



UNIVERSIDAD  
**SANTO TOMÁS**  
TUNJA

VIGILADA MINEDUCACIÓN - SNIES 1732

**Aquí y  
Ahora**



Universidad Santo Tomás

Facultad de Derecho

Maestría en Derecho Minero – Ambiental

Vacíos Normativos en la Legislación Frente al Uso y Aprovechamiento de  
Elementos de Tierras Raras Presentes en las Cenizas del Carbón

Por

David Alejandro Herrera Carvajal

Trabajo presentado como requisito de grado para optar por el título de Magister en  
Derecho Minero – Ambiental

Director:

Dr. Marlon Iván Maldonado Narváez

Tunja - Boyacá

2025

Vacíos Normativos en la Legislación Frente al Uso y Aprovechamiento de Elementos de  
Tierras Raras Presentes en las Cenizas del Carbón

Trabajo de grado presentado por  
David Alejandro Herrera Carvajal

Aprobado por:

---

Dr. Marlon Iván Maldonado Narváez

Director

---

Dr.

Jurado

---

Dr.

Jurado

Tunja – Boyacá., abril de 2025

## **AGRADECIMIENTOS**

A todos, especialmente a los más entre los todos. A estos últimos: gracias totales.

Vacíos Normativos en la Legislación Frente al Uso y Aprovechamiento de Elementos de  
Tierras Raras Presentes en las Cenizas del Carbón

Universidad Santo Tomás

Maestría en Derecho Minero - Ambiental

Tunja, Colombia.

abril, 2025.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>4</b>
<b>RESUMÉN .....</b>	<b>13</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>14</b>
<b>JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>15</b>
Objetivo general .....	20
Objetivos específicos.....	21
<b>1 INTRODUCCIÓN A LOS ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS (ETR).</b>	<b>22</b>
1.1 Génesis de los Elementos de Tierras Raras .....	24
1.2 Depósitos Minerales de Elementos de Tierras Raras .....	25
1.2.1 Operaciones de extracción de ETR de mayor relevancia a nivel mundial en la actualidad. ....	28
<b>2 DEMANDA DEL RECURSO .....</b>	<b>30</b>
2.1 La Importancia Estratégica De Los Elementos De Tierras Raras: Aplicaciones Actuales, Desafíos Y Proyecciones Futuras .....	30
2.2 Aplicaciones Actuales de los Elementos de Tierras Raras.....	31
2.3 Elementos de Tierras Raras en la industria de Tecnologías Verdes.....	33
2.4 Desafíos en la Cadena de Suministro de ETR.....	36

2.4.1	Desafíos Geopolíticos y de Mercado en la Cadena de Suministro de ETR	37
2.4.2	Estrategias para la Generación de una cadena de Suministro Robusta y Sostenible de ETR .....	39
2.4.2.1	<i>Diversificación de las fuentes de suministro</i> .....	40
2.4.2.2	<i>Fomento de la Circularidad y Sostenibilidad</i> .....	41
2.4.2.3	<i>Monitoreo y Gestión de Riesgos</i> .....	42
2.4.2.4	<i>Fortalecimiento de la cadena de valor</i> .....	42
2.4.2.5	<i>Consideraciones adicionales</i> .....	43
2.4.3	Impacto Ambiental en la Extracción de ETR.....	43
<b>3</b>	<b>EXISTENCIA DEL RECURSO EN EL TERRITORIO NACIONAL.....</b>	<b>45</b>
3.1	Tierras raras en Colombia.....	45
3.2	Génesis de los depósitos de tierras raras en carbones .....	49
3.2.1	Procesos Singenéticos o Sindeposicionales.....	50
3.2.2	Procesos Diagenéticos .....	51
3.2.3	Procesos Epigenéticos .....	52
3.2.4	Proceso Telogénico.....	52
3.3	Perspectivas del potencial de las cenizas del carbón como fuente de elementos de tierras raras. ....	54
3.4	Las cenizas de los carbones colombianos como posible fuente emergente de elementos de tierras raras.....	57

## **4 PROCESO DE RECUPERACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS DE LAS CENIZAS DEL CARBÓN Y RENTABILIDAD DEL PROCESO .66**

4.1	Etapa de pretratamiento físico .....	66
4.1.1	Separación Magnética.....	67
4.1.2	Separación por Densidad (Flotación por espuma/Hundimiento) .....	68
4.1.3	Clasificación por Tamaño de Partículas .....	68
4.1.4	Combinación de métodos .....	69
4.2	Etapa de extracción química.....	71
4.2.1	Lixiviación ácida .....	71
4.2.2	Tostado alcalino.....	72
4.2.3	Fusión alcalina.....	73
4.2.4	Lixiviación alcalina .....	74
4.2.5	Lixiviación secuencial .....	75
4.2.6	Biolixiviación .....	76
4.3	Etapa de purificación final.....	77
4.3.1	Cristalización/Precipitación selectiva.....	78
4.3.2	Extracción con solventes (SX) .....	78
4.3.3	Intercambio iónico.....	79
4.3.4	Electrodialisis .....	80
4.3.5	Separación por membranas.....	81
4.4	Rentabilidad del proceso de extracción de ETR de las cenizas del carbón	
	84	
4.4.1	Rentabilidad del proceso en el caso colombiano.....	86

**5 VACÍOS NORMATIVOS EN LA LEGISLACIÓN COLOMBIANA  
FRENTE AL USO Y APROVECHAMIENTO DE ELEMENTOS DE TIERRAS  
RARAS PRESENTES EN LAS CENIZAS DEL CARBÓN ..... 90**

5.1 Marco jurídico presente en la Constitución Política de 1991 ..... 90

5.2 Marco Normativo sobre Recursos Naturales y Permisos Ambientales .... 93

5.2.1 Marco normativo específico para la protección del recurso aire ..... 94

5.2.2 Marco normativo específico para la protección del recurso agua ..... 96

5.2.3 Marco normativo específico para la protección del recurso suelo ..... 99

5.3 Marco Normativo en Minería y Beneficio de Minerales..... 101

5.4 Marco Normativo en Economía Circular y Aprovechamiento de Residuos  
115

**6 BASES PARA EL ESTABLECIMIENTO DE UN MARCO  
NORMATIVO QUE REGULE EL USO Y APROVECHAMIENTO DE  
ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS PRESENTES EN LAS CENIZAS DEL  
CARBÓN EN COLOMBIA..... 125**

6.1 Eje Temático 1: Normativas en las que se puede apoyar una posible  
regulación 126

6.1.1 Constitución Política de la República de Colombia de 1991. .... 126

6.1.2 Ámbito minero..... 127

6.1.3 Responsabilidades ambientales. .... 128

6.1.4 Reciclaje y economía circular..... 129

6.2 Eje Temático 2: Los vacíos legales que se deben subsanar..... 130

6.2.1	Definición y clasificación de los ETR.....	131
6.2.2	Regulación Ambiental (Aire, Agua y Suelo).....	132
6.2.2.1	<i>Recurso Aire</i> .....	132
6.2.2.2	<i>Recurso Agua</i> .....	133
6.2.2.3	<i>Recurso Suelo</i> .....	133
6.2.3	Regulación Minera y Beneficio de Minerales.....	134
6.2.4	Economía Circular y Aprovechamiento de Residuos.....	135
6.3	Eje Temático 3: Referentes Internacionales y Sinergia Regulatoria.....	136
6.3.1	República Popular de China.....	137
6.3.2	Unión Europea.....	139
6.3.3	Estados Unidos de América.....	141
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>147</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>153</b>
	<b>RECOMENDACIÓN DE UN MARCO REGULATORIO DIFERENCIAL PARA EL APROVECHAMIENTO DE ETR DESDE CENIZAS DE CARBÓN.....</b>	<b>158</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>164</b>
	<b>ANEXO A.....</b>	<b>181</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Distribución global de Elementos de Tierras Raras.....	38
<b>Figura 2.</b> Procesos asociados con la formación de materia mineral y la inclusión de ETR en el carbón. ....	53
<b>Figura 3.</b> Ubicación de centrales termoeléctricas activas en el territorio nacional. 58	
<b>Figura 4.</b> Composición parque de generación eléctrica en Colombia (Ene- Jul 2021). 64	
<b>Figura 5.</b> Composición de la oferta por fuente energética (PetaJulios) en 2019 y proyecciones 2050. 64	
<b>Figura 6.</b> Consumo de energéticos del sector Industrial 2019 y proyecciones 2050 (PetaJulios) 65	
<b>Figura 7.</b> Resumen de Técnicas de Pretratamiento Físico para la Concentración de ETR en Cenizas de Carbón.....	70
<b>Figura 8.</b> Resumen de Técnicas de extracción química para la Concentración de ETR en Cenizas de Carbón.....	77
<b>Figura 9.</b> Resumen de Técnicas de extracción química para la Etapa de Purificación de ETR en Cenizas de Carbón .....	83
<b>Figura 10.</b> Resumen del proceso de extracción de ETR de las cenizas del carbón y sus principales interacciones entre las técnicas utilizadas.....	84
<b>Figura 11.</b> Análisis de ceniza de carbón. Muestra 1939. ....	181
<b>Figura 12.</b> Análisis de ceniza de carbón. Muestra 1944. ....	182
<b>Figura 13.</b> Análisis de ceniza de carbón. Muestra 1994. ....	183
<b>Figura 14.</b> Análisis de ceniza de carbón. Muestra 1998. ....	184

<b>Figura 15.</b>	Análisis de ceniza de carbón. Muestra 1999. ....	185
<b>Figura 16.</b>	Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2000. ....	186
<b>Figura 17.</b>	Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2001. ....	187
<b>Figura 18.</b>	Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2003. ....	188
<b>Figura 19.</b>	Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2006. ....	189
<b>Figura 20.</b>	Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2009. ....	190
<b>Figura 21.</b>	Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2011. ....	191
<b>Figura 22.</b>	Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2079. ....	192
<b>Figura 23.</b>	Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2081. ....	193
<b>Figura 24.</b>	Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2082. ....	194
<b>Figura 25.</b>	Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2083. ....	195
<b>Figura 26.</b>	Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2085. ....	196
<b>Figura 27.</b>	Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2086. ....	197
<b>Figura 28.</b>	Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2088. ....	198
<b>Figura 29.</b>	Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2088. ....	199
<b>Figura 30.</b>	Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2089. ....	200
<b>Figura 31.</b>	Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2093. ....	201
<b>Figura 32.</b>	Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2094. ....	202
<b>Figura 33.</b>	Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2096. ....	203
<b>Figura 34.</b>	Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2141. ....	204
<b>Figura 35.</b>	Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2146. ....	205

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Resumen de métodos de explotación a nivel mundial de yacimientos geológicos convencionales de ETR. ....	27
<b>Tabla 2.</b> Aspectos relevantes de los yacimientos de ETR en el mundo. ....	30
<b>Tabla 3.</b> Aplicaciones de los ETR, principales productores y aspectos destacados. ....	34
<b>Tabla 4.</b> Nota. Reproducido de Generación de Energía con Carbón (p. 10), por Asociación Nacional de Empresas Generadoras (ANDEG), (2021). <a href="https://www.andeg.org/wp-content/uploads/2021/09/Generacio%CC%81n-con-carbo%CC%81n-PPT-para-ANLA.pdf">https://www.andeg.org/wp-content/uploads/2021/09/Generacio%CC%81n-con-carbo%CC%81n-PPT-para-ANLA.pdf</a> Capacidad, Eficiencia y Tipo de Combustible de Unidades de Generación Térmica en Colombia .....	58
<b>Tabla 5.</b> Valores de concentración de elementos de tierras raras en los departamentos de Antioquia-Caldas, Boyacá y Cundinamarca según Gómez Rojas (2018), Henao (2019) y datos inéditos del autor (ppm). ....	61
<b>Tabla 6.</b> Comparativo internacional de marcos regulatorios sobre ETR y oportunidades para Colombia.....	143

## **RESUMÉN**

La presente investigación examina de forma integral los vacíos normativos en la legislación colombiana en torno al uso y aprovechamiento de los elementos de tierras raras (ETR) presentes en las cenizas del carbón, un recurso estratégico en la era de la transición energética y digital. El estudio se fundamenta en un exhaustivo análisis geológico, minero y normativo, y argumenta que, a pesar de la abundancia relativa de estos elementos en la corteza terrestre, su extracción y procesamiento se han visto históricamente limitados por concentraciones bajas que, hasta hace poco, hacían inviable económicamente su explotación. Sin embargo, los avances tecnológicos han permitido identificar y desarrollar métodos de recuperación que optimizan su concentración y rentabilidad, lo cual posiciona a los ETR como insumos fundamentales para sectores de alta competitividad, como el de tecnologías verdes, defensa y telecomunicaciones.

En este contexto, el estudio destaca la necesidad de establecer un marco regulatorio robusto que no solo fomente el aprovechamiento responsable de estos recursos, sino que también garantice la seguridad ambiental y la competitividad en mercados globales. La investigación propone, asimismo, estrategias orientadas a la diversificación de fuentes, el fortalecimiento de la cadena de valor mediante alianzas estratégicas y la promoción de la economía circular, con vistas a asegurar una gestión integral de los ETR. Este trabajo aspira a ofrecer una visión clara y práctica que oriente tanto a la formulación de políticas públicas como a los actores privados, en pos de transformar un recurso tradicionalmente infravalorado en un pilar de la economía del conocimiento y la innovación tecnológica.

## **ABSTRACT**

This research provides a comprehensive review of the regulatory gaps in Colombian legislation regarding the use and exploitation of rare earth elements (REE) found in coal ashes—resources that have emerged as strategic assets in the current era of energy transition and digital innovation. The study is built on an in-depth analysis that spans geological, mining, and legal frameworks, arguing that although these elements are relatively abundant in the Earth’s crust, their historical low concentrations rendered economic extraction unfeasible. Technological advancements, however, have paved the way for innovative recovery methods that enhance both the concentration and profitability of REE, positioning them as key inputs for highly competitive sectors such as green technologies, defense, and telecommunications.

Within this context, the research emphasizes the urgent need to establish a robust regulatory framework that not only promotes the responsible utilization of these resources but also ensures environmental security and global market competitiveness. Additionally, the study proposes strategies aimed at diversifying supply sources, reinforcing the value chain through strategic partnerships, and fostering a circular economy to guarantee comprehensive management of REE. The work aims to deliver a clear and pragmatic perspective that will guide both public policy formulation and private sector initiatives, transforming a traditionally undervalued resource into a cornerstone of the knowledge economy and technological innovation.

## **JUSTIFICACIÓN**

Los elementos de Tierras Raras (en adelante ETR, por sus siglas en español o REE por sus siglas en inglés), comprenden a 15 elementos del grupo de los metales de la tabla periódica, principalmente y en su mayoría pertenecientes al grupo de los Lantánidos, entre los que se encuentran el Lantano (La), Cerio (Ce), Praseodimio (Pr), Neodimio (Nd), Prometio (Pm), Samario (Sm), Europio (Eu), Gadolinio (Gd), Terbio (Tb), Disproso (Dy), Holmio (Ho), Erblio (Er), Tulio (Tm), Iterbio (Yb) y Lutecio (Lu), y además dos (2) elementos metálicos pertenecientes a los metales de transición que son el Escandio (Sc) y el Itrio (Y). (Chakhmouradian & Wall, 2012).

Los ETR no se encuentran de forma aislada, estos elementos son muy escasos y aunque en bajas concentraciones, normalmente se encuentran dispuestos en una variedad de minerales distribuidos en toda la corteza terrestre.(Gschneidner Jr et al., 2006).

Según Gschneidner (2006), la rareza y escasez de estos elementos hace que en la mayoría de los casos donde se identifiquen especies minerales que contengan a los ETR, su concentración sea tan baja que no es económicamente viable realizar operaciones en pos de su extracción y beneficio. Sin embargo, actualmente se han desarrollado técnicas avanzadas que han permitido identificar yacimiento convencionales y no convencionales de ETR lo cual, a permitido que dentro de la cadena de valor de los ETR se desarrollen métodos de recuperación y procesamiento que permiten la producción de concentrados de alta pureza, los cuales contienen varios de estos elementos, que posteriormente serán ofrecidos en el mercado. (Goodenough et al., 2018)

Los ETR han sido ampliamente investigados y su uso actual envuelve aplicaciones que abarcan desde los aspectos más cotidianos como los complejos de la humanidad. Como ejemplo de lo anteriormente mencionado, el desarrollo de los diferentes componentes para

la fabricación de smartphones, computadoras de uso común, computadoras cuánticas y servidores para el almacenamiento de datos en la nube y desarrollo de Inteligencia Artificial (IA) requiere del uso de Lantano, Neodimio, Iterbio y Erbio, las aleaciones de Samario-Cobalto se implementan en instrumentos que hacen uso del Radar, así mismo, la aleación de Escandio con Aluminio es ampliamente utilizada para aumentar el rendimiento de los aviones de combate y el Itrio se incorpora en la tecnología de los láseres. También se aprecian aplicaciones prácticas en el mercado creciente de los automóviles eléctricos dado que los imanes de Neodimio - Hierro se utilizan en los motores de arranque eléctrico de estos coches y las baterías que contienen Lantano y Neodimio se perfilan como un mercado que les permitiría más autonomía de movimiento al poder almacenar más energía eléctrica con un mínimo de pérdida. Por ultimo y no menos importante desde el auge de internet como un servicio cada vez más de necesidad básica y la búsqueda de mejores y tasas de transmisión de datos intercontinentales, desde las décadas de 1990 y 2000 se implementa el Erbio como un elemento clave en los cables en la fibra óptica dado que permite aumentar la señal de estos. (Alvares Calderón & Trujillo Palacio, 2020)

La preocupación mundial por el cambio climático y la independencia energética ha disparado la investigación sobre los posibles usos de ETR, especialmente con la alta demanda de automóviles híbridos y eléctricos y turbinas eólicas. Según el Servicio Geológico de los Estados Unidos, las reservas mundiales de tierras raras se estiman en aproximadamente 120 millones de toneladas métricas (equivalente de óxidos de tierra) y China tiene la mayor parte con alrededor del 37%, anudado a lo anterior, Alvares Calderón, (2020) estima que más del 90% de la capacidad de producción de ETR está controlada por China.

Bajo este contexto monopolista, Colombia actualmente no participa del mercado de suministro de tierras raras a nivel mundial a pesar de tener el potencial de, no solo tener presencia, si no de convertirse en un actor importante dentro de la cadena de suministro mundial de ETR. (Alvares Calderón & Trujillo Palacio, 2020)

Los ETR hoy en día han adquirido un estatus de alta esencialidad y criticidad en la vida moderna dado su cada vez más creciente uso en innumerables avances tecnológicos. De hecho, el tema anterior a llegado a tal punto que en el informe de la Organización Mundial del Comercio (2015) sobre las acciones de China relacionadas con el precio y el suministro de ciertos ETR y tras la creación del Instituto de Materiales Críticos del DOE de EE. UU. financiado en parte por La Oficina de Eficiencia Energética y Energía Renovable del DOE se evidencio la necesidad de una nueva Cadena mundial de suministro de ETR.

De acuerdo con (Orris & Grauch, 2002) Los ETR son, en promedio, más abundantes que los metales preciosos (por ejemplo, oro, plata y platino), pero debido a sus propiedades geoquímicas únicas, comúnmente no forman depósitos de mineral económicamente viables. Sin embargo, los ETR son cada vez más necesarios para una gama de aplicaciones modernas como se mencionó con anterioridad. (Gambogi, 2019).

En lo que concierne a Colombia, por un par de décadas se ha especulado que el país podría tener acceso a elementos de tierras raras en su geografía, contenidos principalmente en depósitos de coltán, un tipo de mena muy utilizada en la fabricación de componentes eléctricos. Según la Agencia Nacional Minera (ANM), en Colombia no existe producción de este mineral, al menos de manera legal, aunque la explotación ilegal de coltán en el país viene desarrollándose hace varios años por parte de algunos. (Alvares Calderón & Trujillo Palacio, 2020).

(Reyes Caballero et al., 2015), destaca que Estados Unidos produce una gran cantidad de cenizas de carbón, pero la cantidad de tierras raras extraídas de la basura del carbón sigue siendo increíblemente leve en comparación con lo que se extrae a través de la minería tradicional. Para el año 2014 se estima que la planta de energía térmica TERMOPAIPA IV ubicada en Boyacá, Colombia, produce doscientas (200) toneladas de ceniza volante por cada mil quinientas (1500) toneladas de carbón combustionado y toda la ceniza volante producida se comercializa como materia prima para la industria del cemento local.

Se estima que se necesitan cinco toneladas métricas de cenizas de carbón para producir un kilogramo de elementos de tierras raras, dependiendo de la concentración. La concentración promedio de tierras raras en cenizas de carbón es de 68,5 partes por millón, mientras que la concentración de tierras raras en mineral extraído es aproximadamente 40 veces mayor. (Gaffney, 2021; Lin et al., 2017)

En Colombia no existe actualmente una normativa que regularice el aprovechamiento de los ETR, dado que, si bien existen estudios efectuados por Servicio Geológico Colombiano SGC que dan viabilidad a esta actividad de recuperación de ETR, su enfoque ha sido exclusivamente desde un ámbito investigativo y no con la finalidad de darle una aplicación en el mercado con su respectiva regulación.

Sin embargo, a nivel internacional, se ha enfocado la investigación de los ETR, concebidos como materiales estratégicos de alta prioridad en su aprovechamiento y con ello se han producido las primeras regularizaciones en este ámbito. El Departamento de Energía de Los Estados Unidos de América, en mayo de 2022 ha presentado un informe ante el congreso en el cual de acuerdo con los requisitos de la Sección 7001 de la Ley de Energía de 2020, codificada en el USC 13344, el Departamento de Energía (DOE), la Oficina de

Energía Fósil y la Gestión del Carbono (FECM) y el Laboratorio Nacional de Tecnología Energética (NETL) han realizado una evaluación y análisis de la viabilidad de valorizar económicamente los elementos de tierras raras (ETR) y otros materiales críticos (CM) del carbón y las corrientes de subproductos del carbón, como carbones de bajo rango, carbón desechos, cenizas de carbón y drenaje ácido de minas (AMD). (U.S. Department of Energy, 2022).

### ***Objetivo general***

Identificar los vacíos normativos en la legislación colombiana en torno al uso y aprovechamiento de elementos de tierras raras presentes en las cenizas del carbón, de cara a la formulación de una propuesta regulatoria.

### *Objetivos específicos*

- Analizar el potencial económico de las tierras raras dentro del mercado colombiano
- Identificar los soportes legales de la normatividad colombiana alrededor del aprovechamiento de recursos naturales y la ausencia de normativa para el aprovechamiento de elementos de tierras raras presentes en las cenizas del carbón.
- Proponer una base para la futura regulación de la legislación actual para el aprovechamiento de elementos de tierras raras presentes en las cenizas del carbón, sus tecnologías y técnicas.

## **1 INTRODUCCIÓN A LOS ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS (ETR).**

Los elementos de tierras raras (ETR) son un conjunto de diecisiete (17) elementos químicos que se encuentran principalmente en los bloques f y d de la tabla periódica de los elementos, incluyendo quince (15) elementos del grupo de los lantánidos y dos (2) elementos del grupo de los metales. A pesar de su denominación comercial como ETR, no son realmente “raros” o “escasos” en términos de abundancia en la corteza terrestre, este calificativo deriva de la dificultad inicial para extraer estos elementos de sus escasos yacimientos, los cuales además de contener bajas concentraciones de estos elementos, se encuentran sumamente dispersos en la corteza terrestre. (Alvares Calderón & Trujillo Palacio, 2020).

En su artículo científico denominado *Rare Earth Elements: Minerals, Mines, Magnets (and More)*, Chakhmouradian & Wall (2012), indican que los ETR se conocen desde el año 1787, cuando por primera vez se describió uno de los elementos químicos que más tarde pasarían a formar parte de este grupo particular. El hallazgo se concentró en la descripción y análisis de un mineral negro encontrado en la villa de Ytterby, ubicada a unos treinta (30) kilómetros de Estocolmo en Suecia. El mineral en cuestión fue estudiado y se encontró que estaba compuesto principalmente por óxidos de Silicio, Aluminio y Hierro, pero además contenía una porción importante de un óxido refractario de un elemento que, hasta la época de su descubrimiento, era desconocido para la ciencia. Este elemento se denominó Itrio (Y), en honor a su origen geográfico.

Los ETR se caracterizan por sus propiedades químicas y físicas únicas, como lo es su elevada conductividad y capacidad magnética. Estas propiedades los hacen indispensables en una amplia gama de aplicaciones tecnológicas avanzadas, incluyendo la fabricación de imanes permanentes, aleaciones, vidrios especiales y en la electrónica

avanzada. La singularidad de los ETR reside en su configuración electrónica, la cual les confiere características magnéticas y ópticas especiales, haciendo su uso esencial en tecnologías específicas de un alto grado de complejidad, enfocadas en un constante desarrollo evolución de elementos de alta precisión, durabilidad, eficiencia energética y almacenamiento de datos. Dentro de las industrias con más consumo de ETR se encuentran las enfocadas en el aprovechamiento y uso de energía renovables, la industria electrónica en general, la industria militar, de defensa y aeroespacial, la industria automotriz y la medicina. Es precisamente esta dependencia tecnológica actual lo que propiciado la alta demanda de ETR, desencadenado una carrera en la exploración y extracción de estos elementos, llevando a consideraciones importantes en términos de legislación minera y protección ambiental. (Goodenough et al., 2018).

Es importante destacar la relevancia de los ETR en el contexto del derecho minero ambiental, enfocándose en los desafíos legales y ambientales que representa su extracción. Estos desafíos incluyen la regulación de la minería, el manejo de residuos y la mitigación de impactos ambientales, aspectos cruciales en el marco del desarrollo sostenible y la gestión de recursos no renovables.

Además, como destacan (Alvares Calderón & Trujillo Palacio, 2020), la industria del sector militar y defensa valora y propende cada vez más por el uso de ETR dentro de sus productos, convirtiéndolos en un recurso natural estratégico de relevancia geopolítica, que puede afectar la seguridad multidimensional de los Estados. Por otro lado, en el ámbito de la investigación (Toache-Pérez et al., 2022), destaca el uso de ETR como proxies en estudios geológicos, siendo estas evidencias indirectas de los climas o ambientes del pasado preservados en archivos naturales que ayudan en el entendimiento de las variaciones

climáticas globales pasadas y enriquecen los datos para los estudios y modelos de predicción del actual cambio climático global.

### ***1.1 Génesis de los Elementos de Tierras Raras***

El origen de los elementos de tierras raras se remonta a eventos astronómicos extremos, como supernovas y fusiones de estrellas, que liberaron ingentes cantidades de energía y posibilitaron la síntesis de elementos más pesados a partir de los más ligeros mediante la fusión nuclear. Posterior a esto, los elementos quedaron atrapados en las nubes de polvo y gas que dieron origen al sistema solar para posteriormente incorporarse dentro de la materia que dio origen a los planetas, incluida la Tierra. En nuestro planeta, los ETR se distribuyeron y concentraron a través de una serie de procesos geológicos y químicos que se desarrollaron a lo largo de millones de años. La tectónica de placas, el vulcanismo y la meteorización de las rocas, fueron factores clave en la dispersión de los ETR en la corteza terrestre, formando los depósitos de tierras raras que se conocen y aprovechan hoy en día. (Gschneidner Jr et al., 2006).

Según (Chakhmouradian & Wall, 2012), la distribución geológica de los ETR, debido a su naturaleza en forma de minerales compuestos por varios elementos, requiere métodos de exploración minera avanzados y especializados. Los ETR suelen estar asociados con minerales que son fases accesorias en rocas ígneas, como la monazita y la bastnasita, que requieren procesos de extracción y separación complejos.

La exploración minera para los ETR utiliza técnicas como la teledetección y la geofísica para identificar áreas de interés. Estas técnicas incluyen la espectroscopía de reflectancia, la magnetometría y la gravimetría, que permiten mapear las anomalías geológicas asociadas con concentraciones de ETR. Además, la geoquímica de suelos y

sedimentos ayuda a determinar la presencia de ETR y a modelar su distribución en la corteza terrestre. El análisis estructural de las formaciones geológicas, incluyendo la identificación de fallas y fracturas, es fundamental para comprender la dinámica de los fluidos subterráneos que afectan la concentración de ETR. Este análisis es crucial para diseñar estrategias de extracción que minimicen los impactos ambientales y maximicen la eficiencia de recuperación. (Chakhmouradian & Wall, 2012).

## **1.2 Depósitos Minerales de Elementos de Tierras Raras**

(Chakhmouradian & Wall, 2012), indica que a medida que los estudios sobre los minerales que contienen Elementos de Tierras Raras (ETR) se han desarrollado, ha sido posible la caracterización de dos tipos principales de depósitos minerales según su origen geológico: depósitos primarios y secundarios. Esta distinción radica en el origen geológico de los yacimientos, lo cual es determinante tanto el tenor de ETR como en la metodología de explotación.

Los depósitos primarios en los cuales se ha estudiado la amplia y rica presencia de ETR durante el proceso de formación y cristalización de minerales como monacita y bastnasita, están asociados con procesos ígneos mediante la cristalización de magmas de composición básica o ultra básica ricos en ETR o mediante procesos hidrotermales producto de la alteración de yacimientos preexistentes por flujos acuosos de alta temperatura. (Orris & Grauch, 2002).

Como resultado de sus investigaciones (Orris & Grauch, 2002), determinaron que los depósitos primarios que contienen ETR, generan yacimientos minerales conocidos en la industria como Tierras Raras Iónicas, las cuales se localizan principalmente en el sur de China, en regiones de meteorización intensa. Este tipo de yacimientos se caracteriza por

contener ETR en forma de iones absorbidos en las arcillas producto de la meteorización de las rocas ígneas o los filones hidrotermales, mencionados con anterioridad y consecuentemente la alteración de los minerales que les contienen. La extracción de ETR de estos depósitos requiere técnicas especializadas para separarlos de la matriz arcillosa.

Por otro lado, los depósitos secundarios se forman mediante procesos sedimentarios en los que la meteorización concentra los ETR como sedimentos que posteriormente se volverán a litificar. Este proceso erosivo - acumulativo se ha encontrado asociado principalmente a cuencas sedimentarias que contaron con un amplio aporte de carbonatos. Adicionalmente a su disertación anteriormente expuesta, (Orris & Grauch, 2002), consideran que los depósitos de origen metamórfico, producto de la alteración de rocas preexistentes en condiciones de altas presiones y temperaturas, pueden concentrar los minerales que contienen ETR en su composición química y por ello considerarse también como un depósito secundario. Con esto último, subrayan la complejidad de los procesos geológicos que pueden concentrar los ETR en un yacimiento, aumentando la incertidumbre geológica en la exploración y obligando a desarrollar nuevos métodos que permitan una explotación económicamente viable.

Estos depósitos secundarios generan yacimientos caracterizados por contener minerales ricos en ETR distribuidos en estratos arcillosos, por ello a nivel industrial son conocidos como yacimientos de tipo arcilla. La distribución y dispersión de ETR en la matriz arcillosa, es una característica que dificulta su recuperación del yacimiento. (Orris & Grauch, 2002). En este sentido para (Seredin & Finkelman, 2008), los carbones metalíferos se pueden incluir dentro de este tipo de yacimientos, dado que en su cuenca sedimentaria se deposita una matriz arcillosa de origen orgánico y una facción inorgánica con una amplia

gama de metales dispersos en ellos, los cuales terminan litificandose para formar mantos de carbón, dentro de los cuales es posible encontrar concentraciones interesantes de ETR.

En términos generales, la minería de depósitos que contienen ETR, requieren de técnicas complejas, sofisticadas y especializadas, que se puedan adaptar a una amplia gama de características geológicas propias de cada yacimiento presente en los depósitos primarios o secundarios. A continuación, se presenta de forma resumida las características de las operaciones más importantes a nivel mundial enfocadas en la extracción de ETR.

**Tabla 1.** *Resumen de métodos de explotación a nivel mundial de yacimientos geológicos convencionales de ETR.*

<b>Tipo de Depósito</b>	<b>Técnica de Extracción</b>	<b>Técnica de Separación/Beneficio</b>	<b>Descripción</b>
<b>Primario</b>	Minería a cielo abierto	Flotación <sup>1</sup> , separación magnética <sup>2</sup> , lixiviación ácida <sup>3</sup>	Extracción superficial seguida de procesos físicos y químicos para separar ETR.
	Minería subterránea	Flotación, separación magnética, lixiviación ácida	Acceso a depósitos profundos y su procesamiento mediante técnicas especializadas.
	Lixiviación con ácidos	Extracción por solventes <sup>4</sup> , intercambio iónico	Uso de ácidos para disolver minerales y técnicas de separación química para purificar ETR.
<b>Secundario (Sedimentarios/Metamórficos)</b>	Lixiviación in situ <sup>5</sup>	Extracción por solventes, intercambio iónico	Extracción de ETR de depósitos geológicos sedimentarios/metamórficos sin minería convencional.

Tipo de Depósito	Técnica de Extracción	Técnica de Separación/Beneficio	Descripción
	Biolixiviación <sup>6</sup>	Extracción por solventes, intercambio iónico	Uso de microorganismos para lixiviar ETR de depósitos sedimentarios/metamórficos.

*Nota. Elaboración propia con base en información de Orris y Grauch. (2002).*

### ***1.2.1 Operaciones de extracción de ETR de mayor relevancia a nivel mundial en la actualidad.***

La complejidad geológica de los depósitos mineros toma en cuenta la amplia variabilidad en extensión, profundidad, tipo y calidad de minerales contenidos en las rocas, lo cual incurre directamente en importantes variaciones de la concentración, distribución y que tipo de ETR contiene, dado que, en un yacimiento no es posible encontrar los diecisiete (17) elementos de tierras raras y de los que contiene solo será económicamente viable la recuperación de los elementos de mayor concentración. Estas consideraciones otorgan un amplio grado de complejidad al momento de consolidar operaciones mineras rentables, sin embargo, la búsqueda de yacimientos de gran extensión que tengan buen tenor y el desarrollo de tecnologías innovadoras que permitan la recuperación de gran parte de los ETR a un bajo costo, ha provocado que China se consolide como la economía hegemónica de ETR, logrando producir, para el 2024, casi el 70% de concentrados de estos elementos a nivel mundial, otorgándole la capacidad de monopolizar en este mercado y regular la disponibilidad de ETR y los precios de los mismos según su interés. Países como Vietnam, EE. UU, Australia, Brasil y Rusia, para este mismo año, después de china son los principales productores de ETR, consolidando una cifra de producción en conjunto de más

de veintiún millones de toneladas métricas. (Alvares Calderón & Trujillo Palacio, 2020; Goodenough et al., 2018; Orris et al., 2018; Orris & Grauch, 2002).

Entre los yacimientos más importantes en el mundo registrados hasta el año 2023, se encuentran en el depósito Bayan Obo ubicado en el desierto de Gobi entre Mongolia y China. En la actualidad este es el yacimiento más grande del mundo de tierras raras, con reservas que alcanzan aproximadamente los 44 millones de toneladas métricas. Se destaca también el depósito de Mount Weld en Australia, este es el yacimiento más grande del país y resulta ser uno de los yacimientos más grandes del mundo, con reservas que aproximadamente alcanzan los 1,1 millones de toneladas métricas. Por último, dentro de este breve repaso, cabe mencionar el depósito de Mountain Pass en California es uno de los yacimientos más importantes de los Estados Unidos de América, el cual se calcula posee aproximadamente 20 millones de toneladas métricas en reservas. (Goodenough et al., 2018; Orris et al., 2018).

A continuación, se describe de forma breve aspectos relevantes de los yacimientos anteriormente expuestos.

**Tabla 2.** Aspectos relevantes de los yacimientos de ETR en el mundo.

<b>Yacimiento</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Descripción</b>
Bayan Obo	Mongolia Interior	Mina de Óxidos de hierro-molibdeno-fluorita con uno de los mayores depósitos de ETR. Geología Única por procesos Ígneos, hidrotermales y sedimentarios. Mineralización de ETR compleja y variada.
Mount Weld	Australia	Depósito con alta concentración de Óxidos de tierras raras en forma de laterita. Situado en un antiguo cráter de meteorito, lo que contribuye a su rica concentración en ETR.
Mountain Pass	Estados Unidos	Fuente importante de rocas carbonaticas ricas en ETR con una de las mayores concentraciones de bastnasita, el mineral portador de ETR más común en este yacimiento.

*Nota. Elaboración propia con base en información de Goodenough, Wall y Merriman, (2018).*

## **2 DEMANDA DEL RECURSO**

En este apartado se buscará demostrar la demanda existente de los ETR como recurso estratégico para la transición energética dentro del mercado global el cual podría permitir la entrada de Colombia a establecerse como un actor clave en la cadena de suministros de este tipo de elementos.

### ***2.1 La Importancia Estratégica De Los Elementos De Tierras Raras: Aplicaciones Actuales, Desafíos Y Proyecciones Futuras***

Los constantes avances tecnológicos han posicionado a las ETR como pilares críticos de la innovación tecnológica, representando un componente estratégico en el escenario económico mundial. Su cada vez más indispensable y amplio uso en diversos componentes tecnológicos usados en una gama diversa de industrias, ha generado el debate

sobre la necesidad de garantizar y asegurar el flujo constante de estos suministros, posicionando a los ETR como elementos clave en la geopolítica internacional.(Alvares Calderón & Trujillo Palacio, 2020).

La minería de ETR incluye aspectos de sostenibilidad, impacto ambiental, y las complejidades legales en diversas jurisdicciones. La extracción de ETR es un proceso complejo que requiere tecnologías avanzadas y costosas, presentando desafíos únicos, tanto desde una perspectiva técnica como legal y ambiental, que deben ser abordados por los reguladores y los actores de la industria, teniendo como meta final la búsqueda del balance entre la extracción, beneficio, comercialización global, respeto al medio ambiente y el beneficio y conservación de las comunidades locales. Además, la extracción de estos elementos a menudo se asocia con la producción de residuos tóxicos y la contaminación ambiental. Por lo tanto, es necesario establecer un marco legal y regulatorio sólido que garantice que la extracción de elementos de tierras raras se realice de manera segura y sostenible. Bajo este contexto, se podría afirmar la necesidad imperiosa de promover una competencia leal entre las naciones, estableciendo, por ejemplo, políticas que fomenten el acceso equitativo a estos valiosos recursos. Esto último, en favor de la justicia económica global, buscando impulsar la innovación y el desarrollo sostenible, garantizando que todos los Estados tengan la oportunidad de beneficiarse de los ETR. (Goodenough et al., 2018).

## ***2.2 Aplicaciones Actuales de los Elementos de Tierras Raras***

Como se ha mencionado con anterioridad, los ETR son actualmente las materias primas más indispensables para el desarrollo tecnológico y económico global. En este apartado se abordarán las principales aplicaciones desde su uso en dispositivos electrónicos

hasta tecnologías sostenibles y aplicaciones militares, lo cual resalta su versatilidad y valor estratégico.

Tal como lo indican (Ospina Correa et al., 2021), Los ETR juegan un papel esencial en la fabricación de una amplia gama de dispositivos avanzados y la miniaturización de la tecnología. Dentro de su estudio resaltan la importancia del Neodimio en la fabricación de imanes permanentes de alta potencia, los cuales son fundamentales en la eficiencia y rendimientos de motores eléctricos. También destacan la importancia del Disprosio que además de ayudar a mejorar las propiedades de los imanes permanentes fabricados con neodimio, su uso es cada vez más frecuente en la fabricación de elementos para dispositivos de almacenamiento y procesamiento de datos, dado que aumenta la eficiencia energética, mejora la resistencia al calor y otorga mayor durabilidad de los componentes en los que se incluye.

En cuanto a la producción de tecnología de visualización (Ríos Bolívar & Marroquín Arreola, 2013) dentro de su estudio destacan el uso del Europio y del Terbio en la fabricación de fósforos rojos y verdes respectivamente los cuales se usaban en las ya obsoletas pantallas con tubos de rayos catódicos, dado que estos fósforos son materiales que emiten luz cuando son excitados por un haz de electrones, sin embargo, esta tecnología ha sido remplazada por tecnología LED, LCD y OLED en la cual además de también hacer uso del Europio y del Terbio se incluye el Itrio y el Cerio, lo cual indica la necesidad de usar las ETR en tecnologías emergentes evitando que caigan en desuso y aumentando su demanda. (Bey, 2019).

Los ETR están impulsando innovaciones en nuevas tecnologías en campos emergentes de las comunicaciones, la electrónica en general y últimamente el desarrollo de inteligencia artificial. En este contexto (Ospina Correa et al., 2021) también destaca su uso

en la fabricación de baterías de iones de litio es un ejemplo notable, siendo estos componentes esenciales para vehículos eléctricos y dispositivos portátiles. Además, los ETR son clave en la producción de semiconductores, componentes fundamentales en una amplia gama de dispositivos electrónicos, subrayando la creciente dependencia de las tecnologías modernas en los ETR, así como la necesidad de una gestión sostenible y eficiente de estos recursos cruciales.

