



Hidroxiapatita: material alternativo en la inertización de polvo de carbón en minas subterráneas

Hydroxyapatite as an Alternative Inerting Material for Underground Coal-Dust Control

Juliana Andrea Chaparro Laguado ¹, Adriana del Pilar Castañeda Rojas ², Kevin Leandro Rosas Barrera ³

Fecha de Recepción: 14 de abril de 2026

Fecha de Aceptación: 31 de julio de 2026

Cómo citar: Chaparro Laguado, J.A. Castañeda Rojas, A.P. y Rosas Barrera, K.L., «Hidroxiapatita: material alternativo en la inertización de polvo de carbón en minas subterráneas», *Tecnura*, vol. 30, n.º 89, jul. 2026. 121–132. <https://doi.org/10.14483/22487638.25006>

Resumen

Contexto: Las explosiones por polvo de carbón en suspensión constituyen uno de los riesgos más críticos en la minería subterránea. Para mitigar este fenómeno se aplica la inertización, medida preventiva basada en la dispersión de un material inerte que reduce la inflamabilidad y favorece la captura de partículas. Aunque la caliza ha sido el material de referencia tradicional, su alta sensibilidad a la humedad degrada su adherencia y dispersabilidad, lo que limita la homogeneidad de la mezcla y disminuye la eficacia del proceso.

Objetivo: Evaluar el desempeño de la hidroxiapatita (HAp) como material alternativo para la inertización en minas de carbón subterráneas, analizando su viabilidad térmica y eficacia en la reducción del riesgo de explosividad en comparación con el polvo de caliza comercial.

Metodología: Se sintetizó HAp mediante dos rutas químicas: precipitación en vía húmeda (HAp-VH) y reacción en estado sólido (HAp-VS). La confirmación estructural se realizó por espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR). Las propiedades térmicas (conductividad y capacidad calorífica) se determinaron mediante un analizador de propiedades térmicas TEMPOS, mientras que la eficacia de inertización y reflectancia se evaluaron con un medidor de explosividad CDEM-1000 sobre mezclas de polvo de carbón e inerte.

Resultados: El análisis por FTIR confirmó la formación de la fase cristalina de HAp mediante la presencia de las bandas de vibración características del ion fosfato (PO_4^{3-}) y del grupo hidroxilo (OH), sin evidenciar carbonatos residuales. En las pruebas térmicas, la HAp-VS registró una baja conductividad térmica ($0,111 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), mientras que la HAp-VH exhibió una estabilidad térmica análoga a la caliza. Las pruebas de explosividad en el CDEM-1000 demostraron que la HAp alcanzó niveles de inertización equivalentes a la caliza, logrando una respuesta no explosiva con proporciones de inerte del 92,5 % para HAp-VS y del 93,0 % para HAp-VH.

- 1 Estudiante de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), sede Sogamoso, Boyacá. Miembro del grupo de investigación GEAM.  Correo electrónico: juliana.chaparro03@uptc.edu.co
- 2 Químico con Especialización en Seguridad y Calidad Alimentaria. Docente de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), sede Sogamoso, Boyacá.  Correo electrónico: adriana.castaneda03@uptc.edu.co
- 3 Ingeniero Químico PhD(c) en Ingeniería Química. Docente de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), sede Sogamoso, Boyacá.  Correo electrónico: kevin.rosas@uptc.edu.co

Conclusiones: La hidroxiapatita sintetizada por ambas rutas químicas (estado sólido y vía húmeda) demostró una capacidad de inertización comparable a la del polvo de caliza convencional, requiriendo fracciones másicas de inerte superiores al 92,5 %. Estos hallazgos validan a la hidroxiapatita como un material alternativo técnicamente viable para la prevención de explosiones por polvo de carbón en minería subterránea.

Palabras clave: explosividad de polvo de carbón, hidroxiapatita, inertización de minas, precipitación vía húmeda, propiedades térmicas.

Abstract

Context: Dust explosions represent one of the most critical hazards in underground coal mining. To mitigate this risk, rock dusting (inertization) is applied as a preventive measure by dispersing an inert material to reduce dust flammability and promote particle agglomeration. Although limestone has been the standard reference material, its high moisture sensitivity impairs adherence and dispersibility, hindering uniform mixing and reducing overall process efficiency.

Objective: To evaluate hydroxyapatite (HAp) as an alternative material for coal mine inertization by analyzing its thermal viability and effectiveness in reducing explosion hazards compared to commercial limestone powder.

