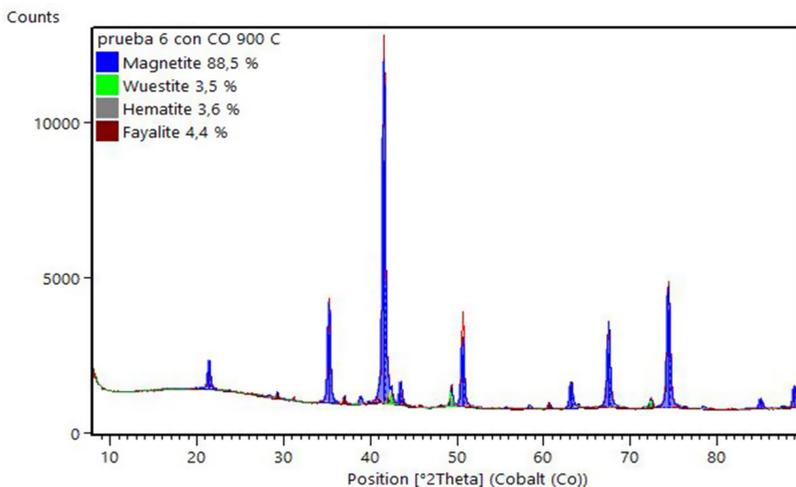


Figura 28. Especies presentes en la muestra analizada.

Tabla 11. Resultados ensayo de DRX muestra 6 horno linder.

No.	Visi...	Ref. Code	Compound Na...	Crystal System	Chemical Formula	Score	Scale ...	Display Co...
1	<input type="checkbox"/>	96-900-5840	Magnetite	Cubic	Fe <sub>24.00</sub> O <sub>32.00</sub>	46	0,838	Blue
2	<input type="checkbox"/>	96-101-1165	Wuestite	Cubic	Fe <sub>3.67</sub> O <sub>4.00</sub>	35	0,049	Lime
3	<input type="checkbox"/>	96-901-5066	Hematite	Hexagonal	Fe <sub>12.00</sub> O <sub>18.00</sub>	14	0,281	Gray
4	<input type="checkbox"/>	96-900-0561	Fayalite	Orthorhombic	Fe <sub>8.00</sub> Si <sub>4.00</sub> O <sub>16.00</sub>	28	0,046	Mar...

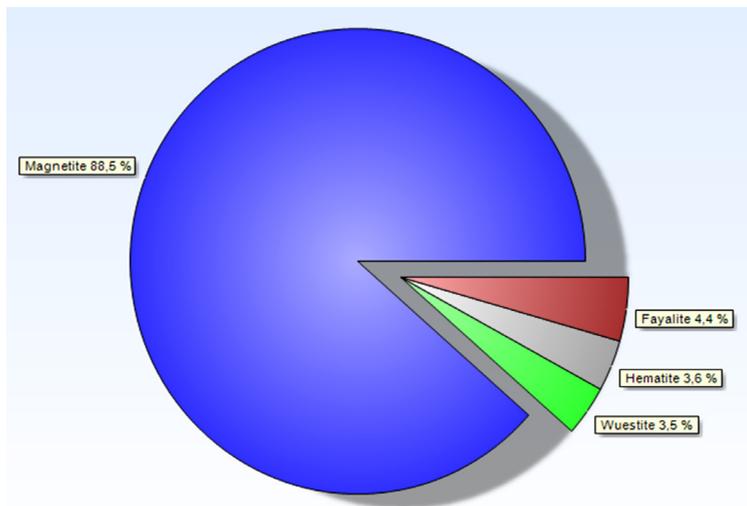


Figura 29. Diagrama de resultados de la composición porcentual muestra a 900°C.