### **2.3 *Elementos de Tierras Raras en la industria de Tecnologías Verdes***

Los ETR, como se ha mencionado ampliamente en el capítulo anterior y como destaca (De la Hoz, 2012), se distinguen de otros elementos no solo por la rareza de sus yacimientos y su dificultad de extracción, también por su elevada capacidad magnética y de conducción eléctrica. Como destaca en su obra (Toache-Pérez et al., 2022), los ETR, con sus características únicas en el campo de la física aplicada anteriormente mencionadas, tiene el potencial de desempeñar un papel aún más significativo en las tecnologías verdes emergentes, dada la continua investigación en este campo que busca una mayor y mejor integración de ETR en componentes que permitan mejorar la eficiencia y sostenibilidad principalmente en tecnologías de almacenamiento de energía, captura de carbono y sistemas de transporte limpios, buscando con ello mitigar el impacto del cambio climático.

Continuando con esta premisa (De la Hoz, 2012; Goodenough et al., 2018), en sus respectivas obras, proponen que la innovación en la síntesis y procesamiento de ETR conduce a la creación de materiales con propiedades físicas únicas, los cuales serán usados en la creación de dispositivos que optimicen el uso de energías renovables, elevando la demanda y precio de estos elementos internacionalmente.

**Tabla 3.** *Aplicaciones de los ETR, principales productores y aspectos destacados.*

<b>Elemento</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Principal Productor</b>	<b>Aspecto Destacado</b>
<b>Lantano (La)</b>	- Baterías recargables. - Industria del vidrio.	China	Baterías Eficientes: El lantano se utiliza en baterías de iones de litio, mejorando su rendimiento y durabilidad.
<b>Cerio (Ce)</b>	- Catalizadores de automóviles. - Fabricación de vidrio.	China	Reciclaje Crucial: El cerio es vital en la industria automotriz y electrónica. Su reciclaje eficiente es esencial para reducir la dependencia de la minería y garantizar la disponibilidad a largo plazo.
<b>Praseodimio (Pr)</b>	- Fabricación de vidrio y cerámica. - Motores de vehículos eléctricos.	China	Vehículos Eléctricos: El praseodimio contribuye a la eficiencia de los motores eléctricos, impulsando la movilidad sostenible.
<b>Neodimio (Nd)</b>	- Imanes permanentes para auriculares, discos duros y motores de vehículos eléctricos.	China	Imanes Poderosos: El neodimio es el componente clave de los imanes de tierras raras, utilizados en tecnología de audio, discos duros y vehículos eléctricos.
<b>Prometio (Pm)</b>	- Sin aplicaciones comerciales debido a su escasez.	China	Radioisótopo Especializado: Se utiliza en baterías nucleares y dispositivos médicos, pero su producción es limitada.
<b>Samaricio (Sm)</b>	- Imanes permanentes. - Reactores nucleares.	China	Energía Nuclear: El samario se emplea en barras de control de reactores nucleares para regular la fisión.
<b>Europio (Eu)</b>	- Pantallas de televisión. - Lámparas fluorescentes.	China	Color y Brillo: El europio proporciona colores intensos en pantallas y lámparas. Sin él, nuestras pantallas serían menos vibrantes.

<b>Elemento</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Principal Productor</b>	<b>Aspecto Destacado</b>
<b>Gadolinio (Gd)</b>	- Resonancias magnéticas.	China	Diagnóstico Médico: El gadolinio mejora las imágenes de resonancia magnética, permitiendo diagnósticos más precisos.
<b>Terbio (Tb)</b>	- Dispositivos electrónicos como televisores y lámparas fluorescentes.	China	Verde Brillante: El terbio se utiliza en fósforos verdes brillantes para pantallas y monitores.
<b>Disproσιο (Dy)</b>	- Imanes permanentes para motores eléctricos y generadores de turbinas eólicas.	China	Energía Limpia: El disprosio es clave para la transición a energías limpias. Sin él, la eficiencia de los imanes en turbinas eólicas y vehículos eléctricos se vería comprometida.
<b>Holmio (Ho)</b>	- Láseres. - Dispositivos de microondas.	China	Precisión Láser: El holmio es esencial en láseres médicos y de comunicación. Su capacidad para ajustar longitudes de onda permite aplicaciones precisas.
<b>Erbio (Er)</b>	- Amplificadores de fibra óptica para telecomunicaciones.	China	Comunicaciones Veloces: El erbio permite velocidades de transmisión de datos ultrarrápidas en redes de fibra óptica. Su papel es fundamental en la era digital.
<b>Tulio (Tm)</b>	- Láseres. - Equipos médicos de rayos X.	China	Láseres Médicos: El tulio se utiliza en láseres quirúrgicos y equipos de rayos X avanzados.
<b>Iterbio (Yb)</b>	- Cristales para dispositivos ópticos. - Industria de la energía nuclear.	China	Detectores Avanzados: El iterbio se emplea en detectores de rayos X de alta resolución

<b>Elemento</b>	<b>Aplicaciones</b>	<b>Principal Productor</b>	<b>Aspecto Destacado</b>
<b>Lutecio (Lu)</b>	- Fabricación de LED. - Detectores de rayos X.	China	Detectores Avanzados: El lutecio se emplea en detectores de rayos X de alta resolución y en la fabricación de LED ultrabrillantes.
<b>Escandio (Sc)</b>	- Aleaciones de aluminio para la industria aeroespacial.	China	Ligero y Fuerte: El escandio mejora la resistencia y la ligereza del aluminio en componentes aeroespaciales.
<b>Itrio (Y)</b>	- Fabricación de LED. - Industria de la energía nuclear.	China	Versatilidad: El itrio se utiliza en una variedad de aplicaciones, desde LED hasta reactores nucleares. Su versatilidad es notable.

*Nota. Elaboración propia con base en datos de (Alvares Calderón & Trujillo Palacio, 2020; De la Hoz, 2012; Gambogi, 2019; Goodenough et al., 2018; Penke, 2021).*

Las aplicaciones y avances destacados anteriormente subrayan la importancia actual y futura de los ETR, destacando su potencial impacto en lograr una transición rápida hacia fuentes energéticas limpias y sostenibles, posicionándolos como elementos estratégicos en la lucha contra el cambio climático y en la promoción de una economía baja en carbono. Sin embargo, la extracción, uso y desecho de ETR presentan desafíos comerciales, ambientales, sociales, económicos y geopolíticos que deben ser abordados en la búsqueda de una legislación integral que los regule en Colombia.

#### **2.4 Desafíos en la Cadena de Suministro de ETR**

Dentro de los desafíos mencionados anteriormente, uno de los más destacados e importantes de abordar en el ámbito económico son aquellos que impactan directamente la cadena de suministro de los ETR, dado que afectan significativamente en su gestión y

sostenibilidad. Como sostienen Alvares Calderón & Trujillo Palacio (2020), estos desafíos generan una constante fragilidad en la cadena de suministro de ETR, la cual amenaza constantemente con desplomarse y cortar de tajo el suministro de estas materias primas valiosas a nivel mundial.

Tanto los impactos ambientales causados por la minería de ETR, mencionados por distintos autores entre ellos Yin et al. (2021) y Balaram (2019), como el monopolio del mercado por parte de China destacado por Alvares Calderón & Trujillo Palacio (2020), dado que cualquier decisión política en esta región repercute directamente sobre la seguridad, estabilidad y asequibilidad de estos recursos y su precio en la oferta global, hacen parte de las dos principales problemáticas que rodean el tema de la minería y afectan considerablemente la cadena de suministro de ETR y por ende se abordaran a continuación.

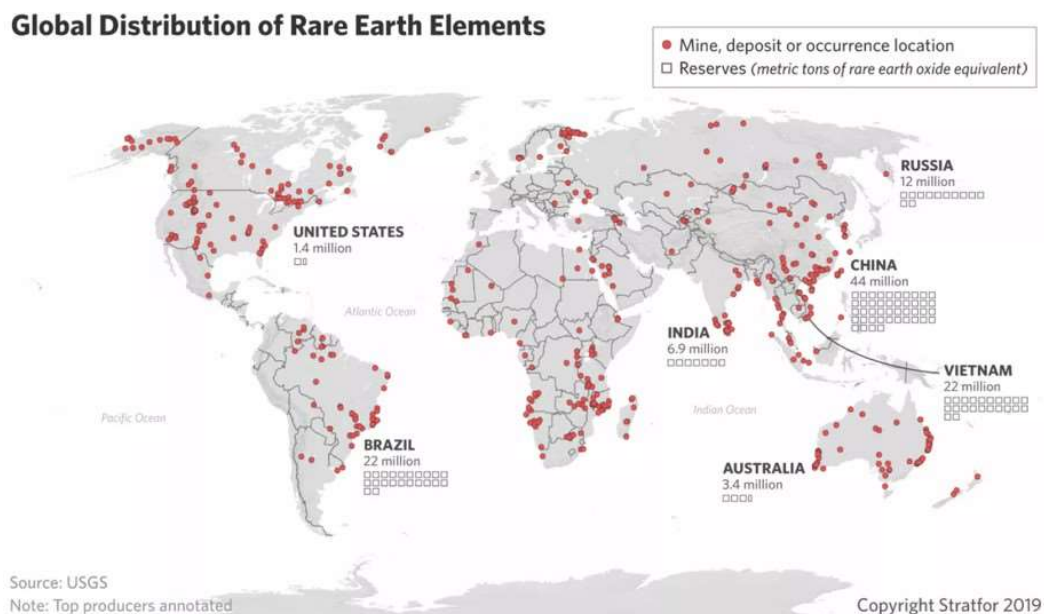
#### ***2.4.1 Desafíos Geopolíticos y de Mercado en la Cadena de Suministro de ETR***

Alvares Calderón & Trujillo Palacio (2020), destaca la concentración geográfica de los yacimientos que contienen ETR como el principal desafío en el suministro y disponibilidad de estos elementos en el mercado global, debido a las dinámicas geopolíticas que derivan de los intereses particulares de los gobiernos que poseen grandes reservas de estos elementos críticos y que mediante la coerción de recursos naturales buscan forzar a los gobiernos de ciertos países particulares a adoptar posturas o decisiones políticas a fines con sus objetivos, socavando en este sentido la soberanía energética de dichos países afectados y generando crisis en el resto del mundo.

Dentro de los grandes productores de ETR en el mundo, La República Popular de China es la que mayor relevancia tiene dentro de la disponibilidad en el mercado mundial y control de precios de estos elementos y por ende la que más preocupaciones levanta en los

mercados tecnológicos globales que dependen de un constante flujo ETR y un precio estable de estos, para la manufactura constatan de las tecnologías mencionadas con anterioridad. (Alvares Calderón & Trujillo Palacio, 2020; Bey, 2019).

**Figura 1.** *Distribución global de Elementos de Tierras Raras.*



*Nota. Reproducido de The geopolitics of rare earth elements, Bey (2019), [Rane (Stratfor)]. <https://worldview.stratfor.com/article/geopolitics-rare-earth-elements>*

China, como potencia económica y minera global, posee alrededor del 40% de las reservas mundiales de ETR logrando beneficiar más del 60% de los mismos y como consecuencia de ello, para el año 2023, les hacía contar con el monopolio mundial de estos elementos debido a que eran capaces de producir alrededor del 80% de los ETR disponibles en el mercado mundial. En conjunto con lo anterior Alvares Calderón & Trujillo Palacio (2020), refuerzan la idea de la preocupación que a nivel mundial se plantea acerca de la seguridad y estabilidad de la oferta a nivel global. Esto último teniendo en cuenta que, gracias a la centralización de estos recursos, definidos como críticos y estratégicos tanto en

Estados Unidos, como en el mercado europeo y asiático, cualquier interrupción geopolítica o decisión política de China puede tener consecuencias mundiales significativas.

En relación con la creciente preocupación antes descrita, Alvares Calderón & Trujillo Palacio (2020) en su estudio, exponen que de este tipo de acciones coercitivas ya se tienen registro y como ejemplo de ello describen la restricción que el Gobierno Chino impuso en el año 2010 a las exportaciones de ETR a Japón por una disputa territorial. Esta decisión provocó una escasez de ETR a nivel global y un aumento de los precios de estos, además de los componentes que con ellos se fabrican y que se utilizan en las industrias que dependen de ellos. Concluyendo que esta dependencia a los ETR provenientes de China a resultado que el gobierno de este país integre y ejecute una dinámica de mercado impositiva, demostrando la capacidad que tiene este gobierno de influir en los precios internacionales y de jugar con la disponibilidad de estos elementos cruciales para la fabricación de tecnología de punta.

#### ***2.4.2 Estrategias para la Generación de una cadena de Suministro Robusta y Sostenible de ETR***

Como respuesta a los desafíos principales que no permiten actualmente tener una cadena de suministro confiable y sostenible anteriormente expuestos, Barakos et al. (2016), expone que desde diferentes campos se han venido desarrollando propuestas para abarcar y solucionar problemáticas particulares en cada parte de la cadena de suministro y que correctamente integradas, teóricamente permitirían la soberanía energética de las naciones liberando el mercado de los ETR del monopolio actual y permitiendo que nuevos actores ingresen en la cadena de suministro. A continuación, se mencionan algunas estrategias actualmente implementadas.

#### *2.4.2.1 Diversificación de las fuentes de suministro*

Esta estrategia de diversificación la podemos dividir en tres aspectos base la regulación actual mencionada en el Reglamento (UE) 2024/1252 del Parlamento Europeo, que trata sobre la diversificación de las fuentes de suministro de materias primas y materiales críticos entre ellos los ETR. Con este reglamento se busca reducir la dependencia de los yacimientos primarios y la minería convencional, inclinando a la Unión Europea (UE por siglas en español) a apostar por el aprovechamiento de fuentes secundarias basadas en el reciclaje de ETR usando como fuentes las cenizas del carbón, residuos electrónicos y relaves mineros como suministro alternativo de estos elementos. (Reglamento (UE) 2024/1252 del Parlamento Europeo y del Consejo, 2024).

En conjunto con lo anterior la Comisión Europea (2020), promueve que la diversificación no debe solo ser la idea de cambiar el tipo de fuente de extracción minera de ETR, también se debe procurar el establecimiento de alianzas con países ricos en ETR cuya cadena de producción abarque tanto la extracción como la transformación y el refinado de estas materias primas. Estas asociaciones estratégicas permiten un benéfico mutuo y garantizan un flujo constante de estos materiales en el marco de la competencia justa.

Por último, se debe fomentar la producción local del ETR como se menciona en el Reglamento (UE) 2024/1252 del Parlamento Europeo, con lo cual se busca establecer un ciclo conjunto entre la extracción, el procesamiento y el reciclaje de ETR fomentando que dentro del territorio de la Unión se logre extraer al menos el 10% de su consumo de materias primas estratégicas, procesar el 40% y reciclar el 25%.

Con esta estrategia conjunta utilizada como un caso de legislación real y actual la UE busca fortalecer la cadena de suministro de ETR, aumentar su capacidad de suministro interno y reducir su dependencia de importaciones, con la meta que para el año 2030, no

dependan como lo hacen actualmente, de un solo tercer país para más del 65% del suministro de cualquier materia primas incluyendo los ETR.(Comisión Europea, 2020).

#### *2.4.2.2 Fomento de la Circularidad y Sostenibilidad*

Esta estrategia se encuentra ligada directamente con el segundo aspecto que conforma la estrategia de diversificación de las fuentes de suministro, dado que está enfocado en mejorar los índices de recogida y reciclado de residuos con el potencial de beneficiar ETR y con ello fomentar un mercado interno secundario. (Reglamento (UE) 2024/1252 del Parlamento Europeo y del Consejo, 2024).

De forma complementaria se busca la promoción para el diseño de productos sostenibles que faciliten el reciclaje de ETR. En este sentido en el Reglamento (UE) 2024/1252 del Parlamento Europeo, indica que son los operadores de instalaciones de residuos tóxicos, las figuras indicadas para realizar los estudios de valoración de ETR con la finalidad de dar prioridad a la extracción de estos elementos antes de convertirlos en residuos. (Reglamento (UE) 2024/1252 del Parlamento Europeo y del Consejo, 2024).

Como complemento final a esta estrategia en particular, se propone la implementación de regímenes de certificación que evalúen la sostenibilidad de los ETR como materias primas fundamentales, cubriendo riesgos ambientales y sociales primordialmente y de forma complementaria se plantea la posibilidad de implementar incentivos financieros con la finalidad de fomentar la reutilización y el reciclaje de productos que contenga ETR, además de promover el uso eficiente de los recursos y la reducción del consumo de los ETR. Los dos aspectos anteriormente mencionados buscan de forma conjunta fomentar la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías enfocadas en la extracción, procesamiento y reciclaje de ETR, impulsar la producción sostenible de ETR, y la transparencia sobre la huella ambiental de todos los productos que

contengan y de los que se busque reciclar posteriormente estos elementos críticos.

(Reglamento (UE) 2024/1252 del Parlamento Europeo y del Consejo, 2024).

#### *2.4.2.3 Monitoreo y Gestión de Riesgos*

Esta es una de las estrategias más importantes dentro del proceso de robustez de la cadena de valor, dado que se debe propender por el continuo seguimiento de los riesgos y evaluación de vulnerabilidades en la cadena de suministro de ETR, identificando factores claves que puedan causar la interrupción de estas cadenas y buscando soluciones que eviten el congelamiento de estas y sus consecuencias derivadas. (Reglamento (UE) 2024/1252 del Parlamento Europeo y del Consejo, 2024).

En este sentido como se propone en el Reglamento (UE) 2024/1252 del Parlamento Europeo, (2024), las legislaciones generadas en pos de la regulación de materias críticas incluyendo los ETR y el fortalecimiento de sus cadenas de suministro, deben considerar dentro si la creación de reservas estratégicas que busquen mitigar el riesgo de falta de suministros además de propender por la tercerización de la responsabilidad, promoviendo la preparación empresarial, dirigida en el sentido que las principales industrias que dentro de sus procesos de manufactura tecnológica usen ETR, evalúen de forma independiente los riesgos de sus cadenas de suministros y desarrollen estrategias de mitigación.

#### *2.4.2.4 Fortalecimiento de la cadena de valor*

En este sentido la UE propone como estrategia la identificación y financiamiento de proyectos que sean sostenibles, que demuestren su viabilidad técnica y económica y cuyo enfoque sea la extracción, producción y reciclaje de ETR, convirtiéndolos en proyectos de interés público con la finalidad de acelerar los procesos de autorización. Como medida complementaria, el Estado puede y debe garantizar a estos proyectos el acceso a

financiamiento mediante la implantación de fondos públicos y brindarles mecanismos de reducción del riesgo para la inversión. (Reglamento (UE) 2024/1252 del Parlamento Europeo y del Consejo, 2024).

#### *2.4.2.5 Consideraciones adicionales*

Es importante recalcar que las estrategias anteriores deben ser consecuentes con una serie de medidas que permitan fortalecer la cadena de suministro de ETR, como se resalta en el Reglamento (UE) 2024/1252 del Parlamento Europeo y del Consejo, (2024), entre estas se incluye la legislación de medidas de transparencia principalmente dirigidas en exigir los correspondientes pagos tributarios y promover la implementación de regalías diferenciales en la industria de los ETR. Dentro del mismo documento la UE con la finalidad de garantizar la promoción en investigación de ETR, se coloca en la palestra la importancia de legislar sobre la necesidad de garantizar la participación de la industria, la academia, la sociedad civil y demás interesados en el desarrollo de estrategias para la fortalecer la cadena de suministro de ETR. Por último, es importante designar a los proyectos estratégicos relacionados con ETR como de interés público debido a su importancia en proyectos de transición energética y digital, innovación tecnológica y defensa, garantizando acceso a ventajas gubernamentales, fiscales y legales. Reglamento (UE) 2024/1252 del Parlamento Europeo y del Consejo, (2024).

#### **2.4.3 Impacto Ambiental en la Extracción de ETR**

El segundo gran desafío que enfrenta la Cadena de suministro de ETR es el proceso de extracción y benéfico en sí mismo, dado que la mayor fuente de ETR dentro del mercado global proviene de minería tradicional como reporta Goodenough et al. (2018), en

su obra. Sin embargo Yin et al. (2021), destaca que este proceso de minería tradicional puede generar riesgos ambientales significativos, dado que durante el proceso de extracción de la mena rica en ETR, proceso el cual suele ser con minería a cielo abierto, no solo se produce una degradación del entorno natural sino que también, a menudo conlleva la generación de desechos los cuales, como expone Peiró et al. (2013), en conjunto con procesos hidrológicos, meteorológicos y las mismas actividades humanas resultan clave en la movilización y transporte ambiental de los ETR los cuales, como se ha evidenciado, pueden terminar contaminando suelos destinados a agricultura y fuentes de agua. que desencadena en la bioacumulación de ETR descrita por Yin et al. (2021).

Yin et al. (2021), reflexiona que la bioacumulación de ETR anteriormente descrita no solo representa un problema por sí solo, el cual es apoyada por el estudio de Balaram (2019), en donde resalta que los ETR suelen acumularse en tejidos y órganos que repercuten adversamente en los sistemas respiratorios e inmunológicos del organismo afectado. En conjunto con la problemática anterior Yin et al. (2021), destaca que a menudo los ETR coexisten dentro del yacimiento con elementos radioactivos como Uranio y Torio, lo cual puede aumentar la exposición a elementos radioactivos de la biota, así como a los trabajadores y comunidades aledaños tanto a la operación extractiva como a sitios de manufactura.

Las problemáticas anteriormente mencionadas ponen en evidencia la importancia de conocer, evaluar y reducir estos impactos, por lo que ese a estas alturas ya se ha desencadenado un movimiento dentro de la academia impulsado por la industria, haciendo necesaria la búsqueda de nuevas fuentes de extracción o recuperación de ETR, la adopción de tecnologías avanzadas que buscan reducir la generación de residuos y mejorar la eficiencia de los procesos de extracción y refinamiento. (Henaó, 2019).

### **3 EXISTENCIA DEL RECURSO EN EL TERRITORIO NACIONAL**

En este capítulo se buscará demostrar la presencia de ETR en el territorio colombiano, identificando los factores clave de su génesis en el territorio y su integración a la estructura de los carbones colombianos, presentado los estudios de diferentes autores realizados en los carbones de diferentes cuencas y demostrando la viabilidad geológica de encontrar ETR en los carbones colombianos y por ende en sus residuos industriales.

#### **3.1 *Tierras raras en Colombia***

Los reportes de tierras raras descritos dentro del territorio colombiano son escasos dado que el interés por la exploración de estos elementos ha tenido su auge en épocas recientes, como ejemplo de ello Wokittel (1960) reporta tres ocurrencias de ETR en diferentes sectores del territorio colombiano. La primera se reportó en la mina La Magdalena, región de Natagaima (Tolima), dónde logro identificar la ocurrencia de Itrio. La segunda fue el reporte de monacita en las arenas del río Chico el cual es afluente del río Grande en Antioquia y finalmente en los aluviones auríferos del río Nechí (región de Zaragoza, Antioquia), donde identificó la presencia de Monacita asociada con minerales del grupo de la Euxinita en los cuales se caracterizan por contener Itrio, Erblio, Cerio e incluso óxidos de Uranio.

Beus & Minnev (1972), reportan trazas de ETR en las regiones mineralizadas de los shales negros del Grupo Villeta con contenidos promedio de 380 ppm, los cuales exceden al promedio aceptado para las rocas sedimentarias que es de 240 ppm, describiendo que los minerales que contienen dichos elementos son la Parisita con más del 60% de lantánidos y la Codazzita, ambos minerales del grupo de los carbonatos. En este mismo año y en un estudio independiente al de Beus & Minnev, Galvis et al. (1972),

reporta manifestaciones de hasta un 2% de Monacita en rocas metamórficas tipo cuarcitas, interpretándolo como un posible depósito paleo-placer en la región del bajo Guainía entre los caseríos de Danaco y Santa Helena.

Aun con este detalle de información estos reportes de ETR son solo producto de análisis mineralógicos y geoquímicos generales y no de estudios dirigidos en la búsqueda específica de estos elementos, dado que es hasta el año 1987, cuando se realiza un estudio enfocado en la búsqueda de ETR, donde Cepeda (1987), recopila y detalla los primeros reportes exclusivamente dirigidos en la identificación de ETR en el país, determinando que existen yacimientos relacionados con las minas de esmeraldas de Muzo, Coscuez, Chivor y otros sitios en la cordillera oriental, relacionando la ocurrencia de los ETR en los mismos minerales descritos con anterioridad por Wokittel y Beus & Minnev.

Posteriormente al estudio de Cepeda, los investigadores en el área de las geociencias empiezan a hacer hincapié en la necesidad de realizar estudios específicos para la determinación de ETR, como es el caso de López Africano (1998), quien describe:

En la cuenca media y alta de los ríos Guainía e Inírida, se encontraron depósitos explotables de oro, manifestaciones de amatista, cuarzo, ¿titanio en las arenas negras y muestras esporádicas de tantalita o columbita?, platino y diamante (este último por información verbal de los mineros). El ambiente geológico de rocas migmatíticas, rocas graníticas, zonas de venas y diques, zonas de alteración hidrotermal, y sedimentos aluviales, forman un escenario propicio para el hallazgo de minerales preciosos, semipreciosos, estratégicos y de tierras raras; sin embargo, se necesita de exploración indirecta, de una campaña de exploración de campo y geoquímica detallada, para precisar y seleccionar sitios de interés mineral susceptibles a explotación. (p. 28).

Sin embargo, pese a este llamado a la exploración específica y detallada para la determinación de yacimientos de ETR en el territorio nacional, estos elementos fueron relegados por la comunidad científica a un segundo plano, donde su identificación se hizo crucial en estudios que ayudaran a entender la génesis de distintos cuerpos y complejos geológicos dado que se comprendió su valor como un importante marcador geoquímico, geocronológica, genético e incluso hidrogeológico. Siguiendo con la línea anterior y citando como ejemplos los estudios llevados a cabo por (García et al., 2017; García & Arango, 2018; García & Tarazona, 2016; Mantilla et al., 2006; Rodríguez et al., 2017; Toro-Toro et al., 2015), demuestran el papel crucial de los ETR al ser usados como geomarcadores que ayudan a entender la evolución, diversidad y riqueza geológica de diferentes sectores del territorio colombiano, más sin embargo en estos estudios no se llegó a determinar si los cuerpos o complejos geológicos tienen porcentajes de ETR lo suficientemente altos para poder ser considerados como yacimientos de los mismos, demostrando que los ETR han sido vistos y estudiados, en la mayoría de los casos, solo como un complemento valioso en estudios más amplios en el ámbito geocientífico.

Los estudios dirigidos en determinar la viabilidad económica de yacimientos primarios y secundarios de ETR dentro del territorio colombiano son escasos y poco detallados, siendo la mayoría de estas investigaciones lideradas por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) concluyendo que de todo el territorio colombiano las anomalías químicas reportadas de estos elementos o la presencia de los minerales que los contienen son más recurrentes e interesantes en los departamentos de Guainía y Vichada. (Cramer et al., 2011).

Del lado de los yacimientos primarios cabe resaltar el estudio desarrollado por la empresa GEOREXP S.A.S (2012), quienes durante el desarrollo de la cartografía geológica

básica de la plancha 254 (san José de Ocuñe), bloque 9 – Departamento de Vichada, se reportó la presencia de ETR en muestras recopiladas en los niveles de lateritas asociados a la unida geológica denominada Batolito de Parguaza. El análisis realizado con la técnica de Fluorescencia de Rayo X (FRX por sus siglas en ingles), reporto valores de significativos de Niobio, en un conjunto de cinco (5) muestras recuperadas en las localidades Vía de San José de Ocuñe a Tres Matas, vía Cumaribo – La 14, Vía Cumaribo – Caño Guacamayas, Vía hacia Caño Samarro en el sector de Santa Marta y Vía hacia el caño Samarro, con un valor promedio total de 20.7 ppm. En el mismo estudio, los autores resaltan la presencia de Itrio dentro de muestras recuperadas de sedimentos activos en el sector La playa dentro de la finca Puerto Rico y en el sector del caño Guacamayas, reportando valores anómalos de hasta 57 ppm.

De igual forma, dentro del estudio que desarrolla la cartografía geológica a escala 1:100.000, perteneciente al bloque 6 ubicado en el departamento de Vichada, Alfonso et al. (2014), reporto explotaciones de ETR en el cerro El Tigre y en el sitio denominado el Zancudo, ambos ubicados aproximadamente a 230 kilómetros al sur de los resguardos Cuenca Media y Alta Inírida, ubicados sobre el margen del río Inírida. Dentro de este mismo estudio también se referencian dos explotaciones de estos elementos ubicadas en los sectores denominados localmente como Guarinuma y Caranacoa, hacia el sector centro - este de la zona Puinawai, sobre el margen río Guainía.

En el campo de los yacimientos secundarios de ETR, Gómez Rojas (2018) y Henao (2019) realizaron los primeros estudios enfocados en la identificación de trazas de ETR en mantos de carbón. Los resultados preliminares de estos estudios demuestran que las condiciones de formación de algunos de los carbones presentes en la mayoría de las cuencas carboníferas del país favorecieron el enriquecimiento de elementos metálicos

incluyendo a los ETR. La presencia de estos elementos se referenció en siete (7) de las doce (12) cuencas carboníferas identificadas y delimitadas dentro del territorio nacional. Sin embargo, este apartado de gran interés se explorará con mayor profundidad más adelante en este documento.

### **3.2 *Génesis de los depósitos de tierras raras en carbones***

En la memoria explicativa del mapa que recopila la Cartografía geológica de la plancha 254 (San José de Ocuné) bloque 9 – departamento del vichada, realizado bajo el contrato 941 de 2011, los autores describen que las anomalías geoquímicas de los yacimientos tanto primarios como secundarios en los que se ha logrado identificar la presencia de ETR, dentro del territorio colombiano, están fuertemente ligadas al complejo marco geológico de génesis y evolución de las formaciones que contiene dichos yacimientos.(GEOREXP S.A.S, 2012).

El estudio llevado a cabo por Seredin & Finkelman (2008), demuestra la veracidad de la premisa anteriormente planteada, dado que explica que el origen de yacimientos secundarios de ETR, específicamente los relacionados con los carbones metalíferos como los colombianos, está directamente ligado con las dos etapas del enriquecimiento de los sedimentos orgánicos con materia mineral, etapa deposicional y etapa posdeposicional.

Estas etapas, según Ward (2016), se pueden clasificar de forma más específica en cuatro procesos principales dentro de los cuales se presenta la ocurrencia de fenómenos geológicos que controlan la depositación y enriquecimiento de materia mineral inorgánica a lo largo de la génesis y evolución del carbón y los cuales se describen a continuación.

### ***3.2.1 Procesos Singenéticos o Sindeposicionales***

El conjunto de procesos englobados en este apartado que están directamente ligados con la depositación de materia mineral inorgánica, tienen como común denominador que su ocurrencia es simultánea a la acumulación de la turba (materia orgánica), es decir en el momento inicial de generación del carbón. En este estadio, como explica Ward (2016), existen dos subprocesos que favorecen que la materia mineral inorgánica pueda depositarse en las turberas. El primer subproceso es consecuencia directa de la acumulación de sedimentos de origen marino o continental, los cuales ingresan a la cuenca por procesos de arrastre de material desde los canales de agua que alimentaban estos paleo ambientes sedimentarios. Posteriormente esta materia mineral inorgánica se interstratifica y litifica con la materia orgánica durante el proceso de carbonización. El segundo subproceso indica que la materia mineral puede precipitarse desde la solución de las aguas presentes en el pantano hasta depositarse en los poros presentes en las capas de la turba que, de acuerdo con el grado de salinidad y el PH del agua, puede causar un fenómeno denominado floculación de arcillas, concluyendo que en este subproceso es posible encontrar minerales cristalizados in situ (autigenéticos) los cuáles tienden a presentarse como fragmentos dispuestos en capas finas interstratificados de forma no ordenada, con los componentes macérales del carbón.

De forma general Ward, da a entender que un posible enriquecimiento en ETR en carbones metalíferos, como los catalogados en Colombia por Seredin & Finkelman (2008), puede estar principalmente relacionado con el primer subproceso, dado que la presencia de ETR puede estar ligada directamente a la acumulación de minerales meteorizados y transportados de posibles paleo yacimientos primarios como las pegmatitas, las cuales según el estudio llevado a cabo por Demartis et al. (2012), indica que los procesos

magmáticos y tectónicos relacionados con la génesis de las pegmatitas, especialmente las catalogadas como de tipo I (caracterizadas por presentar minerales grandes con zonamiento), las hace especialmente susceptibles a contener depósitos metálicos y estar enriquecidas en ETR.

### ***3.2.2 Procesos Diagenéticos***

Como explica Ward (2016), este tipo de procesos que se dan posterior a la acumulación y sedimentación de la materia orgánica, principalmente en los Estados de humificación – gelificación del carbón. Durante la evolución de la formación del carbón, los minerales integrados a la turba durante los procesos singenéticos ven modificada su composición química y estructura mineralógica debido a la interacción con fluidos hidrotermales. De forma paralela al proceso anterior, durante el proceso de maduración de la materia orgánica ciertos elementos inorgánicos, que no forman parte en sentido estricto de un mineral pero que pueden encontrarse en forma de iones disueltos en la turba, migran gracias a las altas presiones y temperaturas provocando que se concentran y acumulen bien sea dentro de la roca en la que se encontraban originalmente o en las rocas que lo infrayacen y suprayacen.

Tanto Ward (2016) como Seredin & Dai (2012), concluyen en sus respectivos estudios que este proceso tiene la capacidad de formar minerales autigénicos ricos en ETR si se da la precipitación de los compuestos disueltos en los fluidos y solo puede ocurrir en etapas tempranas de la diagénesis cuando los sedimentos orgánicos no se han terminado de consolidar en roca.

### ***3.2.3 Procesos Epigenéticos***

La materia mineral típica del proceso epigenético, según Ward (2016), tiene su origen en la migración de fluidos minerales y posterior cristalización en fracturas o poros secundarios cuya ocurrencia se da en las etapas posteriores a la compactación y solidificación del carbón. En este sentido Seredin & Finkelman (2008), en su estudio, subdividen el tiempo de ocurrencia de estos procesos en tres fases: temprana, media y tardía, tomando como base el grado de maduración del carbón. La fase temprana está definida para los carbones clasificados como lignitos, la fase media fue definida para los carbones de bajo rango tipo lignitos a subbituminosos y, por último, la fase tardía fue definida para los carbones de alto rango clasificados como bituminosos a antracitas. Esta división temporal, ayuda a comprender tanto el tipo de mineral que se precipita en las fracturas como la modificación su composición mineralógica a medida que progresa la maduración del carbón.

Es en esta fase en la que Zhao et al. (2013) y Dai et al. (2012), destacan la posible ocurrencia de minerales que contengan tierras raras (principalmente de tipo hidróxidos o oxihidróxidos), producto de procesos de precipitación química, principalmente como rellenos en fracturas como se mencionó anteriormente.

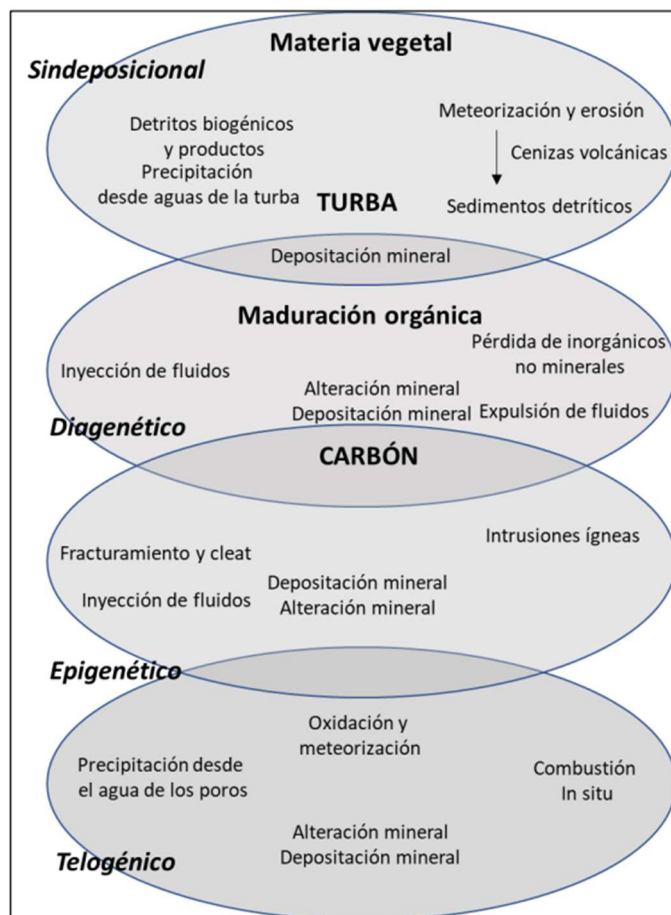
### ***3.2.4 Proceso Telogénico***

Propuesto inicialmente por Ward (2016), este proceso está definido por la reacción oxidante que sucede en los minerales autigénicos, una vez el carbón es expuesto a agentes atmosféricos de forma natural o durante el proceso de explotación. La interacción con el oxígeno de la atmosfera o del agua, provoca reacciones químicas que afectan la estabilidad

química y cristalina de ciertas especies minerales provocando que los elementos traza presentes en el carbón puedan liberarse y moverse.

En la Figura 2 se sintetiza la información descrita anteriormente, proporcionando una mejor comprensión de los procesos, interacciones y componentes que participan en la formación y acumulación de la materia mineral en el carbón

**Figura 2.** *Procesos asociados con la formación de materia mineral y la inclusión de ETR en el carbón.*



*Nota. Reproducido y traducido de Analysis, origin and significance of mineral matter in coal: An updated review (p. 70), por C. Ward, (2016), International Journal of Coal Geology. Copyright 2016 por International Journal of Coal Geology.*

### ***3.3 Perspectivas del potencial de las cenizas del carbón como fuente de elementos de tierras raras.***

Las cenizas de carbón son definidas por Gómez Rojas (2018), como el residuo inorgánico derivado de la precipitación física de la fracción de la materia mineral intrínseca en el carbón que no se alcanza a volatilizar en el proceso de combustión llevado a cabo al interior de los hornos o calderas presentes en termoeléctricas de carbón, plantas de coquización y la industria siderúrgica. La autora explica que el porcentaje de ceniza presente en los carbones está directamente relacionada a dos factores principales: el rango del carbón y las condiciones de formación del carbón que llevan al enriquecimiento de este en materia mineral.

Dado que el contenido de cenizas de los carbones influye significativamente en su calidad y uso industrial, autores como Fu et al. (2016), clasifican el carbón basado en esta propiedad siguiendo los lineamientos establecidos en la Norma de clasificación China para el rendimiento de ceniza del carbón (GB /T 15224.1 - 2004). En este sentido establecen que todo carbón con un rango de cenizas en base seca (Czs) entre 10 - 16% es un carbón bajo en cenizas, entre 16 - 29% ceniza media y > 29% para el carbón de alto contenido de ceniza.

La premisa anterior adquiere gran relevancia cuando autores como Zhang et al. (2018) y Q. Huang et al. (2018), determinan que generalmente el contenido de ETR en muestras de carbón aumenta a medida que aumenta el contenido de cenizas, lo que ha generado interés en estudiar los depósitos de cenizas de carbón como fuente alternativa de ETR dado que, como reporta Zhang et al., para el año 2015, la cantidad de tierra raras reportadas en carbones de todo el mundo se estimaron en hasta 50 millones de toneladas, que en su momento equivalía al 50% de las reservas mundiales detectadas.

La premisa de reciclar los residuos de la combustión del carbón para ser usadas como posibles fuentes de ETR es planteada por Seredin & Dai (2012), y se sustenta en el hecho que en los carbones el promedio mundial de contenido de ETR es de 68 ppm, mientras que para las cenizas del carbón es de 404 ppm, el cual resulta ser un valor muy cercano a los valores típicos que se esperaría encontrar en los minerales de yacimientos primarios que generalmente se utilizan para estimar la abundancia de estos metales en los minerales y que oscilan entre 483 ppm y 621 ppm. Finalmente, Seredin & Dai (2012), concluyen que si el contenido promedio de ETR en las cenizas de carbón, basado en análisis de numerosas muestras, es comparable al de algunos minerales convencionales, podrían y deberían considerarse como posibles fuentes de estos metales. (Z. Huang et al., 2020; Zhang et al., 2015).

Una vez determinado el interés por estudiar las cenizas del carbón como fuente alterna de ETR, es necesario caracterizar la naturaleza física y químicamente estos residuos. Fidanchevski et al. (2021), realizan un aporte valioso en este campo al distinguir entre dos tipos principales de estos residuos: Cenizas volantes y Cenizas de fondo.

Las cenizas volantes según Fidanchevski et al. (2021), son residuos que se generan tras la combustión del carbón. El tamaño de las partículas generadas es tan fino, oscilando entre los 2 a 20  $\mu\text{m}$ , que resultan siendo capturadas por los gases de la combustión los cuales se desplazan hacia la parte alta de las chimeneas. Finalmente, con el uso de precipitadores electrostáticos las cenizas son capturadas y redirigidas gravitacionalmente al fondo de la chimenea evitando.

Las cenizas de fondo se caracterizan por contener tamaños de partículas más gruesos (normalmente en el rango de la arena o grava), los cual les otorga un peso específico mayor a las cenizas volantes y por ende no les permite ser capturadas por los

gases que se generan en la combustión del carbón, ello deriva en que su precipitación gravitacional es instantánea acumulándose en el fondo de las calderas. (Fidanchevski et al., 2021).