Methodology: HAp was successfully synthesized via two chemical routes: wet chemical precipitation (HAp-VH) and solid-state reaction (HAp-VS). Structural characterization was confirmed using Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Thermal properties (thermal conductivity and heat capacity) were measured using a TEMPOS thermal properties analyzer, while inertization efficiency and reflectance were evaluated using a CDEM-1000 coal dust explosibility meter on coal-inert dust mixtures.

Results: FTIR spectra confirmed the synthesis of pure HAp by identifying characteristic vibration bands of phosphate (PO_4^{3-}) and hydroxyl (OH^-) groups, with no detectable residual carbonates. Thermal evaluations indicated that HAp-VS exhibited low thermal conductivity ($0,111 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), whereas HAp-VH showed thermal stability comparable to limestone. Explosibility tests on the CDEM-1000 demonstrated that hydroxyapatite achieved inertization levels equivalent to limestone, reaching non-explosive thresholds at inert mass fractions of 92.5 % (HAp-VS) and 93.0 % (HAp-VH).

Conclusions: Hydroxyapatite synthesized through both chemical routes (solid-state and wet precipitation) demonstrated an inertization capacity comparable to conventional limestone powder, requiring inert fractions above 92.5 %. These results confirm that hydroxyapatite is a technically viable alternative for mitigating coal dust explosion risks in underground mining operations.

Keywords: coal dust explosibility, hydroxyapatite, mine inertization, thermal properties, wet precipitation.

Introducción

Las explosiones en minas subterráneas de carbón constituyen uno de los riesgos más críticos e impactantes para la industria minera a escala global [1]. El polvo de carbón en suspensión, debido a su elevada inflamabilidad, actúa como el combustible principal en la propagación de la llama, por lo que su mitigación se logra fundamentalmente mediante el proceso de inertización [2], [3]. Esta técnica consiste en la dispersión de un material incombustible para diluir la concentración de materia orgánica y absorber la energía térmica liberada durante un evento de ignición. La caliza (carbonato de calcio, CaCO_3) ha sido el material de referencia universalmente empleado; su eficacia se basa en la dilución física del combustible y en la absorción endotérmica de calor [4]. La dosificación y homogeneidad del agente inerte se validan rutinariamente mediante mediciones de explosividad con equipos como el CDEM-1000, cuyo

principio de funcionamiento se fundamenta en la reflectancia óptica de la mezcla de polvo, lo que introduce una dependencia crítica del color del material utilizado.

A pesar de su adopción extendida, la caliza presenta limitaciones operativas significativas. Su alta higroscopicidad y sensibilidad a la humedad en ambientes subterráneos deterioran propiedades fundamentales como la dispersabilidad y la adhesión a las partículas de carbón, lo que dificulta alcanzar una mezcla homogénea y disminuye la eficacia real de la inertización. En este escenario, el desarrollo de materiales alternativos con propiedades térmicas optimizadas ofrece una supresión de llama más eficiente. Específicamente, se requieren sustancias con mayor capacidad calorífica para responder al flujo térmico por unidad de masa y con estabilidad estructural a temperaturas elevadas para preservar la dispersión.

En este contexto, la hidroxiapatita (HAp, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$) emerge como una alternativa prometedora [5]. Sus ventajas se fundamentan en su compatibilidad de reflectancia óptica con los equipos de diagnóstico (CDEM-1000) y en sus propiedades químicas, estructurales y térmicas superiores [6]. La red cristalina de la HAp proporciona mayor resistencia a la humedad, lo que favorece la dispersibilidad y activa un mecanismo de inhibición térmica que combina la absorción de calor con la posible deshidratación endotérmica y la liberación de especies de fosfato a temperaturas elevadas. Asimismo, la versatilidad de sus rutas de síntesis [7], [8] (como la reacción en estado sólido, precipitación en vía húmeda o sol-gel) permite sintonizar la granulometría y la morfología de partícula mediante el control de parámetros como el pH, la temperatura y la relación molar Ca / P. Esta modulación es determinante, pues el área superficial específica condiciona la transferencia de calor y el contacto con el polvo de carbón.

Por consiguiente, el objetivo de esta investigación fue sintetizar hidroxiapatita mediante las rutas de precipitación en vía húmeda y reacción en estado sólido, evaluando sistemáticamente su desempeño como agente inertizante en comparación con la caliza comercial. La caracterización contempló la validación de reflectancia analítica en el equipo CDEM-1000 [9] y la evaluación de sus propiedades físicas y térmicas, con el fin de determinar la viabilidad técnica de la HAp para la mitigación del riesgo de explosión en minería subterránea. Es importante destacar que la revisión bibliográfica realizada no reporta antecedentes sobre la evaluación de agentes inertizantes alternativos a la caliza en ensayos de explosividad de polvo de carbón.