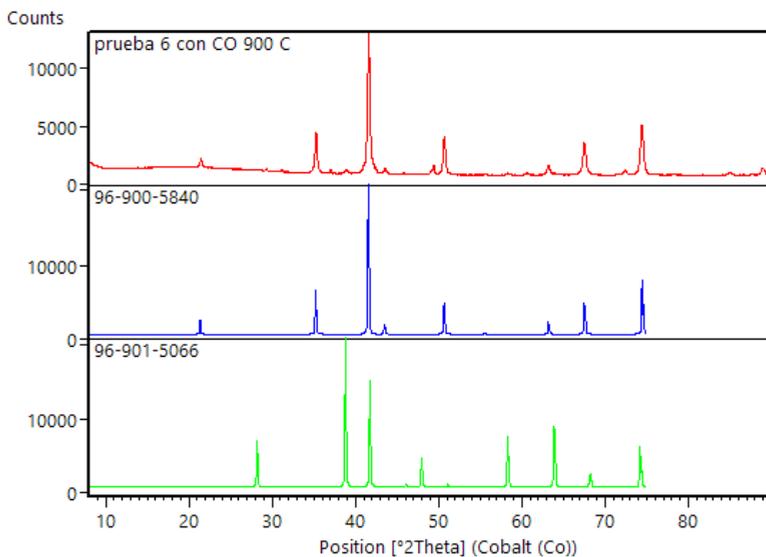


Figura 30. Diagrama de patrón resultante en la muestra y patrones teóricos de compuestos.

El análisis realizado en el MEB enfocado especialmente al tamaño de grano obtenido, muestra que hay uniformidad en el tamaño. La homogeneidad en la forma y tamaño de grano obtenido es importante para este propósito, ya que un grano de tamaño homogéneo produce mayor cohesión y permite que la magnetita obtenida se use en mezclas con compuestos con mayor facilidad, ver Figura 31 y Figura 32.

*Análisis Tamaño de grano SEM muestra a 900°C*

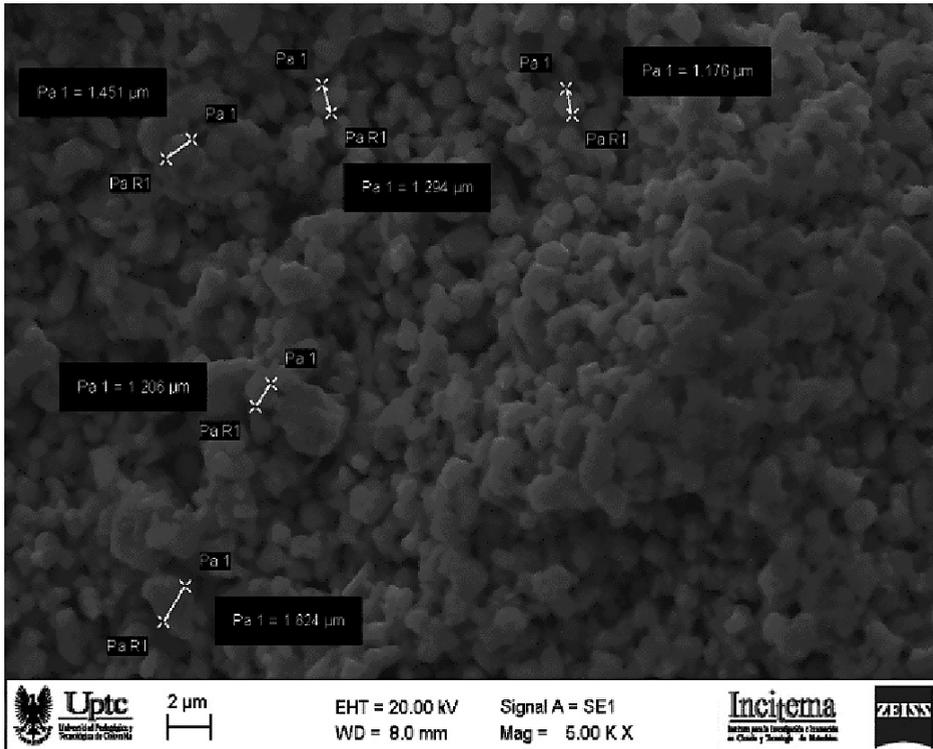


Figura 31. Muestra.5.00 K X. Grano esferoidal uniforme. Análisis tamaño de grano.