La distinción del tipo de ceniza por tamaño de la partícula expuesta con anterioridad adquiere mayor relevancia cuando autores como Dai et al. (2014), Hower et al. (2013) y Blissett et al. (2014), confirman que las concentraciones de ETR en las cenizas de carbón aumentan conforme disminuye el tamaño de partícula, indicando que las cenizas volantes contienen mayor concentración de estos elementos que las cenizas de fondo. Sin embargo, como menciona Taggart (2018), esta concentración de ETR no contiene a todos los elementos de este grupo de forma equitativa, sustentándolo en el hecho que la abundancia natural de ETR disminuye en forma de zigzag de izquierda a derecha siguiendo la regla de Oddo-Harkins, que sostiene que, debido a su mayor estabilidad de nucleones, los elementos con número par son más abundantes en el universo que los elementos adyacentes con número impar. Esto significa que los Elementos de Tierras Raras con número atómico bajos, denominados ligeros o ETRL por sus siglas en español, como Lantano (La), Cerio (Ce), Praseodimio (Pr), Neodimio (Nd), Prometio (Pm), Samario (Sm) son más abundantes que aquellos que tienen un peso atómico mayor, denominados pesados o ETRP por sus siglas en español, como el Europio (Eu), Gadolinio (Gd), Terbio (Tb), Disprosio (Dy), Holmio (Ho), Erblio (Er), Tulio (Tm). Por ende, concluye que las cenizas volantes naturalmente están enriquecidas principalmente por elementos de tierras raras de bajo número atómico.

### ***3.4 Las cenizas de los carbones colombianos como posible fuente emergente de elementos de tierras raras.***

Como se menciona en el material estadístico publicado por la Agencia Nacional de Minería en el año 2023, la producción de carbón colombiano para el año 2021 represento hasta el 78,8% de la producción total en Latinoamérica y el 0,73% de la producción mundial, posicionando a Colombia como el país con el mercado de producción de este recurso, más importante de la región. En este mismo año se reportó que el territorio nacional cuenta con hasta 4.554 millones de toneladas de carbón de tipo antártico y bituminoso en reservas probadas, lo cual representa las mayores reservas de Latinoamérica llegando a alcanzar el 46,6% de las mismas y representando el 0,6% de las reservas mundiales de este recurso.

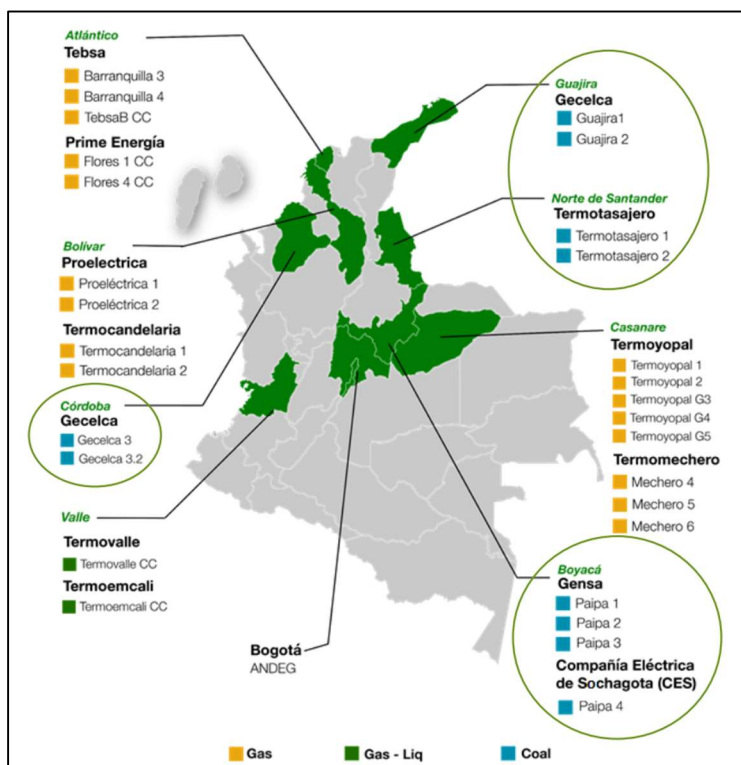
En la septuagésima primera edición de la Revisión Estadística de la Energía Mundial, BP (2022), reseña que para el año 2022 la producción de carbón en Colombia alcanzo las 59.4 Millones de toneladas. Si tomamos en cuenta que Colombia utiliza hasta el 8% de su producción de carbón para consumo interno, como lo señalan Bustamante et al. (2021), se puede aseverar que, anualmente Colombia consume hasta 4,83 millones de toneladas de Carbón extraídas principalmente de las cuencas carboníferas ubicadas en el interior del país, en las cuales según la Agencia Nacional de Minería (2023), reporta un potencial carbonífero de aproximadamente 6.053 Millones de Toneladas de carbón térmico y 2.609 Millones de Toneladas de carbón metalúrgico, y que son usadas en diferentes procesos industriales.

El consumo interno de carbón se puede dividir entre el utilizado en una gama diversa de industrias y el utilizado en procesos de generación de energía eléctrica. Sin embargo, pese a los valores reportados por Gómez Pérez (2012), en los cuales la industria del

departamento de Antioquia y sus zonas de influencia pueden generar anualmente hasta 26.825 toneladas de ceniza de carbón, cabe destacar que el mayor potencial de generación de cenizas en el territorio nacional corresponde a la actividad de centrales termoeléctricas.

Esta premisa está respaldada por los datos reportados por la ANDEG, que indican que en Colombia para el año 2021, como se observa en la Figura 3 y en la Tabla 4, existen 10 unidades de generación de energía eléctrica cuyo combustible principal es el carbón, con una capacidad conjunta de generación efectiva neta de 1.400 MW y que según las estimaciones recopiladas por Pinilla et al. (2021), tiene un potencial de producción de cenizas de hasta 290.078 toneladas al año.

**Figura 3.** Ubicación de centrales termoeléctricas activas en el territorio nacional.



**Tabla 4.** Nota. Reproducido de Generación de Energía con Carbón (p. 10), por Asociación Nacional de Empresas Generadoras (ANDEG), (2021).

<https://www.andeg.org/wp-content/uploads/2021/09/Generacio%CC%81n-con->

Unidades de Generación Térmica en Colombia

Compañía	Unidad	Capacidad Efectiva Neta (MW)	Heat rate (MBTU/MWh)	Combustible
CES	Paipa 4	160	8,6	Carbón Sub-bituminoso pulverizado (Principal), ACPM - FO N°4 (arranque)
CES	Termoguajira 1	145	10	Carbón Bituminoso pulverizado - Gas Natural (Principal)
CES	Termoguajira 2	145	9,8	
GECELCA	Gecelca 3	164	10,1	Carbón Bituminoso pulverizado (Principal)
GECELCA	Gecelca 32	273	8,7	Carbón Bituminoso pulverizado (Principal)
GENSA	Paipa 1	36	12	Carbón Sub-bituminoso (Principal), GLP (arranque)
GENSA	Paipa 2	72	11,2	
GENSA	Paipa 3	70	10,5	
TASAJERO	Tasajero 1	165	9,2	Carbón Bituminoso (Principal) ACPM - FO N°6 (arranque)
TASAJERO	Tasajero 2	170	10,2	

*Nota. Adaptado de Generación de Energía con Carbón (p. 25), por Asociación Nacional de Empresas Generadoras (ANDEG), (2021). <https://www.andeg.org/wp-content/uploads/2021/09/Generacio%CC%8In-con-carbo%CC%8In-PPT-para-ANLA.pdf>*

El potencial para que las cenizas generadas en Colombia como subproducto de la combustión de carbón sean consideradas como una posible fuente de ETR se puede calcular basado en la proporción de abundancia de estos elementos en las cenizas con respecto al carbón determinada por Ketris & Yudovich (2009), quienes tras aplicar un enfoque sistemático de recolección, procesamiento y análisis de datos geológicos y geoquímicos, cuya metodología se explica a detalle en su artículo, encontraron que la proporción media

de ETR en el carbón con respecto a su concentración de ceniza es de 0,17, indicando así que la concentración de ETR en la ceniza es aproximadamente 5,88 veces mayor que en el carbón.

Bajo la premisa anterior trabajos como los que han sido adelantados por Gómez Rojas (2018) y por Henao (2019), adquieren mayor relevancia dado que su enfoque principal se basa en determinar la concentración de ETR en carbones provenientes de distintas cuencas carboníferas del país. Y aunque los valores determinados por ambos autores son distantes entre sí, dado que tanto la metodología como la densidad de muestreo en ambos artículos fue diferente, presentaron fuertes evidencias de la presencia de ETR principalmente en los carbones provenientes de las cuencas carboníferas del interior del país.

La evidencia anteriormente descrita es respaldada por los datos no publicados obtenidos por el autor durante la realización del artículo de investigación denominado “Comportamiento de la química inorgánica de los carbones bituminosos en el sinclinal Checua – Lenguazaque” (Herrera Carvajal et al., 2021) donde se explica la metodología de muestreo, georeferenciación de las muestras y técnicas de análisis a profundidad. Estos datos obtenidos para 24 muestras de carbón provenientes del sinclinal Checua - Lenguazaque, ubicado en el departamento de Cundinamarca, se determinaron mediante la técnica de fluorescencia de rayos x, la cual permitió identificar la presencia de ETR en 7 muestras de las 24 recolectadas con valores que, según como recopila Henao (2019) de Lin et al. (2017), Seredin & Dai (2012) y Zhang et al. (2015), son comercialmente rentables para su extracción dado que alcanzan a tener concentraciones cercanas a las 115 - 130 ppm y recalculados según el factor de proporción citado anteriormente sus valores de ETR en cenizas son cercanos al valor de concentración rentable que son de 677 – 762 ppm. Los

datos inéditos mencionados en este apartado se podrán consultar en el Anexo A y el consolidado de los datos promedio obtenidos por cada autor para cada elemento en cada uno de los departamentos se referencian en la Tabla 5.

**Tabla 5.** *Valores de concentración de elementos de tierras raras en los departamentos de Antioquia-Caldas, Boyacá y Cundinamarca según Gómez Rojas (2018), Henao (2019) y datos inéditos del autor (ppm).*

Elemento	Departamento	Gómez Rojas (2018) ppm	Henao (2019) ppm	Datos inéditos del Autor (2019) ppm
Ce	Antioquia-Caldas	6,88	24,53	ND
Ce	Boyacá	2,23	13,75	ND
Ce	Cundinamarca	1,45	29,33	ND
Dy	Antioquia-Caldas	0,70	3,04	ND
Dy	Boyacá	0,14	0,80	ND
Dy	Cundinamarca	0,12	2,08	ND
Er	Antioquia-Caldas	0,41	1,64	ND
Er	Boyacá	0,09	0,44	ND
Er	Cundinamarca	0,07	1,05	ND
Eu	Antioquia-Caldas	ND	0,77	ND
Eu	Boyacá	ND	0,19	ND
Eu	Cundinamarca	ND	0,47	91,99
Gd	Antioquia-Caldas	1,23	3,05	ND
Gd	Boyacá	1,52	0,84	ND
Gd	Cundinamarca	0,15	2,20	ND
Ho	Antioquia-Caldas	ND	0,56	ND
Ho	Boyacá	ND	0,15	ND
Ho	Cundinamarca	ND	0,37	ND
La	Antioquia-Caldas	3,84	12,20	ND
La	Boyacá	0,96	7,28	ND
La	Cundinamarca	0,70	14,47	ND
Lu	Antioquia-Caldas	ND	0,31	ND
Lu	Boyacá	ND	0,11	ND
Lu	Cundinamarca	ND	0,21	ND
Nd	Antioquia-Caldas	2,95	12,76	ND
Nd	Boyacá	0,63	5,25	ND

<b>Elemento</b>	<b>Departamento</b>	<b>Gómez Rojas (2018) ppm</b>	<b>Henao (2019) ppm</b>	<b>Datos inéditos del Autor (2019) ppm</b>
Nd	Cundinamarca	0,49	12,43	59,87
Pr	Antioquia-Caldas	0,74	3,34	ND
Pr	Boyacá	0,18	1,55	ND
Pr	Cundinamarca	0,14	3,48	ND
Sc	Antioquia-Caldas	3,13	16,77	ND
Sc	Boyacá	1,52	0,39	ND
Sc	Cundinamarca	1,72	4,47	ND
Sm	Antioquia-Caldas	0,78	2,85	ND
Sm	Boyacá	0,13	0,95	ND
Sm	Cundinamarca	0,13	2,43	ND
Tb	Antioquia-Caldas	ND	0,44	ND
Tb	Boyacá	ND	0,13	ND
Tb	Cundinamarca	ND	0,34	ND
Tm	Antioquia-Caldas	ND	0,24	ND
Tm	Boyacá	ND	0,05	ND
Tm	Cundinamarca	ND	0,17	ND
Y	Antioquia-Caldas	5,15	14,45	ND
Y	Boyacá	0,91	4,50	ND
Y	Cundinamarca	0,62	10,27	64,1
Yb	Antioquia-Caldas	0,34	1,54	ND
Yb	Boyacá	0,09	0,47	ND
Yb	Cundinamarca	0,06	1,07	ND

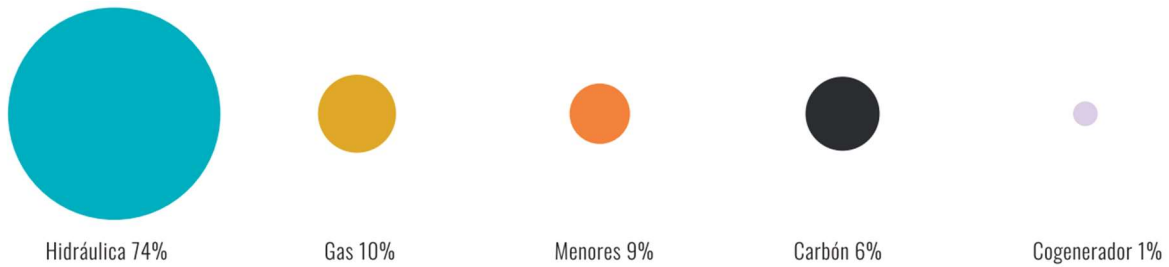
*Nota. Adaptado de Modelo genético de minerales y elementos traza en carbones metalíferos de la zona centro de Colombia, (p.87), por Gómez Rojas, 2018; Identificación de elementos de tierras raras en carbones colombianos, (p.46), por Henao, 2019; y datos inéditos obtenidos por el autor en 2019.*

Como se observa en la tabla anterior, existe una discrepancia entre los datos obtenidos por tres autores en estudios diferentes, indicando la necesidad de realizar muestreos bajo un estándar unificado que permita obtener valores de ETR cercanos a la realidad de los yacimientos de carbón y cenizas de carbón que los contienen.

En todo caso, los datos consolidados en la Tabla 5, muestran concentraciones interesantes en el contenido de ciertos ETR, los cuales si tenemos en cuenta el factor de proporción de abundancia de estos elementos en las cenizas con respecto al carbón planteado por Ketris & Yudovich (2009), obtenemos valores que para ciertos elementos como el Europio (Eu), Itrio (Y), Neodimio (Nd), Escandio (Sc), Cerio (Ce) y Lantano (La), se acercan a las concentraciones comercialmente rentables para su extracción explicadas anteriormente.

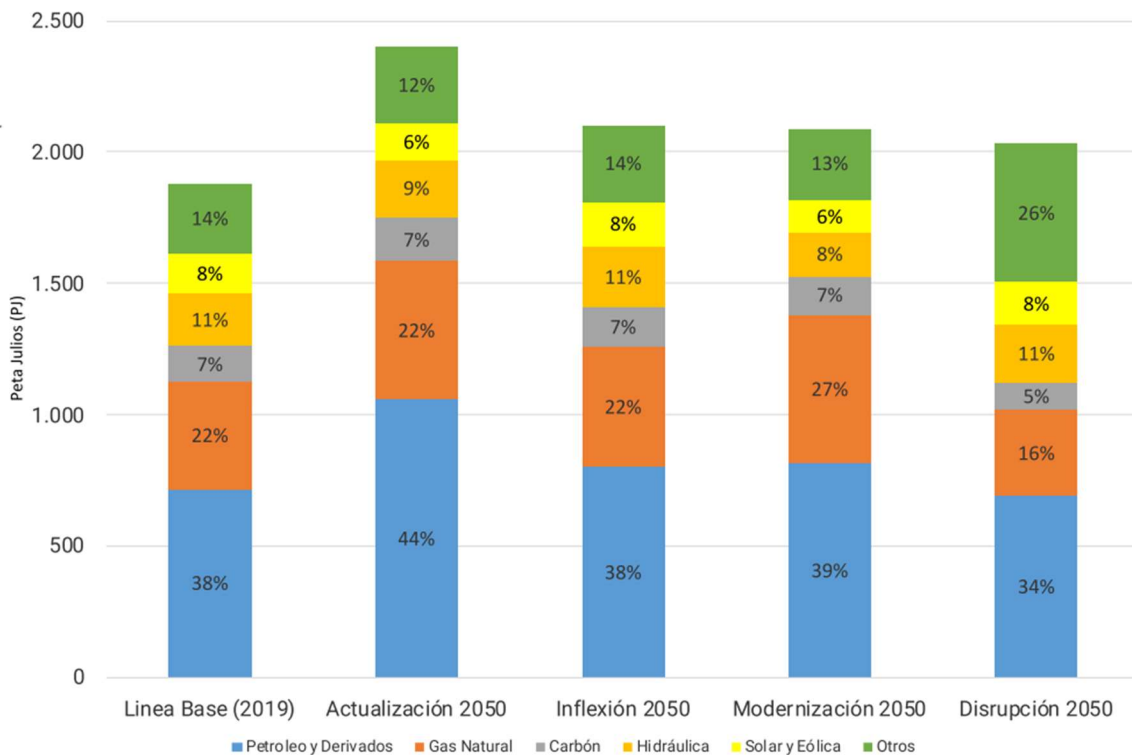
Si tenemos en cuenta que la generación a partir de carbón constituye aproximadamente el 6% de energía eléctrica generada en el Sistema Interconectado Nacional (SIN) como destaca Bustamante et al. (2021), y se observa en la Figura 4, que además, como señala la misma autora, la energía de plantas carboeléctricas contribuye a la confiabilidad del sistema ya que permite que el país cuente con una matriz energética diversificada que funcione adecuadamente en temporadas de escasez hídrica, como cuando se presentan fenómenos climáticos como El Niño y que según las proyecciones de los distintos escenarios contemplados por el Ministerio de Minas y Energía & Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) (2020) en el Plan Energético Nacional 2020- 2050 (PEN), el carbón seguirá proporcionando entre el 5% y el 7% de las necesidades energéticas en 2050 y entre el 11% y el 28% del consumo final energético del sector industrial para este mismo año como se observa en la Figura 5 y en Figura 6, se puede concluir entonces que Colombia podrá mantener un potencial de producción de cenizas como residuo de forma continuada sin que se prevea escases de este desecho al menos hasta el año 2050.

**Figura 4.** Composición parque de generación eléctrica en Colombia (Ene- Jul 2021).



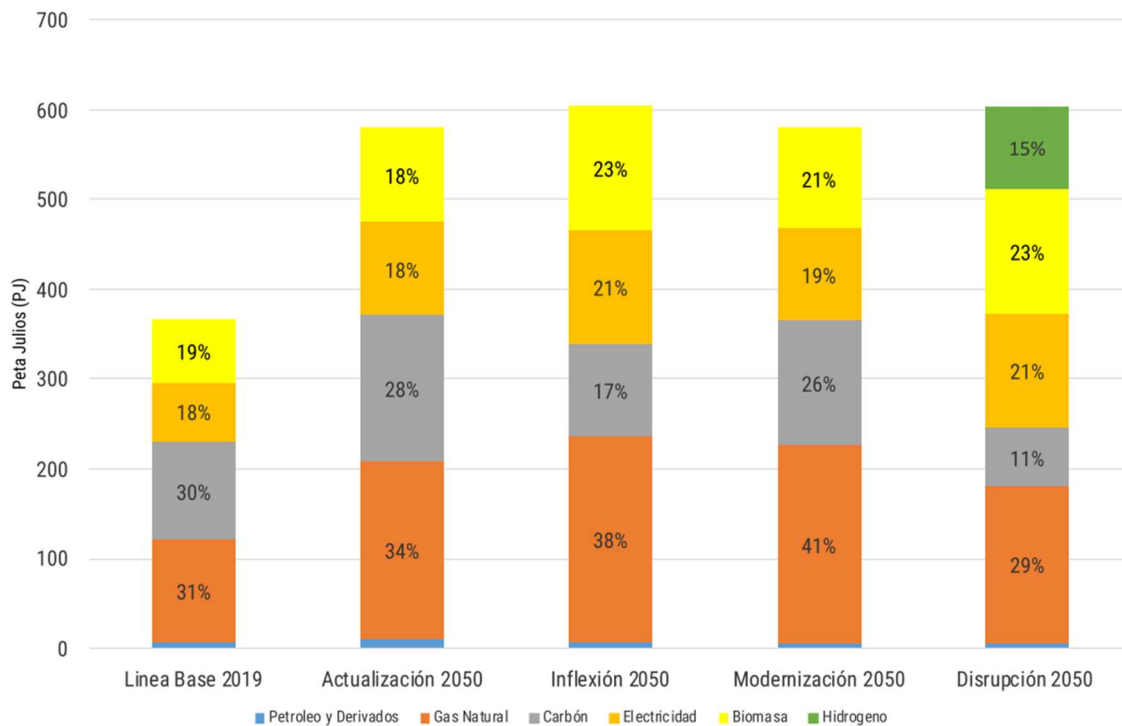
*Nota. Reproducido de Minería de Carbón en Colombia. Transformando el Futuro de la Industria (p. 20), Bustamante et al., (2021), Ministerio de Minas y Energía de Colombia. Copyright 2021 por Ministerio de Minas y Energía de Colombia.*

**Figura 5.** Composición de la oferta por fuente energética (PetaJulios) en 2019 y proyecciones 2050.



*Nota. Reproducido de Minería de Carbón en Colombia. Transformando el Futuro de la Industria (p. 19), Bustamante et al., (2021), Ministerio de Minas y Energía de Colombia. Copyright 2021 por Ministerio de Minas y Energía de Colombia.*

**Figura 6.** Consumo de energéticos del sector Industrial 2019 y proyecciones 2050 (PetaJulios)



*Nota. Reproducido de Minería de Carbón en Colombia. Transformando el Futuro de la Industria (p. 20), Bustamante et al., (2021), Ministerio de Minas y Energía de Colombia. Copyright 2021 por Ministerio de Minas y Energía de Colombia.*

Por último, la posible entrada del uso del carbón como fuente de generación de hidrogeno azul a partir del año 2035 como apunta el Ministerio de Minas y Energía & Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) (2021), en la Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia, aumenta el rango de tiempo en el que se puedan seguir generando cenizas de este recurso, dado que en el proceso de gasificación del carbón para producir hidrógeno azul se genera este residuo como subproducto.

## **4 PROCESO DE RECUPERACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS DE LAS CENIZAS DEL CARBÓN Y RENTABILIDAD DEL PROCESO**

Como reseña Pan et al. (2021), la recuperación de ETR desde las cenizas de carbón englobado como un todo, es un proceso complejo y multidisciplinario que involucra el diseño y estudio de una serie de distintas metodologías y técnicas enfocadas en aislar y concentrar estos elementos de forma eficiente. A lo largo de los años, como menciona Lin et al. (2017), el desarrollo de técnicas enfocadas en el uso de principios físicos, químicos e incluso biológicos se ha realizado bajo la división del proceso en tres grandes etapas: pretratamiento físico, extracción química y purificación final, con la finalidad de maximizar la eficiencia del proceso de concentración de ETR en cada etapa y hacer rentable económicamente la recuperación de estos elementos de las cenizas producto de la combustión del carbón.

Este apartado no pretende reseñar ni explicar a detalle los principios físicos, químicos o biológicos que rigen cada técnica que participan de forma integrada en cada una de las etapas de concentración, refinado y extracción de ETR desde las cenizas de carbón. Sin embargo, es fundamental mencionar las técnicas más relevantes, los procesos en los que participan, su eficiencia y analizar su rentabilidad y sostenibilidad como proceso integrado. El objetivo es demostrar el potencial de esta tecnología como una alternativa competitiva para satisfacer la demanda mundial de suministro constante y seguro de estos elementos críticos.

### ***4.1 Etapa de pretratamiento físico***

El objetivo principal de esta etapa, como explica Stojković et al. (2024), es aumentar la concentración de ETR mediante la reducción de la fracción total de material

que posteriormente será tratado en la etapa de extracción química. En este sentido como destaca Pan et al. (2020), la implementación de la etapa de pretratamiento físico en el proceso conjunto de recuperación de ETR, no solo maximiza la recuperación y calidad de los ETR al eliminar una cantidad considerable de impurezas de las cenizas del carbón. También, como efecto secundario, maximiza la eficiencia de los procesos usados en la etapa de extracción química dado que minimiza el consumo de ácidos y ayuda a reducir los problemas ambientales en los procesos de purificación. Este paso, como expone Dodbiba & Fujita (2023), es crucial dado que las concentraciones de ETR dentro de las cenizas de carbón suelen ser bajas para efectuar una extracción directa, la cual sería ineficiente y costosa.

A continuación, se abordarán las técnicas más usadas que recientemente han sido objeto de estudio en el campo de la separación física para la concentración de ETR en cenizas del carbón.

#### ***4.1.1 Separación Magnética***

Esta técnica ampliamente establecida en la industria minera, como reseña Pan et al. (2020), basa su funcionamiento en la implementación de imanes de alta intensidad con los que se busca la remoción de impurezas metálicas como el hierro o minerales paramagnéticos. De esta forma al aprovecharse de la susceptibilidad magnética de estos metales se logra la concentración de ETR en las cenizas del carbón. Al no requerir reactivos químicos para su funcionamiento su costo de uso es bajo, así como su impacto ambiental, sin embargo, cuenta con la desventaja de no separar eficientemente los ETR de minerales que no son magnéticos, por lo que debe ser complementada con técnicas de extracción química.

#### ***4.1.2 Separación por Densidad (Flotación por espuma/Hundimiento)***

Basado en el principio diferencia de densidades y de hidrofobicidad entre partículas minerales, esta técnica, como explica Liu et al. (2023), utiliza líquidos para controlar la densidad de una solución acuosa y agentes espumantes para generar burbujas de aire que capturan selectivamente minerales ricos en ETR, dejando una fracción de cenizas empobrecida y de mayor densidad que termina decantándose al fondo. Lin et al. (2017), determino que, dentro de la etapa de pretratamiento físico, este método es el de mayor eficiencia con una tasa de concentración de ETR calculada por Liu et al. (2023), entre el 50 al 85%, la cual se ve afectada por la mineralogía de las cenizas. Ambos autores reseñados anteriormente coinciden que, pese a la alta tasa de eficiencia de concentración de esta técnica, su implementación a gran escala puede elevar los costos del proceso de recuperación en general, debido al uso de reactivos químicos y el tratamiento de los residuos acuosos generados antes de su vertido para evitar impactar negativamente al medioambiente.

#### ***4.1.3 Clasificación por Tamaño de Partículas***

Como describe Lin et al. (2017), la clasificación granulométrica es una de las técnicas más sencillas y de bajo costo que se pueden implementar en el proceso de recuperación de ETR, dado que para su funcionamiento se requieren equipos básicos ampliamente utilizados en la industria minera y de procesamiento de materiales, los cuales tiene un impacto ambiental mínimo, reducido exclusivamente al consumo de energía. Como explica el U.S. Department of Energy (2022) en su informe, la separación por tamaño de partículas hace uso de tamices y ciclones hidráulicos para clasificar granulométricamente los materiales presentes en las cenizas y concentrar los ETR. Sin

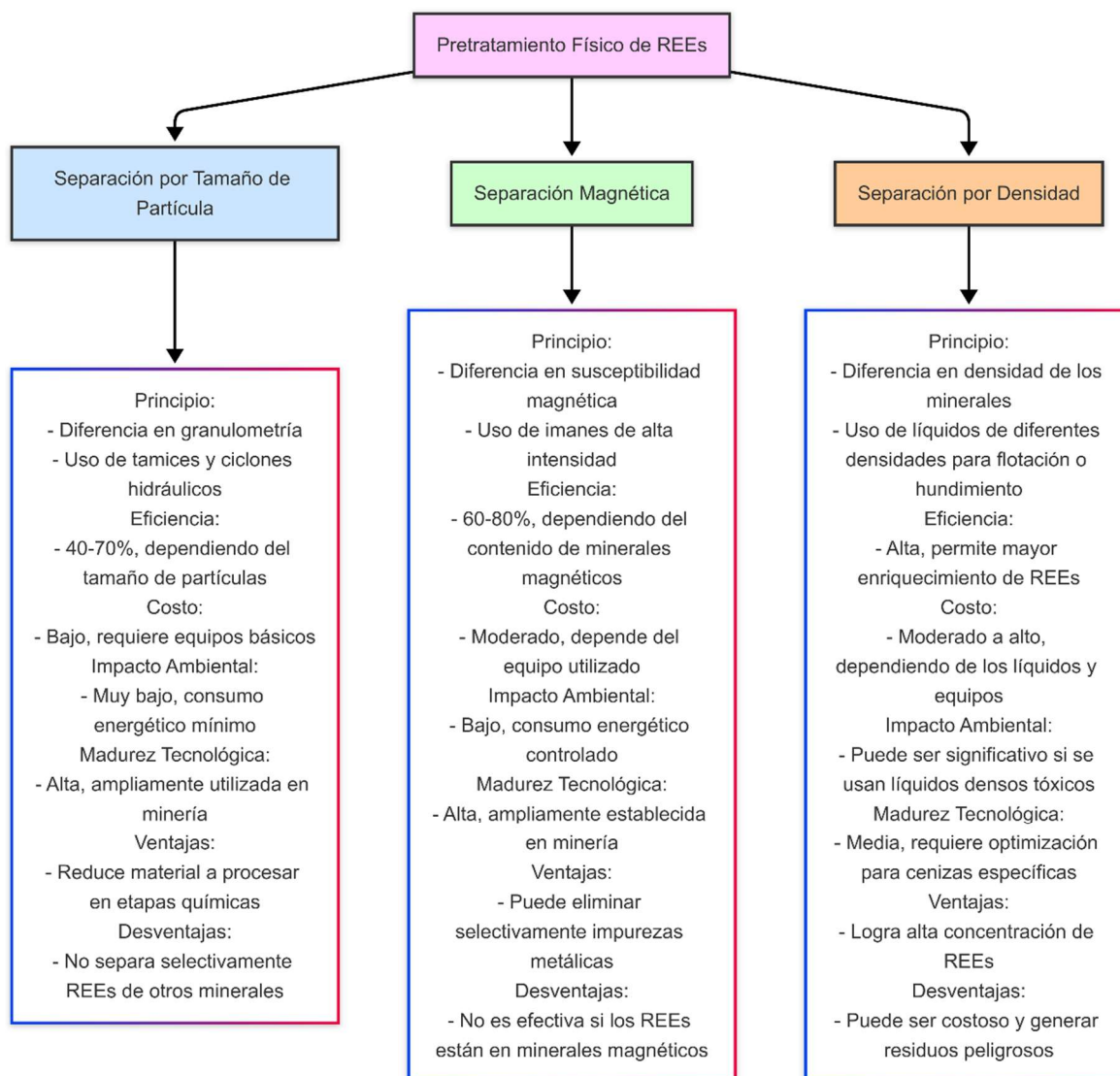
embargo Lin et al. (2017), destaca que por sí solo esta técnica no es muy efectiva a la hora de separar los ETR de la matriz mineral, por lo que es necesaria la implementación de técnicas de extracción química en las etapas posteriores.

#### ***4.1.4 Combinación de métodos***

Pan et al. (2020), recomienda la implementación de varias técnicas de separación física de forma consecutiva con el objetivo de maximizar la concentración de ETR la cual, según los estudios adelantados por el mismo autor, pueden pasar de 782 mg/g a 1025 mg/g con un margen de recuperación aumentado en un 31,46%. El uso de técnicas combinadas requiere un diseño cuidadoso para evitar el aumento desmedido del costo total de la operación de extracción y dependiendo de las técnicas que se combinen, evitar el aumento en el posible el impacto ambiental.

La Figura 7, resume las técnicas usadas en esta primera etapa del ciclo de recuperación de ETR de las cenizas del carbón, así como sus características principales anteriormente descritas.

**Figura 7.** Resumen de Técnicas de Pretratamiento Físico para la Concentración de ETR en Cenizas de Carbón



*Nota. Elaboración propia con base en Recovery of Rare Earth Elements from Coal Fly and Bottom Ashes by Ultrasonic Roasting Followed by Microwave Leaching, por Stojković et al., 2024; Recovery of rare earth elements from coal fly ash by integrated physical separation and acid leaching, por Pan et al., 2020; Trends in Extraction of Rare Earth Elements from Coal Ashes: A Review, por Dodbiba & Fujita, 2023; Green Approach for Rare Earth Element (REE) Recovery from Coal Fly Ash, por Liu et al., 2023; Enrichment of rare earth elements from coal and coal by-products by physical separations, por Lin et al., 2017; Recovery of Rare Earth Elements and Critical Materials from Coal and Coal Byproducts, por U.S. Department of Energy, 2022.*

## **4.2 Etapa de extracción química**

Esta etapa intermedia del ciclo de recuperación de ETR, funciona, al igual que la anterior, como una fase dirigida en la concentración de estos elementos. Las técnicas estudiadas dentro de esta etapa buscan modificar la química de la ceniza de carbón para facilitar la extracción de los ETR contenidos. Para lograr este objetivo, es necesaria la utilización de reactivos químicos que, como explica Thomas et al. (2024), disuelven selectivamente los ETR presentes en la ceniza en una solución acuosa y los separa de la matriz sólida para posteriormente recuperarlos en la etapa final del proceso.

A continuación, se abordarán técnicas que recientemente han sido objeto de estudio en el campo de la separación química y cuyo rendimiento ha sido el mejor para la concentración de ETR en cenizas del carbón.

### **4.2.1 Lixiviación ácida**

En el estudio adelantado por Mokoena et al. (2022), se explica que, en este proceso acuñado dentro del campo de la hidrometalurgia, se mezclan las cenizas con un ácido con la finalidad de disolver la matriz de cenizas de carbón y liberar los ETR que serán recuperados en la última etapa del proceso de recuperación de estos elementos. El uso de ácidos como ácido clorhídrico (HCl), ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) eleva el costo de este proceso debido a que las cantidades necesarias de ácido en un proceso industrial a gran escala son importantes y el precio de algunos de estos ácidos es elevado. Además, como resalta Mokoena et al. (2022), la necesidad de implementar procesos de neutralización para tratar los residuos ácidos generados posterior al tratamiento de las cenizas no solo elevaría los costos totales de esta técnica, sino que también aumentaría el

posible impacto ambiental de esta técnica en caso de que no se realicen los procedimientos adecuados de neutralización.

Dodbiba & Fujita (2023), resalta que este proceso llega a su máxima eficiencia con el uso de ácido clorhídrico (HCl) en una concentración de 3 mol/L, una relación líquido-sólido de 10 (v/m), una temperatura de 60 °C, una velocidad de agitación de 200 rpm y un tiempo de lixiviación de 120 minutos, logrando eficiencias de lixiviación de 71.9% para el Lantano (La), 66.0% para el Cerio (Ce) y 61.9% para el Neodimio (Nd).

Por último Finley et al. (2025), resalta que el uso combinado de ácido clorhídrico (HCl) y ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) resulta en una tasa de recuperación mayor que con el uso de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) y reseña que en general la técnica de lixiviación ácida puede ser ineficiente si la matriz de cenizas contiene vidrio aluminosilicatos, los cuales no se ven afectados por el uso de los ácidos mencionados con anterioridad y por ende se debe hacer uso de ácido fluorhídrico (HF) el cual, si bien puede aumentar la extracción de ETR, conlleva riesgos y peligros asociados a su alta toxicidad.

#### **4.2.2 Tostado alcalino**

G. Wu et al. (2022), destaca este proceso como un pretratamiento químico utilizado para modificar la estructura de las cenizas buscando maximizar el rendimiento en la extracción de ETR con la aplicación de técnicas de recuperación en una etapa posterior. De forma complementaria Banerjee et al. (2024), reseña que esta técnica tiene por objetivo romper la matriz de vidrio aluminosilicatos, mencionado en la técnica anterior, la cual tiende a encapsular los ETR, permitiendo que estos sean más accesibles para el uso de técnicas de lixiviación.

Esta técnica, como explica Banerjee et al. (2024), hace uso de agentes alcalinos como Hidróxido de sodio (NaOH), Carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), Óxido de calcio (CaO), Hidróxido de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), Peróxido de sodio (Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), Sulfato de calcio (CaSO<sub>4</sub>) y Sulfato de amonio ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) en conjunto con la aplicación de temperaturas entre 400 °C a 850 °C (tostado). De esta forma tras el enfriamiento y posterior molienda a la que se somete el material, se obtiene un polvo fino el cual se someterá al ataque de agentes químicos específicos según sea el proceso de lixiviación que se desee usar posteriormente a esta técnica. (Mokoena et al., 2022).

Esta técnica, pese a representar un paso y un costo adicional en el proceso de extracción de ETR, tiene la ventaja de maximizar el rendimiento de extracción de estos elementos en hasta el 90% como indica Thomas et al. (2024), al usar Hidróxido de sodio (NaOH) como aditivo durante el tostado e incluso se pueden alcanzar valores cercanos al 100% si se aplica un tostado con temperaturas superiores a los 200 °C como reseña G. Wu et al. (2022), por lo que se puede compensar los costos adicionales del proceso de extracción y del manejo ambiental de los residuos cargados en metales pesados como Mercurio (Hg), Arsénico (As), Selenio (Se), Plomo (Pb), Cromo (Cr) y Cadmio (Cd) que se pueden generar usando en esta técnica.

#### **4.2.3 Fusión alcalina**

Según expone G. Wu et al. (2022), esta técnica al igual que la de tostado alcalino, representan una gama de técnicas ejecutadas previamente a las fases de lixiviación cuya finalidad es destruir las fases de vidrio que retienen los ETR. Esta técnica también busca el ataque químico de la ceniza del carbón utilizando agentes alcalinos en ambientes de altas temperaturas, sin embargo, en esta técnica se busca alcanzar temperaturas de alrededor de

500 °C a 900 °C con la finalidad de fundir la mezcla de ceniza, fundente y agentes alcalinos, la cual será tratada con agentes ácidos en la fase de lixiviación en busca de la concentración de ETR.

Como reporta Li et al. (2024), esta técnica experimental alcanza tasas de lixiviación de elementos críticos totales que rodean el 72,56%, sin embargo, su costo total de implementación aumenta al tener en cuenta el gasto energético que es realizar una fundición y la compra de los agentes alcalinos que se deben usar en este proceso. Además, G. Wu et al. (2022), destaca que esta técnica puede tener un alto impacto ambiental si las cenizas de carbón contienen mercurio (Hg), dado que en el proceso de fundición se utilizan agentes fundentes los cuales hace que este elemento se volatilice a temperaturas menores y se emita a la atmosfera. Por último, Li et al. (2024), que las altas temperaturas usadas en esta técnica podrían conducir a la generación de una nueva fase cristalina de aluminosilicatos de sodio inhibiendo la recuperación de ETR.

#### ***4.2.4 Lixiviación alcalina***

Como menciona Rosita et al. (2024), este proceso, denominado también como digestión, utiliza Hidróxido de sodio (NaOH) como agente lixivante para destruir la fase de vidrio aluminosilicato de las cenizas del carbón que en este caso no deben ser magnéticas y liberar los ETR. Para su correcto funcionamiento, esta técnica debe ser complementada con una etapa de calentamiento y agitación logrando, por si sola un aumento en el contenido de ETR en un factor de enriquecimiento de 1.43.

El costo de implementación de esta técnica es relativamente bajo como indica Mokoena et al. (2022), dado que el uso de Hidróxido de sodio (NaOH) resulta más económico que otros reactivos, además, si se logra la optimización de las condiciones de

reacción se logra la disminución aún más el costo y de forma adicional se realiza un control *in situ* de los subproductos generados, evitando que esta técnica tenga un impacto ambiental alto por si sola. Sin embargo, como establece Rosita et al. (2024), por si sola la técnica no es lo suficientemente buena para extraer los ETR y se hace necesaria la aplicación de una fase de lixiviación acida, por lo que el impacto ambiental de esta última, descrito con anterioridad se suma al proceso combinado en general.

#### **4.2.5 Lixiviación secuencial**

Es un proceso que, como indica Rosita et al. (2024) apoyado por M. Wu et al. (2023), implica el uso de múltiples etapas de lixiviación con diferentes reactivos para extraer los ETR de las cenizas del carbón se basa en la premisa que los ETR se distribuyen en varias fracciones químicas dentro de las cenizas las cuales requieren reactivos específicos para su disolución.