Metodología

Para la síntesis de hidroxiapatita por precipitación en vía húmeda (HAp-VH), se prepararon dos soluciones precursoras: ácido fosfórico (H_3PO_4) a 0,60 M y de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) a 1,00 M, dosificadas para garantizar la relación molar estequiométrica de la apatita ($\text{Ca} / \text{P} = 1,67$). La solución de H_3PO_4 se adicionó gota a gota sobre la suspensión de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mediante agitación magnética constante, asegurando una velocidad de reacción controlada y una mezcla homogénea. Finalizada la adición,

la suspensión se calentó a 90°C durante 1 h bajo agitación continua y, posteriormente, se sometió a un proceso de envejecimiento durante 24 h a temperatura ambiente. El precipitado obtenido se calcinó en una mufla a 800°C durante 3 h, aplicando una rampa de calentamiento de $10^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$.

Para la HAp sintetizada por reacción en estado sólido (HAp-VS), los precursores sólidos $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y pentóxido de fósforo (P_2O_5) se dosificaron en masa hasta cumplir la relación molar estequiométrica $\text{Ca} / \text{P} = 1,67$. Los reactivos se homogenizaron mecánicamente en seco con varilla de vidrio, se sometieron a tratamiento térmico a 90°C durante 1 h y se dejaron envejecer por 24 h a temperatura ambiente. Finalmente, la mezcla sólida se sinterizó a 800°C durante 3 h con una rampa térmica de $10^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$.

La caracterización espectroscópica de las muestras sintetizadas se realizó mediante espectrometría de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR), siguiendo los estándares internacionales ASTM E168 [10] y ASTM E1252 [11]. Los espectros se adquirieron en el intervalo de 4000 cm^{-1} a 400 cm^{-1} , con una resolución de 4 cm^{-1} y un mínimo de 32 barridos por muestra, con el fin de identificar las bandas de vibración características de los iones fosfato (PO_4^{3-}) e hidroxilo (OH^-), así como la presencia de carbonatos o fases secundarias residuales.

La evaluación de las propiedades térmicas —conductividad térmica (k) y capacidad calorífica volumétrica ($\rho \cdot C_p$)— se ejecutó en un analizador de propiedades térmicas TEMPOS provisto de una sonda de doble aguja SH-3. Para el ensayo se confeccionaron probetas cilíndricas de 3 cm X 3 cm empleando partículas de HAp con granulometría controlada pasante por malla Tyler N.º 200 ($75 \mu\text{m}$). La sonda SH-3 se insertó asegurando la alineación paralela de las agujas y el contacto térmico continuo con la matriz de polvo, registrando tres réplicas por cada material sintetizado.

Finalmente, las pruebas de explosividad y reflectancia óptica se llevaron a cabo en un medidor CDEM-1000 siguiendo las especificaciones del manual de operación del fabricante [9]. Estas mediciones de inflamabilidad se aplicaron comparativamente tanto a la HAp obtenida por las dos rutas químicas (HAp-VH y HAp-VS) como a la caliza comercial utilizada como material de referencia.

Resultados

El carbón utilizado en los ensayos de explosividad se extrajo de la mina subterránea El Espejo, ubicada en el municipio de Tasco (Boyacá, Colombia). Este yacimiento pertenece al área de reserva especial de la Formación Guaduas, unidad litológica del Cretácico Superior reconocida por albergar importantes secuencias carboníferas de la cuenca del Cordillera Oriental. Este contexto geológico resulta de especial interés para el estudio de carbones humínicos debido a la variabilidad textural y composicional de sus niveles estratigráficos.

De acuerdo con la caracterización petrológica reportada por Ocampo [12], la materia mineral asociada al carbón estudiado está constituida predominantemente por fragmentos de limolitas silíceas y lodolitas carbonosas, con intercalaciones lenticulares de vitrinita, microcuarzo y presencia ocasional de pirita granular fina con tamaños de grano inferiores a $25\ \mu\text{m}$. A partir de sus atributos petrográficos y grado de madurez térmica, el material se clasifica como un carbón bituminoso de alto contenido de materia volátil tipo C (según la norma ASTM D388). Su matriz presenta una estructura anisotrópica y un elevado grado de consolidación mecánica, lo que ratifica las observaciones microtexturales reportadas en la literatura para los mantos de esta formación [12].