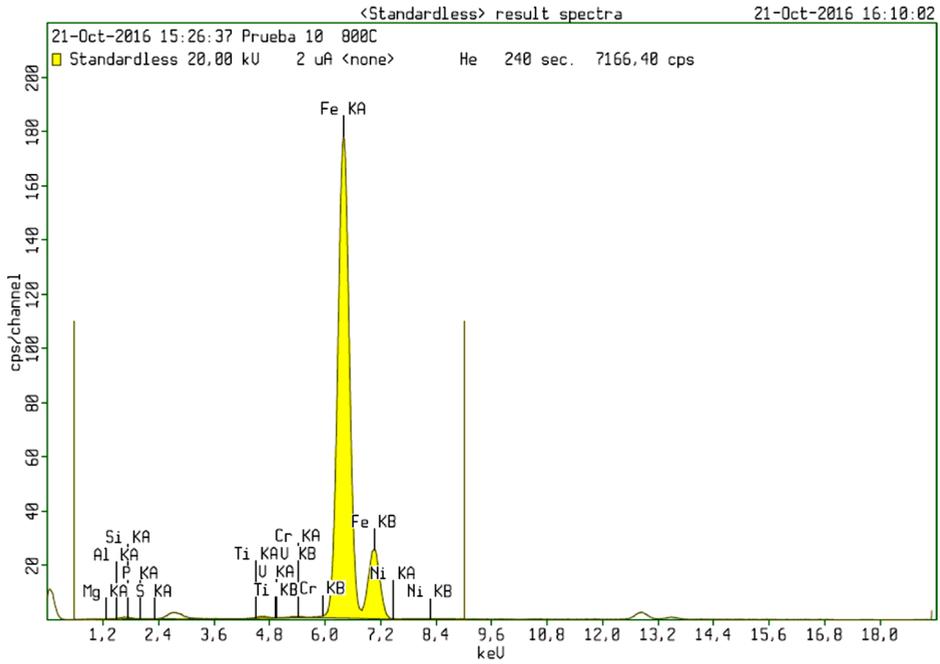


Figura 33. Elementos presentes en la muestra a 800°C FRX.

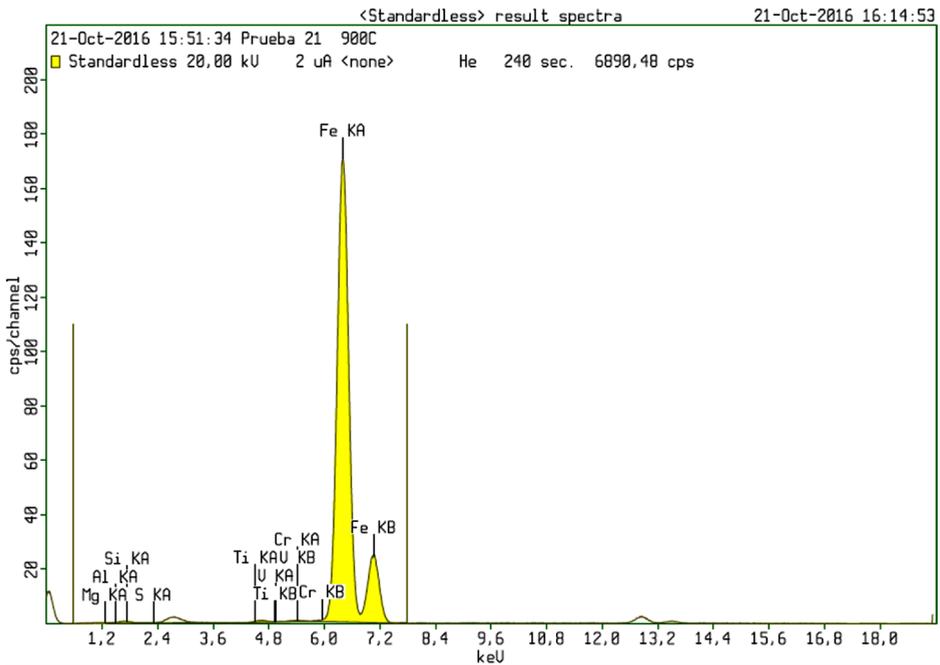


Figura 34. Elementos presentes en la muestra a 900°C FRX.