Según Pan et al. (2021) el uso secuencial de la técnica de tostado alcalino, lixiviación alcalina y lixiviación acida en ese orden, propende el aprovechamiento de todas las ventajas que ofrece cada técnica, descritas con anterioridad, logrando aumentar la recuperación global de ETR pasando del 32,2% al 77,6%, como reseña Rosita et al. (2024). Además, pese a ser una técnica combinada, más costosa que la implementación de una lixiviación directa, ha demostrado maximizar la recuperación de ETR al atacar las diferentes fases donde estos elementos de acumulan en las cenizas del carbón. (Dardona et al., 2023).

Para concluir con esta técnica, Thomas et al. (2024), reseña que esta técnica puede tener un mayor impacto ambiental debido al uso de múltiples reactivos y sus residuos, sin embargo, el proceso puede ser optimizado como resalta Ramprasad et al. (2022), aplicando

medidas de selección de reactivos con menor toxicidad, optimización de condiciones de reacción y gestión adecuada de residuos.

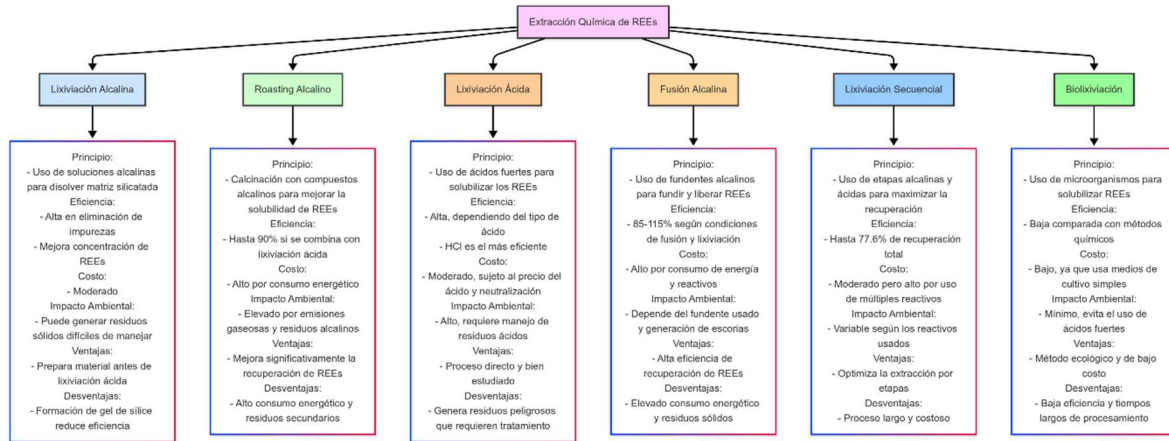
#### **4.2.6 Biolixiviación**

La biolixiviación, dentro de la etapa de extracción química se menciona como un método alternativo a las técnicas de lixiviación y concentración expuestas anteriormente. Ramprasad et al. (2022), la define como una técnica en la que en conjuntos con los ácidos orgánicos, aminoácidos, péptidos, complejos enzimáticos y lípidos secretados por microorganismos comunes como *Komagataeibacter xylinus*, *Lactobacillus casei* y *Yarrowia lipolytica* inoculados en las cenizas del carbón, que metabolizan el material y causan una disolución de los ETR, los cuales serán recuperados posteriormente mediante métodos de biosorción, precipitación o la extracción con solventes.

Esta técnica presenta la ventaja de tener un menor costo de implementación que los métodos de lixiviación química, además de demostrar una mayor selectividad en la concentración de ETR y se puede considerar más ecológica, con muchas menos emisiones. Sin embargo, es importante resaltar que su acción es más lenta, requiere áreas extensas para su uso a nivel industrial y presenta recuperaciones más bajas que los procesos químicos, debido a la dificultad en controlar los complejos sistemas biológicos en los que se basa el funcionamiento de esta técnica. (Ramprasad et al., 2022).

La Figura 8, resume las técnicas usadas en esta segunda etapa del ciclo de recuperación de ETR de las cenizas del carbón, así como sus características principales anteriormente descritas.

**Figura 8.** Resumen de Técnicas de extracción química para la Concentración de ETR en Cenizas de Carbón



*Nota. Elaboración propia con base en Effects of acid concentration on the recovery of rare earth elements from coal fly ash, por Mokoena et al., 2022; Trends in Extraction of Rare Earth Elements from Coal Ashes: A Review, por Dodbiba & Fujita, 2023; Aqua regia-based digestion methods for trace rare earth element recovery from coal fly ash, por Finley et al., 2025; Coal fly ash activated by NaOH roasting: Rare earth elements recovery and harmful trace elements migration, por G. Wu et al., 2022; A comparative study on the association and extractability of rare earth elements from laboratory ash, bottom ash, fly ash: A perspective on Indian coals, por Banerjee et al., 2024; Extraction and separation of rare earth elements from coal and coal fly ash: A review on fundamental understanding and on-going engineering advancements, por Thomas et al., 2024; A two-stage process of alkali fusion and organic acid leaching for recovery of critical elements from coal fly ash, por Li et al., 2024; Sequential alkaline-organic acid leaching process to enhance the recovery of rare earth elements from Indonesian coal fly ash, Rosita et al., 2024; Recovery of rare earth elements from coal fly ash through sequential chemical roasting, water leaching, and acid leaching processes, por Pan et al., 2021; From ash to oxides: Recovery of rare-earth elements as a step towards valorization of coal fly ash waste, por Dardona et al., 2023; Strategies and options for the sustainable recovery of rare earth elements from electrical and electronic waste, por Ramprasad et al., 2022.*

### 4.3 Etapa de purificación final

Esta etapa, como explica Thomas et al. (2024), es la fase final del ciclo de recuperación de ETR de las cenizas del carbón. Su objetivo final se centra en la extracción y separación de los ETR de las soluciones acuosas obtenidas tras la lixiviación, eliminando

impurezas y obteniendo productos de alta pureza listos para su uso en la industria. Los métodos principales utilizados en esta etapa incluyen la precipitación selectiva, la extracción con solventes, el intercambio iónico y la separación por membrana de las cuales se hablará a continuación.

#### **4.3.1 *Cristalización/Precipitación selectiva***

Esta técnica, como define Couto et al. (2020), fue desarrollada para la recuperación de ETR, mediante la adición de un reactivo específico como el ácido oxálico ( $H_2C_2O_4$ ), Hidróxido de amonio ( $NH_4OH$ ) o sulfato de sodio ( $Na_2SO_4$ ), los cuales, como explica Thomas et al. (2024), ajustando factores como la temperatura, la concentración y la composición del solvente para reducir la solubilidad de los ETR deseados, inducen la precipitación selectiva de estos elementos en forma de sales, formando cristales de oxalatos o hidratos de sulfato según el precipitante utilizado. De esta forma como sustenta Dodbiba & Fujita (2023), pese al costo moderado de esta tecnología la cual se debe principalmente a la mano de obra calificada y el impacto ambiental moderado debido a la generación de residuos sólidos que deben ser tratados, se obtienen niveles de pureza superiores a 90% con una tasa de eficiencia de recuperación de entre el 85 y el 98%, los cuales pueden sopesar el costo de implementación de esta técnica.

#### **4.3.2 *Extracción con solventes (SX)***

También conocida como extracción líquido-líquido (LL) como explica Praneeth et al. (2024), es la técnica con mayor aceptación comercial y tecnológicamente más desarrollada para la separación y recuperación de ETR de cenizas del carbón.

La técnica, como menciona Praneeth et al. (2024), funciona utilizando dos líquidos que no se mezclan entre sí. El primero de ellos es una fase orgánica, como queroseno, que contiene un extractante o ligando como ácido versático, fosfato de tributilo (TBP), cloruro de tri-caprililmetil amonio, D2EHPA, Cyanex272, ácido 2-etilhexil fosfórico-2-etilhexil éster (EHEHPA), Di-(1-metil heptil) metil fosfonato (DMHMP) y Aliquat 336, los cuales tienen la capacidad de unirse específicamente a iones metálicos como los de los ETR disueltos en la fase acuosa inorgánica, que es el segundo líquido, ambas fases se agitan para permitir que los ligandos en la fase orgánica reaccionen con los iones metálicos en la fase acuosa. Posterior al agitado las dos fases se dejan en reposo para permitir que se separen. Posteriormente se recupera la fase orgánica y se coloca en contacto con una nueva fase acuosa a la que se transfieren los ETR, en un proceso llamado “stripping”, el proceso se repite hasta obtener soluciones de ETR de alta pureza

Finalmente, como reseña Thomas et al. (2024) apoyado por Ramprasad et al. (2022),. Este método tiene una eficiencia de extracción de entre el 80 al 90%, con costos variables y dependientes principalmente de la capacidad de carga de iones metálicos que tiene el solvente y la cantidad de etapas de stripping realizadas. La técnica en si es versátil y rentable comercialmente dado que maneja grandes volúmenes de solución, generando subproductos simples de tratar, sin embargo, el uso de grandes cantidades de solventes genera importantes residuos orgánicos, la degradación del extractante y la limitada selectividad de ETR pueden hacer variar el costo final de la operación.

### **4.3.3 Intercambio iónico**

Esta técnica funciona bombeando una solución rica en ETR a través de una columna llena de un material sólido denominada resina de intercambio iónico, en el paso de la

solución los ETR son absorbidos por la resina y reemplazados en la solución por otros iones. Posteriormente se hace uso de un eluyente, como EDTA o ácido amino-poliacético, con la finalidad de remover selectivamente los ETR de la resina para finalmente ser precipitados con reactivos. (Thomas et al., 2024).

Como explica Dardona et al. (2023), esta técnica usa una tecnología bien establecida y ampliamente usada para la recuperación de uranio y oro y que experimentalmente al ser usada para recuperar ETR de cenizas de carbón a demostrado una alta capacidad de separación en tiempos cortos y con un impacto ambiental mínimo. Sin embargo, presenta una gran dificultad la hora de fabricar un sorbente que soporte varios ciclos de bombeo y con una alta capacidad de retención de ETR.

#### **4.3.4 *Electrodialisis***

Como señala Couto et al. (2020), esta técnica implementa un campo eléctrico entre dos electrodos (Ánodo y Cátodo) que busca la movilidad de iones positivos y negativos de ETR, los cuales son seleccionados en su paso por las membranas de intercambio iónico que si son recubiertas con ácidos amino-policarboxílicos como EDTA, DCTA, HEDTA y DTPA, como describe Thomas et al. (2024), mejoran la separación de ETR.

Firdaus et al. (2016), reseña que la tecnología usada en este proceso si bien esta ampliamente establecida una variedad de industrias, su aplicación específica para la recuperación e ETR de las cenizas del carbón aún está en estudio. Pese a lo anteriormente expuesto, Couto et al. (2020), expone que esta técnica tiene una tasa de eficiencia de extracción de ETR de más del 70%, e incluso mayor mediante el uso de ácido cítrico como electrolito.

Este proceso pese a su baja selectividad y dado que los ETR no siempre son directamente recuperables en los electrodos principalmente por la alta reactividad de ellos mismos como expone Ramprasad et al. (2022), tiene las ventajas de poder recuperar los ETR con el uso de membranas, además que en caso de ser integrado a fuentes de energía renovable que permite que este sea visto como una técnica sostenible para la recuperación de ETR de las cenizas del carbón. (Thomas et al., 2024).

#### **4.3.5 Separación por membranas**

Este método, como explica Thomas et al. (2024), se aprovecha de la tendencia que los ETR, que en su Estado de oxidación +3, (lo que significa que han perdido tres electrones), tienden a ser atrapados por moléculas que tienen múltiples sitios de enlace y tienden a unirse a un ion metálico, denominados como agentes quelantes. La separación se produce de forma diferente y con diferente tasa de eficiencia de recuperación según el tipo de membrana utilizado.

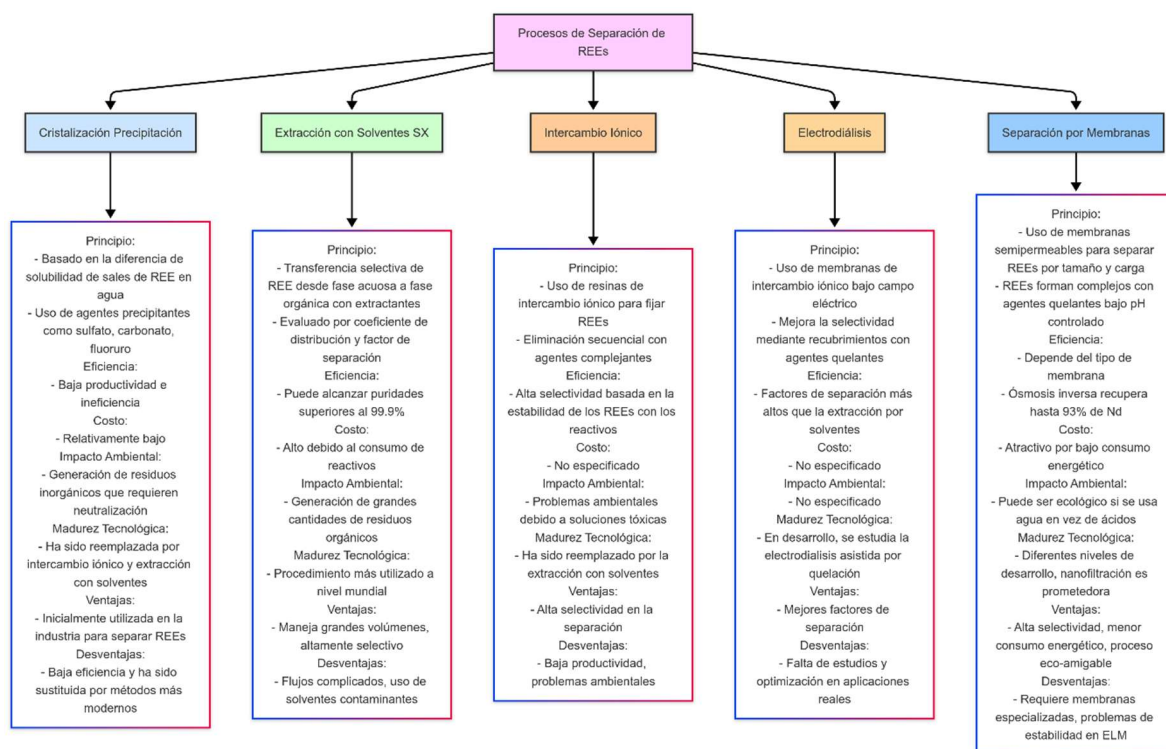
El uso de membranas líquidas hace uso de la osmosis inversa evidencia una tasa de recuperación de hasta un 93% para el Neodimio (Nd) como reseña Thomas et al. (2024), quien también indica que el uso de membranas de fibra hueca concentran los ETR hasta 300 veces. Este mismo autor indica que la nanofiltración, cuya eficiencia depende de la presión transmembrana, el tamaño de los poros, el flujo de permeado requerido y el pH de la solución, resulta eficaz en la separación de iones monovalentes y divalentes de los iones trivalentes de ETR presentes en el lixiviado puede alcanzar una recuperación mayor al 90%. Cada una de las técnicas por separación de membrana englobadas en este apartado se encuentran en diferentes etapas de desarrollo y aplicación industrial siendo la nanofiltración una solución atractiva para las industrias debido a su menor consumo de

energía y la ausencia de agentes quelantes en las membranas líquidas soportada. Thomas et al. (2024).

En general como menciona Ramprasad et al. (2022), y posteriormente Thomas et al. (2024), esta técnica en general tiene la ventaja de presentar una mayor selectividad de ETR, además de poder eliminar una fase del ciclo de recuperación de ETR dado que se usan métodos de combinación de extracción y recuperación en un solo paso y además de ser considerado como un proceso ecológico dado que usa agua en lugar de ácido. Sin embargo, estos mismos autores señalan que algunas membranas presentan problemas de inestabilidad, fuga e hinchazón además que generalmente se obtienen mezclas de ETR en vez de ETR individualizados.

La Figura 9, resume las técnicas usadas en esta segunda etapa del ciclo de recuperación de ETR de las cenizas del carbón, así como sus características principales anteriormente descritas.

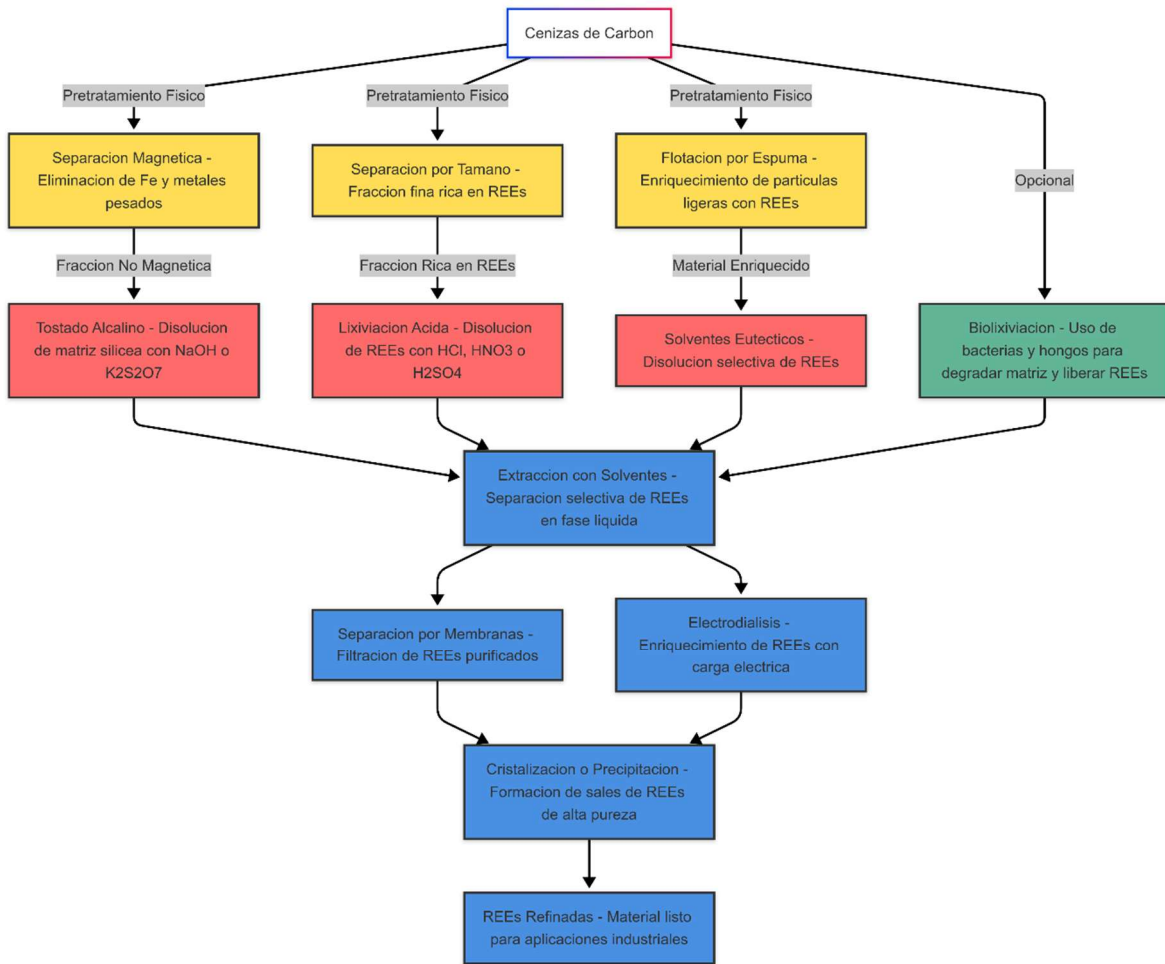
**Figura 9.** Resumen de Técnicas de extracción química para la Etapa de Purificación de ETR en Cenizas de Carbón



*C Elaboración propia con base en Extraction and separation of rare earth elements from coal and coal fly ash: A review on fundamental understanding and on-going engineering advancements, por Thomas et al., 2024; Electrodialytic recovery of rare earth elements from coal ashes, Couto et al., 2020; Trends in Extraction of Rare Earth Elements from Coal Ashes: A Review, por Dodbiba & Fujita, 2023; Selective separation and recovery of rare-earth elements (REEs) from acidic solutions and coal fly ash leachate by novel TODGA-Impregnated organosilica media, por Praneeth et al., 2024; Strategies and options for the sustainable recovery of rare earth elements from electrical and electronic waste, por Ramprasad et al., 2022; From ash to oxides: Recovery of rare-earth elements as a step towards valorization of coal fly ash waste, por Dardona et al., 2023; Review of High-Temperature Recovery of Rare Earth (Nd/Dy) from Magnet Waste, por Firdaus et al., 2016.*

La Figura 10, resume y resalta la posición en la que se ubica cada uno de las fases que conforman el ciclo de extracción de ETR de las cenizas del carbón, en conjunto con las técnicas que fueron abordadas con anterioridad y sus principales interacciones.

**Figura 10.** Resumen del proceso de extracción de ETR de las cenizas del carbón y sus principales interacciones entre las técnicas utilizadas.



*Nota. Elaboración propia.*

#### 4.4 Rentabilidad del proceso de extracción de ETR de las cenizas del carbón

Pese a que en apartados anteriores se abordó la eficiencia y rentabilidad de cada técnica que conforma el proceso de extracción de ETR de cenizas del carbón, de forma individual, la eficiencia económica y técnica en la ejecución de un proceso complejo, como explica Goldratt & Cox (2004) con su teoría de las restricciones, resulta en la suma de las ventajas y desventajas de cada uno de los procesos que lo integran.

La concentración de ETR en las cenizas, como explica M. Wu et al. (2023), es uno de los factores principales a la hora de determinar la eficiencia económica total del proceso. Este factor crítico para considerar las cenizas de carbón como una fuente secundaria de ETR como reseña, Thomas & Bhattacharya (2025), se calcula con la relación entre la suma de elementos críticos y la suma de elementos excesivos, denominado coeficiente de perspectiva o “Coult”, el cual normalmente es expresado por la siguiente expresión  $(Nd + Eu + Tb + Dy + Er + Y)/(Ce + Ho + Tm + Yb + Lu)$  y cuyo resultado, si es mayor a 0.7, indica que la ceniza puede ser considerada una fuente prometedora para la recuperación de ETR. Sin embargo, la expresión con la que se calcula este coeficiente es susceptible a cambios, como explica Thomas et al. (2024), dado que según el clima económico global los elementos considerados críticos en un momento dado pueden catalogarse como excesivos y viceversa, haciendo que ciertos depósitos de cenizas crezcan en interés para su uso en el proceso de extracción o por el contrario que sean relegados para un futuro donde su coeficiente sea sustancialmente más interesante y rentable de ser usado.

Otro factor importante a tener en cuenta son los ingresos por la recuperación de ETR, los cuales, como explica Y. Wu et al. (2024), se calculan multiplicando la tasa de recuperación de ETR del proceso en total, por los precios de óxidos de ETR en el mercado internacional, (se determina el precio de óxidos y no de elementos puros, dado que es la principal forma de comercialización de estos elementos en el mercado), siendo este último el factor de mayor variabilidad y que para el año 2023, como recopila Stojković et al. (2024), se comercializaban así: los óxidos de La y Ce se valoran en 1 USD por kg, mientras que los de Eu, Nd y Dy alcanzan los 27, 80 y 323 USD por kg, respectivamente y el óxido de Tb es el más caro, con un precio de 1300 USD por kg.

Por último, Y. Wu et al. (2024), señala que cada empresa debe evaluar el costo del ciclo de vida de cada etapa o fase que dispongan dentro de su proceso de recuperación de ETR, dado que los costos de maquinaria se estiman en un 9% del costo total de producción. Si a al valor anterior se añade el costo de materiales utilizados, los materiales utilizables obtenidos y el manejo de los residuos producidos pueden llegar a representar hasta un 14% adicional. Sin embargo, como resalta Thomas et al. (2024), la implementación de tecnologías innovadoras principalmente enfocadas en disolver las estructuras de vidrio aluminosilicato presentes en las cenizas, permite aumentar la eficiencia total del proceso de extracción y disminuir el consumo de las materias utilizadas.

#### ***4.4.1 Rentabilidad del proceso en el caso colombiano***

La evaluación de la rentabilidad en la recuperación de elementos de tierras raras (ETR) desde cenizas del carbón colombiano requiere analizar de forma integrada la **concentración del recurso, la viabilidad técnica del proceso extractivo, y el valor de mercado de los elementos recuperados**. Esta actividad representa una oportunidad emergente para consolidar un nuevo eslabón productivo dentro del marco de la economía circular y la transición energética del país.

Según los estudios recopilados realizados por Gómez Rojas (2018) , Henao (2019) y los datos inéditos del autor (2019), muestran concentraciones totales de ETR (agrupados como un conjunto) en carbones de las cuencas de Antioquia-Caldas, Boyacá y Cundinamarca entre **143 y 250 ppm (partes por millón)**, con un valor promedio representativo de **200 ppm**. Estas cifras, si bien menores a las observadas en yacimientos primarios internacionales, resultan comparables con las concentraciones que ya son explotadas industrialmente en países como Estados Unidos y China (Goodenough et al., 2018; Seredin & Finkelman, 2008).

El proceso de recuperación de ETR desde cenizas de carbón puede dividirse en tres fases fundamentales: **pretratamiento físico**, **extracción química** y **purificación final**. En la primera se aplican técnicas como la separación magnética y la clasificación por densidad y tamaño; en la segunda, métodos como la lixiviación ácida, alcalina o secuencial; y en la tercera, tecnologías como la extracción por solventes, intercambio iónico o electrodiálisis. Según diversos estudios, estas etapas pueden alcanzar eficiencias de recuperación cercanas al **70%**. (Lin et al., 2017; U.S. Department of Energy, 2022).

Desde un enfoque práctico, si se considera una concentración promedio de **200 ppm** (0.02%) y una eficiencia de recuperación del 70%, se estima que cada tonelada de ceniza podría generar hasta **140 gramos de ETR concentrado**, equivalentes a **0.14 kg/tonelada**.

$$Kg \text{ recuperables por tonelada} = \frac{(200ppm \times 0.70)}{1000} = 0.14kg/ton$$

Ahora bien, el valor de mercado de los ETR varía ampliamente según el elemento específico. Para efectos de cálculo, se utilizan los siguientes valores promedio por kilogramo, con base en datos de exportación y reportes internacionales:

- **Neodimio:** US\$85/kg
- **Disprosio:** US\$390/kg
- **Europio:** US\$230/kg
- **Promedio estimado general:** US\$100/kg

Dado lo anterior, el ingreso potencial por tonelada de ceniza procesada puede estimarse en función del elemento recuperado. A modo de ejemplo, con una concentración de 200 ppm y un rendimiento de 70%, se obtienen los siguientes valores:

- **Neodimio:** US\$11.90/ton
- **Disprosio:** US\$54.60/ton

- **Europeo:** US\$32.20/ton
- **Promedio general:** US\$14.00/ton

Estos ingresos, si bien moderados individualmente, pueden resultar altamente significativos cuando se procesan volúmenes industriales de ceniza.

Aunque los yacimientos primarios de ETR pueden presentar tenores mayores a 1000 ppm, los costos de extracción, remoción de sobrecarga, gestión de residuos mineros y licenciamiento ambiental hacen que su explotación sea considerablemente más costosa. En contraste, **las cenizas del carbón ya han sido generadas como subproducto de la combustión en plantas térmicas**, por lo que su aprovechamiento reduce significativamente los costos iniciales de operación y minimiza impactos ambientales.

En Colombia, por ejemplo, se reporta que la planta TERMO-PAIPA IV produce **200 toneladas de ceniza por cada 1500 toneladas de carbón quemado** Reyes Caballero et al. (2015), lo que representa una fuente continua de materia prima que no requiere nuevas actividades extractivas.

Por último, es indispensable abordar Factores adicionales que afectan la rentabilidad del proceso de extracción de ETR de las cenizas del carbón:

1. **Disponibilidad logística:** Las centrales térmicas nacionales generan cenizas de manera continua y controlada, facilitando la implementación de procesos industriales escalables.
2. **Tecnologías adaptables:** Procesos como el tostado alcalino o la lixiviación secuencial permiten recuperar más del 70% de los ETR, y pueden ser adaptados a los perfiles químicos específicos de las cenizas colombianas. (Henaó, 2019; Seredin & Finkelman, 2008).

3. **Mercados objetivos:** La demanda creciente de ETR en industrias de defensa, telecomunicaciones, almacenamiento energético e inteligencia artificial garantiza una salida comercial atractiva para el producto final. (Alvares Calderón & Trujillo Palacio, 2020).
4. **Viabilidad técnica nacional:** Los estudios del Servicio Geológico Colombiano han demostrado la presencia estable de ETR en múltiples cuencas y residuos industriales, lo que justifica avanzar hacia el diseño de procesos pilotos.

Por tanto, se puede asegurar de forma preliminar que la recuperación de ETR desde las cenizas del carbón colombiano es **técnicamente viable y económicamente atractiva**, al identificarse concentraciones importantes de ETR de las cenizas del carbón detectadas en estudios nacionales que combinados con eficiencias del proceso de recuperación superiores al 70% y precios internacionales favorables, sustentan su rentabilidad.

No obstante, **la falta de un marco normativo especializado en Colombia representa el principal obstáculo** para su implementación a escala. Es indispensable establecer regulaciones que reconozcan este tipo de aprovechamiento como parte de una minería secundaria o economía circular, otorgando licencias, fijando criterios ambientales y abriendo espacios para el financiamiento de proyectos piloto.

Así, Colombia podrá aprovechar un subproducto industrial subutilizado y convertirlo en una fuente estratégica de valor, reduciendo su dependencia del mercado exterior y contribuyendo activamente a los objetivos de sostenibilidad y soberanía tecnológica.

## **5 VACÍOS NORMATIVOS EN LA LEGISLACIÓN COLOMBIANA FRENTE AL USO Y APROVECHAMIENTO DE ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS PRESENTES EN LAS CENIZAS DEL CARBÓN**

A nivel global, desde diferentes gobiernos existe un cada vez más marcado y creciente interés por participar y controlar el mercado de los elementos de tierras raras, debido a su importancia estratégica a nivel energético, militar, económico y tecnológico. Colombia como nación pese a no tener un potencial comprobado de yacimientos primarios y convencionales de ETR que le permita participar en este mercado de forma inmediata, podría consolidar en el corto o medio plazo una importante cuota de mercado dentro de este comercio al posibilitar la extracción de ETR de las cenizas del carbón. Sin embargo, la legislación minero ambiental de Colombia aún presenta serias lagunas que impiden el aprovechamiento de estos minerales, especialmente de aquellos que se encuentran en residuos industriales como las cenizas del carbón, generando una incertidumbre jurídica para su correcto desarrollo. La carencia de una regulación específica para este tipo de recuperación de minerales dificulta la realización de proyectos innovadores, limitando a su vez el aprovechamiento de estos recursos estratégicos y de los beneficios en materia económica que estos dejarían para la nación y dejando a al país rezagado frente a las tendencias internacionales de economía circular y minería urbana.

A continuación, se abordarán los vacíos normativos presentes en la legislación colombiana frente al uso y aprovechamiento de elementos de tierras raras presentes en las cenizas del carbón.

### **5.1 *Marco jurídico presente en la Constitución Política de 1991***

Es en la Constitución Política de 1991, como norma de orden jerárquico superior en la legislación colombiana, donde se establecen las bases de la regulación minera,

concretamente al categorizar el manejo y protección de los recursos naturales y el medio ambiente, como norma de rango constitucional, reconociendo entonces la obligación del Estado de proteger tanto las riquezas culturales y naturales de la nación, como el derecho de todos los ciudadanos a gozar de un ambiente sano y estableciendo el deber que tiene el Estado para planificar el manejo y el aprovechamiento de los recursos naturales, garantizando su desarrollo sostenible, conservación, restauración o sustitución. (Constitución Política de la República de Colombia, 1991, Arts. 8, 79, 80).

La Constitución establece las bases para la regulación de los recursos mineros, abarcando de forma implícita los elementos de tierras raras, al designar al Estado como propietario del subsuelo y de los recursos naturales no renovables. (Constitución Política de la República de Colombia, 1991, Art. 332). En este contexto, dichos elementos al ser parte integral de la estructura química de ciertos minerales clasificados como no convencionales están sometidos a toda regulación referida frente al uso y aprovechamiento de recursos naturales no renovables conforme a lo establecido por la Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales (CCRR) (2025), dentro del Estándar colombiano para el reporte público de resultados de exploración, recursos y reservas minerales (ECRR) - Versión 2025.

En Colombia el sistema general de regalías nace a partir del artículo 360 de la constitución política de 1991, estableciendo que:

“La explotación de un recurso natural no renovable causará, a favor del Estado, una contraprestación económica a título de regalía, sin perjuicio de cualquier otro derecho o compensación que se pacte. La ley determinará las condiciones para la explotación de los recursos naturales no renovables.”

Sin embargo, el término “explotación” mencionada acá debe entenderse como: “El proceso de extracción y **procesamiento** de los minerales, así como la actividad orientada a la preparación y el desarrollo de las áreas que abarca el depósito mineral.” tal cual como es definido dentro del glosario técnico minero el cual es amparado bajo el artículo 68 de la Ley 685 del 2001 y adoptado por el Decreto 2191 de 2003, por tanto la palabra procesamiento permite inferir que el ciclo de reciclaje y obtención de los ETR de las cenizas de carbón, una vez se regule deberá quedar circunscrito al pago de regalías según los topes definidos en este caso por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) como entidad designada para establecer estos precios bajo el Decreto 1258 de 2013. (Constitución Política de la República de Colombia, 1991, Art. 360; Decreto 2191 de 2003 - Glosario Técnico Minero, 2003; Ley 685 de 2001 - Código de Minas de Colombia, 2001, Art. 68).

Como se puede apreciar la Constitución Política de 1991 en su aspecto generalista engloba todo recurso mineral, incluyendo los ETR y su ciclo de extracción bien sea de forma directa o como producto del reciclaje de desechos industriales. Este marco jurídico es objeto de ser desarrollado posteriormente con el respaldo del artículo 334 de la constitución que faculta al Estado para dirigir la economía de la nación envistiéndolo con el poder de intervenir en la explotación de los recursos naturales, el uso del suelo, la producción, distribución, utilización y consumo de bienes; por tanto, el Estado colombiano tiene todo el poder de legislar sobre toda actividad que busque la regulación frente a los procesos de extracción, recuperación y comercialización de minerales estratégicos, en este caso en particular, para la obtención de elementos de tierras raras, incluso si es de una actividad de procesamiento y reciclaje desde desechos industriales como las cenizas del carbón. (Constitución Política de la República de Colombia, 1991, Art. 334).

## **5.2 Marco Normativo sobre Recursos Naturales y Permisos Ambientales**

La regulación de los recursos naturales en Colombia inicia con la expedición de la Ley 23 de 1973, la cual concedió al presidente de la República facultades extraordinarias para la expedición del código de recursos naturales y de protección al medio ambiente el cual quedó en firme tras la expedición del Decreto 2811 de 1974 y en cual se establecen principios rectores para el uso y aprovechamiento y conservación de los recursos naturales además de establecer que el dominio de los recursos naturales dentro del territorio nacional pertenece a la nación. (Decreto 2811 de 1974 - Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, 1974; Ley 23 de 1973 - Facultades extraordinarias para el Código de Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente, 1973).

Como se abordó en el título 4 de este trabajo, durante el proceso de extracción de los ETR de las cenizas del carbón es frecuente el uso de técnicas las cuales, bien sea por las sustancias que usan, el método en el que basan su funcionamiento o el simple hecho de acopiar las cenizas, tienen una capacidad contaminante definido bajo el contexto establecido, en un inicio, por la ley 23 de 1973 que, en sus artículos cuarto y quinto expresan que, todo elemento, combinación de elementos o forma de energía es considerado contaminante cuando, puestas allí por la actividad humana o de la naturaleza, en cantidades, concentraciones o niveles son capaces de interferir con el bienestar y la salud de las personas, atentar contra la flora y la fauna, degradar la calidad del medio ambiente o afectar los recursos de la Nación o de particulares, indicando en el artículo tercero que los bienes susceptibles de contaminación son el recurso aire, agua y suelo. (Ley 23 de 1973 -

Facultades extraordinarias para el Código de Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente, 1973, Arts. 3, 4, 5).

Con la finalidad de establecer un marco específico para la protección de los bienes susceptibles de contaminación expuestos anteriormente, el Congreso de la República promulgó la ley 99 de 1993, en la cual por medio del artículo 31 establece que las Corporaciones Autónomas Regionales tienen la función de ejercer actividades de regulación, evaluación, control y seguimiento ambiental de los usos del agua, el suelo y el aire, comprendiendo entonces vertimientos, emisiones, o incorporaciones de sustancias o residuos líquidos, sólidos y gaseosos al agua (superficial o subterránea), al aire, o a los suelos. En este sentido toda actividad enmarcada en la recuperación de ETR de las cenizas del carbón debe alienarse bajo el marco normativo específico que regula la protección de cada bien que es susceptible de ser afectado por esta actividad. (Ley 99 de 1993 - Sistema Nacional Ambiental (SINA), 1993, Art. 31).

### ***5.2.1 Marco normativo específico para la protección del recurso aire***

Dadas las consideraciones expuestas anteriormente es posible afirmar que toda actividad dirigida en buscar la extracción de ETR de las cenizas del carbón en la que se implementen técnicas que puedan generar gases, vapores o emisiones de material particulado deben ceñirse a los lineamientos establecidos en el título 5, capítulo 1, del Decreto 1076 de 2015, el cual establece el reglamento de protección y control de la calidad del aire. (Decreto 1076 de 2015 - Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

En este sentido es necesario entender la operación de extracción de ETR de las cenizas de carbón como una fuente de emisiones fijas, según la clasificación expuesta en los artículos 2.2.5.1.3.2 y 2.2.5.1.7.2, especialmente si dentro de sus ciclos de proceso se

realizan actividades de combustión y procesamiento químico, lo que claramente hace que los químicos y materias usados en la extracción en general sean susceptibles de ser reguladas en el listado de sustancias de emisión sometidas a control o prohibición por el artículo 2.2.5.1.3.1 y la actividad en general por los artículos 2.2.5.1.3.3 y 2.2.5.1.3.10 donde se prohíbe expresamente la combustión de ciertos materiales por sus potenciales emisiones tóxicas al aire. Sin embargo, pese al control establecido dentro de este Decreto en el cual se otorga la obligación al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de definir el listado de sustancias, no se contemplan explícitamente otros contaminantes como las partículas ultrafinas y compuestos tóxicos de ETR que se pueden generar en emisiones industriales, representando así una clara brecha normativa. (Decreto 1076 de 2015 - Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, Arts. 2.2.5.1.3.1, 2.2.5.1.3.2, 2.2.5.1.3.3, 2.2.5.1.3.10, 2.2.5.1.7.2).

Además de lo anteriormente mencionado, es importante resaltar que, como dentro del proceso de extracción y concentración de ETR es necesario el uso de ácidos fuertes, compuestos orgánicos o agentes reductores, es necesario implementar todas las medidas de control necesarias a fin de garantizar el cumplimiento de la restricción establecida en el artículo 2.2.5.1.3.16 frente al almacenamiento de productos tóxicos volátiles en tanques o contenedores. (Decreto 1076 de 2015 - Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, Art. 2.2.5.1.3.16).

Cabe mencionar, que toda operación industrial que busque la recuperación de ETR de las cenizas del carbón, independientemente de las técnicas que implemente dentro de su ciclo de beneficio, debe operar bajo una licencia ambiental previamente otorgada donde se incluyan los permisos y autorizaciones necesarios para proteger el recurso aire, agua y suelo, los cuales están amparados bajo el artículo 2.2.2.3.1.3, dado que la ejecución de esta

actividad puede generar un deterioro grave a los recursos naturales renovables o al medio ambiente. (Decreto 1076 de 2015 - Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, Art. 2.2.2.3.1.3). En última instancia se destaca que, de los aspectos anteriormente anotados, no se evidencia como tal, que dentro del ordenamiento jurídico en relación con la protección del aire exista una norma que se adecúe con precisión a las prácticas necesarias para la extracción de ETR de las cenizas del carbón, especialmente en lo relativo a emisiones de gases contaminantes, aerosoles o material particulado que se pueda generar como resultado de este tipo de operación.

### ***5.2.2 Marco normativo específico para la protección del recurso agua***

El marco normativo colombiano en materia ambiental establece diversas disposiciones para el uso, regulación, aprovechamiento y protección del recurso hídrico en diversos procesos industriales entre los que se encuentran las manufactureras y de transformación, establecidas en el artículo 2.2.3.3.2.8 del Decreto 1076 del 2015. Esta primera aproximación permite englobar los procesos de extracción, beneficio y transformación de ETR de las cenizas del carbón dentro de estos procesos industriales susceptibles a ser regulados por esta norma. (Decreto 1076 de 2015 - Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, Art. 2.2.3.3.2.8).