Caracterización FTIR: identificación de grupos funcionales en caliza e HAp

El análisis por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se empleó para identificar los grupos funcionales característicos de la caliza (CaCO_3) y de las hidroxiapatitas sintetizadas por vía sólida (HAp-VS) y vía húmeda (HAp-VH), con el fin de confirmar la formación de las fases esperadas y detectar posibles sustituciones o residuos carbonatados derivados de las condiciones de síntesis. Esta técnica permite obtener información sobre los enlaces químicos presentes en el material, mediante la absorción selectiva de radiación infrarroja por los modos vibracionales de los grupos funcionales, generando un espectro que actúa como huella estructural del compuesto.

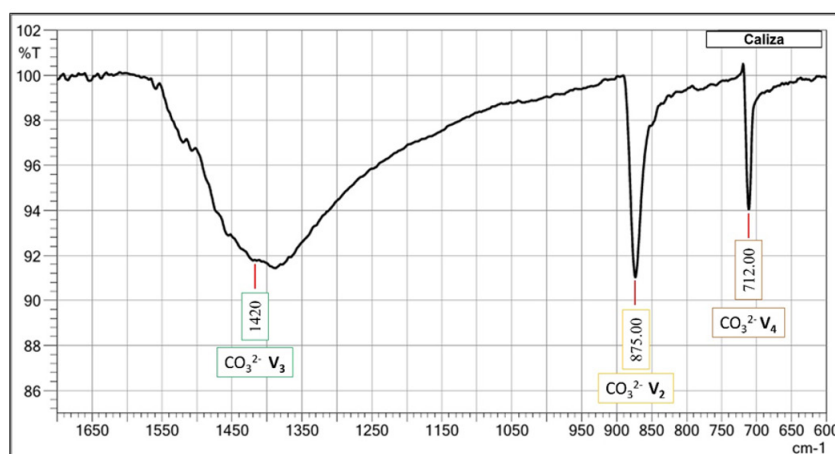


Figura 1: Espectro Infrarrojo con Transformada de Fourier de la Caliza

Fuente: Autores

La Figura 1 muestra el espectro obtenido para la caliza empleada en este trabajo. En dicho espectro se observan las bandas asociadas al ion carbonato (CO_3^{2-}) a $\sim 712\ \text{cm}^{-1}$ correspondiente a la vibración de deformación angular (bending, ν_4) del enlace C—O, así como la absorción aproximadamente a $875\ \text{cm}^{-1}$ relacionada con la deformación angular (ν_2) de la unión C—O, y finalmente, una de las regiones más importantes de la estructura del carbonato de calcio, las cuales aparecen entre $1418\text{--}1430\ \text{cm}^{-1}$, debido a que relaciona la vibración de estiramiento (stretching, ν_3) de la unión C—O.

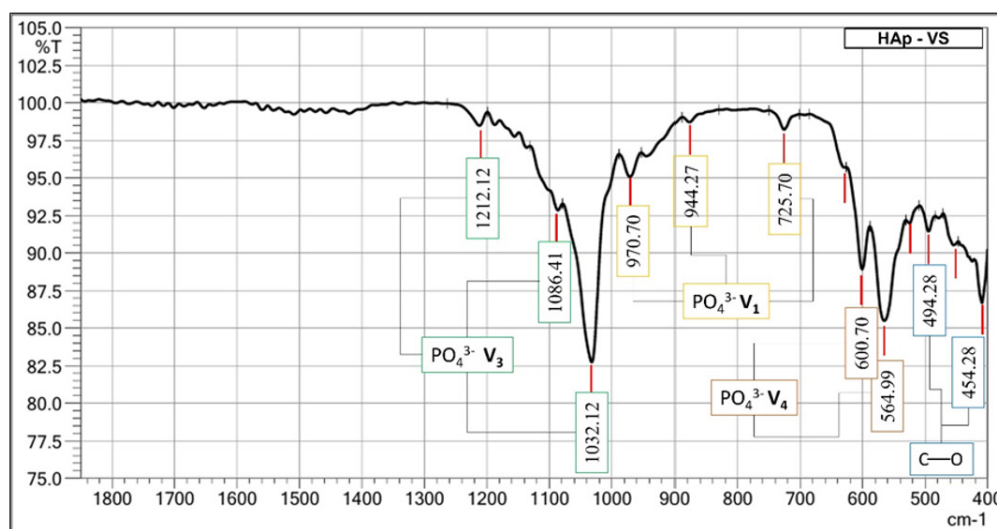


Figura 2: Espectro Infrarrojo con Transformada de Fourier de la Hidroxiapatita _ Vía sólida.