Tabla 13. Resultados Ensayo de FRX muestra a 900°C

21-Oct-2016 16:13:44

## Sample results

Page 1

Sample ident	
Prueba 21	900°C

Application	<Standardless>
Sequence	1 of 1
Measurement time	21-Oct-2016 15:51:34
Position	4

Compound	Mg	Al	Si	S	Ti	V	Cr	Fe
Conc	2	2,5	2,7	0,13	0,04	0,04	0,12	92,9
Unit	%	%	%	%	%	%	%	%

Usando las técnicas de FRX para la caracterización química y morfológica del material, se identifica que se logró un alto contenido de hierro en la magnetita, ver Tabla 13, para aquellas muestras procesadas a temperatura de 900°C, así como un grano con morfología esferoidal y tamaño homogéneo, resultado de un correcto proceso de reducción, como se ve en la Figura 35. *Tamaño de grano homogéneo de la muestra a 900°C analizada en el SEM*

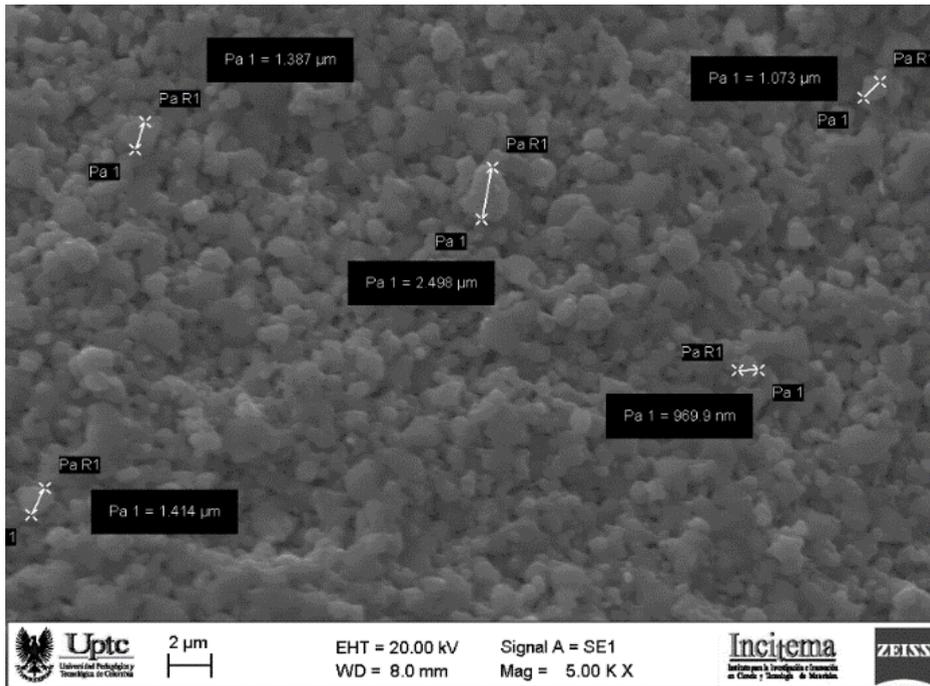


Figura 35. Muestra. 5.00 K X. Medidas tamaño de grano.

Los resultados obtenidos con la espectroscopia de Mössbauer, indican un alto contenido de hierro. Lo que se traduce en la validez del proceso efectuado.

El control de las variables en el horno reactor Linder junto con el apoyo de las diferentes técnicas de análisis: Difracción de rayos X (DRX), Fluorescencia de rayos X (FRX), Microscopia electrónica de barrido (MEB) y Espectroscopia Mössbauer (EM); proporciona resultados que permiten identificar que el proceso de reducción fue realizado de manera eficiente y arroja resultados que permiten considerar la viabilidad para la fabricación de piedras abrasivas.