En este sentido, este Decreto establece que el uso del agua en los procesos anteriormente mencionados debe cumplir la normativa en cuanto concesiones, vertimientos, uso eficiente y ahorro del agua. La normativa en cuanto a concesiones que esta actividad debe seguir, están reguladas por los artículos 2.2.3.2.7.1, 2.2.3.2.8.6 y 2.2.3.2.20.2 que definen la obligatoriedad de una concesión para el uso del agua en procesos industriales o de tratamiento de minerales, indicando además que el concesionario debe respetar la

inalterabilidad de las condiciones impuestas en la resolución una vez esta sea otorgada y, que si como consecuencia del aprovechamiento del agua dentro el proceso industrial se generan vertimientos se deberá tramitar de forma conjunta con la concesión el permiso correspondiente. (Decreto 1076 de 2015 - Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, Arts. 2.2.3.2.7.1, 2.2.3.2.8.6 y 2.2.3.2.20.2).

En materia de vertimientos, se establece en los artículos 2.2.3.3.7.8, 2.2.3.2.20.5 y 2.2.3.3.5.19 del Decreto 1076 de 2015, la prohibición tácita de realizar vertimientos de residuos solios, líquidos o gaseosos sin tratamiento previo, por lo cual requieren a los beneficiarios del permiso un plan de tratamiento del agua, indicando que el incumplimiento de las condiciones el permiso otorgado conllevará las respectivas sanciones establecidas dentro del procedimiento sancionatorio vigente a la fecha de otorgado el permiso. (Decreto 1076 de 2015 - Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, Arts. 2.2.3.3.7.8, 2.2.3.2.20.5 y 2.2.3.3.5.19).

En cuanto a la reutilización y uso eficiente el agua el artículo 2.2.3.2.1.1.3 del Decreto obliga a los solicitantes de una concesión de uso de agua, a presentar un programa para el uso eficiente y el ahorro del agua (PUEAA), en el que se deben incluir la implementación de alguna de las actividades descritas en el artículo 2.2.3.2.1.1.2 del mismo Decreto. (Decreto 1076 de 2015 - Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, Arts. 2.2.3.2.1.1.3, 2.2.3.2.1.1.2).

La normativa anteriormente mencionada muestra que de forma general la regulación vigente entorno al uso y protección del agua engloba las normas que los procesos industriales como aquellos que participan en el ciclo de extracción de ETR de las cenizas del carbón deben cumplir. Sin embargo, dentro el mismo Decreto, existe una falta de

regulación entorno a definir los criterios específicos para el uso de este recurso en procesos industriales ligados a esta actividad.

Como ejemplo de la premisa anteriormente planteada, pese a que en el artículo 2.2.3.2.23.1, se menciona que las industrias deben evacuar sus desagües y efluentes mediante redes especiales de tal forma que esto facilite el tratamiento del agua y que de forma complementaria en el artículo 2.2.3.2.23.2 del Decreto 1076 de 2015, se establece que las industrias que no puedan garantizar la calidad del agua dentro de los límites permisibles que se establezcan, deberán instalarse en lugares definidos por la autoridad ambiental competente. Sin embargo, es la palabra “límites permisibles” la que genera duda, dado que actualmente en la legislación colombiana no se han determinado a los ETR de forma tácita como posibles sustancias contaminantes, por ende, no existen estudios que indiquen cuáles son los límites permisibles de concentración de estas sustancias con lo cual, no se podría definir si la actividad de extracción de dichos elementos de las cenizas de carbón es susceptible de ser regulada bajo este artículo. (Decreto 1076 de 2015 - Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, Arts. 2.2.3.2.23.1, 2.2.3.2.23.2).

En este mismo contexto, también es importante resaltar que a pesar que no se ha expedido un protocolo de monitoreo de vertimientos a las aguas superficiales y al alcantarillado, el cual está amparado bajo el artículo 2.2.3.3.4.13 del Decreto 1076 de 2015, y que es concebido como un complemento a la guía de monitoreo del IDEAM, su marco de acción técnica se basa en la resolución 631 de 2015 expedida por el Ministerio de Minas y Desarrollo Sostenible la cual, a pesar de establecer los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y sistemas de alcantarillados público, no incluye, en ningún aparte, los elementos de tierras raras y

sus reactivos en los parámetros de evaluación.(Decreto 1076 de 2015 - Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, Art. 2.2.3.3.4.13; Resolución 631 de 2015, 2015).

### **5.2.3 Marco normativo específico para la protección del recurso suelo**

El marco normativo para el uso, regulación , aprovechamiento y protección del suelo se remonta al Decreto 2811 de 1974, establece en los artículos 178 y 179, que los suelos deben usarse según sus características físicas, ecológicas y socioeconómicas, de tal forma que se garantice la conservación y capacidad productiva del suelo, estableciendo los cimientos del actual ordenamiento territorial frente al uso de suelos, los cuales son determinados por las autoridades ambientales correspondientes con el fin de garantizar su regulación y conservación y a las cuales debe ceñirse cualquier actividad industrial enfocada en la recuperación de ETR de las cenizas del carbón. (Decreto 2811 de 1974 - Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, 1974, Arts. 178, 179).

Actualmente la regulación principal sobre el uso y prevención de contaminación del suelo está dada principalmente por el Decreto 1076 de 2015, que en sus artículos 2.2.2.1.2.10 y 2.2.2.1.2.1.1, señala que los suelos presentes en áreas establecidas bajo el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP) están limitados en su posible uso, llegando incluso a restringir su intervención, con la finalidad de evitar los impactos ambientales negativos derivados, además de prohibir tácitamente en el artículo 2.2.3.3.4.3, el vertimiento a suelos en zonas donde exista una extrema o alta vulnerabilidad de contaminar acuíferos, como las zonas de recarga alta de los mismos, prohibiendo de igual manera el uso de contaminantes orgánicos persistentes de los que trata el Convenio de Estocolmo. Sin embargo, frente a esta última restricción, es importante resaltar que los ácidos orgánicos

que pueden ser usados en el proceso de extracción de ETR de las cenizas del carbón y los derivados que se pueden producir durante este proceso, no están regulados bajo este Convenio, por ende, el Decreto flaquea al no emitir directrices claras para la futura regulación de estas sustancias. (Decreto 1076 de 2015 - Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, Arts. 2.2.2.1.2.10, 2.2.2.1.2.1.1, 2.2.3.3.4.3).

Por último, pese a que en el artículo 2.2.6.1.1.3, del Decreto 1076 de 2015, dispone que los residuos categorizados como peligrosos son aquellos que exhiben características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radioactivas y que los residuos generados por la industria que contengan concentraciones de metales pesados, como los que normalmente se generan en plantas de extracción y beneficio de metales, son clasificados dentro de esta categoría dado que además cumplen con las características de peligrosidad de los residuos y desechos expuestos en el anexo III del mismo Decreto, es importante destacar que los ETR a nivel internacional, como destaca la Convención sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Larga Distancia (Convenio de Ginebra, 1979) y el Protocolo a la Convención de 1979 sobre la contaminación atmosférica transfronteriza a larga distancia relativo a los metales pesados, 1998 no han sido considerados como metales pesados, por tanto los residuos sólidos y líquidos que puedan verse en los suelos, productos de esta actividad y que contengan porcentajes considerables de ETR, no están regulados bajo ninguna legislación actual y no se especifica ninguna directriz que este enfocada en evaluar la peligrosidad de este grupo específico de metales y de implementar estudios y controles para su regulación. (Decreto 1076 de 2015 - Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, Art. 2.2.6.1.1.3, anexo III).

### **5.3 Marco Normativo en Minería y Beneficio de Minerales**

Antes de la expedición del actual Código de Minas, consagrado en la Ley 685 de 2001, la legislación minera en Colombia transitó por diversos cuerpos normativos que reflejaron las dinámicas económicas, políticas y técnicas de su tiempo. Estas normas, algunas de carácter transitorio y otras de aplicación prolongada, constituyen el andamiaje histórico y jurídico que moldeó las prácticas extractivas y las formas de relacionamiento entre el Estado, el sector privado y los recursos minerales del subsuelo nacional.

Comprender este acervo normativo resulta fundamental para analizar con rigurosidad el marco actual que regula la minería y el beneficio de minerales, en tanto permite identificar no solo su evolución conceptual y técnica, sino también las omisiones estructurales que persisten en la normativa vigente. Esta revisión histórica cobra especial relevancia en el contexto de la presente tesis, orientada a evidenciar los vacíos legales existentes frente al uso y aprovechamiento de los Elementos de Tierras Raras (ETR) contenidos en las cenizas del carbón, una fuente secundaria cuya explotación aún no cuenta con una regulación específica en el país.

El análisis de las disposiciones legales previas a la Ley 685 de 2001 permite establecer un marco de referencia indispensable para sustentar la necesidad de adecuar el ordenamiento jurídico minero a las nuevas realidades tecnológicas, ambientales y productivas, especialmente frente a la valorización de residuos industriales con potencial estratégico en la transición energética y la economía circular.

La legislación minera en Colombia ha atravesado un proceso de evolución normativa que refleja el interés del Estado en regular integralmente la exploración, explotación, beneficio, transformación y aprovechamiento económico de los recursos minerales, los cuales son considerados propiedad inalienable de la Nación. Este marco

normativo ha ido consolidando principios fundamentales como la propiedad estatal sobre las minas, el establecimiento de contraprestaciones económicas, y la diferenciación por escalas de la actividad minera. A continuación, se presenta una síntesis ordenada cronológicamente de las principales disposiciones legales que rigieron la actividad minera antes de la entrada en vigor del actual Código de Minas (Ley 685 de 2001):

Ley 20 de 1969 (22 de diciembre de 1969), introdujo un principio cardinal en la legislación minera colombiana: todas las minas pertenecen a la Nación, aunque se reconocieron derechos adquiridos por terceros siempre que estos correspondieran a situaciones jurídicas subjetivas, concretas y perfeccionadas, vinculadas a yacimientos previamente descubiertos. El objetivo de los derechos que la Nación confería sobre sus minas era asegurar, mediante una exploración técnica previa, el aprovechamiento integral de las sustancias económicamente explotables. (Ley 20 de 1969 - Disposiciones sobre Minas e Hidrocarburos, 1969).

La ley estipuló que los derechos privados sobre minas, adquiridos mediante adjudicación, redención a perpetuidad o accesión, entre otros, se extinguirían automáticamente si no se iniciaba su explotación dentro de los tres años siguientes a su promulgación, o si, una vez comenzada, se suspendía por más de un año sin justa causa (fuerza mayor o caso fortuito). Aquellos cuyos derechos se extinguieran podrían obtener prioridad para nuevos títulos (concesión, aporte o permiso), siempre que hubieran realizado estudios técnicos avanzados.

Cabe destacar que esta ley fue posteriormente derogada por el Artículo 325 del Decreto 2655 de 1988, con excepción de sus artículos 1 y 13, que conservaron vigencia.

El Decreto 2477 de 1986 (10 de octubre de 1986), sentó las bases para una regulación más detallada de la actividad minera. Definió las principales fases del proceso

minero: exploración, explotación, montaje, beneficio y transformación, además de precisar los conceptos técnicos relacionados, como “beneficio de minerales”, entendido como el conjunto de procesos físicos para separar y preparar el mineral antes de su transformación. (Decreto 2477 de 1986, 1986).

Este decreto introdujo, además, una clasificación de la minería según su escala (micro, pequeña, mediana y gran minería), especialmente para el caso del carbón, considerando variables como producción, personal y equipo. Asimismo, especificó los fines de los recursos del Fondo Minero, destinados prioritariamente a Carbocol y a programas comunitarios en zonas de pequeña y mediana minería. (Decreto 2477 de 1986, 1986).

En el mismo sentido reguló aspectos críticos como el otorgamiento de derechos mineros, áreas restringidas, períodos de actividad, regalías, expropiaciones, y vigilancia técnica. Aunque fue derogado por el Artículo 361 del Decreto 2655 de 1988, sus definiciones y estructura conceptual fueron esenciales para la formulación del Código de Minas.

Decreto 2655 de 1988 (26 de diciembre de 1988), consolidó el primer Código de Minas de Colombia, con el propósito de fomentar la exploración y explotación racional de los recursos minerales, atender la demanda nacional, generar empleo, promover la inversión y contribuir al desarrollo regional. Este código ratificó que los recursos minerales del suelo, subsuelo y espacios marítimos son propiedad exclusiva, inalienable e imprescriptible de la Nación, la cual puede explotarlos directamente o delegar su aprovechamiento mediante títulos otorgados a particulares. (Decreto 2655 de 1988 – Código de Minas, 1988).

Este código reconoció que los únicos derechos privados válidos sobre minas eran aquellos constituidos antes del 22 de diciembre de 1969, que cumplieran con los requisitos

legales. La industria minera fue declarada de utilidad pública e interés social, habilitando la expropiación de bienes necesarios para su desarrollo.

Se definieron los títulos mineros como actos administrativos que otorgan derechos exclusivos y temporales sobre un área para su exploración y explotación, sin conferir propiedad sobre los minerales in situ. Estos títulos comprenden licencias de exploración y explotación, contratos de concesión y aportes.

La regulación abarcó todas las fases de la actividad minera:

- Prospección: libre y superficial, sin otorgar derechos preferenciales.
- Exploración técnica: requiere licencia e involucra actividades como sondeos y excavaciones. Se exige delimitación y presentación de informes técnicos.
- Montaje: comprende la instalación de infraestructura posterior a la exploración.
- Explotación: autorizada por períodos de hasta 30 años, exige métodos técnicamente eficientes y sostenibles, así como informes anuales.

El beneficio de minerales se reguló como parte integral de la cadena minera, promoviendo la transformación local cuando fuese técnica y económicamente viable.

En el caso del carbón, se estableció un modelo de aportes mineros canalizados por Carbocol. Solo mediante esta modalidad podía otorgarse el derecho a explotar áreas sin título vigente. Incluso se permitió la superposición de aportes de carbón sobre áreas con títulos de otros minerales.

Se reconocieron cuatro tipos de contraprestaciones económicas:

- Canon superficiario: pago anual por hectárea durante la exploración.
- Regalías: porcentaje fijo sobre la producción, estipulado en el contrato de concesión.

- Participaciones: incluyen regalías, impuestos, cánones y otros gravámenes.
- Impuestos específicos.

El código también incluyó disposiciones ambientales, laborales y de fomento a la industria nacional. Exigió la obtención de licencias para el uso de recursos naturales renovables y estableció la obligación de vincular y capacitar mano de obra colombiana, con énfasis en apoyar a la pequeña minería.

Decreto 2656 de 1988 (26 de diciembre de 1988), este decreto complementó el Código de Minas regulando los recursos del Fondo de Carbón. Estableció que los recursos serían destinados exclusivamente a operaciones de Carbocol, programas comunitarios, e inversiones en proyectos de carbón por otros actores del sector, asegurando su reinversión en el fortalecimiento de la industria.

Ley 141 de 1994 (29 de junio de 1994), introdujo reformas sustanciales al régimen de regalías, incluyendo definiciones sobre la promoción de la minería, entendida como el conjunto de acciones para fomentar la cadena completa del sector (desde la prospección hasta la transformación y comercialización), mediante la asignación preferente de recursos provenientes de regalías. (Ley 141 de 1994, 1994).

Con esta ley se asignaron porcentajes diferenciados del Fondo de Regalías para fomentar proyectos, con especial énfasis en la pequeña y mediana minería: 70% para proyectos relacionados con carbón y 30% para metales preciosos, esmeraldas, calizas, entre otros. También se establecieron bases técnicas para la liquidación de regalías sobre minerales específicos como el níquel, y se asignó a las industrias consumidoras (termoeléctricas, cementeras, acerías) la responsabilidad del recaudo de regalías sobre el

carbón y calizas que consumen, con base en precios oficiales fijados por el Ministerio de Minas y Energía.

El marco legal colombiano previo a la Ley 685 de 2001 consolidó principios estructurales como la propiedad estatal de los recursos minerales, la concesión de derechos mediante títulos mineros, y el establecimiento de contraprestaciones económicas. Además, favoreció esquemas de fomento específicos como el sistema de aporte para carbón, y promovió la sostenibilidad mediante disposiciones ambientales y sociales. No obstante, estos cuerpos normativos no contemplaron explícitamente la regulación del aprovechamiento de minerales provenientes de residuos industriales o procesos de reciclaje, lo cual constituye un vacío normativo relevante en el contexto actual de economía circular y aprovechamiento de subproductos, como las cenizas del carbón.

La competencia en cuanto a la regulación de extracción de ETR de fuentes convencionales como la minería de yacimientos primarios o secundarios o de fuentes alternativas en específico de aquellos extraídos como producto del reciclaje desde las cenizas del carbón, recae en el Ministerio de Minas y Energía el cual es reconocido como la autoridad minera o en su defecto, a quien éste delegue para dichas funciones bajo el bajo el artículo 317 de la ley 685 de 2001:

“autoridad de orden nacional que de conformidad con la organización de la administración pública y la distribución de funciones entre los entes que la integran, tenga a su cargo la administración de los recursos mineros, la promoción de los aspectos atinentes a la industria minera, la administración del recaudo y distribución de las contraprestaciones económicas señaladas en este Código, con el fin de desarrollar las funciones de titulación, registro, asistencia técnica, fomento,

fiscalización y vigilancia de las obligaciones emanadas de los títulos y solicitudes de áreas mineras”. (Ley 685 de 2001 - Código de Minas de Colombia, 2001, Art. 317).

De forma conjunta como una de las principales bases sobre las cuales reposaría una futura regulación de extracción de ETR está el artículo 13 de la ley 685 de 2001, que desarrolla el artículo 58 de la Constitución Política de Colombia, el cual declara de utilidad pública e interés social a la industria minera en todas sus ramas y fases. Por tanto, como el proceso de beneficio es concebido como una rama integral de esta industria, toda actividad concebida para la extracción de ETR bien sea de fuentes primarias o alternativas, se encontraría amparado bajo este artículo.(Constitución Política de la República de Colombia, 1991, Art. 58; Ley 685 de 2001 - Código de Minas de Colombia, 2001, Art. 13).

En este sentido la estructuración de un marco regulatorio para la extracción de ETR de fuentes convencionales se puede concebir como un proceso sencillo, dado que, la mayor parte de la jurisprudencia minero-ambiental colombiana se ha desarrollado en aras de regular esta actividad, por tanto la industria minera que se pueda desarrollar tras la introducción de nuevos minerales como los que contienen ETR, está sujeta sin lugar a duda a cada una de las normas vigentes y futuras que de forma específica se generen de forma diferencial por las autoridades mineras en aras de ayudar a regular su extracción, beneficio, comercialización e impactos ambientales.

Sin embargo, la extracción de los ETR de las cenizas del carbón es una actividad que no cuenta con una regulación específica y que si bien debe ceñirse a ciertos lineamientos para poder ser implementada dentro del territorio nacional, no existen parámetros que permitan su evaluación y control, principalmente porque esta actividad sería la primera en ser concebida como un proceso de reciclaje de desechos industriales que debe contar con un claro marco regulatorio diferenciado dentro de la legislación minera,

debido a que es una actividad de beneficio de metales que evidentemente hace parte de la industria minera, por la naturaleza de los procesos utilizados en esta actividad y la importancia estratégica y económica que representa para la nación los elementos objeto de ser beneficiados y comercializados.

Por la premisa anterior, bajo el ideal de buscar la regulación de los ETR de las cenizas del carbón, toda venta de este residuo cuyo fin sea destinado a ser utilizado en obras, industrias y servicios deberá acreditar la procedencia lícita del material, es decir que la materia prima de la cual se obtiene el residuo, en este caso el carbón, debe provenir de un proceso que cumpla con la normativa legal vigente que le atañe y además que el residuo fue obtenido como parte de un proceso industrial mayor y no solo por los fines de quemar carbón para obtener la ceniza, de tal forma que esté amparado bajo los lineamientos del artículo 30 de la ley 685 del 2001, en este caso, el artículo deberá ser modificado y ampliado a tal punto que abarque toda actividad en la cual sea o pueda ser usada la ceniza de carbón.

De forma conjunta y como medida preventiva previa una regulación en toda regla, la autoridad minera deberá declarar a los ETR y los minerales que los contengan, como minerales estratégicos los cuales están sujetos de toda la legislación minera y ambiental existente y por existir, de esta forma asegurando que cualquier actividad que busque su aprovechamiento, comercio o adquisición, previo a ser establecida una regulación especial para la extracción de estos elementos, no caiga en el aprovechamiento ilícito el cual es definido y regulado por el artículo 160 de la ley 685 de 2001.

Con relación al apartado anterior, y en una primera aproximación a la regulación de los ETR y su clasificación como minerales de interés estratégico la Agencia Nacional de Minería (ANM) en el 2023 emitió el Acuerdo 01 del 2023, bajo el cual determina que los minerales de interés estratégico para el País:

“son aquellos que puede garantizar soberanía en el abastecimiento de la demanda interna actual o futura, asociada a los desarrollos industriales requeridos para soportar una transición energética gradual hacia fuentes de generación de energías limpias no convencionales y para el desarrollo de la infraestructura requerida para garantizar la industrialización de la economía y un sector minero productivo, competitivo y con la implementación de buenas prácticas técnicas, sociales y ambientales; de igual forma, lo son aquellos minerales necesarios para brindar seguridad alimentaria a los habitantes del territorio nacional, mayor disponibilidad y acceso mediante precios razonables, permitiendo reducciones en los costos de los fertilizantes y abonos agrícolas, y con ello el abaratamiento de los alimentos. Finalmente, resultan estratégicos los minerales priorizados para promover esquemas asociativos entre mineros tradicionales, ancestrales o en proceso de formalización, que permitan un aprovechamiento racional de los recursos minerales de propiedad del Estado y contribuyan a su formalización colectiva”.

A partir de estos lineamientos, el Grupo de Promoción de la Vicepresidencia de Promoción y Fomento de la Agencia Nacional de Minería bajo este acuerdo, en noviembre del 2023 emitió el documento denominado “Determinación de minerales de interés estratégico para Colombia” en el cual exponen la metodología para la recomendación de un mineral a fin de que sea considerado como estratégico para la nación. Dicha metodología se planteó con el fin de incorporar el análisis de las tendencias globales frente a la demanda de minerales en el mediano y largo plazo, incluyendo la transición energética como un eje fundamental al considerar importantes los insumos para la fabricación de tecnologías e infraestructura bajas en

emisiones de carbono, acorde con el cumplimiento de objetivos nacionales e internacionales. (Acuerdo 01 de 2023 - Lineamientos para la Determinación de Minerales Estratégicos, 2023; Agencia Nacional de Minería - Grupo de Promoción et al., 2023).

En el documento mencionado anteriormente, el Grupo de Promoción de la Vicepresidencia de Promoción y Fomento de la Agencia Nacional de Minería, define dos dimensiones principales en las que clasifican los lineamientos establecidos en el Acuerdo 01 del 2023: dimensión transversal y dimensión temática. La primera permite identificar el grado de conocimiento geocientífico que se tiene sobre los recursos minerales, y la segunda de manera específica los diferentes lineamientos asociados a la política de reindustrialización del país, así como al autoabastecimiento, la formalización del sector minero y la transición energética. Por tanto, la puntuación de los minerales en cada dimensión temática se compara con la puntuación de la existencia de ambientes geológicos favorables, con el fin de señalar en cuáles existiría una mayor viabilidad para la exploración y en cuáles se deberían aunar esfuerzos para incrementar el conocimiento geocientífico. (Agencia Nacional de Minería - Grupo de Promoción et al., 2023).

Los criterios de selección y clasificación de minerales por dimensión se pueden consultar en el documento “Determinación de minerales de interés estratégico para Colombia”. Sin embargo, es importante destacar en este aspecto, que para seleccionar finalmente los minerales estratégicos se realiza una comparación de los resultados obtenidos en cada una de las 7 dimensiones y se escogen aquellos que se encuentran ubicados entre la franja de puntuación 4 y 5 (rangos medio alto y alto), de esta forma un mineral recomendado como estratégico deberá de forma obligatoria obtener algunos de los puntajes relacionados anteriormente en la dimensión transversal, y por lo menos en una

dimensión temática, dado que los lineamientos acogidos bajo esta última línea temática no son aplicables a la todos los minerales evaluados. (Agencia Nacional de Minería - Grupo de Promoción et al., 2023).

Bajo el criterio anterior en el documento no se recomiendan las tierras raras como mineral estratégico dado que, a pesar de tener un puntaje de 4 en el componente transversal, no se le otorgó ningún puntaje alto en alguna de las categorías de la dimensión temática. Este aspecto resulta interesante, dado que como se mencionó anteriormente los ETR son materiales indispensables en el desarrollo de la industria asociado a la transición energética el cual es un componente específico de la dimensión temática y en el cual se le otorgó a los ETR un puntaje bajo.

Según el documento “Determinación de minerales de interés estratégico para Colombia”:

“El lineamiento, Demanda de minerales para la transición energética, es consecuente con las políticas del Gobierno Nacional, establecidas en un principio, por la Ley 2099 de 2021 que moderniza la legislación colombiana en términos de transición energética, dinamización del mercado energético a través de la utilización, desarrollo y promoción de fuentes no convencionales, reactivación económica del país y, en general, la definición de normas para el fortalecimiento de los servicios públicos de energía eléctrica y gas combustible”.

Por tanto, para este lineamiento se evaluaron tres variables: la participación de cada mineral en la demanda total a 2040, transversalidad en 2040 y variación de la demanda del mineral entre 2020 y 2040 basado en el reporte de la IEA o IRENA (Agencia Internacional de las Energías Renovables). (Agencia Nacional de Minería - Grupo de Promoción et al., 2023).

En el documento anteriormente mencionado, tácitamente se establece que: “para este ejercicio, los minerales de tierras raras se **agruparon**, dado que en el reporte de la IEA se diferenciaban algunos de los demás”. La anterior afirmación permite deducir que el englobar todos los elementos que conforman el subgrupo de tierras raras es un **error** a la hora de evaluar su criticidad para un país, dado que en el mercado, como se estableció en el apartado 4.4, la demanda y aplicación de cada mineral se realiza de forma independiente y no como un conjunto englobado; es por esta razón que de forma correcta, en el reporte de la IEA, los elementos que pertenecen a las tierras raras, se proyectan y evalúan de forma individual, como el Neodimio (Nd), el cual se establece como material crítico en la transición energética global. (Agencia Nacional de Minería - Grupo de Promoción et al., 2023; Gielen, 2021).

Es importante entender que la denominación de Elementos de tierras raras, como se estableció al inicio de esta tesis, es solo un nombre comercial con el que se busca englobar estos elementos, esto significa que no existe ningún criterio que impida o limite la evaluación de cada elemento por aparte o que impida o limite la comercialización de cada elemento de forma individual, por ende la evaluación de la criticidad de estos ETR se debe realizar de forma independiente, permitiendo categorizar cuales de estos elementos que pertenecen a esta denominación, sí pueden ser catalogados como críticos para la nación y alrededor de los cuales se pueda generar una legislación que regule su uso y aprovechamiento, como el que se puede realizar a partir de las cenizas del carbón.

En este ámbito y bajo los estándares que se realizó la clasificación y posterior recomendación de minerales estratégicos en el documento, “Determinación de minerales de interés estratégico para Colombia”, es que posteriormente la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), emite el documento “Anexo 4 – minerales estratégicos dentro del plan

nacional de desarrollo minero 2024 – 2035”, en el que no están incluidos los ETR, ni como grupo, ni de forma individual, dejando ver que la falta de especificidad en cuanto a la evaluación de estos minerales, excluye a toda actividad dirigida en pro de la extracción y beneficio de estos elementos, incluyendo aquellas que se puedan generar entorno al aprovechamiento de las cenizas del carbón como fuente alterna, de los beneficios en materia fiscal como incentivos, acceso a financiamiento, acceso a tecnología y capacitación, y estabilidad regulatoria, con políticas y normativas diseñadas para apoyar la extracción de estos minerales críticos.

Ahora bien, como el proceso de extracción de ETR de las cenizas del carbón es en sí mismo concebido como una planta que busca el beneficio de metales, esta debe estar inscrita dentro del Registro Único de Comercializadores de Minerales (RUCOM), según el artículo 2.2.5.6.1.1.1, de la sección 1 del capítulo 6 del Decreto 1073 de 2015. Sin embargo, la materia prima usada en este proceso no viene directamente de una extracción de un mineral o conjunto de minerales del suelo o del subsuelo, sino que es un desecho generado por diferentes industrias tras la quema de carbón, por ende en un sentido estricto una planta de tratamiento del tipo descrito con anterioridad no debe demostrar la procedencia o trazabilidad de minerales requerida por los artículos 2.2.5.6.4.1 y subsecuentes de la sección 4 del Decreto 1073 de 2015 y el artículo 2.2.5.6.1.1.4 del mismo Decreto. (Decreto 1073 de 2015 - Sector Administrativo de Minas y Energía, 2015, Arts. 2.2.5.6.4.1, 2.2.5.6.4.2, 2.2.5.6.4.3, 2.2.5.6.4.4, 2.2.5.6.4.5, 2.2.5.6.4.6, 2.2.5.6.4.7, 2.2.5.6.4.8, 2.2.5.6.1.1.1, 2.2.5.6.1.1.4. ).

De forma conjunta a la premisa anterior, al leer el artículo 2.2.5.6.2.1. del Decreto 1073 de 2015, adicionado por el Decreto 1421 de 2016, art. 1, el cual trata sobre la

inscripción de las plantas de beneficio en el registro único de comercializadores de minerales, en su parágrafo tres tácitamente expone que:

“Las Plantas de Beneficio sólo podrán beneficiar minerales provenientes de Explotadores Mineros Autorizados, so pena de incurrir en la conducta tipificada en el artículo 160 de la Ley 685 de 2001, y que se le cancele la inscripción en el Registro Único de Comercializadores de Minerales RUCOM, previo el adelantamiento de la respectiva actuación en los términos del Código de Procedimiento Administrativo y de lo Contencioso Administrativo”.

Este apartado deja en un limbo legal si se puede beneficiar un desecho como las tierras raras para la obtención de una materia prima. (Decreto 1073 de 2015 - Sector Administrativo de Minas y Energía, 2015, Art. 2.2.5.6.2.1), desconociendo el potencial económico que estos elementos pueden traer para la Nación. Ejemplo de lo anterior, en el estudio adelantado por Reedy et al., evalúan el potencial de la ceniza del carbón como fuente secundaria de ETR en Estados Unidos, estimando que en las cenizas accesibles a ser beneficiadas contienen ETR por un valor total 97 mil millones de dólares, resaltando así la posibilidad de convertir pasivos ambientales, como los rellenos de cenizas, en activos estratégicos que apoyen la seguridad energética y reduzcan la dependencia de las importaciones de estos elementos, especialmente desde China.

De forma conjunta con lo anterior, es tal la importancia geopolítica global de ocupar una cuota cada vez más grande en el mercado de ETR que incluso se usa actualmente como moneda de cambio en los conflictos armados y económicos actuales, siendo especialmente relevante en las relaciones entre Estados Unidos y Ucrania y entre Estados Unidos y China. En el primer caso siendo usadas de forma

coercitiva como retribución de la deuda adquirida por Ucrania por la ayuda brindada por parte de la administración Biden y luego por la administración Trump en el conflicto que se adelanta con Rusia, argumentando que el acceso a estos minerales es esencial para reducir la dependencia de China y fortalecer la seguridad nacional de EE. UU. En el segundo caso, en la actual guerra comercial librada por el aumento de aranceles a nivel mundial por parte de la administración Trump, China ha anunciado la implementación de controles de exportación sobre ETR esenciales para la industria de alta tecnología y defensa, aumentando la escasez a nivel mundial y obligando a los grandes consumidores como Estados Unidos y Europa a buscar alternativas de abastecimiento de estos elementos, lo cual abre un mercado de miles de millones de dólares para aquellos países que se logren consolidar como fuentes alternas que aseguren y fortalezcan la cadena de suministros de ETR de estas potencias.

#### **5.4 Marco Normativo en Economía Circular y Aprovechamiento de Residuos**

Es bajo los lineamientos concebidos bajo el numeral 3.3.5 del CONPES 4075 de 2022 el cual consolida la política de transición energética, implementando estrategias enfocadas en fomentar el crecimiento económico, energético, tecnológico y ambiental de la nación, que se establece que una de las problemáticas que enfrenta el sector minero energético para aumentar su competitividad y alcanzar un desarrollo económico sostenible es la baja inversión nacional en exploración de minerales estratégicos para la transición energética a nivel nacional.

Bajo este contexto, el CONPES 4075 de 2022 expone que la inversión en exploración minera en Colombia disminuyó un 75% entre los años 2012 y 2019. Estas

bajas inversiones en exploración minera, conllevan a un bajo conocimiento del potencial geológico del territorio, impactando negativamente en el conocimiento sobre la disposición nacional de yacimientos de minerales estratégicos importantes para la transición energética mundial, lo cual deriva en el retraso de la puesta en marcha de proyectos de explotación minera y la disminución de oportunidades para atraer inversión nacional y extranjera que contribuyan al desarrollo económico y social de las regiones productoras del país, ejemplo de ello, son los escasos estudios existentes alrededor de la caracterización química de las cenizas del carbón producidas por diversas industrias a lo largo del territorio nacional, lo cual no permitió su identificación temprana como una posible fuente alterna de ETR y retraso el ingreso de la nación al mercado mundial de estos elementos.

Además, que ha sido hasta la vigencia del año 2022 que bajo la iniciativa del Servicio Geológico Colombiano (SGC), se inició la Investigación geoquímica de Tierras Raras en cenizas de carbón y geotécnica en patios de cenizas de termoeléctricas bajo la cual se desarrolla el Proyecto de Investigación para el Aprovechamiento de carbones y subproductos (Fase tierras raras), pero sin arrojar algún resultado sobre el potencial de este residuo industrial como fuente alterna de ETR hasta la fecha de escrito este documento.

Ahora bien, pese a que los ETR de forma individual si son materiales críticos para la transición energética, a pesar de no estar definidos como tales por la autoridad minera colombiana, tal cual como se explicó en el numeral 5.3, la extracción de estos elementos de las cenizas del carbón, expresando este proceso como un reciclaje dentro del ciclo minero energético del carbón, se puede presuponer en un inicio, como una actividad que va en contravía al numeral 3.3.6 del CONPES 4075 de 2022, el cual establece que una de las problemáticas que enfrenta el sector minero energético para aumentar su competitividad es

la dependencia económica de la producción de carbón y escasos lineamientos para la diversificación de las regiones productoras.

Sin embargo, no se debe presuponer que la mono actividad minera y baja diversificación del mineral extraído, en este caso el carbón, es una deficiencia o problemática que tiene el sector minero para aumentar su competitividad, dado que, como se expuso en el apartado 3.4, la diversificación de una matriz energética, las proyecciones de consumo interno de carbón para la generación de energía y la posibilidad de la entrada de plantas de producción de hidrogeno azul reforzarían en el mediano plazo el sector minero del carbón y en conjunto con la posibilidad de implementar esta actividad de aprovechamiento de los residuos generados para obtener materias primas estratégicas, aumentaría efectivamente la diversificación del sector minero, especialmente en las regiones donde la minería del carbón presupone su principal fuente de ingreso.

El último eje problemático que aborda el CONPES 4075 de 2022, analiza las problemáticas que enfrenta el sector energético del país para avanzar hacia un sistema de bajas emisiones de Gases de efecto invernadero (GEI). En el numeral 3.4.6 destacan la insuficiencia de herramientas de planeación y regulación para la implementación de buenas prácticas de economía circular en el sector minero explicando que:

“En el país los procesos de beneficio en los que se separa el mineral de interés de otros geomateriales desconocen procesos de economía circular para el aprovechamiento de otros minerales como tierras raras, plata, platino, cobre, entre otros. Lo anterior, al considerar que los yacimientos nacionales de minerales como el oro o níquel son polimetálicos. Las colas de relaves o residuos de las minas de oro o níquel tienen grandes posibilidades de reúso, de acuerdo con el tipo de tecnología que se utilice para su reprocesamiento. Alrededor del mundo se han

implementado tecnologías de recuperación de metales de interés dentro de estos residuos de hasta el 70 % (UPME, 2018).”.

Este apartado deja entrever la visión reducida que existe frente al aprovechamiento de los residuos industriales, especialmente en el caso que atañe a este trabajo, de las cenizas del carbón, como fuentes alternas para la obtención de materia primas críticas y primordiales para la transición energética, y al mismo tiempo representan la oportunidad para la entrada en vigor de una legislación que permita y regule la actividad anteriormente mencionada al establecer que:

“El bajo desarrollo de tecnología e innovación en el sector ha dejado de lado las potencialidades que presentan estos residuos(...). Situación que resulta problemática al considerar que estas estrategias resultan alternativas para la solución de la problemática ambiental que se genera en operaciones con altas tasas de producción de estériles.”

Dicha postura no es aislada, lo cual genera inquietud al demostrar el desconocimiento de la importancia de la diversificación de fuentes. Esto se afirma, toda vez que la misma también es apreciable la política nacional de reindustrialización que se concibió a través del documento CONPES 4129 de 2023, en el cual se determina que:

“Colombia tiene una baja generación de valor agregado, un pobre desempeño en productividad, acompañado de un retroceso del aporte del sector industrial y un incipiente desarrollo del sector de servicios basados en innovación y conocimiento. La actividad productiva se ha reprimarizado y la economía tiene una alta dependencia del sector minero energético que ha acompañado el proceso de desindustrialización entendido como la pérdida del aporte de la industria”.

En este sentido se extiende la responsabilidad a las diferentes entidades del orden nacional en implementar acciones encaminadas, desde su misión, en adoptar acciones en favor de impulsar la producción y ensamble de vehículos con tecnologías de cero y/o bajas emisiones en el país, para los modos carretero, fluvial, férreo y marítimo; el fortalecimiento de las cadenas productivas que agreguen valor a minerales estratégicos entre otras, siendo esta última mencionada en la que se podría englobar la extracción de tierras raras desde las cenizas del carbón.

Continuando con lo anterior, en el mismo documento se sugiere que el alcance de las intervenciones propuestas por la política en materia de la transición energética justa, incluye fortalecer todos los sectores estratégicos relacionados con los minerales estratégicos, la siderurgia, producción de piezas, partes, equipos y servicios alrededor de sectores o actividades encadenadas a la producción de energía a partir de fuentes renovables no convencionales que permitan avanzar la movilidad sostenible, reducción de las emisiones contaminantes, mejoramiento de las condiciones de seguridad vial y promoción de la industria nacional.

Sin embargo, pese a que este marco de acción está directamente dirigido a fortalecer las cadenas productivas que agreguen valor a minerales estratégicos para la reindustrialización, se prevé continuar con un régimen extractivista de las materias primas, es decir, no se coloca en la palestra la posibilidad de utilizar fuentes alternas que provean materias primas y que le otorguen a la industria la capacidad de desarrollarse alrededor materiales innovadores. Lo anterior se logra deducir al observar que en el mismo documento se hace hincapié en que: “Colombia cuenta con áreas con alto potencial de minerales estratégicos” y que si bien el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 “Colombia potencia mundial de la vida”, destaca la importancia de delimitar áreas con alto potencial

para la extracción de minerales estratégicos, mediante la asignación de contratos especiales de exploración y explotación para pequeños y medianos mineros organizados bajo figuras asociativas, el país no cuenta con reglamentación y parámetros que regulen los procesos de selección objetiva para otorgar las Áreas para minerales estratégicos, dejando por fuera de forma tajante la idea de fuentes alternas de suministro, que le otorguen a la nación una independencia del recurso, en este caso de los ETR, y que de forma añadida le permita competir en el mercado mundial, aumentando su vínculo con las cadenas de valor.

En el documento del CONPES 4129 de 2023, se menciona que:

“Si bien la minería es un sector estratégico para la reindustrialización, transición energética, soberanía alimentaria y la consolidación de infraestructura pública, aún presenta retos que dificulta su articulación con otras industrias y la consolidación de encadenamientos. Además, a través de la Resolución 1006 del 2023, la ANM actualizó el listado de minerales estratégicos para el país y determinó 17 grupos de minerales considerados vitales no solo para la transformación productiva de la economía, sino además para la transición energética justa, el desarrollo agrícola y la construcción de infraestructura pública.”

Como se expuso previamente, los ETR han sido dejados fuera de este listado de elementos aun cuando su participación como materias primas para el fortalecimiento de cadenas de valor en procesos ligados a la transición energética es reconocido a nivel mundial, lo que permite entender la urgencia de una nueva clasificación de minerales estratégicos para la nación, dado que los marcos normativos y políticas generados alrededor de este tema toman como base este listado el cual, al menos para el ámbito de los ETR, está mal constituido.

Como se explicó en el numeral 4 de esta tesis, y como se ha venido exponiendo a lo largo de este documento en reiteradas ocasiones, el proceso de extracción de ETR de las cenizas del carbón es en sí mismo un reciclaje de un desecho industrial con la finalidad de recuperar materias primas, haciendo al proceso en general parte integral de cualquier política de economía circular y gestión de residuos sólidos que exista o pueda existir y por tanto susceptible a las regulaciones ya establecidas o por establecerse en este ámbito.

Ahora bien, las cenizas del carbón de las centrales termoeléctricas están claramente reguladas y clasificadas como residuos peligrosos bajo el Decreto 4741 de 2005 el cual en su artículo 5 anexo II, las define como residuos peligrosos por corrientes de residuos siempre que contengan alguna de las sustancias referidas en el Anexo I de este mismo artículo, en concentraciones tales que puedan tener alguna característica de peligrosidad referida en el anexo III.