Fuente: Autores

La Figura 2 evidencia regiones que confirman la presencia de hidroxiapatita la cual fue sintetizada por vía sólida: una señal intensa en la región de $\sim 1030\text{--}1220\text{ cm}^{-1}$ asociada al estiramiento asimétrico (v_3) del ion fosfato, una banda en $950\text{--}975\text{ cm}^{-1}$ correspondiente al estiramiento simétrico (v_1), así como las absorciones en 603 y 565 cm^{-1} propias de las deformaciones (v_4) del grupo PO_4^{3-} , y finalmente la región comprendida entre $450\text{--}950\text{ cm}^{-1}$ se relaciona con las vibraciones del enlace C-O.

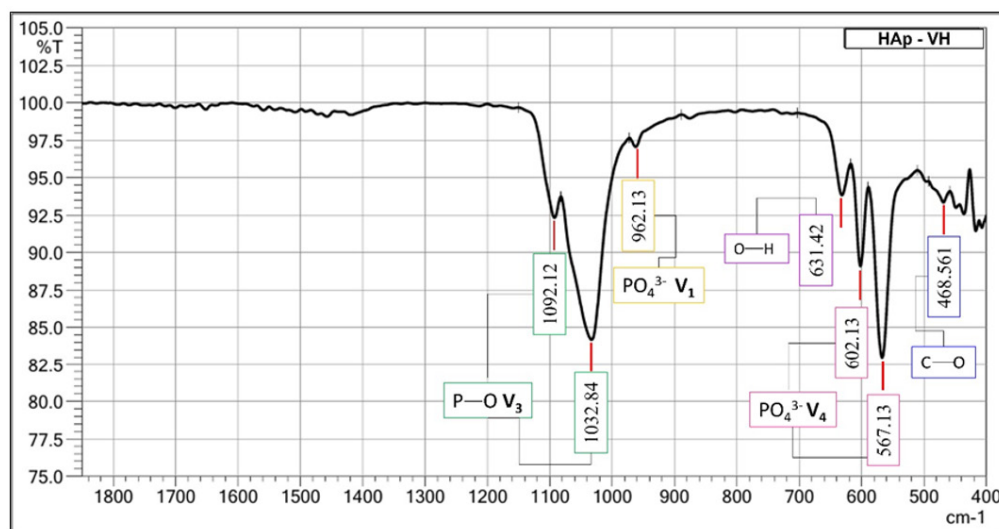


Figura 3: espectro Infrarrojo con Transformada de Fourier de la Hidroxiapatita - Vía húmeda

Fuente: Autores

El espectro de la Figura 3, obtenido para la hidroxiapatita sintetizada por vía húmeda, presenta las bandas características del ion fosfato: una absorción intensa en la región de 1035–1100 cm^{-1} correspondiente al estiramiento asimétrico (ν_3), una señal definida en 960 cm^{-1} asociada al estiramiento simétrico (ν_1), el doblete en 603 y 565 cm^{-1} relacionado con las deformaciones angulares (ν_4), y la banda en $\sim 470 \text{ cm}^{-1}$ atribuida a la vibración del enlace C-O. La nitidez y buena separación de estas señales confirman la presencia de hidroxiapatita.

Pruebas de explosividad e inertización con CDEM-1000

En el presente trabajo se realizaron mediciones de explosividad mediante el analizador óptico CDEM-1000, con el propósito de evaluar comparativamente la capacidad de supresión de llama de los materiales sintetizados frente a la propagación de explosiones por polvo de carbón. Las mediciones se aplicaron a mezclas binarias de polvo de carbón con agentes inertes de caliza comercial (material de referencia), hidroxiapatita obtenida por vía húmeda (HAp-VH) e hidroxiapatita sintetizada por reacción en estado sólido (HAp-VS). Esta comparación permite determinar la viabilidad técnica de la hidroxiapatita como agente inerte alternativo en minería subterránea. Cabe destacar que, en la práctica minera actual, la caliza constituye el único material reglamentado y utilizado operativamente con este fin, debido a su abundancia comercial y efectividad probada en la mitigación de explosiones.