En el uso de la magnetita obtenida en el proceso, se observa que para la fabricación de discos abrasivos su comportamiento es eficiente como se ve en la Figura 36. Lo cual avala su uso en uno de los diferentes campos en los cuales se puede utilizar esta magnetita.



Figura 36. Piedra obtenida-mineral hierro.

La inclusión de la magnetita al carburo de silicio en los discos de esmeril, disminuye el entrapo de los mismos cuando se trabajan metales no ferrosos, además de su bajo costo en comparación con los discos convencionales fabricados de carburo de silicio.

## 4.5 Roca fosfórica.

### 4.5.1 Producción de fertilizante agrícola.

Los estudios realizados indican que los yacimientos existentes en el Departamento de Boyacá corresponden a arenitas fosfóricas que se encuentran localizadas a lo largo de la Cordillera Oriental, contenidas en secuencias de origen marino de edad cretácica (ANM, 2016). Las fosforitas estudiadas son rocas que contienen entre el 14,6 y el 21.1% de  $P_2O_5$ , en un alto porcentaje en forma de flourapatito criptocristalino “colofana” de acuerdo con el (“Glosario de términos del sector minero” 2013), que suelen aparecer como capas de espesor variable, de aspecto semejante al de muchas capas de calizas fosilíferas o pisolíticas, aunque con colores más oscuros (Cabrera et al., 2011).

Debido al incremento poblacional a nivel mundial, el hombre se enfrenta a la imperiosa necesidad de aumentar la producción de alimentos. Esta mayor producción se logrará incrementando la superficie cultivable y mejorando los rendimientos de los suelos. Uno de los retos que hoy en día enfrentan nuestros gobernantes, es el de lograr desarrollar una agricultura sostenible, que sea respetuosa con el medioambiente, sea capaz de incrementar los rendimientos de los cultivos y la producción de alimentos (Ávila P, 2014).

Las plantas necesitan de nutrientes en cantidades adecuadas y balanceadas, de esto se deriva la importancia de conocer las condiciones de los suelos cultivados o por cultivarse, así como también los requerimientos nutritivos para que cumplan con las actividades fisiológicas normales a lo largo de su ciclo productivo (Andrade E, 2009). Todas las plantas necesitan para el crecimiento, desarrollo adecuado y mantenimiento, del orden de 16 elementos minerales que se consideran esenciales. Tres elementos, nitrógeno (N), potasio (K) y fósforo (P) son requeridos en cantidades relativamente altas y se conocen como nutrientes primarios o macronutrientes. Son los elementos principales de todos los fertilizantes químicos. Dependiendo del origen del fertilizante, sus cantidades se pueden expresar como N,  $P_2O_5$ , y  $K_2O$ .

Los nutrimentos deben ser adicionados por medio de fertilizantes minerales u orgánicos y los requerimientos varían principalmente

de acuerdo a las condiciones del suelo y la planta. Los fertilizantes básicamente son sales solubles de uno o más elementos nutritivos esenciales para la planta (Andrade E, 2009). El fósforo como fertilizante, se produce a partir de rocas fosfóricas que son extraídas de diferentes regiones del mundo. El 75 % de las rocas fosfóricas son de origen marino, 10-15 % ígneas y una pequeña proporción se encuentra en los depósitos de guano.

Se estudian para el departamento de Boyacá los prospectos, manifestaciones y yacimientos de roca fosfórica de los municipios de Sogamoso, Cuítiva, Iza, Pesca, Tota y Turmequé.

#### 4.5.2 Caracterización fisicoquímica y mineralógica de los minerales fosfatados de Boyacá

Los resultados de los estudios de caracterización química y mineralógica para los yacimientos de Sogamoso, Cuítiva, Iza, Tota y Turmequé se presentan a continuación:

Tabla 14. Resultados análisis por difracción de rayos x para roca fosfórica.