Sin embargo, pese a que el Decreto 4741 de 2005, que de forma parcial reglamenta la prevención y manejo de los residuos peligrosos generados, manejados o gestionados dentro del territorio nacional, existe una clara omisión al no clasificar ninguno de los ETR presentes en las cenizas del carbón como sustancias peligrosas, lo cual va en contravía de los estudios realizados por Yin et al. (2021), quien expone que la inhalación, ingesta o contacto dérmicos con los ETR en forma de lixiviaos o material particulado tiene efectos tóxicos y nocivos en la salud humana a largo plazo, dado que tienden a acumularse en fibras capilares, sangre, tejido cerebral, óseo pulmonar y en el hígado, lo que puede conllevar efectos negativos graves en la salud.

Bajo la misma línea anteriormente establecida, es el Decreto 1076 de 2015 el cual amplía las disposiciones acerca del uso y manejo de residuos considerados peligrosos;

como ejemplo de ello adopta por completo las disposiciones del Decreto 4741 de 2005 lo que conlleva a que también adopte las falencias y vacíos anteriormente expuestos.

Además, expresamente añade en el numeral 10 del artículo 2.2.2.3.2.3, que la competencia de otorgar o negar la licencia ambiental para la: “construcción y operación de instalaciones cuyo objeto sea el almacenamiento, tratamiento, aprovechamiento, recuperación y/o disposición final de residuos o desechos peligrosos, y la construcción y operación de rellenos de seguridad para residuos hospitalarios en los casos en que la normatividad sobre la materia lo permita” es de las Corporaciones Autónomas Regionales; por tanto, toda actividad de beneficio de minerales que dentro de su proceso haga uso de residuos clasificados como peligrosos, como en este caso las cenizas de carbón, deberá tramitar ante la autoridad correspondiente la licencia ambiental en los términos que disponga la ley que estuviese vigente al momento de iniciar dicho trámite.(Decreto 1076 de 2015 - Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015, Art. 2.2.2.3.2.3).

Ahora, si bien las cenizas del carbón no se mencionan tácitamente en el Decreto 2981 de 2013, el cual reglamenta la prestación del servicio público de aseo en Colombia y las gestión de residuos sólidos, estas se pueden considerar como residuos sólidos especiales y aprovechables según las definiciones incorporadas, dado que por su naturaleza, composición, tamaño, volumen y peso, necesidades de transporte, condiciones de almacenaje y compactación, no puede ser recolectados, manejados, tratados o dispuestos normalmente por la persona prestadora del servicio público de aseo; además de ser un material o sustancia que no tiene valor de uso para quien lo genere, pero que es susceptible de aprovechamiento para su reincorporación a un proceso productivo, su gestión también deberá estar regulada por este Decreto.

En este sentido al ser las cenizas del carbón objeto de comercialización entre los generadores y los beneficiadores, según el párrafo del artículo 7 del Decreto 2981 de 2013, la responsabilidad por los impactos causados será del agente económico que ejecute la actividad, en este caso la planta de beneficio que busque la extracción de ETR de las cenizas del carbón, y el transporte del material en todo caso deberá cumplir con las regulaciones establecidas en el capítulo VIII de este Decreto, la cuales especifican los lineamientos para la recolección y transporte selectivo de residuos para aprovechamiento.

Sin embargo, pese a que en el artículo 82 del Decreto 2981 de 2013, se determina que el aprovechamiento de los materiales contenidos en los residuos sólidos tiene como propósitos fundamentales racionalizar el uso y consumo de las materias primas provenientes de los recursos naturales, recuperar valores económicos y energéticos que hayan sido utilizados en los diferentes procesos productivos, aumentar la vida útil de los rellenos sanitarios al reducir la cantidad de residuos a disponer finalmente en forma adecuada, reducir el caudal y la carga contaminante de lixiviados en el relleno sanitario, disminuir los impactos ambientales, tanto por demanda y uso de materias primas como por los procesos de disposición final; es en el artículo 83 donde se menciona que los residuos sólidos deben estar limpios y debidamente separados por tipo de material, y además no deben estar contaminados con residuos peligrosos, metales pesados, ni bifenilos policlorado; es acá donde se muestra la necesidad de una regulación diferencial para las cenizas del carbón, de tal forma que se puedan categorizar como residuos especiales aprovechables que deban ser almacenados y transportados bajo una serie de lineamientos diferenciales que eviten causar un impacto ambiental grave. (Decreto 2981 de 2013 - Regulación del Servicio Público de Aseo, 2013, Arts. 82 y 83).

Finalmente, a pesar de que el vacío legal anteriormente mencionado deja en un limbo la posibilidad de usar las cenizas del carbón como fuente alterna de ETR, los artículos 93 y 94 del Decreto 2981 de 2013 refuerzan la necesidad del uso de estos residuos en procesos de aprovechamiento para introducir las materias primas que se puedan extraer de nuevo en la cadena productiva al establecer que: “Cuando sea viable el desarrollo de proyectos de aprovechamiento, el ente territorial deberá establecer, acorde con el régimen de servicios públicos, una estrategia técnica, operativa y administrativa que garantice la gestión diferencial de residuos aprovechables y no aprovechables”, y en favor del aprovechamiento:

“Con el objeto de fomentar y fortalecer el aprovechamiento de los residuos sólidos, en condiciones adecuadas para la salud y el medio ambiente, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en coordinación con el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, con apoyo de la industria y la participación de las universidades y/o centros de investigación y otras entidades estatales, podrán adelantar estudios de valoración de residuos potencialmente aprovechables, con el fin de promocionar la recuperación de nuevos materiales, disminuir las cantidades de residuos a disponer y reunir la información técnica, económica y empresarial necesaria para incorporar dichos materiales a los procesos productivos”.

Por lo anteriormente expuesto, es el artículo 94 del Decreto 2981 de 2013 el que constituye una de las principales puertas de entrada para la regulación en cuanto al uso y aprovechamiento de las tierras raras presentes en las cenizas del carbón.

Pese a que actualmente existe una dinámica económica global creciente y dinámica en el mercado de los ETR, posicionándolos como recursos estratégicos de gran valor para la seguridad energética de las naciones y la continua fabricación de tecnología de punta

con múltiples aplicaciones, se observa una preocupante miopía institucional desde los poderes ejecutivo y legislativo en Colombia al encontrarse una amplia y marcada ausencia de políticas públicas claras y marcos regulatorios específicos, privando al país de una oportunidad de participación en un mercado de miles de millones de dólares evidenciando una clara desconexión con las dinámicas geopolíticas actuales y orillando al país a seguir operando en la periferia de la economía global, explotando y exportando materias primas convencionales mientras otras naciones capitalizan el verdadero valor agregado que los ETR aportan a la revolución de la transición energética actual.

## **6 BASES PARA EL ESTABLECIMIENTO DE UN MARCO NORMATIVO QUE REGULE EL USO Y APROVECHAMIENTO DE ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS PRESENTES EN LAS CENIZAS DEL CARBÓN EN COLOMBIA**

Sea lo primero señalar que, aunque en Colombia no existe una regulación específica que aborde todo lo relativo al beneficio de cenizas de carbón como residuos industriales para la obtención de elementos de tierras raras, así como su cadena logística y posterior comercialización, es posible encontrar algunas normas que si bien, no se adecúan a la construcción de un marco regulatorio completo, son tangencialmente aplicables al tema, sirviendo de esta manera como un punto de partida para establecer las bases sobre las cuales se podrá desarrollar una legislación que se centre en permitir el aprovechamiento de tierras raras de las cenizas del carbón, otorgándole a esta actividad innovadora en el territorio colombiano, la capacidad de beneficiarse de un marco regulatorio, que fomente la reutilización sostenible de estos residuos industriales y a la nación la posibilidad de aumentar la cadena de valor alrededor de estas materias primas impulsando la

reindustrialización en un marco de transición energética y por último permitiéndole participar el mercado mundial de estos metales.

Este apartado se abordará desde tres ejes temáticos principales, cada uno de los cuales abarcará una serie de temas relevantes, que como mínimo, deberán ser tenidos en cuenta al momento de querer establecer un marco normativo que regule el uso y aprovechamiento de elementos de tierras raras presentes en las cenizas del carbón en Colombia.

### ***6.1 Eje Temático 1: Normativas en las que se puede apoyar una posible regulación***

La creación de una regulación sobre el uso y aprovechamiento de ETR de las cenizas del carbón debería apoyarse en las siguientes normas ya existentes:

#### ***6.1.1 Constitución Política de la República de Colombia de 1991.***

Partiendo de la premisa que los ETR tiene un origen geológico y que su ocurrencia existe en yacimientos primarios o secundarios como se expuso en el apartado 1.2, se puede entender que los ETR estarían amparados por el artículo 8 de las Constitución, al establecer que es obligación del Estado proteger las riquezas naturales de la nación, en conjunto con el artículo 332 que determina que la propiedad del subsuelo y de los recursos naturales no renovables pertenece al Estado, además, del artículo 80 faculta al Estado para planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales garantizando su desarrollo sostenible, incluyendo el pago de regalías como contraprestación económica por su explotación, entendiendo que el beneficio de los minerales hace parte integral de la explotación del recurso, tal cual como está definido en el glosario técnico minero amparado por la Ley 685 de 2001, y por ende regulado por el artículo 360 de la constitución.

En este sentido es importante buscar generar un marco regulatorio concreto y específico que desarrolle los artículos antes mencionados de la Constitución con la finalidad de permitir la inversión desde el sector público y privada en favor del desarrollo e implementación de prácticas sostenibles que impidan la generación de un entorno de ilegalidad en el que se comercialicen estos residuos ricos en metales estratégicos sin que el estado reciba una retribución o compensación económica por ello.

### **6.1.2 *Ámbito minero.***

La Ley 685 de 2001 - Código de Minas, ofrece puntos de apoyo que pueden considerarse como indispensables a la hora de presentar una posible regulación sobre el tema en cuestión. Principalmente, al declarar, en el artículo 13, a la industria minera en todas sus ramas y fases como de utilidad pública e interés social, englobando en este caso actividades de beneficio de minerales sin discriminar en este caso, la fuente del material a ser beneficiado en aras de recuperar una materia prima. Por tanto, pese a la falta de especificidad anteriormente señalada, y dado que el ciclo de recuperación de ETR de las cenizas del carbón, bajo la definición del párrafo 2 del artículo 95 de la Ley 685 de 2001, es un proceso de beneficio en sí mismo, la naturaleza de esta actividad está ligada intrínsecamente a esta normativa, sus disposiciones en materia de beneficio de minerales: artículo 106 de la Ley 685 de 2001; responsabilidad ambiental y manejo de residuos: artículos 85 y 107 de la Ley 685 de 2001; comercialización de minerales: artículo 98 de la Ley 685 de 2001, pago de regalías: artículo 360 de la Constitución Política de Colombia de 1991, inscripción al RUCOM: artículo 2.2.5.6.1.1.1 del Decreto 1073 de 2015 y actividades de control y vigilancia, reguladas bajo el artículo 318 que pueda ejercer la Agencia Nacional de Minería (ANM) en su calidad de entidad competente para regular cualquier

actividad relacionada con la extracción y aprovechamiento de minerales, designada así por el Ministerio de Minas y Energía como autoridad minera bajo el artículo 317 de la Ley 685 de 2001.

### ***6.1.3 Responsabilidades ambientales.***

Dada que el ciclo de extracción de ETR, usando las cenizas del carbón como fuente alterna de suministro de estos elementos, es considerada una actividad de beneficio en sí mismo, por tanto, su operación debe efectuarse siguiendo los lineamientos en materia ambiental y de gestión de los recursos naturales vigentes. En el marco general de protección de protección ambiental y de los recursos naturales, los principales puntos de apoyo a una futura regulación de la actividad antes descrita, la aporta el Decreto 2811 de 1974, en sus artículos 1 y 9, reconociendo que el ambiente es un patrimonio común por lo que tanto el Estado como los particulares deben participar en su preservación y manejo siguiendo seis principios establecidos que permiten hacer uso de manera eficiente de los elementos ambientales y recursos naturales renovables.

En aspectos de vigilancia y control de la actividad de beneficio, El Decreto 1076 de 2015 indica que los procesos de beneficio deben cumplir con la presentación de estudios ambientales e implementar medidas de mitigación del impacto ambiental, acorde a lo suscrito previamente, en el artículo 11 de la Ley 99 de 1993 se establece que los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) son el instrumento básico para la toma de decisiones respecto a estas actividades con potencial de afectar el medio ambiente. En este sentido, la Ley 99 de 1993, en sus artículos 5, numeral 16 y 31, numeral 12, otorgan facultades en este ámbito tanto a las Corporaciones Autónomas Regionales como al propio Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, quienes además deberán, según corresponda la responsabilidad,

evaluar el impacto ambiental que podría tener el ejercicio de esta actividad en los recursos naturales renovables susceptibles a ser contaminados los cuales han sido definidos por el Decreto 2811 de 1974 como el recurso Agua, Aire y Suelo.

#### ***6.1.4 Reciclaje y economía circular***

En este apartado, y dada la importancia que tiene los ETR en la industria de transición energética, el CONPES 4075 de 2022, representa un punto de partida importante a la hora de regular la extracción de estos metales de fuentes alternas como las cenizas del carbón en este caso particular. En la interpretación del numeral 3.3.5 de este documento, se entiende la necesidad de identificar yacimientos de minerales estratégicos, al destacar que la falta de inversión en estudios enfocados en la exploración de recursos naturales críticos ejerce una carga negativa que retrasa el cumplimiento de los acuerdos y pactos ambientales a los que esta suscrita la nación, por ello, y con la finalidad de suplir esta necesidad, se genera una puerta de entrada a las investigaciones alrededor fuentes alternas que suministren este tipo de elementos cuyo punto de partida debe ser el conocimiento de la verdadera composición química de los yacimientos minerales convencionales o no convencionales.

El bajo desarrollo de tecnología e innovación en el sector minero, y la falta de profundización en el conocimiento de la química composicional, ha dejado de lado las potencialidades que presentan los residuos generados en la industria minero - energética como se expone en el numeral 3.4.6 del CONPES 4075 de 2022, destacando que en este sector cuenta con escasas o insuficientes herramientas en materia de economía circular, dado que en los procesos de beneficio usados en la industria minera no se implementan técnicas que permitan la recuperación de otros minerales, concluyendo así que esta

situación resulta problemática, al considerar que estas estrategias de reciclaje y aprovechamiento de otros elementos resultan alternativas para la solución de la problemática ambiental que se genera en operaciones con altas tasas de producción de estériles.

Por último, el Decreto 2981 de 2013, presenta un punto de partida singular y tal vez la principal puerta de entrada para la regulación de los ETR extraídos de las cenizas del carbón además de presentar un singular alineamiento con las temáticas presentadas en el CONPES 4129 de 2023. El Decreto 2981 de 2013, en sus artículos 93 y 94 plantea la necesidad de aunar esfuerzos, desde diferentes actores del sector investigativo, que deriven en un mayor y mejor aprovechamiento de los residuos generados con la finalidad de reintroducir las materias primas para que puedan estar presentes en la cadena productiva. De esta forma se buscaría propender en avanzar en la resolución de distintas problemáticas principales, como las establecidas en el CONPES 4129 DE 2023 que determinan que la Nación presenta una baja generación de valor agregado en la industria conllevando a una reprimarización de la actividad productiva, entre otras ya abordadas en el capítulo 5 Vacíos Normativos En La Legislación COLOMBIANA Frente Al Uso Y Aprovechamiento De Elementos De Tierras Raras Presentes En Las Cenizas Del Carbón de esta tesis.

## **6.2 Eje Temático 2: Los vacíos legales que se deben subsanar**

Al momento de presentar una posible regulación sobre el ciclo de recuperación de ETR de las cenizas del carbón, se debe propender por subsanar, como mínimo, los siguientes vacíos legales identificados alrededor de esta actividad que actualmente generan una incertidumbre jurídica que obstaculiza el desarrollo sostenible de la industria nacional, propicia la pérdida de la diversificación económica de la nación al retrasar su entrada y

participación en un mercado mundial emergente de alta demanda, apalanca la posibilidad de facilitar actividades informales o ilícitas en cuanto a la extracción y comercialización de estos elementos críticos y por último, impide el establecimiento de los mecanismos adecuados para el aprovechamiento de residuos industriales como las cenizas del carbón, contraponiéndose a los principios de la economía circular, gestión eficiente de residuos sólidos y desarrollo sostenible.

Con el fin de abordar de forma sencilla estos vacíos por subsanar, se han agrupado bajo cuatro temáticas principales: 1. Definición y clasificación de los ETR, 2. Regulación ambiental, 3. Regulación minera y beneficio de minerales y 4. Economía circular y aprovechamiento de residuos.

### ***6.2.1 Definición y clasificación de los ETR***

Desde una perspectiva ambiental, actualmente en el marco de la legislación ambiental en Colombia, existe una ausencia en cuanto a la definición de los ETR como sustancias contaminantes, esto a pesar de los efectos adversos que este tipo de metales tienen en la salud y la contaminación que pueden generar al ambiente, los cuales han sido abordados ampliamente en este trabajo. Este vacío dificulta la aplicación de las normativas creadas a fin de proteger los recursos aire, agua y suelo y se evidencia en la Resolución 631 de 2015 bajo la cual se establecen parámetros sobre los vertimientos sin incluir los ETR.

En el ámbito minero, se crea la necesidad de evaluar la criticidad y clasificar de forma individual a los metales que conforman los ETR como minerales de interés estratégico, y no agrupándolos como un grupo, tal como está dispuesto en el Acuerdo 01 de 2023 de la Agencia Nacional de Minería. Esta falta de individualización crea un limbo jurídico para las actividades de extracción de los ETR de fuentes convencionales o alternas,

la comercialización de estas materias y los beneficios fiscales, financiero y de estabilidad regulatoria a los que puede acceder esta actividad, constituyendo entonces uno de los principales y más importantes vacíos a subsanar.

## **6.2.2 Regulación Ambiental (Aire, Agua y Suelo)**

En este apartado, se considera pertinente continuar con un marco legal diferenciado por cada recurso, dada la discriminación realizada en cuanto a la legislación que los regula y el análisis de los vacíos legales que afectan de forma independiente, la protección, uso y aprovechamiento de cada recurso.

### **6.2.2.1 Recurso Aire.**

- Se debe subsanar la brecha normativa presente en los Artículos 2.2.5.1.3.1, 2.2.5.1.3.2, 2.2.5.1.3.3, 2.2.5.1.3.10, 2.2.5.1.7.2 del Decreto 1076 de 2015, dado que no contempla tácitamente a las partículas ultrafinas y compuestos tóxicos de ETR como agentes contaminantes atmosféricos.
- Se deben ampliar el alcance de las sustancias con restricción de almacenamiento que incorpora el artículo 2.2.5.1.3.16 del Decreto 1076 de 2015, en su texto, de tal forma que integre y regule el almacenaje de los ácidos fuertes o compuestos orgánicos que normalmente son usados en la extracción de ETR.

#### *6.2.2.2 Recurso Agua.*

- Se deben definir nuevos criterios específicos y ampliar los ya existentes con el fin de regular el uso del agua en la extracción de ETR de las cenizas del carbón principalmente en los artículos 2.2.3.3.2.8, 2.2.3.2.7.1, 2.2.3.2.8.6, 2.2.3.2.20.2, 2.2.3.3.7.8, 2.2.3.2.20.5, 2.2.3.3.5.19, 2.2.3.2.1.1.3, 2.2.3.2.1.1.2 del Decreto 1076 de 2015.
- En el artículo 2.2.3.2.23.2 del Decreto 1076 de 2015 se deben incluir y definir los límites permisibles para la concentración de ETR en los vertimientos que se generen tras la extracción de estos elementos en los procesos de benéfico que aprovechen las cenizas del carbón como fuente alterna.
- Se debe buscar la modificación de la resolución 631 de 2015 y por subsiguiente del artículo 2.2.3.3.4.13 del Decreto 1076 de 2015 a fin de agregar los ETR dentro de los parámetros de evaluación que deben ser usados en los protocolos de monitoreo de vertimientos.

#### *6.2.2.3 Recurso Suelo*

- Se debe buscar la emisión de directrices claras de tal forma que se aúnen esfuerzos para la realización de los estudios pertinentes a los ácidos orgánicos que pueden ser usados en el proceso de extracción de ETR de las cenizas del carbón y los derivados que se pueden producir durante este proceso, con la finalidad de sustentar la ausencia de estos en el texto del artículo 2.2.3.3.4.3, del Decreto 1076 de 2015, principalmente en el apartado

donde se prohíbe el uso de contaminantes orgánicos persistentes de los que trata el Convenio de Estocolmo o por el contrario ampliar la normativa para que se incluyan y regulen.

- En el artículo 2.2.6.1.1.3 y anexo III del Decreto 1076 de 2015 se deben incluir los ETR como metales pesados, dado que su ausencia actual los deja por fuera de toda regulación y directrices que permitan determinar su peligrosidad.

### **6.2.3 Regulación Minera y Beneficio de Minerales**

En este apartado, es importante mencionar que de forma general la Ley 685 de 2001 se centra en la extracción de minerales del suelo sin contemplar el beneficio de metales de fuentes alternas como los residuos industriales, esto pese a que la actividad de beneficio de minerales es parte integral de la industria minera, por tanto se hace imprescindible la gestión de un marco regulatorio diferenciado para el beneficio de ETR a partir de residuos industriales, dentro del que se deben incluir las cenizas del carbón y que a pesar de su naturaleza diferenciada debe estar ligado intrínsecamente a la Ley 685 de 2001.

Continuando con la premisa anterior, se propone que, la regulación de venta de residuos para su uso en obras, industrias y servicios, planteada en el artículo 30 de la Ley 685 de 2001, debe modificar a fin de ampliarse con la finalidad de incluir específicamente el uso de ceniza de carbón como fuente alterna para la recuperación de ETR.

Se propone la modificación del párrafo tres del artículo 2.2.5.6.2.1 del Decreto 1073 de 2015 adicionado por el Decreto 1421 de 2016, de los artículos 2.2.5.6.4.1 y subsecuentes de la sección 4 del Decreto 1073 de 2015 y el artículo 2.2.5.6.1.1.4 del mismo Decreto, a fin de enmendar el limbo legal generado al establecer que las plantas de

beneficio solo pueden beneficiar minerales de explotadores mineros autorizados y limitar la exigencia del registro de procedencia a los minerales del suelo o subsuelo, de tal forma que toda planta de beneficio que busque el beneficio de ETR de las cenizas del carbón, debe presentar un certificado de procedencia de una empresa autorizada generadora de cenizas de carbón, con la finalidad de mitigar la ilegalidad en cuanto a la combustión indiscriminada de carbón a fin de obtener las cenizas, de tal forma que se propenda por evitar el aumento de emisiones producto de este proceso.

Se propone la posibilidad de plantear la entrega en concesión de botaderos de cenizas para su manejo y explotación una vez se regule la actividad de extracción, además de planear una labor conjunta de gestión de residuos, donde el concesionario pueda realizar el aprovechamiento tanto de los depósitos antiguo de cenizas presentes en los botaderos, como de las cenizas nuevas que se generen por parte de la industria, dándole la libertad al concesionario de establecer contratos comerciales con diferentes fuentes de cenizas de carbón a fin de mantener una competencia justa y evitar la monopolización del recurso.

#### ***6.2.4 Economía Circular y Aprovechamiento de Residuos***

En cuanto a los vacíos legales que deben ser subsanados para poder regular la extracción de ETR de las cenizas del carbón, unos de los principales cambios en el ámbito del aprovechamiento de residuos debe estar dirigido en generar una nueva categoría dentro de la clasificación de residuos sólidos que establece el Decreto 2981 de 2013, dado que las cenizas del carbón no son consideradas enteramente residuos especiales y son excluidas por completo de la definición de residuos aprovechables al contener metales pesados, por tanto se deberían aunar esfuerzos para realizar estudios que permitan generar una categoría en la que quepan las características de estos residuos sólidos industriales.

De igual forma que el apartado anteriormente descrito, existe una usencia en el Decreto 4741 de 2005 y en el Decreto 1076 de 2015 frente a la categorización de las cenizas de carbón como sustancias peligrosas, principalmente por la falta de estudios realizados o evaluados que demuestren o refuten la peligrosidad de estos elementos basados en su potencial toxicidad, por tanto es importante impulsar desde la legislación, la realización de estudios que permitan definir o no estos residuos dentro de la categoría antes mencionada.

El hecho de subsanar el apartado anterior coadyuvaría parcialmente a definir el alcance del artículo 2.2.2.3.2.3 del Decreto 1076 de 2015, principalmente en la aplicación del numeral 10 de este artículo, dado que categorizar o no las cenizas del carbón como una sustancias peligrosas, limitaría o facultaría la competencia de las Corporaciones Autónomas Regionales frente a la expedición de licencias ambientales para la extracción de ETR que usen este residuo como fuente alterna de estos elementos.

### **6.3 Eje Temático 3: Referentes Internacionales y Sinergia Regulatoria**

En este apartado se dará un vistazo general de las diferentes legislaciones internacionales desde las que se pretende de forma explícita o implícita, regular los ETR extraídos de las cenizas del carbón, buscando la identificación de oportunidades en aras de fortalecer la normativa nacional, y aportar valor y robustez a la propuesta de regulación sobre el uso y aprovechamiento de elementos de tierras raras presentes en las cenizas del carbón.

Bajo este contexto, se propone abarcar de forma breve algunos apartados legales muy específicos emitidos por la República Popular de China, los Estados Unidos de América y la Unión Europea en los que se establecen bases importantes que permitirían la

implementación de actividades de reciclaje de ETR, a partir del beneficio de las cenizas del carbón como fuente alterna de estos elementos, en sus territorios. Este apartado se abordará de manera diferenciada por nación, mencionando brevemente los avances legales ha ido sumando, dado que, en ninguna de estas naciones existe una legislación específica que regule por completo esta actividad, a pesar de estar a la vanguardia en cuanto a legislación sobre este tema.

### **6.3.1 República Popular de China**

La Ley de industria del carbón en su artículo noveno, determina la obligación del Estado a fomentar y apoyar la adopción de ciencia y tecnología avanzada mediante el estudio o creación de métodos que mejoren la explotación y utilización de los recursos del carbón. Además, terceriza la responsabilidad instando a las empresas mineras a fortalecer y mejorar su operación y gestión, en aras de logara un aumento en la productividad de estas. (Coal Industry Law of the People's Republic of China, 1996, Art. 9).

Der forma complementaria en el artículo octavo de la Ley de Minería, se establece que, con la finalidad de promover la tecnología avanzada y elevar el conocimiento científico y tecnológico alrededor de la exploración y explotación de minerales, se otorga al Estado la responsabilidad en cuanto al fomento de la investigación minera científica y tecnológica, dejando de esta forma abierta la posibilidad a la innovación y la implementación de nuevas técnicas que permitan una mejor gestión y aprovechamiento de los recursos. (Mineral Resources Law of the People's Republic of China, 2022).

En materia de la responsabilidad ambiental de la industria minera, es la Ley de industria del carbón la que, en su artículo 11, determina la obligatoriedad de cumplimiento de la legislación y regulaciones que propendan por la protección ambiental, de tal manera

que, quienquiera que explote o utilice recursos de carbón, deberá implementar medidas en pro de mitigar y controlar la contaminación y proteger el medio ambiente ecológico.

(Mineral Resources Law of the People's Republic of China, 2022, Art. 11)

Es importante destacar que el juego de palabras “recursos de carbón” usado de forma amplia en la Ley de industria de carbón, deja entrever que en este país no solo se concibe al carbón como un recurso simple, sino que denota la idea de contemplar este recurso desde un punto de vista más complejo, considerándolo una materia prima y al mismo tiempo una fuente de otros recursos, por tanto la ley se amplía, cobijando no solo la explotación de carbón, sino también al aprovechamiento de todo recurso derivado o contenido en el carbón.

En Colombia se hace pertinente la modificación normativa de la percepción del carbón dentro de la normativa colombiana, dado que la implementación de terminología que propenda por abarcar y concebir al carbón no solo como una materia prima sino como una mena de uno o varios minerales que estén presentes en su estructura de forma natural, como se hace con elementos metálicos como el oro o el cobre con la expresión “y sus concentrados”, permitiría la implementación normativas específicas que permitan añadir un valor agregado a la explotación de este recurso mineral, incentivando la investigación en este recurso, dinamizando la economía de los municipios donde se realiza esta actividad minera y propendiendo por la implementación de tecnología de punta que permita no solo la recuperación cada vez más eficiente y sostenible de estos elementos atrapados en la estructura del carbón si no también en el uso de los mismos dentro del programa de reindustrialización del país con visión sostenible en la manufactura de tecnología asociada con el aprovechamiento de energías renovables, llevando al carbón a un estadio de economía circular y sostenible.

### **6.3.2 Unión Europea**

La Unión Europea presenta un marco normativo en el que establece lineamientos que permiten el beneficio de los ETR desde una perspectiva enfocada en la sostenibilidad, economía circular y resiliencia.

Como ejemplo de la premisa anterior, la Unión establece un marco regulatorio en los artículos 6 y 7 del Reglamento (UE) 2024/1252 del Parlamento Europeo y del Consejo, emitido en el año 2024, donde busca el reconocimiento de proyectos estratégicos que estén relacionados con materias primas fundamentales, especialmente si estos proyectos se enfocan en garantizar el flujo de suministro de materias primas, brindándole seguridad a la cadena de suministro y además agrandándole valor añadido al impulsar toda industria alrededor de estas materias que demuestre que existe una viabilidad técnica en su operación, que son sostenibles ambientalmente y responsables socialmente. Además, con el fin de promocionar esta innovación, la Unión Europea establece una serie de ventajas en materia de beneficios transfronterizos y procesos de autorización acelerados, a los cuales puede acceder todo proyecto que cumpla con las características antes mencionadas y supla las necesidades de independencia de recursos extranjeros.

El Reglamento (UE) 2024/1252 del Parlamento Europeo y del Consejo del 2024, de forma adicional promueve la eficiencia y la economía circular en la cadena de valor de las materias primas fundamentales, incentivando el aumento del reciclaje en los Estados miembros de la Unión y en conjunto con la estrategia de Resiliencia de las materias primas fundamentales: trazando el camino hacia un mayor grado de seguridad y sostenibilidad que menciona la importancia de incentivar la investigación y la innovación enfocada en explorar nuevas tecnologías que puedan ser usadas en el sector minero, sustitución y reciclaje de materia primas fundamentales, promueven la posibilidad de establecer una

industria innovadora enfocada en el uso y aprovechamiento de ETR de las cenizas del carbón.

En la Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo: El Pacto Verde Europeo, se aborda la necesidad de realizar una transición hacia una economía desligada del uso intensivo de recursos, por lo que establecen la necesidad de integrar criterios de sostenibilidad en procesos productivos como el tratamiento de subproductos. En este sentido el Documento de Resiliencia de las materias primas fundamentales: trazando el camino hacia un mayor grado de seguridad y sostenibilidad, destaca los requisitos técnicos para la trazabilidad, certificación y evaluación del desempeño ambiental en cada fase de la cadena de valor, implicando la necesidad de definir parámetros de eficiencia y sostenibilidad que se pueden aplicar a la recuperación de ETR de las cenizas de carbón.

Por último, todo proyecto de recuperación de ETR que se quiera establecer en territorio de la unión europea estarían sujetas a las directivas sobre la evaluación de impacto ambiental y otras normativas ambientales que le apliquen, sin embargo, bajo el Reglamento (UE) 2024/1252 del Parlamento Europeo y del Consejo del 2024, se busca establecer un marco que permita agilizar los procesos de autorización para estos proyectos estratégicos de forma que no se vulneren las prerrogativas ambientales ya establecidas.

En Colombia actualmente el documento CONPES 4075 de 2022 habla extensamente sobre los incentivos relacionados con actividades en pro de la transición energética señalando la existencia de insuficientes recursos y estrategias para promover la innovación y conocimiento en transición energética, reconociendo implícitamente la necesidad de desarrollar más y mejores incentivos en esta área. En este sentido la adopción de medidas similares a las planteadas por la Unión Europea permiten agrupar diferentes sectores industriales y comerciales incluyendo la minería y el reciclaje de desechos

industriales en una serie de incentivos orientados a mejorar la productividad, calidad, encadenamientos productivos y sofisticación en las empresas, de esta forma se traza el camino, no solo convertirse en un proveedor que asegure la cadena de suministro mundial de ETR, sino también en un proveedor de tecnología promoviendo la reindustrialización al agregar valor a estos elementos. En este sentido Colombia aseguraría su independencia energética en la promoción, el desarrollo y la utilización de su propia tecnología que aproveche las Fuentes No Convencionales de Energías Renovables, al contar con un suministro interno para la fabricación de dicha tecnología y estaría cumpliendo con tratados internacionales de reducción de huella de carbono y transición energética al darle una tercera vida a la minería de carbón si lograra conjugar la extracción de ETR con la generación de Hidrogeno azul como combustible derivado.

### **6.3.3 *Estados Unidos de América***

Sea lo primero destacar que el Servicio geológico de Estados Unidos (USGS), emite en el año 2021 la Lista de Minerales Críticos, bajo el cual enumera 50 minerales recomendados a ser tenidos en cuenta como minerales críticos y que han de ser tenidos en cuenta en toda política de desarrollo minero – energético de la nación norteamericana. Este listado se estableció con base en una serie de evaluaciones de tipo cuantitativo, semicuantitativo y cualitativo, estableciendo entonces un estándar de evaluación técnica para la evaluación de estos minerales. Es importante destacar que en este listado no se agrupan las tierras raras bajo esta denominación comercial, si no que cada elemento es evaluado de forma independiente de tal forma que la mayoría de los ETR son recomendados como materiales críticos. (U.S. Geological Survey (USGS) & Department of the Interior, 2021).

En las secciones 1 y 3 de la Orden Ejecutiva 13817, identifican la necesidad de alcanzar la independencia en cuanto a la importación de minerales críticos y de forma mancomunada impulsara la exploración y procesamiento nacional, de esta manera se busca garantizar la seguridad de la cadena de suministros de estos materiales maximizando la diversificación de fuentes de las que se puedan obtener estos elementos, por tanto estos preceptos son clave a la hora de plantar la posibilidad de incluir la recuperación de minerales críticos como los ETR de subproductos como las cenizas de carbón. (Executive Order 13817 - A Federal Strategy to Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals, 2017).

Adicionalmente la Ley de Producción de Defensa de 1950 (modificada en 2022) en los artículos 4501 y 4502, reafirma que la capacidad de abastecimiento de materiales críticos que tenga la industria interna de la nación infiere directamente en la seguridad nacional, por tanto, el marco de acción de esta ley se extiende con la finalidad de abarcar la priorización y asignación de estos recursos estratégicos. Este marco legal refuerza la idea de la integración a la cadena de suministros interna de materiales críticos recuperados de subproductos, asegurando de esta forma la independencia energética, tecnológica y económica de la nación. (Defense Production Act of 1950 (as amended in 2022), 2022).

Por último, la Ley de reducción de inflación en el Título I, Sección 10001, propone la aplicación de beneficios fiscales y facilidades de financiamiento a los proyectos que promuevan la innovación en la producción y reciclaje. En este sentido, esta legislación permite la entrada e instauración de plantas de reciclaje de TER de las cenizas del carbón como proyectos piloto y permite la evaluación de la viabilidad antes de ser considerados como una industria en sí misma, dado que le recuperación de ETR de las cenizas de carbón es en sí mismo un proceso de reciclaje innovador en constante cambio. Inflation Reduction

Act of 2022 (Public Law 117-169), 2022).

A continuación se muestra la comparación de referentes regulatorios internacionales sobre el aprovechamiento de ETR a partir de cenizas de carbón: similitudes, diferencias y oportunidades para Colombia.

**Tabla 6.** *Comparativo internacional de marcos regulatorios sobre ETR y oportunidades para Colombia*

<b>Eje / Actor</b>	<b>China</b>	<b>Unión Europea</b>	<b>Estados Unidos</b>	<b>Oportunidades para Colombia</b>
Marco Legal sobre Carbón y Subproductos	Aborda el carbón como recurso integral, incluyendo sus derivados (cenizas, ETR). Aplica conceptos amplios desde la Ley de la Industria del Carbón y la Ley de	Prioriza la sostenibilidad y resiliencia. Aplica enfoque de cadena de valor y economía circular bajo el Reglamento (UE) 2024/1252.	Utiliza leyes estratégicas como la Defense Production Act y la Inflation Reduction Act, centradas en seguridad nacional y estímulos fiscales.	Urge redefinir el carbón como recurso compuesto, no solo energético. La legislación minera y ambiental debe evolucionar para incluir el beneficio de subproductos como actividad estratégica.

<b>Eje / Actor</b>	<b>China</b>	<b>Unión Europea</b>	<b>Estados Unidos</b>	<b>Oportunidades para Colombia</b>
	Recursos Minerales.			
Visión sobre ETR	Fomenta la investigación y adopción tecnológica para recuperación de recursos del carbón, sin una norma específica, pero con apertura legal clara.	Declara a los ETR como materias primas fundamentales e impulsa proyectos estratégicos con trámites ágiles e incentivos.	Trata los ETR de forma individualizada, considerándolos materiales críticos y promueve su recuperación localmente con enfoque de seguridad nacional.	Colombia puede posicionarse como proveedor estratégico si desarrolla una regulación diferencial para ETR como minerales críticos y reconoce su potencial tecnológico y geopolítico.
Mecanismos de Incentivo	Fomento estatal a la innovación minera. No hay incentivos fiscales	Ofrece procesos de autorización rápida, beneficios transfronterizos	Otorga beneficios fiscales y financiamiento directo a proyectos	Hay vacíos en incentivos actuales. El CONPES 4075 reconoce esa falencia. Se

<b>Eje / Actor</b>	<b>China</b>	<b>Unión Europea</b>	<b>Estados Unidos</b>	<b>Oportunidades para Colombia</b>
	específicos, pero se permite investigación aplicada.	y alineación con el Pacto Verde Europeo.	innovadores de reciclaje y recuperación.	requiere una política de fomento a la investigación, beneficios fiscales e integración con la estrategia nacional de transición energética.
Enfoque Ambiental	Obliga a cumplir con regulación ambiental general; abre la puerta a tecnologías limpias sin detallar criterios técnicos.	Requiere evaluaciones de impacto ambiental con énfasis en trazabilidad, sostenibilidad y eficiencia.	Flexibiliza trámites ambientales en proyectos estratégicos sin debilitar el marco ambiental.	Colombia debe incluir los ETR en sus normas de vertimiento y residuos, actualizar el marco de impacto ambiental para procesos de beneficio con subproductos.
Economía Circular	Implícita en la reutilización	Enfoque robusto hacia la	La recuperación de ETR de	Se requiere reconocimiento

<b>Eje / Actor</b>	<b>China</b>	<b>Unión Europea</b>	<b>Estados Unidos</b>	<b>Oportunidades para Colombia</b>
	del carbón como fuente múltiple de recursos.	economía circular; promueve reciclaje e innovación.	cenizas es vista como un proceso de reciclaje estratégico.	normativo de las cenizas como residuo aprovechable. Urge ajustar el Decreto 2981 de 2013 y definir rutas normativas de reciclaje industrial.
Colombia en el contexto internacional	—	—	—	Colombia está en una posición estratégica, con abundantes recursos y necesidad urgente de actualizar su marco jurídico minero-ambiental. Puede aprender de estos modelos para atraer inversión,

<b>Eje / Actor</b>	<b>China</b>	<b>Unión Europea</b>	<b>Estados Unidos</b>	<b>Oportunidades para Colombia</b>
				formalizar el aprovechamiento de ETR y avanzar hacia la reindustrialización verde.

*Nota. Elaboración propia*

## **CONCLUSIONES**

A pesar de que el país no cuenta con depósitos primarios de ETR de relevancia mundial, la recuperación de Elementos de Tierras Raras (ETR) a partir de fuentes secundarias, como las cenizas del carbón, representa una oportunidad estratégica para Colombia en el contexto global de transición energética y demanda tecnológica. Esta alternativa representa un enfoque innovador dentro del marco legal minero, que puede contribuir a diversificar la matriz de suministro nacional y fortalecer la gestión sostenible de recursos minerales en el país.

La creciente demanda global de elementos de tierras raras (ETR) responde a que estos elementos juegan un papel crucial en la transición energética y la revolución tecnológica, siendo ampliamente usados en sectores como la producción de imanes permanentes, baterías de alto rendimiento, y dispositivos electrónicos. Sin embargo, la disponibilidad en el mercado global de ETR está fuertemente controlada por China quien tiene el monopolio actual sobre estos elementos, lo que ha generado preocupaciones sobre

la seguridad de las cadenas de suministro. Esta dinámica del mercado ha incentivado a otros países a explorar fuentes alternativas de ETR, bajo la idea de obtener una independencia energética y tecnológica del gigante asiático, planteando entonces la posibilidad de iniciar proyectos de recuperación de estos elementos a partir de residuos industriales como las cenizas de carbón.