El principio de funcionamiento del CDEM-1000 se basa en la espectroscopía de reflectancia óptica en el espectro visible e infrarrojo cercano. El dispositivo mide la intensidad de la luz reflejada por la superficie de la mezcla homogénea de polvo de carbón y material inerte. A partir de la firma cromática y el contraste de reflectancia entre el combustible (carbón) y el inerte, el algoritmo del equipo determina cuantitativamente la fracción de materia incombustible presente. Esta fracción se contrasta internamente con los umbrales críticos de explosividad calibrados para el tipo de carbón, emitiendo una clasificación dicotómica cualitativa: señal verde para una condición no explosiva (mezcla inerte) y señal roja para una condición explosiva.

Los resultados de los ensayos de explosividad y los porcentajes mínimos de inerte requeridos para la supresión de la propagación de llama se resumen en la Tabla 1.

Inicialmente, se evaluaron las mezclas binarias de caliza y polvo de carbón en relaciones másicas inerte: combustible de 80,0: 20,0, 80,0: 15,0, 90,0: 10,0 y 92,5: 7,5. De estas combinaciones, únicamente la proporción 92,5: 7,5 arrojó una respuesta positiva (señal verde) en el analizador CDEM-1000. De acuerdo con el protocolo de operación del instrumento, este diagnóstico óptico se interpreta como la supresión efectiva de la inflamabilidad y la ausencia de comportamiento explosivo bajo las condiciones de ensayo.

Posteriormente, se repitieron los ensayos sustituyendo la caliza por HAp-VS bajo idénticas proporciones y condiciones experimentales. La mezcla HAp-VS:carbón a la relación 92,5: 7,5 registró del

mismo modo una señal verde en el CDEM-1000, alcanzando el umbral de no explosividad en la misma proporción que el material de referencia. Estos resultados confirman que, bajo criterios estandarizados de preparación e instrumentación, la HAp-VS exhibe una capacidad de inertización equivalente a la caliza comercial.

Tabla 1. Pruebas de explosividad con el equipo CDEM-1000

EVALUACIÓN DEL GRADO DE INERTIZACIÓN			
CARBÓN	CALIZA	PROPORCIÓN (%p/p)	RESPUESTA
20	80	80:20	ROJO
15	85	85:15	ROJO
10	90	90:10	ROJO
7.5	92.5	92.5:7.5	VERDE
CARBÓN	HAp - VS	PROPORCIÓN (%p/p)	VALOR
20	80	80:20	ROJO
15	85	85:15	ROJO
10	90	90:10	ROJO
7.5	92.5	92.5:7.5	VERDE
CARBÓN	HAp - VH	PROPORCIÓN (%p/p)	VALOR
20	80	80:20	ROJO
15	85	85:15	ROJO
10	90	90:10	ROJO
7.5	92.5	92.5:7.5	ROJO
7.0	93	93:7.0	VERDE

Fuente: Autores.

Por último, se evaluó la serie con HAp-VH utilizando el esquema de proporciones inicial. En esta secuencia, la mezcla 92,5: 7,5 mantuvo una respuesta negativa (señal roja), indicando la persistencia del comportamiento explosivo. Ante este hallazgo, se ajustó la dosificación incrementando en un 0,5 % la fracción másica de HAp-VH hasta alcanzar una relación de 93,0: 7,0 (Tabla 1), formulación con la cual se obtuvo la señal verde de supresión de llama.

Este requerimiento adicional de un 0,5 % de inerte en la HAp-VH se atribuye a diferencias microestructurales y cinéticas de transferencia de calor derivadas de la ruta de síntesis. La hidroxiapatita obtenida por precipitación en vía húmeda suele presentar menor cristalinidad y variaciones en el tamaño de cristalino, tal como sugieren las bandas de vibración espectrales en el análisis por FTIR. No obstante, este ligero incremento en la fracción másica demuestra que la HAp-VH alcanza condiciones operativas de estabilidad e inertización plenamente funcionales.

Evaluación térmica de la caliza y de las rutas de síntesis de HAp

La caracterización térmica de la caliza comercial y de la hidroxiapatita sintetizada por reacción en estado sólido (HAp-VS) y precipitación en vía húmeda (HAp-VH) se realizó mediante un analizador de propiedades térmicas TEMPOS. Esta medición permitió determinar experimentalmente la capacidad calorífica volumétrica (C_v) y la conductividad térmica (K), parámetros físicos fundamentales que gobiernan la transferencia de calor y el almacenamiento de energía en los materiales inerte-combustible. Dichas propiedades son determinantes para evaluar la eficiencia de inertización frente a deflagraciones de polvo de carbón, puesto que dictan la tasa de disipación y la cantidad de energía calórica absorbida durante un evento de ignición.