PROCEDENCIA		Turmequé Vereda Rosales	Sogamoso Vereda Pedregal alto	Sogamoso Vereda Moniquirá	Sogamoso Vereda Pilar y Ceibita	Iza Vereda San Miguel	Cuítiva	Tota
CÓDIGO		RFTM 146	RFSF 197	RFSM 185	RFSC 183	RFI 160	RFC184	RFT 211
ESPECIE MINERAL	FÓRMULA	%	%	%	%	%	%	%
Cuarzo	(SiO <sub>2</sub> )	45.0	44.0	44.0	41.0	42.0	37.0	44.0
Fluorapatita	(Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> F)	40.0	41.0	43.0	46.0	42.0	39.0	37.0
Brucita	(MgO <sub>2</sub> )	24.0	-	-	-	-	-	-
Mullita	(Al <sub>6</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>13</sub> )	14.0	-	-	-	-	-	-
Brownmillerita	(Ca <sub>2</sub> (Al,Fe <sup>3+</sup> )O <sub>3</sub> )	-	14.0	-	-	16.0	-	-
Bernilita	ALPO <sub>4</sub>	-	-	12.0	-	-	-	-
Periclasa	MgO	-	-	-	18.0	-	-	-
Kryzhanovskite	Mn <sup>2+</sup> Fe <sup>3+</sup> 2(PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> •(H <sub>2</sub> O)	-	-	-	-	-	15.0	-



Tabla 17. Resultados de Solubilidad de la Roca Fosfórica.

Fósforo soluble por el método Bray II y el fosforo insoluble en relación con el fósforo total Muestra RFT 211		
% P total = 21,1	% P (Bray) =9,3401	% P (insoluble) = 90,6599
Fósforo soluble por el método Olsen y el fosforo insoluble en relación con el fósforo total Muestra RFT 211		
% P total = 21,1	% P (Olsen) = 2,8275	% P (insoluble) = 97,1725
Norma NTC 234. Resultados de espectrofotometría. Determinación de fósforo soluble en citrato de amonio.		
% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> soluble en citrato de amonio 3.490 / 3.853		Promedio 3,6715 %
Norma NTC 234. Resultados de espectrofotometría. Determinación de fósforo soluble.		
% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> soluble en agua 0.228 / 0.2215		Promedio 0,22475 %

Estos resultados permiten conocer la transformación y liberación en solubilidad de los elementos fundamentales y secundarios en los fertilizantes agrícolas.

El fósforo de estos minerales se encuentra presente en las siguientes especies mineralógicas: dentro de la fluorapatita fibrosa, la cual se presenta en tamaños variados (<1200 µm) con formas irregulares, con hábito laminar y relieve moderado. Se presenta en tamaños variados en formas irregulares como remplazamientos de huesos, cartílagos y otras partes de seres acuáticos y remplazando las partes duras de los foraminíferos, con hábito laminar y relieve moderado positivo.

En la fluorapatita granular, se observa formando mosaicos de cristalitos finos, hace parte de la matriz de la roca ubicada intersticialmente entre los bioclastos y terrígenos, el cual se encuentra como una especie cristalina.

Se encuentra fosfato amorfo como colofana; esta especie es de color café claro, forma partículas cilíndricas y ovoides como petrificación de heces de peses, en su interior se encuentran fragmentos de cuarzo fino. La colofana se halla como especie amorfa. Como se ve en la figura 37, fotografía superior izquierda.