La recuperación de Elementos de Tierras Raras a partir de las cenizas del carbón constituye un proceso complejo y multidisciplinario que se caracteriza por implementar una secuencia lógica de procesos los cuales están agrupados en tres fases principales, pensados en maximizar la eficiencia en la concentración y purificación de estos elementos críticos para la nación. El proceso se hace rentable al encontrar el equilibrio entre las técnicas utilizadas que maximicen el factor de recuperación, el costo de operación de cada uno y el factor de Coult, siendo este último el factor más variable y ligado al mercado mundial de ETR. Sin embargo, teniendo en cuenta que los ETR con mayor abundancia caracterizados en los carbones colombianos son el Lantano, Cerio, Europio, Neodimio los cuales se valoran entre 1 hasta 323 USD por kg, solo es factible determinar la rentabilidad real de dicho proceso con estudios liderados de forma mancomunada entre las instituciones gubernamentales, académicas y la industria donde se fomente la instalación de plantas de beneficio piloto que permitan determinar el conjunto de técnicas adecuadas que permitan la mayor extracción de estos elementos de las cenizas del carbón.

Ahora bien, estudios geoquímicos realizados sobre el carbón en las cuencas de los departamentos de Antioquia, Caldas, Cundinamarca y Boyacá han identificado valores de ETR variables según los distintos autores consultados, lo que, bajo ciertas condiciones de extracción y refinamiento, podría ser económicamente viable. No obstante, la falta de conocimiento geo científico y de seguridad jurídica, limita la posibilidad de establecer

planes piloto donde se permita la construcción de infraestructura especializada en separación y purificación de ETR buscando su aprovechamiento a gran escala, evidenciando la necesidad de inversiones en tecnología y de la creación de políticas públicas orientadas a la investigación y desarrollo en este campo.

La Constitución Política de Colombia de 1991 y la legislación general que regulan el uso y protección sobre los recursos naturales de la nación, establecen principios fundamentales sobre la propiedad y el aprovechamiento de los recursos mineros, sin embargo, adolecen de la especificidad necesaria para regular la actividad de extracción de Elementos de Tierras Raras (ETR) presentes en las cenizas del carbón. Si bien la Constitución designa al Estado como propietario del subsuelo y de los recursos naturales no renovables, y faculta al Estado para intervenir en su explotación, estos mandatos de carácter general requieren un desarrollo normativo detallado que contemple las particularidades de la recuperación de ETR a partir de un desecho industrial.

Así pues, la ausencia de menciones explícitas a los ETR y de los procesos de beneficio que involucren residuos industriales en la normativa colombiana, generan una clara incertidumbre jurídica que dificulta la aplicación directa de la normativa constitucional y la legislación minera vigente a esta actividad específica. Aunque se podría argumentar que los ETR están implícitamente cubiertos al ser elementos químicos presentes en el subsuelo, la falta de un marco regulatorio diseñado específicamente para su recuperación de cenizas de carbón limita la claridad y la seguridad jurídica necesarias para fomentar el desarrollo de esta industria.

La legislación minera colombiana, principalmente regulada por la Ley 685 de 2001 (Código de Minas), se enfoca primordialmente en la extracción de minerales de fuentes geológicas convencionales y no contempla de manera específica los procesos de beneficio

de metales a partir de fuentes alternativas como los residuos industriales, generando importantes ambigüedades legales para la recuperación de Elementos de Tierras Raras (ETR) de las cenizas del carbón.

Las regulaciones ambientales colombianas para la protección de los recursos naturales renovables aire, agua y suelo, listados como vulnerables a ser contaminados, presentan vacíos significativos al no considerar explícitamente a los Elementos de Tierras Raras (ETR) como posibles sustancias contaminantes y al no establecer parámetros específicos para los vertimientos, emisiones o manejo de residuos generados en su proceso de extracción de las cenizas del carbón.

A pesar de que la legislación ambiental, como el Decreto 1076 de 2015, establece mecanismos para el control de emisiones atmosféricas, vertimientos líquidos y manejo de residuos peligrosos, no se incluyen los ETR o los químicos usados en su extracción, dentro de los listados de sustancias controladas, ni se definen límites permisibles para su concentración en los diferentes medios ambientales. Esta omisión dificulta la labor de las autoridades ambientales en la evaluación, seguimiento y control de las actividades de recuperación de ETR, impidiendo la aplicación efectiva de los principios de protección ambiental y desarrollo sostenible. La ausencia de criterios específicos para el uso del agua en estos procesos industriales y la falta de regulación sobre la peligrosidad potencial de los ETR en los residuos generados son ejemplos claros de las brechas normativas que deben ser subsanadas para garantizar una gestión ambiental adecuada de esta actividad.

La evaluación de la criticidad de minerales en Colombia, especialmente los Elementos de Tierras Raras (ETR), ha sido limitada por la falta de metodologías específicas y actualizadas que consideren su relevancia estratégica individual. La clasificación generalizada de Tierras Raras en los estudios de la Agencia Nacional de Minería (ANM) y

la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) excluye a estos elementos de un reconocimiento formal como minerales críticos, obstaculizando su inclusión en marcos regulatorios y beneficios económicos, esta omisión impide el diseño de políticas específicas, acceso a incentivos y financiamiento para su exploración y aprovechamiento, incluso en fuentes secundarias como las cenizas de carbón.

Aunque dentro del marco legal colombiano sobre gestión de residuos sólidos y economía circular se reconoce la importancia del aprovechamiento de residuos y la reincorporación de materiales a la cadena productiva, este presenta inconsistencias y vacíos que dificultan la regulación específica del uso de cenizas de carbón como fuente de Elementos de Tierras Raras (ETR).

Si bien el Decreto 2981 de 2013 establece la necesidad de implementar estrategias para la gestión diferencial de residuos aprovechables, y el CONPES 4075 de 2022 reconoce el potencial de recuperación de metales de interés de residuos industriales, las cenizas del carbón son clasificadas como residuos peligrosos debido a su potencial contenido de sustancias tóxicas, sin antes evaluar de manera diferenciada el potencial de aprovechamiento de los ETR que contienen.

Por ende, la exclusión de las cenizas de carbón de la definición de residuos aprovechables por su posible contenido de metales pesados (categoría dentro de la cual no recaen los ETR) y la falta de una categoría específica para residuos industriales especiales aprovechables evidencian la necesidad de una regulación que equilibre la gestión de los riesgos ambientales asociados a las cenizas con el fomento de su valorización como fuente alternativa de materias primas críticas, alineándose con los principios de la economía circular.

La ausencia de un marco normativo específico y diferenciado para regular el ciclo completo de recuperación de Elementos de Tierras Raras (ETR) presentes en las cenizas del carbón en Colombia impide el desarrollo sostenible de esta industria, obstaculiza la diversificación económica del país y limita su participación en un mercado global de alta demanda de estos materiales críticos. Los vacíos legales identificados en la legislación ambiental, minera y de gestión de residuos generan una incertidumbre jurídica que desincentiva la inversión y la innovación en este campo.

La falta de claridad en la definición y clasificación de los ETR, la ausencia de parámetros ambientales específicos, las ambigüedades en la aplicación de la normativa minera a fuentes de recuperación no convencionales y la exclusión de los ETR de la categoría de minerales estratégicos confluyen en un panorama regulatorio deficiente que no permite el aprovechamiento eficiente y sostenible de este recurso potencial.

El establecimiento de un marco normativo integral que aborde estos vacíos, tomando en consideración referentes internacionales y buscando la sinergia regulatoria, es fundamental para impulsar la reutilización sostenible de las cenizas del carbón, aumentar la cadena de valor alrededor de los ETR, fomentar la reindustrialización en el marco de la transición energética y permitir la participación de Colombia en el mercado mundial de estos metales estratégicos.

Es necesario, analizar las experiencias y los enfoques adoptados en otras jurisdicciones, como la Ley de Industria del Carbón y la Ley de Minería de China, los reglamentos de la Unión Europea sobre materias primas fundamentales y economía circular, y las estrategias de Estados Unidos para asegurar el suministro de minerales críticos, ya que esto, puede aportar valiosas lecciones y mejores prácticas para la regulación colombiana. Si bien no existe una legislación internacional específica para la recuperación

de ETR de cenizas de carbón, los principios y lineamientos establecidos en estas normativas sobre fomento tecnológico, protección ambiental, economía circular y seguridad de suministro son altamente relevantes para el contexto colombiano.

El objetivo primordial del establecimiento de un marco normativo para el aprovechamiento de ETR de cenizas de carbón en Colombia debe ser regular de manera clara y específica esta actividad, creando un ambiente propicio para la inversión, la innovación y la adopción de tecnologías limpias, al mismo tiempo que se garantiza la protección del medio ambiente y la salud humana. Este marco normativo debe promover la reutilización sostenible de las cenizas del carbón, transformando un residuo industrial en una fuente valiosa de materias primas críticas, lo que a su vez fortalecerá las cadenas de valor nacionales y aumentará la competitividad del país en el escenario global.

## **RECOMENDACIONES**

La recuperación de Elementos de Tierras Raras (ETR) a partir de cenizas de carbón debe integrarse como un componente clave en el marco normativo, debido a que las técnicas empleadas en este proceso pueden impactar el aire, agua y suelo, es fundamental que la regulación establezca obligaciones claras en cuanto a estudios de impacto ambiental, permisos, control de emisiones y gestión de residuos, tal como lo exige el Decreto 1076; además, resulta imprescindible definir parámetros y límites permisibles para los ETR y los reactivos utilizados, subsanando vacíos normativos como los presentes en la Resolución 631 de 2015, de este modo, se asegurará que esta actividad se desarrolle bajo principios de sostenibilidad y protección ambiental, fortaleciendo un marco legal robusto que promueva la explotación responsable de esta fuente secundaria estratégica, por tanto se recomienda:

1. Si bien existen reportes preliminares que señalan la presencia de ETR en siete de las doce cuencas carboníferas identificadas en Colombia, y los estudios

consultados sugieren concentraciones potencialmente rentables en algunas muestras de carbón, es crucial incrementar la densidad de muestreo y estandarizar las metodologías de análisis geoquímico para obtener una caracterización más precisa y exhaustiva del potencial de ETR asociado al carbón. Esta ampliación debe incluir la cuantificación de la concentración promedio de ETR en las cenizas de carbón a nivel nacional.

2. En este contexto, se ve necesario el implementar un programa de investigación y desarrollo tecnológico enfocado en la optimización de los procesos de recuperación de ETR a partir de cenizas de carbón, considerando la concentración promedio de ETR en cenizas reportada como 404 ppm a nivel mundial, un valor cercano a los típicos de minerales de yacimientos primarios (483 ppm y 621 ppm). Este programa debe evaluar la eficiencia y rentabilidad de las tres etapas principales del proceso: pretratamiento físico, extracción química y purificación final, adaptando técnicas como la separación por tamaño de partículas, la flotación, la separación magnética y la lixiviación ácida a las características específicas de las cenizas de carbón colombianas.
3. Asimismo, realizar estudios de viabilidad técnico-económica detallados que consideren la complejidad y multidisciplinariedad de los procesos y la suma de las ventajas y desventajas de cada una de las técnicas involucradas. Estos estudios deben analizar la rentabilidad de técnicas específicas como el tostado alcalino seguido de lixiviación alcalina y ácida, que han demostrado aumentar la recuperación global de ETR del 32,2% al 77,6%, así como la influencia del pretratamiento físico en la reducción del consumo de ácidos y la mejora de la eficiencia de la extracción química.

4. Se debe propender por la gestión y desarrollo de un marco regulatorio específico para el uso y aprovechamiento de ETR presentes en las cenizas del carbón en Colombia, fundamentándose en la Constitución Política de 1991, ya que esta establece la protección de las riquezas naturales de la nación, la propiedad estatal del subsuelo y los recursos no renovables, y la facultad del Estado para planificar su manejo y aprovechamiento sostenible, incluyendo el pago de regalías.
5. Integrar al marco regulatorio de la Ley 685 de 2001 (Código de Minas) los principios y lineamientos necesarios que permitan el aprovechamiento de ETR de cenizas de carbón, considerando que la actividad de beneficio de minerales se declara de utilidad pública e interés social y abarca el procesamiento de minerales para la obtención de materias primas. Esto implica regular aspectos como el beneficio de minerales de fuentes alternas, la responsabilidad ambiental, el manejo de residuos, la comercialización y el pago de regalías.
6. Incorporar una regulación ambiental diferencial que permita la extracción de ETR de cenizas de carbón, en la cual se integren los principios del Decreto 2811 de 1974 (Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente), reconociendo el ambiente como patrimonio común y estableciendo la necesidad de su preservación y manejo eficiente. Asimismo, se deben considerar los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) como instrumentos básicos para la toma de decisiones sobre estas actividades, en concordancia con la Ley 99 de 1993 y el decreto 1076 de 2015.
7. Articular el marco regulatorio para el aprovechamiento de ETR de cenizas de carbón con la política de transición energética establecida en el CONPES 4075

de 2022, reconociendo la necesidad de identificar yacimientos de minerales estratégicos y la baja inversión en exploración como factores que retrasan el cumplimiento de acuerdos ambientales. Se debe promover la valorización de residuos como las cenizas del carbón y fomentar la diversificación del sector minero.

8. Considerar el Decreto 2981 de 2013, que regula el servicio público de aseo y la gestión de residuos sólidos, como un punto de partida para la regulación del aprovechamiento de ETR de cenizas de carbón, dado que este Decreto plantea la necesidad de un mayor aprovechamiento de residuos para reintroducir materias primas en la cadena productiva. Es necesario explorar la posibilidad de categorizar las cenizas de carbón dentro de una nueva categoría que integre las características de los residuos especiales y aprovechables.
9. Se propone evaluar y clasificar individualmente los metales que componen los ETR como minerales de interés estratégico, en contraposición a su agrupación actual en el Acuerdo 01 de 2023 de la Agencia Nacional de Minería. Esta individualización clarificará el marco jurídico para las actividades de extracción, comercialización y acceso a beneficios fiscales y regulatorios.
10. Modificar los artículos 2.2.5.1.3.1, 2.2.5.1.3.2, 2.2.5.1.3.3, 2.2.5.1.3.10 y 2.2.5.1.7.2 del Decreto 1076 de 2015 para incluir explícitamente las partículas ultrafinas y compuestos tóxicos de ETR como agentes contaminantes atmosféricos.
11. Ampliar el alcance del artículo 2.2.5.1.3.16 del Decreto 1076 de 2015 para regular el almacenamiento de ácidos fuertes y compuestos orgánicos utilizados en la extracción de ETR.

12. Definir criterios específicos en el Decreto 1076 de 2015 para regular el uso del agua en la extracción de ETR de cenizas de carbón, modificando artículos como el 2.2.3.3.2.8, 2.2.3.2.7.1, 2.2.3.2.8.6, 2.2.3.2.20.2, 2.2.3.3.7.8, 2.2.3.2.20.5, 2.2.3.3.5.19, 2.2.3.2.1.1.3 y 2.2.3.2.1.1.2. Además, se deben establecer límites permisibles para la concentración de ETR en los vertimientos y modificar la Resolución 631 de 2015 para incluir los ETR en los parámetros de evaluación de vertimientos.
13. Realizar estudios sobre los ácidos orgánicos y sus derivados utilizados en la extracción de ETR para determinar su potencial como contaminantes orgánicos persistentes y, de ser necesario, incluirlos en el artículo 2.2.3.3.4.3 del Decreto 1076 de 2015.
14. Analizar las legislaciones internacionales sobre el aprovechamiento de ETR de cenizas de carbón, como la Ley de industria del carbón y la Ley de Minería de la República Popular de China, el Reglamento (UE) 2024/1252 de la Unión Europea, y la Lista de Minerales Críticos y la Orden Ejecutiva 13817 de los Estados Unidos, con el fin de identificar mejores prácticas y lineamientos que puedan ser adaptados al contexto colombiano para fortalecer la regulación nacional. Se debe prestar especial atención al enfoque de la Unión Europea en la sostenibilidad y la economía circular y al enfoque estadounidense en cuanto a la importancia de contar con un criterio propio de evaluación que permita la individualización de los ETR dentro de su clasificación y recomendación como minerales críticos.

## **RECOMENDACIÓN DE UN MARCO REGULATORIO DIFERENCIAL PARA EL APROVECHAMIENTO DE ETR DESDE CENIZAS DE CARBÓN**

A partir del análisis legal realizado en este documento, se propone una estructura normativa orientada a cerrar los vacíos legales que actualmente dificultan el desarrollo del aprovechamiento de los Elementos de Tierras Raras (ETR) contenidos en las cenizas del carbón en Colombia. La ausencia de un marco jurídico específico ha generado una incertidumbre regulatoria que limita el avance de esta industria emergente, obstaculiza el desarrollo industrial sostenible, restringe la diversificación económica y reduce la competitividad del país en el mercado internacional de ETR.

Para superar estas limitaciones, se plantea como prioridad la modificación de normativas clave que actualmente no reconocen ni regulan adecuadamente el potencial estratégico de los ETR derivados de residuos industriales. A continuación, se detallan las propuestas específicas de modificación normativa:

1. Mecanismos de Modificación Normativa a través de Decretos Reglamentarios en Colombia: En el ordenamiento jurídico colombiano, los decretos reglamentarios constituyen una herramienta esencial para desarrollar, complementar o precisar la aplicación de las leyes expedidas por el Congreso de la República. Esta facultad reglamentaria está consagrada en el artículo 189, numeral 11, de la Constitución Política de 1991, y otorga al presidente de la República la potestad de reglamentar las leyes, garantizando su ejecución efectiva. Así, para adaptar el marco normativo vigente al contexto del aprovechamiento de ETR a partir de residuos industriales como las cenizas de carbón, se propone la expedición de decretos reglamentarios específicos, con los siguientes objetivos:

- a. Inicialmente, se propone la modificación del Acuerdo 01 de 2023 de la Agencia Nacional de Minería (ANM). Dado que este acuerdo y no recomiendan a los ETR como minerales estratégicos para el país, basándose en una agrupación de estos elementos que no permite evaluar su importancia individual. La propuesta regulatoria debe buscar la evaluación y clasificación individualizada de los metales que componen los ETR como minerales de interés estratégico. Esta individualización es fundamental para clarificar el marco jurídico de su extracción, comercialización y acceso a beneficios fiscales y regulatorios.
- b. De forma conjunta, se debe abordar la modificación del Decreto 2981 de 2013, que regula el servicio público de aseo y la gestión de residuos sólidos. Aunque este decreto plantea la necesidad de un mayor aprovechamiento de residuos para reintroducir materias primas en la cadena productiva, las cenizas del carbón son clasificadas como residuos peligrosos bajo el Decreto 4741 de 2005, lo cual dificulta su consideración como residuos aprovechables en la práctica. Se propone generar una nueva categoría dentro de la clasificación de residuos sólidos que establezca el Decreto 2981 de 2013, que integre las características de los residuos especiales y aprovechables, permitiendo el uso de las cenizas de carbón como fuente alterna de ETR. Subsanan este punto también ayudaría a definir la competencia de las Corporaciones Autónomas Regionales para otorgar licencias ambientales a plantas de beneficio que usen cenizas de carbón, según el Decreto 1076 de 2015.

Una vez sentadas estas bases, la propuesta regulatoria debe extenderse a la modificación de otras regulaciones mineras y ambientales, apoyándose en los lineamientos de políticas nacionales como el CONPES 4075 de 2022 sobre Transición Energética y el CONPES 4129 de 2023 sobre Política Nacional de Reindustrialización.

Modificación de Otras Regulaciones Mineras, Ambientales, y de Reciclaje y Economía Circular

## 2. Ámbito Minero

(Ley 685 de 2001, Decreto 1073 de 2015): La legislación minera se enfoca principalmente en la extracción de yacimientos convencionales y no regula específicamente el beneficio de metales a partir de residuos industriales.

Propuesta:

- a. Integrar principios y lineamientos específicos para el aprovechamiento de ETR de cenizas de carbón en la Ley 685 de 2001, reconociendo esta actividad de beneficio de metales a partir de fuentes alternas como parte de la industria minera, declarada de utilidad pública e interés social. Esto debe incluir regulación sobre beneficio, responsabilidad ambiental, manejo de residuos, comercialización y pago de regalías.
- b. Modificar el artículo 30 de la Ley 685 de 2001 para incluir explícitamente el uso de ceniza de carbón como fuente alterna para la recuperación de ETR en la regulación de venta de residuos.
- c. Modificar el párrafo tres del artículo 2.2.5.6.2.1 del Decreto 1073 de 2015, y los artículos relacionados con el registro de procedencia (Arts. 2.2.5.6.4.1 y subsecuentes, y 2.2.5.6.1.1.4). Esto busca enmendar el "limbo legal" que limita a las plantas de beneficio a procesar solo minerales de

explotadores autorizados, permitiendo que las plantas que recuperan ETR de cenizas de carbón operen legalmente y requieran un certificado de procedencia de una empresa generadora autorizada, mitigando la ilegalidad.

- d. Considerar la concesión de botaderos de cenizas para su manejo y explotación, permitiendo el aprovechamiento de depósitos antiguos y cenizas nuevas, y estableciendo contratos comerciales para fomentar la competencia y evitar la monopolización.

### 3. Ámbito Ambiental

(Decreto 1076 de 2015, Decreto 2811 de 1974, Ley 99 de 1993, Resolución 631 de 2015):

Las regulaciones ambientales carecen de especificaciones para los ETR y los procesos de su extracción de cenizas de carbón. Es necesaria una regulación ambiental diferencial.

Propuesta:

- a. Recurso Aire: Modificar artículos del Decreto 1076 de 2015 (Arts. 2.2.5.1.3.1, 2.2.5.1.3.2, 2.2.5.1.3.3, 2.2.5.1.3.10, 2.2.5.1.7.2) para incluir explícitamente las partículas ultrafinas y compuestos tóxicos de ETR como agentes contaminantes atmosféricos. Ampliar el alcance del Art. 2.2.5.1.3.16 para regular el almacenamiento de ácidos fuertes y compuestos orgánicos usados en la extracción de ETR.
- b. Recurso Agua: Definir criterios específicos y límites permisibles para la concentración de ETR en los vertimientos generados, modificando artículos relevantes del Decreto 1076 de 2015 (Arts. 2.2.3.3.2.8, 2.2.3.2.7.1, 2.2.3.2.8.6, 2.2.3.2.20.2, 2.2.3.3.7.8, 2.2.3.2.20.5, 2.2.3.3.5.19, 2.2.3.2.1.1.3, 2.2.3.2.1.1.2, 2.2.3.2.23.2). Modificar la Resolución 631 de 2015 y el Art. 2.2.3.3.4.13 del Decreto 1076 para incluir los ETR en los parámetros de

evaluación de vertimientos. Se deben seguir los lineamientos del Decreto 2811 de 1974 sobre el uso y protección del agua.

- c. Recurso Suelo: Realizar estudios sobre los ácidos orgánicos y sus derivados utilizados en la extracción de ETR para determinar si deben incluirse en la normativa sobre contaminantes orgánicos persistentes del Decreto 1076 (Art. 2.2.3.3.4.3). Incluir los ETR como metales pesados en el Decreto 1076 de 2015 (Art. 2.2.6.1.1.3 y anexo III), ya que su ausencia los deja sin regulación sobre peligrosidad. La regulación debe alinearse con el Decreto 2811 de 1974 sobre el uso y conservación del suelo.
- d. Licenciamiento Ambiental: Reafirmar que toda operación de recuperación de ETR de cenizas de carbón requiere una licencia ambiental, y clarificar las competencias de las CARs en relación con la gestión de residuos clasificados como peligrosos utilizados en el proceso. Se deben exigir estudios de impacto ambiental (EIA).

#### 4. Ámbito de Reciclaje y Economía Circular

(Decreto 2981 de 2013, CONPES 4075 de 2022, CONPES 4129 de 2023): El documento destaca que el proceso de extracción de ETR de cenizas de carbón es un reciclaje de un desecho industrial, alineado con políticas de economía circular. Sin embargo, hay inconsistencias y vacíos.

Propuesta:

- a. Reiterar la creación de una nueva categoría en el Decreto 2981 de 2013 para residuos industriales especiales aprovechables como las cenizas del carbón.

- b. Aprovechar la visión de aprovechamiento de residuos y reintroducción de materias primas planteada en el Decreto 2981 (Arts. 93 y 94) para sustentar la regulación.
- c. Apoyarse en el CONPES 4075, que reconoce la necesidad de identificar minerales estratégicos y promueve la valorización de residuos para la transición energética.
- d. Apoyarse en el CONPES 4129, que busca fortalecer las cadenas productivas de minerales estratégicos y la reindustrialización. Reconocer la extracción de ETR de cenizas como una forma de agregar valor a minerales estratégicos para la reindustrialización.
- e. La regulación debe promover la investigación y desarrollo (I+D) en tecnologías de recuperación de ETR de residuos.

En síntesis, la propuesta regulatoria se fundamenta en la necesidad de crear un marco específico y diferenciado para el aprovechamiento de ETR de cenizas de carbón, superando la incertidumbre jurídica actual. Esto implica modificaciones puntuales al Acuerdo 01 de 2023 para la clasificación individual de ETR y al Decreto 2981 de 2013 para la gestión de residuos especiales aprovechables, seguidas de ajustes integrales en la legislación minera (Ley 685, Decreto 1073) y ambiental (Decreto 1076, Resolución 631), así como en el marco de economía circular. La alineación con las políticas de transición energética y reindustrialización (CONPES 4075 y 4129) es clave para fomentar la inversión y el desarrollo de esta industria innovadora. La experiencia internacional, aunque sin legislación específica para este tipo de aprovechamiento, ofrece lineamientos valiosos en fomento tecnológico, protección ambiental y seguridad de suministro

## BIBLIOGRAFÍA

Acuerdo 01 de 2023 - Lineamientos para la Determinación de Minerales Estratégicos, Pub.

L. No. Acuerdo 01 de 2023, Agencia Nacional de Minería - Consejo Directivo 1 (2023).

Agencia Nacional de Minería. (2023). *Ficha Carbón*.

Agencia Nacional de Minería - Grupo de Promoción, Bayter, M., Rodríguez, F., Sierra, H.,

Ortega, M., Tovar, C., García, J., Ruíz, J., Barbosa, H., Rincón, J., & Cañas, W.

(2023). *Determinación de Minerales de Interés Estratégico para Colombia*.

[https://www.anm.gov.co/sites/default/files/RESPUESTA\\_A\\_COMENTARIOS\\_DE\\_LA\\_CIUDADANIA.pdf](https://www.anm.gov.co/sites/default/files/RESPUESTA_A_COMENTARIOS_DE_LA_CIUDADANIA.pdf)

Alfonso, M., Herrera, J. M., Duarte, P., Ibañez, F., Méndez, C., Montaña, J., Vesga, A., &

Rojas, A. (2014). Estudio De Cartografía Geológica A Escala 1:100.000 Del Bloque 6

En El Vichada. In *Penambahan Natrium Benzoat Dan Kalium Sorbat (Antiinversi)*

*Dan Kecepatan Pengadukan Sebagai Upaya Penghambatan Reaksi Inversi Pada Nira Tebu* (Issue 211044).

Alvares Calderón, C. E., & Trujillo Palacio, J. H. (2020). Geopolitics of rare earths: A

strategic natural resource for the multidimensional security of the State. *Revista*

*Científica General Jose Maria Cordova*, 18(30), 335–355.

<https://doi.org/10.21830/19006586.587>

ANDEG. (2021). *GENERACIÓN DE ENERGÍA CON CARBÓN*.

[https://www.andeg.org/wp-content/uploads/2021/09/Generacio%CC%81n-con-carbo%CC%81n-PPT-para-ANLA.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.andeg.org/wp-content/uploads/2021/09/Generacio%CC%81n-con-carbo%CC%81n-PPT-para-ANLA.pdf?utm_source=chatgpt.com)

- Balaram, V. (2019). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 10(4), 1285–1303. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>
- Banerjee, R., Chakladar, S., Chattopadhyay, S. K., & Chakravarty, S. (2024). A comparative study on the association and extractability of rare earth elements from laboratory ash, bottom ash, fly ash: A perspective on Indian coals. *Minerals Engineering*, 213. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108745>
- Barakos, G., Mischo, H., & Gutzmer, J. (2016). An outlook on the rare earth elements mining industry. *AusIMM Bulletin*.  
[https://www.researchgate.net/publication/303140029\\_An\\_outlook\\_on\\_the\\_rare\\_earth\\_elements\\_mining\\_industry](https://www.researchgate.net/publication/303140029_An_outlook_on_the_rare_earth_elements_mining_industry)
- Beus, A. A., & Minnev, D. A. (1972). *Some geological and geochemical features of Muzo - Cosquez Esmerald Zone. Cordillera Oriental - Colombia*.
- Bey, M. (2019, April 8). *The geopolitics of rare earth elements*. RANE.  
<https://worldview.stratfor.com/article/geopolitics-rare-earth-elements>
- Blissett, R. S., Smalley, N., & Rowson, N. A. (2014). An investigation into six coal fly ashes from the United Kingdom and Poland to evaluate rare earth element content. *Fuel*, 119, 236–239. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.11.053>
- BP. (2022). *Statistical Review of World Energy 2022*.  
<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>
- Bustamante, P., García, R., Maya, O., Rodríguez, J., & Aguilar, T. (2021). *Minería de Carbón en Colombia. Transformando el Futuro de la Industria*.

- Cepeda, H. (1987). Tierras Raras. In Ingeominas (Ed.), *Recursos Minerales de Colombia, Tomo II* (Vol. 2, pp. 1010–1019). Ingeominas.
- Chakhmouradian, A. R., & Wall, F. (2012). Rare Earth Elements: Minerals, Mines, Magnets (and More). *Elements*, 8(5), 333–340.  
<https://doi.org/10.2113/gselements.8.5.333>
- Coal Industry Law of the People’s Republic of China, Pub. L. No. Order No. 75, Official Gazette of the People’s Republic of China 1 (1996). <http://www.npc.gov.cn/>
- Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales (CCRR). (2025). *Estándar Colombiano para el Reporte Público de Resultados de Exploración, Recursos y Reservas Minerales (ECRR) - Versión 2025*.
- Comisión Europea. (2019). *Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo: El Pacto Verde Europeo*.  
<https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>
- Comisión Europea. (2020). *Resiliencia de las materias primas fundamentales: trazando el camino hacia un mayor grado de seguridad y sostenibilidad*.  
<https://op.europa.eu/s/nBRd>.
- Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES), & Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2022a). *CONPES 4075 de 2022 - Política de Transición Energética*.  
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4075.pdf>
- Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES), & Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2022b). *CONPES 4075 de 2022 - Política de Transición Energética*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/>

- Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES), & Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2023). *CONPES 4129 de 2023 - Política Nacional de Reindustrialización*.  
[https://sisconpescp.dnp.gov.co/SisCONPESWeb/ctmp/ConpesGente/CONPES\\_GENTE\\_4129.pdf](https://sisconpescp.dnp.gov.co/SisCONPESWeb/ctmp/ConpesGente/CONPES_GENTE_4129.pdf)
- Constitución Política de la República de Colombia, Pub. L. No. Constitución Política de Colombia de 1991, Gaceta Constitucional No. 116 (1991) / Diario Oficial No. 52.964 (8 de diciembre de 2024) 1 (1991).  
[http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/constitucion\\_politica\\_1991.html](http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/constitucion_politica_1991.html)
- Convención sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Larga Distancia (Convenio de Ginebra, 1979), Diario Oficial de las Comunidades Europeas L 171 1 (1979). <https://unece.org/environment-policy/air/lrtap>
- Couto, N., Ferreira, A. R., Lopes, V., Peters, S. C., Mateus, E. P., Ribeiro, A. B., & Pamukcu, S. (2020). Electrolytic recovery of rare earth elements from coal ashes. *Electrochimica Acta*, 359. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136934>
- Cramer, T., Franco, J., Bonilla, A., Poveda, Á., & Amaya, Z. (2011). *CARACTERIZACIÓN DE DEPÓSITOS ALUVIALES CON MANIFESTACIONES DE TANTALIO Y NIOBIO “COLTÁN”, EN LAS COMUNIDADES INDÍGENAS DE MATRACA Y CARANACOA, DEPARTAMENTO DEL GUAINÍA*.
- Dai, S., Ren, D., Chou, C.-L., Finkelman, R. B., Seredin, V. V., & Zhou, Y. (2012). Geochemistry of trace elements in Chinese coals: A review of abundances, genetic types, impacts on human health, and industrial utilization. *International Journal of Coal Geology*, 94, 3–21. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coal.2011.02.003>

- Dai, S., Zhao, L., Hower, J. C., Johnston, M. N., Song, W., Wang, P., & Zhang, S. (2014). Petrology, mineralogy, and chemistry of size-fractioned fly ash from the Jungar power plant, Inner Mongolia, China, with emphasis on the distribution of rare earth elements. *Energy and Fuels*, 28(2), 1502–1514. <https://doi.org/10.1021/ef402184t>
- Dardona, M., Mohanty, S. K., Allen, M. J., & Dittrich, T. M. (2023). From ash to oxides: Recovery of rare-earth elements as a step towards valorization of coal fly ash waste. *Separation and Purification Technology*, 314. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123532>
- De la Hoz, M. (2012). Artículos Las Tierras Raras : elementos claves del Siglo XXI. *Temas de Biología y Geología del NOA*, 2, 39–47. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/11336/91679>
- Decreto 1073 de 2015 - Sector Administrativo de Minas y Energía, Pub. L. No. Decreto 1073 de 2015, Diario Oficial de Colombia 1 (2015). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=107874>
- Decreto 1076 de 2015 - Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, Pub. L. No. Decreto 1076 de 2015, Diario Oficial de Colombia 1 (2015). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297>
- Decreto 2191 de 2003 - Glosario Técnico Minero, Pub. L. No. Decreto 2191 de 2003, Diario Oficial No. 45.231 1 (2003). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=9202>
- Decreto 2811 de 1974 - Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente, Pub. L. No. Decreto 2811 de 1974, Diario Oficial No. 34.001 (1974). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2866>

- Decreto 2981 de 2013 - Regulación del Servicio Público de Aseo, Pub. L. No. Decreto 2981 de 2013, Diario Oficial de Colombia 1 (2013).  
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2752>
- Decreto 4741 de 2005 - Prevención y Manejo de Residuos Peligrosos, Pub. L. No. Decreto 4741 de 2005, Diario Oficial de Colombia No. 46.130 1 (2005).  
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=20837>
- Defense Production Act of 1950 (as amended in 2022), Pub. L. No. 50 U.S.C. Chapter 55, U.S. Code Title 50 - War and National Defense 1 (2022).  
<https://uscode.house.gov/view.xhtml?path=/prelim@title50/chapter55>
- Demartis, M., Aragón, E., Coniglio, J., Pinotti, L., D'Eramo, F., Agulleiro, A. L., Maffini, M., & Petrelli, H. (2012). *Geoquímica y metalogénesis de las pegmatitas y granitos asociados del sector sur del distrito Comechingones, Córdoba*. 28, 103–116.
- Dodbiba, G., & Fujita, T. (2023). Trends in Extraction of Rare Earth Elements from Coal Ashes: A Review. *Recycling*, 8(1), 1–18.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/recycling8010017>
- Executive Order 13817 - A Federal Strategy to Ensure Secure and Reliable Supplies of Critical Minerals, Federal Register, Vol. 82, No. 246 1 (2017).  
<https://www.federalregister.gov/documents/2017/12/26/2017-27899>
- Fidanchevski, E., Angjusheva, B., Jovanov, V., Murtanovski, P., Vladiceska, L., Aluloska, N. S., Nikolic, J. K., Ipavec, A., Šter, K., Mrak, M., & Dolenc, S. (2021). Technical and radiological characterisation of fly ash and bottom ash from thermal power plant. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 330(3), 685–694.  
<https://doi.org/10.1007/s10967-021-07980-w>

- Finley, S., Hosseini, P., Wang, B., & Ginder-Vogel, M. (2025). Aqua regia-based digestion methods for trace rare earth element recovery from coal fly ash. *Resources, Conservation and Recycling*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108093>
- Firdaus, M., Rhamdhani, M. A., Durandet, Y., Rankin, W. J., & McGregor, K. (2016). Review of High-Temperature Recovery of Rare Earth (Nd/Dy) from Magnet Waste. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2(4), 276–295. <https://doi.org/10.1007/S40831-016-0045-9>
- Fu, B., Liu, G., Liu, Y., Cheng, S., Qi, C., & Sun, R. (2016). Coal quality characterization and its relationship with geological process of the Early Permian Huainan coal deposits, southern North China. *Journal of Geochemical Exploration*, 166, 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.04.002>
- Gaffney, A. (2021, February 23). Can Harvesting Rare Earth Elements Solve the Coal Ash Crisis? *Sierra, The Magazine Of The Sierra Club*. <https://www.sierraclub.org/sierra/2021-2-march-april/feature/can-harvesting-rare-earth-elements-solve-coal-ash-crisis>
- Galvis, J., Huguet, A., & Ruge, P. (1972). *Geología de la Amazonia Colombiana*. Boletín Geológico, Ingeominas.
- Gambogi, J. (2019). *2019 Minerals Yearbook. Rare Earths (Advance Release)*. <https://pubs.usgs.gov/myb/vol1/2019/myb1-2019-rare-earths.pdf>
- García, G. R., & Arango, C. M. (2018). *Basaltos de San Pablo: un bloque de un arco de islas en el norte de la cordillera Central de Colombia*.
- García, G. R., García, G. Z., Mejía, M. I., & Cordero, J. G. (2017). *Caracterización petrográfica, geoquímica y geocronología de rocas granitoides Pérmicas al occidente de la Plata y Pacarní – Huila, Valle superior del Magdalena – Colombia*.

- García, G. R., & Tarazona, L. M. (2016). *Caracterización petrográfica y química de rocas de corteza oceánica del Complejo Quebradagrande y comparación con rocas de la unidad Diabasas de San José de Urama*.
- GEOREXP S.A.S. (2012). *Cartografía geológica plancha 254 (san José de ocuné) bloque 9 – departamento del vichada* (Vol. 254).
- Gielen, D. (2021). *Critical Materials for the Energy Transition*. International Renewable Energy Agency. <https://www.irena.org/>
- Goldratt, E. M. ., & Cox, Jeff. (2004). *The goal : a process of ongoing improvement* (3rd ed.). The North River Press Publishing Corporation.
- Gómez Pérez, J. F. (2012). Aprovechamiento de cenizas de carbón mineral producidas en la industria local como material conglomerante en la construcción [UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN]. In *Universidad de Medellín*. <http://hdl.handle.net/11407/65>
- Gómez Rojas, O. (2018). *Modelo genético de minerales y elementos traza en carbones metalíferos de la zona centro de Colombia* [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/68855/30333480.2018.pdf?sequence=1>
- Goodenough, K. M., Wall, F., & Merriman, D. (2018). The Rare Earth Elements: Demand, Global Resources, and Challenges for Resourcing Future Generations. *Natural Resources Research*, 27(2), 201–216. <https://doi.org/10.1007/s11053-017-9336-5>
- Gschneidner Jr, K. A., Bunzli, J. C., & Pecharsky, V. K. (2006). *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*. North-Holland.
- Henao, J. (2019). Identificación de elementos de tierras raras en carbones colombianos [Universidad Nacional de Colombia]. In *Universidad Nacional de Colombia*. <https://doi.org/https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76680>

Herrera Carvajal, D. A., Rincón Bayona, J. E., & Sánchez, S. M. (2021).

COMPORTAMIENTO DE LA QUÍMICA INORGÁNICA DE LOS CARBONES BITUMINOSOS EN EL SINCLINAL CHECUA – LENGUAZAQUE. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 20(1), 12–22.

<https://doi.org/10.19053/1900771x.v20.n1.2020.13379>

Hower, J. C., Dai, S., Seredin, V. V., Zhao, L., Kostova, I. J., Silva, L. F. O., Mardon, S. M., & Gurdal, G. (2013). A note on the occurrence of yttrium and rare earth elements in coal combustion products. *Coal Combustion and Gasification Products*, 5(2), 39–47.

Huang, Q., Noble, A., Herbst, J., & Honaker, R. (2018). Liberation and release of rare earth minerals from Middle Kittanning, Fire Clay, and West Kentucky No. 13 coal sources. *Powder Technology*, 242–252.

Huang, Z., Fan, M., & Tian, H. (2020). Rare earth elements of fly ash from Wyoming’s Powder River Basin coal. *Rare Earths*, 219–226.

Inflation Reduction Act of 2022 (Public Law 117-169), Pub. L. No. Public Law 117-169, U.S. Government Publishing Office (GPO) 1 (2022).

<https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/5376>

Ketris, M. P., & Yudovich, Y. E. (2009). Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*, 78(2), 135–148.

<https://doi.org/10.1016/j.coal.2009.01.002>

Ley 23 de 1973 - Facultades extraordinarias para el Código de Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente, Pub. L. No. Ley 23 de 1973, Diario Oficial No. 34.001 (1973). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2865>

Ley 99 de 1993 - Sistema Nacional Ambiental (SINA), Pub. L. No. Ley 99 de 1993, Diario Oficial de Colombia (1993).

Ley 685 de 2001 - Código de Minas de Colombia, Pub. L. No. Ley 685 de 2001, Diario Oficial No. 44.545 1 (2001).