La capacidad calorífica volumétrica (C_v , expresada en $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ o $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$) representa la cantidad de energía requerida para elevar en un kelvin la temperatura de un metro cúbico del material. Un inerte con un valor elevado de C_v actúa como un sumidero térmico eficiente, capaz de absorber una mayor cantidad de la energía liberada por la combustión volátil del carbón sin experimentar incrementos térmicos críticos, amortiguando así el frente de la llama. Por su parte, la conductividad térmica (k , expresada en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) cuantifica la tasa de conducción de energía por unidad de área y gradiente térmico. En sistemas particulados, una menor conductividad térmica limita la propagación rápida del calor hacia las partículas combustibles contiguas, favoreciendo la estabilidad térmica de la suspensión y dificultando el autoabastecimiento cinético del frente de onda.

El análisis comparativo de estas propiedades permite precisar el mecanismo de supresión térmica de la hidroxiapatita frente al material de referencia. En la Tabla 2 se presentan los valores experimentales obtenidos para la caliza, la HAp-VS y la HAp-VH.

Tabla 2 Propiedades térmicas de los materiales empleados

PROPIEDADES TÉRMICAS			
MUESTRA	PROPIEDAD	UNIDAD	VALOR
CaCO_3	Capacidad Calorífica (C)	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	1.112
	Conductividad (k)	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.153
HAp VS	Capacidad Calorífica (C)	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	0.805
	Conductividad (k) HAp VS	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.111
HAp VH	Capacidad Calorífica (C)	$\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	1.010
	Conductividad (k)	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.158

Fuente: Autores.

En términos comparativos, tomando como referencia la caliza comercial, se evidenció que la HAp-VS presentó una reducción del 27,5 % tanto en su capacidad calorífica volumétrica como en su conductividad térmica. A pesar de la menor absorción global de energía, su reducida conductividad térmica representa una ventaja operativa determinante: dificulta el transporte conductivo de calor entre partículas contiguas e impide que la energía liberada durante la ignición local se transfiera con rapidez hacia el combustible vecino. En conjunto, esta respuesta cinética sugiere que la HAp-VS promueve una disipación térmica altamente localizada, lo que restringe eficazmente la expansión del frente de llama.

Por su parte, la HAp-VH registró una capacidad calorífica un 9,2 % menor y una conductividad térmica un 3,3 % superior en relación con la caliza. La ligera disminución en la capacidad calorífica implica que el material absorbe menos calor por unidad de volumen antes de incrementar su temperatura, mientras que el leve incremento en la conductividad refleja una mayor tasa de transferencia de calor, si bien esta variación no resulta estadísticamente significativa ni compromete el desempeño operativo en términos prácticos. En consecuencia, su comportamiento térmico se mantiene en un rango de eficiencia comparable al del agente inerte de referencia.

Conviene señalar que la interrelación exacta entre las propiedades térmicas intrínsecas de un inerte particulado y su firma de reflectancia óptica es un campo de estudio en desarrollo. Por lo tanto, se requiere complementar estas evaluaciones con la caracterización de parámetros microestructurales adicionales —tales como la porosidad intragranular, la distribución de tamaño de cristalino y el área superficial específica (BET)— para alcanzar una mayor certidumbre sobre los mecanismos acoplados de transferencia de calor y reflectancia en el CDEM-1000.

Conclusiones

►El análisis por espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) confirmó la formación de la fase hidroxiapatita (HAp) en los productos sintetizados por reacción en estado sólido (HAp-VS) y precipitación en vía húmeda (HAp-VH). Los espectros de ambas muestras registraron las bandas de vibración características de los iones fosfato (PO_4^{3-}) e hidroxilo (OH^-). La ausencia de señales asociadas al ion carbonato (CO_3^{2-}), distintivas del material de referencia (CaCO_3), ratifica la pureza de las fases obtenidas sin evidencia de contaminación por carbonatos residuales detectables por esta técnica.

►Las mediciones de propiedades térmicas (TEMPOS) evidenciaron que la HAp-VS presentó los valores más bajos de capacidad calorífica volumétrica ($0,805 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$) y conductividad térmica ($0,111 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) en comparación con la caliza comercial. Aunque esta combinación implica una menor capacidad de almacenamiento calórico, su baja conductividad actúa como una barrera efectiva para el transporte conductivo de energía entre partículas, conteniendo la propagación local del frente térmico en la mezcla inerte-combustible y reduciendo el riesgo de deflagración.