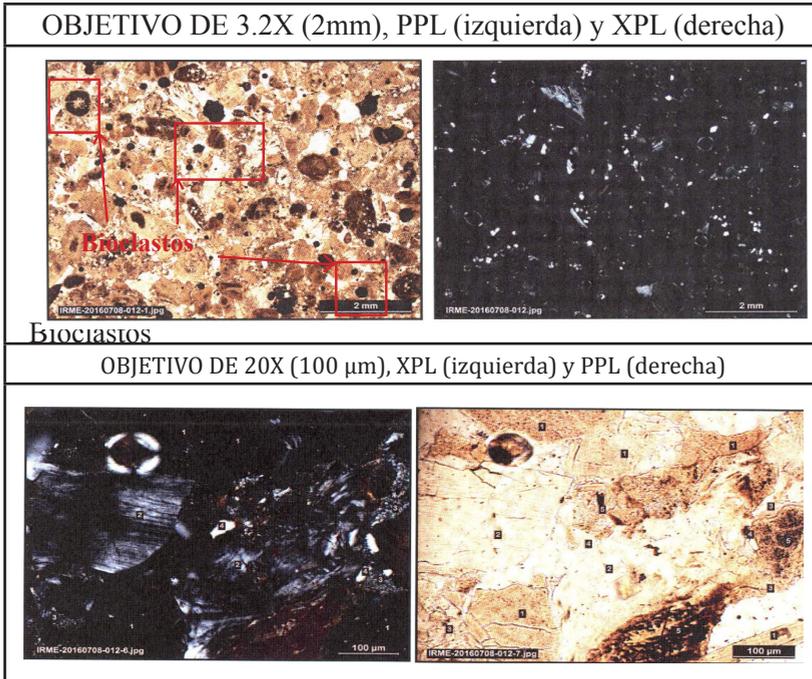


Figura 37. Contraste entre luz transmitida por PPL y XPL, a muestra roca fosfórica

Además de los compuestos de fósforo se identifican los siguientes compuestos, como se puede ver en la Figura 37.

**Material opaco:** Se observa, además, la presencia de partículas diseminadas de material opaco que no interactúan con el haz de luz polarizada. Posiblemente corresponda a materia orgánica carbonosa o hidróxidos de hierro. Se presentan como partículas finas diseminadas en la colofana y en ocasiones es el componente mayoritario en estas. Es de color café oscuro a negro.

El cuarzo, se presenta asociado a los pellets y cilindros de colofana con formas subangulosas. Su tamaño varía desde aproximadamente los 36 μm hasta valores menores a los 500 μm.

Esta roca mostró contener fragmentos de liditas de mayor dureza, en general presenta disgregación a presión manual. Liditas, mezcla de cuarzo coloidal, arcilla fosfática, de grano criptocristalino además de colofana y foraminíferos.

Glauconita, se presenta conservada dentro de limolita silicea y con un avanzado grado de alteración a clorita y limonita impregnando fracturas

Limolita, en fragmentos de tamaño variado, formado por cristales de cuarzo con tamaños inferiores a 70  $\mu\text{m}$  en algunas muestras y en otras menores a 30  $\mu\text{m}$ .

La reactividad de la roca fosfórica determinada por el método de citrato de amonio, Norma NTC 234, establece un valor de 3.8% de solubilidad en citrato del  $\text{P}_2\text{O}_5$  y un valor de 0,2 como  $\text{P}_2\text{O}_5$  soluble en agua.

Igualmente, presenta importantes contenidos de Ca que oscilan entre el 30.4 y el 48% y el  $\text{SiO}_2$  reporta valores del orden del 37% para la mina de Cuitiva y los mayores porcentajes se registran en las muestras de Turmequé con un 45%. La sílice se convierte en la principal especie mineralógica que se buscará eliminar en procesos de concentración por flotación de la roca fosfórica. Las muestras estudiadas de mineral de roca fosfórica, se clasifican como una roca sedimentaria de fósforo, de textura organogena, su capa superficial está formada por restos de seres vivos y fuerte olor aliáceo.

Presenta bioclastos en forma de cilindros macizos y pellets de aproximadamente 1.5 mm. Corresponde a fragmentos de origen biológico o restos de esqueletos calcáreos de organismos marinos. Estos minerales presentan las siguientes características; reacción negativa al contacto con HCl, no genera efervescencia por presencia de carbonatos cuando se expone al ácido clorhídrico concentrado, nula atracción a imán, fácil disgregación a presión manual, algunas minerales presentan una mayor dureza que se puede asociar a la presencia de compuestos como loiditas.