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=43891>

Li, C., Zhou, C., Li, W., Zhu, W., Shi, J., Wu, L., & Liu, G. (2024). A two-stage process of alkali fusion and organic acid leaching for recovery of critical elements from coal fly ash. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 138, 131–143.

<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.03.047>

Lin, R., Howard, B. H., Roth, E. A., Bank, T. L., Granite, E. J., & Soong, Y. (2017). Enrichment of rare earth elements from coal and coal by-products by physical separations. *Fuel*, 200, 506–520.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.03.096>

Liu, P., Zhao, S., Xie, N., Yang, L., Wang, Q., Wen, Y., Chen, H., & Tang, Y. (2023). Green Approach for Rare Earth Element (REE) Recovery from Coal Fly Ash. *Environmental Science and Technology*, 57(13), 5414–5423.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acs.est.2c09273>

López Africano, P. (1998). *Minería - Guainía: Aspectos geológicos, mineros y ambientales cuenca media y alta de los ríos Guainía e Inírida*. Convenio Andrés Bello – SECAB.

[https://rds.org.co/aa/img\\_upload/44fdd6beac515f4957a4a964392a2da8/mineria\\_guainia.pdf](https://rds.org.co/aa/img_upload/44fdd6beac515f4957a4a964392a2da8/mineria_guainia.pdf)

Mantilla, F. L., Tassinari, C. C., & Mancini, L. H. (2006). *Estudio de isótopos de C, O, Sr y de elementos de tierras raras (REE) en rocas sedimentarias cretácicas de la*

*Cordillera Oriental (Dpto. de Santander, Colombia): Implicaciones paleohidrogeológicas.*

Medidas relacionadas con la exportación de tierras raras, volframio (tungsteno) y molibdeno, Pub. L. No. DS431 (2015).

[https://www.wto.org/english/tratop\\_e/dispu\\_e/cases\\_e/ds431\\_e.htm](https://www.wto.org/english/tratop_e/dispu_e/cases_e/ds431_e.htm)

Mineral Resources Law of the People's Republic of China, Pub. L. No. Revised Version of the Mineral Resources Law, Official Gazette of the People's Republic of China (2022). <http://www.npc.gov.cn/>

Ministerio de Minas y Energía & Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2020). *Plan Energético Nacional 2020-2050: La transformación energética que habilita el desarrollo sostenible.*

[https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN\\_2020\\_2050/Plan\\_Energetico\\_Nacional\\_2020\\_2050.pdf](https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/PEN_2020_2050/Plan_Energetico_Nacional_2020_2050.pdf)

Ministerio de Minas y Energía & Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2021). *Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia.*

[https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia\\_2810.pdf](https://www.minenergia.gov.co/static/ruta-hidrogeno/src/document/Hoja%20Ruta%20Hidrogeno%20Colombia_2810.pdf)

Mokoena, B. K., Mokhahlane, L. S., & Clarke, S. (2022). Effects of acid concentration on the recovery of rare earth elements from coal fly ash. *International Journal of Coal Geology*, 259. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2022.104037>

Orris, G., & Grauch, R. (2002). *Rare Earth Element Mines, Deposits, and Occurrences*. U.S. Geological Survey.

Orris, G., Seo, Y., Briggs, D., Dunlap, P., & Cocker, M. (2018). *Global rare earth element occurrence database*. <https://doi.org/https://doi.org/10.5066/F7DR2TN4>

- Ospina Correa, J., Osorio Cachaya, J., Henao Arroyave, Á., Palacio Acevedo, D., & Giraldo Builes, J. (2021). Retos y oportunidades para la industria minera como potencial impulsor del desarrollo en Colombia. *TecnoLogicas*.
- Pan, J., Hassas, B. V., Rezaee, M., Zhou, C., & Pisupati, S. V. (2021). Recovery of rare earth elements from coal fly ash through sequential chemical roasting, water leaching, and acid leaching processes. *Journal of Cleaner Production*, 284, 124725.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124725>
- Pan, J., Nie, T., Vaziri Hassas, B., Rezaee, M., Wen, Z., & Zhou, C. (2020). Recovery of rare earth elements from coal fly ash by integrated physical separation and acid leaching. *Chemosphere*, 248, 112–126.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126112>
- Peiró, L. T., Méndez, G. V., & Ayres, R. U. (2013). Material Flow Analysis of Scarce Metals: Sources, Functions, End-Uses and Aspects for Future Supply. *Environmental Science & Technology*, 47(6), 2939–2947. <https://doi.org/10.1021/es301519c>
- Penke, M. (2021). Reuse and substitutes of critical resources . In *Nature and Environment, Global issues*. <https://www.dw.com/en/rare-rocks-reuse-and-substitutes-of-critical-resources/a-57148472>
- Pinilla, C., Mieres, F., Szantó, M., & Flores, P. (2021). *Potencial de valorización de residuos en la industria del cemento en América Latina y el Caribe al año 2030*.  
[https://ficem.org/wp-content/uploads/2022/04/Paper\\_Residuos.pdf](https://ficem.org/wp-content/uploads/2022/04/Paper_Residuos.pdf)
- Praneeth, S., Sakr, A. K., Dardona, M., Tummala, C. M., Roy, P. K., & Dittrich, T. M. (2024). Selective separation and recovery of rare-earth elements (REEs) from acidic solutions and coal fly ash leachate by novel TODGA-Impregnated organosilica media. *Chemical Engineering Journal*, 500. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156849>

Protocolo a la Convención de 1979 sobre la contaminación atmosférica transfronteriza a larga distancia relativo a los metales pesados, Naciones Unidas – Programa del Medio Ambiente 1 (1998). <https://www.dipublico.org/11294/protocolo-a-la-convencion-de-1979-sobre-la-contaminacion-atmosferica-transfronteriza-a-larga-distancia-relativo-a-los-metales-pesados-aarhus-24-de-junio-de-1998/>

Ramprasad, C., Gwenzi, W., Chaukura, N., Azelee, N. I. W., Rajapaksha, A. U., Naushad, M., & Rangabhashiyam, S. (2022). Strategies and options for the sustainable recovery of rare earth elements from electrical and electronic waste. *Chemical Engineering Journal*, 442. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135992>

Reedy, R. C., Scanlon, B. R., Bagdonas, D. A., Hower, J. C., James, D., Kyle, J. R., & Uhlman, K. (2024). Coal ash resources and potential for rare earth element production in the United States. *International Journal of Coal Science and Technology*, 11(1). <https://doi.org/10.1007/s40789-024-00710-z>

Reglamento (UE) 2024/1252 del Parlamento Europeo y del Consejo, Pub. L. No.

Reglamento (UE) 2024/1252, Diario Oficial de la Unión Europea, Serie L, 3 de mayo de 2024 1 (2024). <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj>

Resolución 631 de 2015, Pub. L. No. 631 de 2015, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015).

Reyes Caballero, F., Martínez Ovalle, S. A., & Moreno Gutiérrez, M. (2015). Mossbauer characterization of feed coal, ash and fly ash from a thermal power plant. *Hyperfine Interact*, 8.

Ríos Bolívar, H., & Marroquín Arreola, J. (2013). Innovación tecnológica como mecanismo para impulsar el crecimiento económico. Evidencia regional para México. *Contaduría y Administración*.

- Rodríguez, G., Zapata, G. G., Arango, M. I., & Bermúdez, J. G. (2017). *Caracterización petrográfica, geoquímica y geocronología de rocas granitoides Pérmicas al occidente de la Plata y Pacarní – Huila, Valle Superior del Magdalena – Colombia.*
- Rosita, W., Perdana, I., Bendiyasa, I. M., Anggara, F., Petrus, H. T. B. M., Prasetya, A., & Rodliyah, I. (2024). Sequential alkaline-organic acid leaching process to enhance the recovery of rare earth elements from Indonesian coal fly ash. *Journal of Rare Earths*, 42(7), 1366–1374. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2023.09.001>
- Seredin, V., & Dai, S. (2012). Coal deposits as potential alternative sources for lanthanides and yttrium. *International Journal of Coal Geology*, 67–93.
- Seredin, V., & Finkelman, R. (2008). Metalliferous coals: A review of the main genetic and geochemical types. *International Journal of Coal Geology*, 253–289.
- Stojković, M., Ristić, M., Đolić, M., Perić Grujić, A., & Onjia, A. (2024). Recovery of Rare Earth Elements from Coal Fly and Bottom Ashes by Ultrasonic Roasting Followed by Microwave Leaching. *Metals*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/met14040371>
- Taggart, R. K. (2018). Recovery of Rare Earth Elements from Coal Combustion Ash: Survey, Extraction, and Speciation [Duke University]. In *Thesis*. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/10161/16855>
- Thomas, B. S., & Bhattacharya, S. (2025). Quantification and recovery prospects of critical metals and rare earth elements in Victorian brown coal fly ash: A promising secondary source for critical metal extraction. *Hydrometallurgy*, 232. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106428>
- Thomas, B. S., Dimitriadis, P., Kundu, C., Vuppaladadiyam, S. S. V., Raman, R. K. S., & Bhattacharya, S. (2024). Extraction and separation of rare earth elements from coal

- and coal fly ash: A review on fundamental understanding and on-going engineering advancements. In *Journal of Environmental Chemical Engineering* (Vol. 12, Issue 3). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112769>
- Toache-Pérez, A. D., Bolarín-Miró, A. M., de Jesús, F., & Lapidus-Lavine, G. T. (2022). Una perspectiva global de las tierras raras. *Tópicos de Investigación En Ciencias de La Tierra y Materiales*.
- Toro-Toro, L. M., Moreno-Sánchez, M., & Gómez-Cruz, A. (2015). *Metagabro del Ariari, plutonismo MORB, Cordillera Oriental de Colombia*.
- U.S. Department of Energy. (2022). *Recovery of Rare Earth Elements and Critical Materials from Coal and Coal Byproducts*.  
<https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-05/Report%20to%20Congress%20on%20Recovery%20of%20Rare%20Earth%20Elements%20and%20Critical%20Minerals%20from%20Coal%20and%20Coal%20By-Products.pdf>
- U.S. Geological Survey (USGS), & Department of the Interior. (2021). *2021 Draft List of Critical Minerals - U.S. Geological Survey* (Open-File Report).  
<https://doi.org/10.3133/ofr20211045>
- Ward, C. R. (2016). Analysis, origin and significance of mineral matter in coal: An updated review. *International Journal of Coal Geology*, 165, 1–71.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coal.2016.07.014>
- Wokittel, R. (1960). *Recursos Minerales de Colombia. Tomo X*.
- Wu, G., Wang, T., Chen, G., Shen, Z., & Pan, W. P. (2022). Coal fly ash activated by NaOH roasting: Rare earth elements recovery and harmful trace elements migration. *Fuel*, 324. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124515>

- Wu, M., Qi, C., Chen, Q., & Liu, H. (2023). Evaluating the metal recovery potential of coal fly ash based on sequential extraction and machine learning. *Environmental Research*, 224. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115546>
- Wu, Y., Huang, G., Zhang, P., Yao, Y., Zhao, K., Shen, J., Feng, R., & Chen, N. (2024). Synchrotron-aided exploration of REE recovery from coal fly ashes within a Canadian context. *Chemosphere*, 367. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143562>
- Yin, X., Martineau, C., Demers, I., Basiliko, N., & Fenton, N. J. (2021). The potential environmental risks associated with the development of rare earth element production in Canada. *Environmental Reviews*, 29(3), 354–377. <https://doi.org/https://doi.org/10.1139/er-2020-0115>
- Zhang, W., Rezaee, M., Bhagavatula, A., Li, Y., Groppo, J., & Honaker, R. (2015). A Review of the Occurrence and Promising Recovery Methods of Rare Earth Elements from Coal and Coal By-Products. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 35(6), 295–330. <https://doi.org/10.1080/19392699.2015.1033097>
- Zhang, W., Yang, X., & Honaker, R. Q. (2018). Association characteristic study and preliminary recovery investigation of rare earth elements from Fire Clay seam coal middlings. *Fuel*, 215, 551–560. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.11.075>
- Zhao, L., Ward, C., French, D., & Graham, I. (2013). Mineralogical composition of Late Permian coal seams in the Songzao Coalfield, southwestern China. *International Journal of Coal Geology*, 116–117, 208–226.



**SANTOTO**  
TUNJA

VIGILADA MINEDUCACIÓN - SNIES 1732

TUNJA - BOYACÁ · PBX: (608) 744 0404

**Campus Centro Histórico:**

Calle 19 No. 11 - 64

**Campus Avenida Universitaria:**

Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Calle 48 No. 1 - 235 este.

Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202

**Santoto Services:**

Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106



**Aquí y  
Ahora**

## ANEXO A

Valores de concentración de elementos de tierras raras en el departamento de Cundinamarca obtenidos en los carbones del sinclinal Chueca - Lenguaque mediante la técnica de espectrometría por fluorescencia de rayos x. Datos inéditos obtenidos por el autor.

**Figura 11.** *Análisis de ceniza de carbón. Muestra 1939.*

Compound	Conc	Unit
Na2O	0,238	%
MgO	0,234	%
Al2O3	23,382	%
SiO2	63,386	%
P2O5	0,934	%
SO3	419,6	ppm
Cl	89,2	ppm
K2O	1,059	%
CaO	0,845	%
TiO2	1,121	%
V2O5	285,2	ppm
Cr2O3	104,2	ppm
MnO	39,2	ppm
Fe2O3	1,148	%
NiO	70,0	ppm
CuO	72,6	ppm
ZnO	17,7	ppm
Ga2O3	36,6	ppm
GeO2	8,1	ppm
As2O3	2,8	ppm
Rb2O	53,5	ppm
SrO	485,8	ppm
Y2O3	46,2	ppm
ZrO2	334,3	ppm
Nb2O5	37,4	ppm
SnO2	47,7	ppm
Sb2O3	18,9	ppm
TeO2	51,4	ppm
BaO	200,7	ppm
Nd2O3	33,4	ppm
Eu2O3	36,2	ppm
Yb2O3	5,6	ppm
OsO4	0,0	ppm
IrO2	0,0	ppm
Tl2O3	0,6	ppm
PbO	3,3	ppm
ThO2	22,6	ppm
CO2	0,000	%
OH	0,000	%
Re	0,0	ppm

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1026285 Y:1067908 Z: 2866. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID 3116).*

**Figura 12.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 1944.

Compound	Conc	Unit
Na2O	0,229	%
MgO	0,292	%
Al2O3	26,390	%
SiO2	59,051	%
P2O5	0,941	%
SO3	589,8	ppm
Cl	0,0	ppm
K2O	1,088	%
CaO	0,545	%
TiO2	1,074	%
V2O5	477,4	ppm
Cr2O3	145,8	ppm
MnO	0,0	ppm
Fe2O3	0,957	%
NiO	154,1	ppm
CuO	84,8	ppm
ZnO	119,3	ppm
Ga2O3	35,6	ppm
GeO2	5,7	ppm
As2O3	2,8	ppm
ZrO2	407,1	ppm
Nb2O5	35,2	ppm
MoO3	32,5	ppm
SnO2	39,7	ppm
Nd2O3	106,3	ppm
Eu2O3	33,9	ppm
OsO4	0,0	ppm
IrO2	0,0	ppm
PbO	36,0	ppm
ThO2	26,0	ppm
CO2	0,000	%
OH	0,000	%

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1027580 Y:1068789 Z: 2866. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID 3116).*

**Figura 13.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 1994.

Compound	Conc	Unit
Na2O	0,857	%
MgO	0,185	%
Al2O3	29,312	%
SiO2	58,771	%
P2O5	0,618	%
SO3	0,179	%
Cl	0,0	ppm
K2O	0,523	%
CaO	0,715	%
TiO2	1,077	%
Cr2O3	0,117	%
MnO	0,0	ppm
Fe2O3	2,264	%
NiO	304,4	ppm
CuO	93,9	ppm
ZnO	50,5	ppm
Ga2O3	31,7	ppm
GeO2	5,7	ppm
As2O3	13,5	ppm
MoO3	84,9	ppm
SnO2	37,4	ppm
Eu2O3	152,5	ppm
OsO4	0,0	ppm
IrO2	0,0	ppm
Tl2O3	2,1	ppm
PbO	27,4	ppm
ThO2	30,9	ppm
CO2	0,000	%
OH	0,000	%

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1042427  
Y:1083507 Z: 2762. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID  
3116).*

**Figura 14.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 1998.

Compound	Conc	Unit
Na2O	0,238	%
MgO	0,703	%
Al2O3	18,813	%
SiO2	63,761	%
P2O5	0,378	%
SO3	0,592	%
Cl	0,0	ppm
K2O	1,228	%
CaO	1,187	%
TiO2	0,913	%
Cr2O3	814,6	ppm
MnO	67,0	ppm
Fe2O3	1,620	%
NiO	257,5	ppm
CuO	46,8	ppm
ZnO	172,7	ppm
Ga2O3	30,7	ppm
GeO2	14,5	ppm
As2O3	1,4	ppm
MoO3	40,5	ppm
SnO2	43,9	ppm
Eu2O3	109,6	ppm
OsO4	0,0	ppm
IrO2	0,0	ppm
Tl2O3	0,9	ppm
PbO	44,9	ppm
ThO2	23,9	ppm
CO2	0,000	%
OH	0,000	%

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1041953  
Y:1083510 Z: 2719. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID  
3116).*

**Figura 15.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 1999.

Compound	Conc	Unit
Na2O	0,612	%
MgO	0,131	%
Al2O3	30,417	%
SiO2	55,434	%
P2O5	1,691	%
SO3	325,6	ppm
Cl	177,5	ppm
K2O	0,600	%
CaO	1,838	%
TiO2	1,040	%
V2O5	295,2	ppm
Cr2O3	85,5	ppm
MnO	82,5	ppm
Fe2O3	1,516	%
NiO	178,5	ppm
CuO	99,0	ppm
ZnO	38,5	ppm
Ga2O3	43,3	ppm
GeO2	12,0	ppm
As2O3	3,7	ppm
Rb2O	34,8	ppm
ZrO2	481,0	ppm
Nb2O5	38,5	ppm
MoO3	8,3	ppm
SnO2	47,0	ppm
TeO2	54,0	ppm
Nd2O3	67,1	ppm
Eu2O3	57,3	ppm
OsO4	0,0	ppm
IrO2	0,0	ppm
Tl2O3	2,4	ppm
PbO	29,3	ppm
ThO2	28,5	ppm
CO2	0,000	%
OH	0,000	%
Re	0,0	ppm
U	5,0	ppm

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1041999 Y:1083434 Z: 2708. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID 3116).*

**Figura 16.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2000.

Compound	Conc	Unit
Na <sub>2</sub> O	0,380	%
MgO	0,267	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,847	%
SiO <sub>2</sub>	57,600	%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,189	%
SO <sub>3</sub>	281,1	ppm
Cl	876,7	ppm
K <sub>2</sub> O	1,121	%
CaO	0,216	%
TiO <sub>2</sub>	0,596	%
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	355,5	ppm
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	136,7	ppm
MnO	0,0	ppm
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,779	%
NiO	107,2	ppm
CuO	71,7	ppm
ZnO	28,6	ppm
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33,1	ppm
GeO <sub>2</sub>	15,0	ppm
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,6	ppm
MoO <sub>3</sub>	23,4	ppm
SnO <sub>2</sub>	33,1	ppm
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35,4	ppm
OsO <sub>4</sub>	0,0	ppm
IrO <sub>2</sub>	0,0	ppm
Tl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,2	ppm
PbO	28,4	ppm
Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0	ppm
ThO <sub>2</sub>	23,7	ppm
CO <sub>2</sub>	0,000	%
OH	0,000	%

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1041999 Y:1083434 Z: 2708. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID 3116).*

**Figura 17.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2001.

Compound	Conc	Unit
Na2O	0,583	%
MgO	0,173	%
Al2O3	21,050	%
SiO2	62,122	%
P2O5	3,473	%
SO3	0,147	%
Cl	114,5	ppm
K2O	0,533	%
CaO	3,680	%
TiO2	1,209	%
V2O5	469,4	ppm
Cr2O3	179,2	ppm
MnO	55,3	ppm
Fe2O3	1,660	%
NiO	366,1	ppm
CuO	198,6	ppm
ZnO	63,9	ppm
Ga2O3	56,1	ppm
GeO2	25,6	ppm
As2O3	8,9	ppm
Rb2O	27,8	ppm
SrO	0,135	%
Y2O3	74,1	ppm
ZrO2	434,0	ppm
Nb2O5	36,0	ppm
SnO2	56,5	ppm
Sb2O3	33,2	ppm
Eu2O3	121,7	ppm
OsO4	0,0	ppm
Tl2O3	0,7	ppm
PbO	31,0	ppm
ThO2	18,6	ppm
CO2	0,000	%
OH	0,000	%

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1041953 Y:1083510 Z: 2719. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID 3116).*

**Figura 18.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2003.

Compound	Conc	Unit
Na2O	0,412	%
MgO	774,0	ppm
Al2O3	27,956	%
SiO2	58,462	%
P2O5	0,474	%
SO3	360,4	ppm
Cl	0,0	ppm
K2O	0,353	%
CaO	0,591	%
TiO2	1,002	%
V2O5	330,6	ppm
Cr2O3	750,5	ppm
MnO	44,5	ppm
Fe2O3	1,073	%
NiO	230,2	ppm
CuO	80,7	ppm
ZnO	38,4	ppm
Ga2O3	35,4	ppm
GeO2	15,8	ppm
As2O3	5,7	ppm
Rb2O	16,0	ppm
SrO	436,2	ppm
Y2O3	55,2	ppm
ZrO2	298,4	ppm
Nb2O5	27,8	ppm
SnO2	37,6	ppm
Sb2O3	14,8	ppm
BaO	180,8	ppm
OsO4	0,0	ppm
IrO2	0,0	ppm
Tl2O3	0,0	ppm
PbO	32,4	ppm
ThO2	18,7	ppm
CO2	0,000	%
OH	0,000	%
Re	0,0	ppm

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1041999  
Y:1083434 Z: 2708. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID  
3116).*

**Figura 19.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2006.

Compound	Conc	Unit
Na2O	0,269	%
MgO	0,283	%
Al2O3	23,788	%
SiO2	57,729	%
P2O5	0,740	%
SO3	838,6	ppm
Cl	713,1	ppm
K2O	1,164	%
CaO	0,462	%
TiO2	0,957	%
V2O5	579,9	ppm
Cr2O3	197,1	ppm
MnO	0,0	ppm
Fe2O3	0,776	%
NiO	205,5	ppm
CuO	93,9	ppm
ZnO	72,5	ppm
Ga2O3	40,9	ppm
GeO2	55,3	ppm
As2O3	4,1	ppm
Rb2O	67,6	ppm
SrO	738,2	ppm
Y2O3	93,8	ppm
ZrO2	237,1	ppm
Nb2O5	24,7	ppm
MoO3	52,5	ppm
SnO2	42,5	ppm
Sb2O3	24,8	ppm
TeO2	43,8	ppm
Nd2O3	89,5	ppm
Eu2O3	52,5	ppm
OsO4	0,0	ppm
IrO2	0,0	ppm
Tl2O3	0,0	ppm
PbO	36,0	ppm
ThO2	20,3	ppm
CO2	0,000	%
OH	0,000	%

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1041999  
Y:1083434 Z: 2708. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID  
3116).*

**Figura 20.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2009.

Compound	Conc	Unit
Na2O	0,354	%
MgO	0,127	%
Al2O3	24,131	%
SiO2	62,339	%
P2O5	2,110	%
SO3	0,100	%
Cl	0,0	ppm
K2O	0,464	%
CaO	1,927	%
TiO2	1,159	%
Cr2O3	135,0	ppm
MnO	1,8	ppm
Fe2O3	1,327	%
NiO	50,4	ppm
CuO	88,0	ppm
ZnO	60,9	ppm
Ga2O3	29,0	ppm
GeO2	6,7	ppm
As2O3	10,8	ppm
MoO3	28,9	ppm
SnO2	31,9	ppm
Nd2O3	74,6	ppm
Eu2O3	46,0	ppm
Yb2O3	0,0	ppm
OsO4	0,0	ppm
IrO2	0,0	ppm
Tl2O3	3,7	ppm
PbO	26,5	ppm
ThO2	34,6	ppm
CO2	0,000	%
OH	0,000	%

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1034207 Y:1075833 Z: 2674. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID 3116).*

**Figura 21.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2011.

Compound	Conc	Unit
Na2O	0,244	%
MgO	0,197	%
Al2O3	24,579	%
SiO2	63,108	%
P2O5	0,243	%
SO3	116,8	ppm
Cl	54,6	ppm
K2O	0,731	%
CaO	0,316	%
TiO2	1,006	%
V2O5	299,1	ppm
Cr2O3	700,6	ppm
MnO	46,5	ppm
Fe2O3	1,129	%
NiO	247,9	ppm
CuO	65,8	ppm
ZnO	63,7	ppm
Ga2O3	34,5	ppm
GeO2	14,4	ppm
As2O3	2,5	ppm
Rb2O	36,0	ppm
SrO	335,5	ppm
Y2O3	59,7	ppm
ZrO2	260,3	ppm
Nb2O5	28,8	ppm
MoO3	28,5	ppm
SnO2	41,0	ppm
OsO4	0,0	ppm
IrO2	0,0	ppm
Tl2O3	0,0	ppm
PbO	25,1	ppm
ThO2	16,5	ppm
CO2	0,000	%
OH	0,000	%

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1034207 Y:1075833 Z: 2674. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID 3116).*

**Figura 22.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2079.

Compound	Conc	Unit
Na <sub>2</sub> O	0,409	%
MgO	0,183	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,221	%
SiO <sub>2</sub>	60,618	%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,161	%
SO <sub>3</sub>	0,105	%
Cl	0,0	ppm
K <sub>2</sub> O	0,492	%
CaO	0,406	%
TiO <sub>2</sub>	1,153	%
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	434,0	ppm
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,104	%
MnO	69,6	ppm
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,893	%
NiO	277,3	ppm
CuO	101,9	ppm
ZnO	121,2	ppm
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	35,7	ppm
GeO <sub>2</sub>	51,5	ppm
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	94,2	ppm
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	33,2	ppm
SnO <sub>2</sub>	53,5	ppm
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27,9	ppm
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	204,4	ppm
OsO <sub>4</sub>	0,0	ppm
IrO <sub>2</sub>	0,0	ppm
PbO	42,0	ppm
CO <sub>2</sub>	0,000	%
OH	0,000	%

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1062959  
Y:1096330 Z: 2743. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID  
3116).*

**Figura 23.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2081.

Compound	Conc	Unit
Na <sub>2</sub> O	0,199	%
MgO	0,259	%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,354	%
SiO <sub>2</sub>	60,172	%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,210	%
SO <sub>3</sub>	0,107	%
Cl	0,0	ppm
K <sub>2</sub> O	0,804	%
CaO	0,262	%
TiO <sub>2</sub>	0,873	%
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	140,3	ppm
MnO	0,0	ppm
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,591	%
NiO	79,1	ppm
CuO	99,2	ppm
ZnO	82,2	ppm
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	28,3	ppm
GeO <sub>2</sub>	13,7	ppm
As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37,7	ppm
MoO <sub>3</sub>	69,6	ppm
SnO <sub>2</sub>	34,6	ppm
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	102,2	ppm
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,3	ppm
OsO <sub>4</sub>	0,0	ppm
IrO <sub>2</sub>	0,0	ppm
Tl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,2	ppm
Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,6	ppm
CO <sub>2</sub>	0,000	%
OH	0,000	%

Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1062779  
Y:1095719 Z: 2855. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID  
3116).

**Figura 24.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2082.

Compound	Conc	Unit
Na2O	0,355	%
MgO	0,113	%
Al2O3	26,143	%
SiO2	56,632	%
P2O5	1,041	%
SO3	146,9	ppm
Cl	0,0	ppm
K2O	0,448	%
CaO	1,250	%
TiO2	1,020	%
Cr2O3	786,0	ppm
MnO	71,8	ppm
Fe2O3	2,430	%
NiO	201,8	ppm
CuO	78,3	ppm
ZnO	28,2	ppm
Ga2O3	29,9	ppm
GeO2	4,3	ppm
As2O3	22,8	ppm
MoO3	40,5	ppm
SnO2	39,4	ppm
TeO2	32,7	ppm
Eu2O3	132,6	ppm
OsO4	0,0	ppm
IrO2	0,0	ppm
PtO2	0,0	ppm
Tl2O3	1,9	ppm
PbO	33,4	ppm
ThO2	32,0	ppm
CO2	0,000	%
OH	0,000	%

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1062163 Y:1095719 Z: 2832. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID 3116).*

**Figura 25.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2083.

Compound	Conc	Unit
Na2O	0,518	%
MgO	0,111	%
Al2O3	24,561	%
SiO2	65,419	%
P2O5	0,661	%
SO3	0,134	%
Cl	0,0	ppm
K2O	0,279	%
CaO	0,770	%
TiO2	1,133	%
V2O5	301,0	ppm
Cr2O3	0,107	%
MnO	70,3	ppm
Fe2O3	1,568	%
NiO	426,3	ppm
CuO	95,7	ppm
ZnO	76,6	ppm
Ga2O3	41,4	ppm
GeO2	34,7	ppm
As2O3	3,6	ppm
Rb2O	16,2	ppm
MoO3	70,1	ppm
SnO2	45,9	ppm
Eu2O3	135,5	ppm
OsO4	0,0	ppm
IrO2	0,0	ppm
Tl2O3	0,3	ppm
PbO	46,5	ppm
Bi2O3	0,0	ppm
ThO2	35,7	ppm
CO2	0,000	%
OH	0,000	%

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1057680 Y:1096278 Z: 3011. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID 3116).*

**Figura 26.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2085.

Compound	Conc	Unit
Na2O	0,171	%
MgO	0,114	%
Al2O3	19,832	%
SiO2	64,983	%
P2O5	0,230	%
SO3	115,9	ppm
Cl	27,9	ppm
K2O	0,407	%
CaO	0,210	%
TiO2	1,239	%
V2O5	284,3	ppm
Cr2O3	273,8	ppm
MnO	10,7	ppm
Fe2O3	0,592	%
NiO	144,3	ppm
CuO	64,0	ppm
ZnO	52,5	ppm
Ga2O3	27,6	ppm
GeO2	4,9	ppm
As2O3	1,8	ppm
MoO3	32,8	ppm
SnO2	41,2	ppm
TeO2	31,1	ppm
Eu2O3	44,0	ppm
Ta2O5	0,8	ppm
OsO4	0,0	ppm
IrO2	0,0	ppm
Tl2O3	0,9	ppm
PbO	30,0	ppm
ThO2	31,6	ppm
CO2	0,000	%
OH	0,000	%

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1060566 Y:1097323 Z: 2796. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID 3116).*

**Figura 27.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2086.

Compound	Conc	Unit
Na2O	0,303	%
MgO	0,104	%
Al2O3	23,004	%
SiO2	64,418	%
P2O5	0,103	%
SO3	753,7	ppm
Cl	41,8	ppm
K2O	0,625	%
CaO	0,189	%
TiO2	1,047	%
V2O5	309,3	ppm
Cr2O3	470,2	ppm
MnO	5,8	ppm
Fe2O3	1,878	%
NiO	199,7	ppm
CuO	58,0	ppm
ZnO	82,5	ppm
Ga2O3	40,0	ppm
GeO2	51,9	ppm
As2O3	15,2	ppm
Nb2O5	37,0	ppm
MoO3	32,3	ppm
SnO2	40,2	ppm
Eu2O3	79,5	ppm
OsO4	0,0	ppm
IrO2	0,0	ppm
Tl2O3	1,3	ppm
PbO	41,4	ppm
ThO2	26,4	ppm
CO2	0,000	%
OH	0,000	%

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1060566 Y:1097323 Z: 2796. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID 3116).*

**Figura 28.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2088.

Compound	Conc	Unit
Na2O	0,251	%
MgO	0,323	%
Al2O3	21,273	%
SiO2	65,149	%
P2O5	0,131	%
SO3	288,7	ppm
Cl	0,0	ppm
K2O	1,064	%
CaO	0,293	%
TiO2	0,915	%
V2O5	334,5	ppm
Cr2O3	993,1	ppm
MnO	34,2	ppm
Fe2O3	1,906	%
NiO	326,0	ppm
CuO	72,3	ppm
ZnO	168,4	ppm
Ga2O3	38,6	ppm
GeO2	13,0	ppm
As2O3	8,1	ppm
Rb2O	63,4	ppm
SrO	202,0	ppm
Nb2O5	33,3	ppm
SnO2	45,6	ppm
Sb2O3	19,6	ppm
TeO2	41,7	ppm
BaO	118,8	ppm
Eu2O3	91,8	ppm
OsO4	0,0	ppm
IrO2	0,0	ppm
Tl2O3	0,0	ppm
PbO	34,9	ppm
ThO2	26,0	ppm
CO2	0,000	%
OH	0,000	%

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1060566  
Y:1097323 Z: 2796. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID  
3116).*

**Figura 29.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2088.

Compound	Conc	Unit
Na2O	0,288	%
MgO	0,103	%
Al2O3	19,215	%
SiO2	70,991	%
P2O5	1,157	%
SO3	928,6	ppm
Cl	0,0	ppm
K2O	0,227	%
CaO	1,313	%
TiO2	1,243	%
V2O5	353,4	ppm
Cr2O3	438,6	ppm
MnO	9,9	ppm
Fe2O3	0,900	%
NiO	230,7	ppm
CuO	76,7	ppm
ZnO	120,7	ppm
Ga2O3	38,4	ppm
GeO2	39,7	ppm
As2O3	2,3	ppm
Rb2O	15,5	ppm
Nb2O5	41,7	ppm
MoO3	66,4	ppm
SnO2	44,5	ppm
Sb2O3	25,3	ppm
TeO2	45,0	ppm
Eu2O3	71,4	ppm
OsO4	0,0	ppm
IrO2	0,0	ppm
Tl2O3	0,7	ppm
PbO	49,3	ppm
ThO2	34,1	ppm
CO2	0,000	%
OH	0,000	%
U	4,2	ppm

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1060566 Y:1097323 Z: 2796. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID 3116).*

**Figura 30.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2089.

Compound	Conc	Unit
Na2O	0,288	%
MgO	0,103	%
Al2O3	19,215	%
SiO2	70,991	%
P2O5	1,157	%
SO3	928,6	ppm
Cl	0,0	ppm
K2O	0,227	%
CaO	1,313	%
TiO2	1,243	%
V2O5	353,4	ppm
Cr2O3	438,6	ppm
MnO	9,9	ppm
Fe2O3	0,900	%
NiO	230,7	ppm
CuO	76,7	ppm
ZnO	120,7	ppm
Ga2O3	38,4	ppm
GeO2	39,7	ppm
As2O3	2,3	ppm
Rb2O	15,5	ppm
Nb2O5	41,7	ppm
MoO3	66,4	ppm
SnO2	44,5	ppm
Sb2O3	25,3	ppm
TeO2	45,0	ppm
Eu2O3	71,4	ppm
OsO4	0,0	ppm
IrO2	0,0	ppm
Tl2O3	0,7	ppm
PbO	49,3	ppm
ThO2	34,1	ppm
CO2	0,000	%
OH	0,000	%
U	4,2	ppm

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1060566 Y:1097323 Z: 2796. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID 3116).*

**Figura 31.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2093.

Compound	Conc	Unit
Na2O	0,155	%
MgO	0,351	%
Al2O3	19,991	%
SiO2	66,510	%
P2O5	0,164	%
SO3	208,0	ppm
Cl	0,0	ppm
K2O	1,177	%
CaO	0,271	%
TiO2	0,894	%
V2O5	403,8	ppm
Cr2O3	445,7	ppm
MnO	12,8	ppm
Fe2O3	2,014	%
NiO	175,3	ppm
CuO	52,1	ppm
ZnO	72,1	ppm
Ga2O3	38,4	ppm
GeO2	53,3	ppm
As2O3	10,1	ppm
Nb2O5	33,8	ppm
MoO3	24,5	ppm
SnO2	38,6	ppm
Eu2O3	94,7	ppm
IrO2	0,0	ppm
Tl2O3	0,8	ppm
PbO	30,0	ppm
ThO2	26,7	ppm
CO2	0,000	%
OH	0,000	%

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1059600  
Y:1097233 Z: 2934. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID  
3116).*

**Figura 32.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2094.

Compound	Conc	Unit
Na2O	0,356	%
MgO	0,129	%
Al2O3	27,243	%
SiO2	59,510	%
P2O5	2,311	%
SO3	554,3	ppm
Cl	0,0	ppm
K2O	0,207	%
CaO	2,594	%
TiO2	1,047	%
Cr2O3	100,0	ppm
MnO	37,9	ppm
Fe2O3	1,270	%
NiO	145,4	ppm
CuO	94,7	ppm
ZnO	44,3	ppm
Ga2O3	33,2	ppm
GeO2	3,3	ppm
As2O3	5,5	ppm
MoO3	76,4	ppm
SnO2	38,8	ppm
Nd2O3	62,4	ppm
Eu2O3	53,9	ppm
Ta2O5	0,0	ppm
OsO4	0,0	ppm
IrO2	0,0	ppm
Tl2O3	2,9	ppm
PbO	26,2	ppm
ThO2	39,0	ppm
CO2	0,000	%
OH	0,000	%
U	13,3	ppm

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1059600 Y:1097233 Z: 2934. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID 3116).*

**Figura 33.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2096.

Compound	Conc	Unit
Na2O	0,266	%
MgO	0,609	%
Al2O3	19,975	%
SiO2	66,011	%
P2O5	612,6	ppm
SO3	149,0	ppm
Cl	72,7	ppm
K2O	1,410	%
CaO	0,243	%
TiO2	0,775	%
V2O5	550,7	ppm
Cr2O3	494,6	ppm
MnO	0,0	ppm
Fe2O3	1,882	%
NiO	461,5	ppm
CuO	49,8	ppm
ZnO	146,4	ppm
Ga2O3	46,1	ppm
GeO2	60,6	ppm
As2O3	2,2	ppm
Nb2O5	35,5	ppm
MoO3	34,5	ppm
SnO2	50,6	ppm
TeO2	48,0	ppm
BaO	224,3	ppm
Eu2O3	124,4	ppm
Tl2O3	0,5	ppm
PbO	82,2	ppm
ThO2	25,4	ppm
CO2	0,000	%
OH	0,000	%

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1059600  
Y:1097233 Z: 2934. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID  
3116).*

**Figura 34.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2141.

Compound	Conc	Unit
Na2O	0,171	%
MgO	610,6	ppm
Al2O3	25,454	%
SiO2	62,516	%
P2O5	0,231	%
SO3	93,5	ppm
Cl	96,4	ppm
K2O	0,333	%
CaO	0,184	%
TiO2	1,181	%
Cr2O3	337,4	ppm
MnO	0,0	ppm
Fe2O3	0,560	%
NiO	162,5	ppm
CuO	65,9	ppm
ZnO	95,3	ppm
Ga2O3	31,6	ppm
GeO2	42,6	ppm
As2O3	0,0	ppm
MoO3	34,8	ppm
SnO2	39,5	ppm
Eu2O3	35,7	ppm
Ta2O5	0,0	ppm
OsO4	0,0	ppm
IrO2	0,0	ppm
Tl2O3	0,4	ppm
PbO	42,0	ppm
CO2	0,000	%
OH	0,000	%
U	10,1	ppm

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1050765  
Y:1093240 Z: 2893. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID  
3116).*

**Figura 35.** Análisis de ceniza de carbón. Muestra 2146.

Compound	Conc	Unit
Na2O	0,278	%
MgO	0,216	%
Al2O3	21,640	%
SiO2	65,445	%
P2O5	0,583	%
SO3	0,106	%
Cl	386,9	ppm
K2O	0,508	%
CaO	0,557	%
TiO2	1,128	%
V2O5	718,8	ppm
Cr2O3	768,2	ppm
MnO	32,1	ppm
Fe2O3	2,849	%
NiO	258,9	ppm
CuO	107,3	ppm
ZnO	132,8	ppm
Ga2O3	47,2	ppm
GeO2	82,0	ppm
As2O3	9,1	ppm
MoO3	106,9	ppm
SnO2	47,4	ppm
Eu2O3	165,3	ppm
OsO4	0,0	ppm
IrO2	0,0	ppm
Tl2O3	1,2	ppm
PbO	39,7	ppm
CO2	0,000	%
OH	0,000	%

*Nota: Datos inéditos obtenidos por el autor en las siguientes coordenadas: X:1051396 Y:1092285 Z: 3021. Sistema de referencia Magna Sirgas Colombia, Bogotá (WKID 3116).*



# SANTOTO TUNJA

VIGILADA MINEDUCACIÓN - SNIES 1732

TUNJA - BOYACÁ · PBX: (608) 744 0404

**Campus Centro Histórico:**

Calle 19 No. 11 - 64

**Campus Avenida Universitaria:**

Edificio Fray Giordano Bruno, O.P.: Av. Universitaria Calle 48 No. 1 - 235 este.

Edificio Santo Domingo de Guzmán: Av. Universitaria No. 45 - 202

**Santoto Services:**

Centro Comercial Unicentro Tunja, Local 1-106



**Aquí y  
Ahora**