►La HAp-VH registró una capacidad calorífica un 9,2 % menor y una conductividad térmica un 3,3 % superior en relación con la caliza. A pesar de esta leve tendencia a una mayor transferencia calórica, las diferencias no resultan estadísticamente significativas en el contexto operativo. Su desempeño térmico global permanece dentro de un rango estable y directamente comparable con el material de referencia, validando a la HAp-VH como una opción técnicamente viable para la inertización de polvo de carbón.

►Los ensayos en el medidor de explosividad por reflectancia CDEM-1000 demostraron que en fracciones de inerte comprendidas entre 80,0 % y 90,0 % (20,0 % a 10,0 % de polvo de carbón), todas las formulaciones mantuvieron una condición explosiva (señal roja). La condición de supresión efectiva de llama (señal verde) se alcanzó al incrementar la fracción inerte a 92,5 % para la HAp-VS (idéntico a la caliza) y a 93,0 % para la HAp-VH. Esto confirma que la hidroxiapatita sintetizada neutraliza la inflamabilidad del polvo de carbón en concentraciones equivalentes a las exigidas para la caliza comercial.

►En conjunto, este estudio demuestra la viabilidad técnica de la hidroxiapatita como agente inerte alternativo para la mitigación del riesgo de explosión en minería subterránea de carbón. La posibilidad de modular la microestructura y las propiedades térmicas mediante la ruta de síntesis (vía húmeda o estado sólido) abre un campo para el diseño de inertizantes de alta especificidad orientados a la gestión de la seguridad minera.

Referencias

- [1] eCFR, "Title 30 of the CFR – Mineral Resources." [Online]. Available: <https://www.ecfr.gov/current/title-30>. Accessed: Apr. 4, 2025.
- [2] K. Baquero, A. Blandón, and J. Molina, "Análisis de los factores que influyen en la explosividad del polvo de carbón en las minas subterráneas," *Ingeniería y Competitividad*, vol. 14, pp. 173–182, 2012
- [3] Función Pública, "Decreto 1886 de 2015 - Gestor Normativo - Función Pública." [Online]. Available: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=65325&utm_source=chatgpt.com. Accessed: Dec. 11, 2025
- [4] Y. Luo, D. Wang, and J. Cheng, "Effects of rock dusting in preventing and reducing intensity of coal mine explosions," *Int. J. Coal Sci. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 102–109, Jun. 2017, doi: <https://doi.org/10.1007/S40789-017-0168-Z>
- [5] L. O. Ahmed and R. A. Omer, "Hydroxyapatite biomaterials: A comprehensive review of their properties, structures, clinical applications, and producing techniques," *Rev. Inorg. Chem.*, vol. 44, no. 4, pp. 599–618, Nov. 2024, doi: <https://doi.org/10.1515/REVIC-2024-0018/XML>.
- [6] MatWeb, "Recurso de información de materiales en línea - MatWeb." [Online]. Available: <https://www.matweb.com/>. Accessed: May 5, 2025.
- [7] L. G. Sequeda, J. M. Díaz, S. J. Gutiérrez, S. J. Perdomo, and O. L. Gómez, "Obtención de hidroxiapatita sintética por tres métodos diferentes y su caracterización para ser utilizada como sustituto óseo," *Revista Colombiana*

-
- de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, vol. 41, no. 1, pp. 50–66, 2012. [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-74182012000100004&lng=en&nrm=iso&tlng=es. Accessed: May 5, 2025
- [8] D. E. Juárez Robles *et al.*, “Síntesis de nano-hidroxiapatita por los métodos sol-gel y coprecipitación,” 2017. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/11191/8376>. Accessed: May 5, 2025.
- [9] Sensidyne, *Operation Manual*. USA, 2011. [Online]. Available: <https://www.sensidyne.com>
- [10] ASTM, “Practices for General Techniques of Infrared Quantitative Analysis,” Apr. 2016, doi: <https://doi.org/10.1520/E0168-16>
- [11] ASTM, “Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis,” Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.1520/E1252-98R21>
- [12] I. Wilder and A. O. Ochoa, “Caracterización de las Rocas Carbón de la Formación Guaduas y Calizas de la Formación Tibasosa, Usando el Método de Ultrasonido y Susceptibilidad Magnética,” master’s thesis, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), 2021.