#### **4.5.3 Alternativas de aplicación de la roca fosfórica del departamento de Boyacá.**

Con base en el resultado de las características fisicoquímicas y mineralógicas de la roca fosfórica de las zonas productivas representativas del Departamento de Boyacá, se proyectan

alternativas tecnológicas. En primer lugar, para mejorar la concentración de fósforo en el mineral y, en segundo lugar, para tener mayores porcentajes de fósforo soluble a disposición de las plantas. De esta forma, teniendo como referencia que los tenores de fósforo total de las menas minerales estudiadas están por debajo del 20% se deben buscar alternativas de estudio del enriquecimiento del mineral, como las que se citan a continuación.

#### **4.5.3.1 Mezcla de minerales.**

La operación de mezclas de mineral es una actividad frecuentemente adelantada por las diferentes plantas de la industria minera. En un proceso de explotación, los yacimientos presentan minerales con diferente composición y características químicas. Esta situación hace indispensable implementar sistemas de alimentación homogénea a las plantas de beneficio mineral con el propósito de aprovechar al máximo las reservas minerales con diferentes leyes.

Herramientas computacionales y las técnicas matemáticas relacionadas con la Investigación de Operaciones y más específicamente la Programación Lineal, ayudan a reducir el ciclo promedio de explotación y mezclado, cumplir con los programas de producción, aprovechar al máximo las reservas minerales y reducir la variabilidad en la calidad química del producto fosforado que se esté produciendo.

#### **4.5.3.2 Eliminación de partículas ultra finas.**

Se tiene que la granulometría con la que normalmente se comercializa la roca fosfórica es del orden de -100 mallas. Una de las dificultades grandes en la manipulación de este material es la generación de partículas ultrafinas (tamaños de partícula -425 mallas). En este rango de tamaños se van a encontrar los minerales más blandos, principalmente arcillas.

Para eliminar este material ultrafino, se puede emplear el deslamado para procesos que se desarrolla por vía húmeda o mediante el método seco de separación empleando ciclones.

#### **4.5.3.3 Proceso de Flotación de roca fosfórica.**

La flotación de la apatita corresponde a un proceso donde se busca la separación de la ganga silicosa. Son posibles dos alternativas: Flotación de la apatita con ácidos grasos, deprimiendo la ganga y flotación de la ganga con aminas, deprimiendo la apatita.

El primer método es económicamente factible, pero el segundo es demasiado costoso (Lembi C, 2012).

Como alternativas tecnológicas metalúrgicas y biológicas que permitan mejorar la reactividad de la roca fosfórica del Departamento de Boyacá, elevando el % de fósforo soluble en la roca fosfórica se plantean las siguientes alternativas:

#### **4.5.3.4 La acidulación parcial de la roca fosfórica empleando la mezcla de ácido sulfúrico y tiosulfato de amonio.**

Una alternativa de solubilización de la roca fosfórica acidulada más económica es la sustitución parcial del ácido sulfúrico por tiosulfato de amonio. Tratar la roca fosfórica con tiosulfato de amonio mejora la capacidad de la roca para suministrar fósforo disponible al suelo (Sequeral O, 2013). Uno de los factores importantes que tiene el aplicar tiosulfato de amonio, está relacionado con el incremento del contenido de azufre en la roca fosfórica.

#### **4.5.3.5 Desarrollo de un abono orgánico mineral.**

La producción de cosechas altas solo puede tener lugar en suelos fértiles. Los beneficios de integrar fuentes minerales con los abonos orgánicos, son importantes en la búsqueda de obtener cultivos con mayor calidad y mejores rendimientos (FAO, 2007). Una de las ventajas de los abonos orgánicos es que son residuales, es decir, con el tiempo aumenta el porcentaje de materia orgánica del suelo, con lo cual los microorganismos benéficos se desarrollan en mejores condiciones, fortaleciendo los cultivos al hacerlos menos susceptibles a plagas y enfermedades (Lembi C, 2012).

