



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Estudio conceptual con simulación geoestadística para valorar blancos de exploración de elementos de tierras raras (REE) en el departamento de Antioquia, Colombia**

**Jheyson Andres Bedoya Londoño**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales  
Medellín, Colombia

2022



# **Estudio conceptual con simulación geoestadística para valorar blancos de exploración de elementos de tierras raras (REE) en el departamento de Antioquia, Colombia**

**Jheyson Andres Bedoya Londoño**

Trabajo final de maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Magíster en Ingeniería – Recursos Minerales**

Director:

MSc., Ingeniero Geólogo Luis Hernán Sánchez Arredondo

Grupo de Investigación:

Centro Nacional de Geoestadística (CNG)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales

Medellín, Colombia

2022



*“Geostatistics is of real potential if it is reconciled with the geology of the deposit.”*

*King, H. F., 1982*



# Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Jheyson Andres Bedoya Londoño

Nombre

Fecha: 18/08/2022





## **Agradecimientos**

A la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia por la elaboración del proyecto "*Mapa geoquímico del departamento de Antioquia*" y por facilitar los datos para modelar con técnicas geoestadísticas en el software Isatis. En especial al Profesor MSc. Luis Hernán Sánchez Arredondo por proveer la base de datos de elementos de tierras raras (REE), direccionar el estudio geoestadístico y brindar sus conocimientos para el desarrollo de este gran manuscrito.

A mi familia por su apoyo permanente e incondicional.

## Resumen

### **Estudio conceptual con simulación geoestadística para valorar blancos de exploración de elementos de tierras raras (REE) en el departamento de Antioquia, Colombia**

Los estudios conceptuales son generalmente la primera valoración económica de un proyecto minero. Bajo este contexto, el objetivo principal de este trabajo es formular un estudio técnico y económico de la viabilidad potencial de los recursos minerales de elementos de tierras raras (*Rare Earth Elements*, REE) en el departamento de Antioquia mediante la simulación geoestadística por bandas rotantes del tenor de óxidos totales de tierras raras (*Total Rare Earth Oxides*, TREO) y el análisis de los factores modificadores, para valorar un programa de prospección detallada en los blancos o *targets* de exploración. Los datos del tenor de REE en Antioquia se construyeron durante el 2004-2007 en el proyecto “*Mapa geoquímico del departamento de Antioquia*”. El tenor de TREO se procesó mediante las herramientas computacionales *Isatis*, *ArcMap*, *QGIS* y geoportales de la Agencia Nacional de Minería (ANM) y del Servicio Geológico Colombiano (SGC). Se obtuvo dos *targets* con potencial de prospectividad para desarrollar la cadena de valor de REE en las subregiones del Nordeste y Bajo Cauca, con una estimación de recursos inferidos de 5,444 millones de toneladas a un tenor de 0.09% de TREO, equivalentes a 4.9 millones de toneladas de TREO. Para materializar un negocio minero de REE en Antioquia se requiere inicialmente la inversión de un programa técnico de prospección detallada sobre un área de 2,150 km<sup>2</sup>, presupuestado en 1.84 MUSD.

**Palabras clave:** Tierras Raras, Simulación Geoestadística, Minería, Antioquia-Colombia.

## Abstract

### **Scoping study with geostatistical simulation to assess exploration targets for rare earth elements (REE) in the Antioquia department, Colombia**

Scoping studies are generally the first economic appraisal of a mining project. Under this context, the main objective this work is to formulate a technical and economic study of the potential viability of mineral resources of REE in the Antioquia department through geostatistical simulation by turning bands of total rare earth oxides (TREO) grade and analysis of the modifying factors, to assess a detailed prospecting program in exploration targets. REE grade data in Antioquia were constructed during 2004-2007 in the project "*Geochemical Map of the Antioquia Department*". The TREO grade was processed using the computational tools *Isatis*, *ArcMap*, *QGIS*, and National Mining Agency (ANM) and the Colombian Geological Service (SGC) geoportals. Two targets with prospectivity potential were obtained to develop REE's value chain in *Nordeste* and *Bajo Cauca* subregions, with an inferred resource estimate of 5,444 million tons with TREO grade of 0.09%, equivalent to 4.9 million tons of TREO. To materialize a REE mining business in Antioquia, the investment of a technical program of detailed prospecting is initially required over an area of 2,150 km<sup>2</sup>, budgeted at 1.84 MUSD.

**Keywords: Rare Earths, Geostatistical Simulation, Mining, Antioquia-Colombia.**

## Contenido

<b>Resumen.....</b>	<b>10</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>14</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>17</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>18</b>
<b>1. Consideraciones teóricas .....</b>	<b>24</b>
1.1 Marco teórico .....	24
1.2 Estado del arte.....	29
1.3 Planteamiento del problema .....	41
<b>2. Estudio geoestadístico de REE en Antioquia .....</b>	<b>43</b>
2.1 Análisis Exploratorio de Datos (EDA).....	44
2.1.1 Q-Q plots.....	44
2.1.2 Boxplots .....	46
2.1.3 Histogramas.....	47
2.1.4 Análisis de correlación.....	48
2.2 Variografía .....	49
2.2.1 Semivariogramas experimentales.....	49
2.2.2 Modelo de variogramas.....	51
2.2.3 Validación cruzada .....	53
2.3 Simulación con Bandas Rotantes (BR) .....	54
2.3.1 Escenario promedio .....	55
2.3.2 Escenario optimista .....	56
2.3.3 Escenario pesimista .....	57
2.4 Estimación con Kriging Ordinario de Bloques (KOB).....	58
2.5 Simulación BR vs. Estimación KOB .....	59
2.6 Reporte de recursos minerales inferidos de TREO .....	61
2.6.1 Tenor promedio de TREO vs. <i>Cut-off</i> .....	62
2.6.2 Proporción de recursos inferidos vs. <i>Cut-off</i> .....	62
<b>3. Ambiente geológico de blancos de exploración .....</b>	<b>66</b>
3.1 Geología regional de Antioquia.....	66
3.2 Geología local de blancos de exploración.....	68

<b>4. Factores modificadores de la minería de REE .....</b>	<b>72</b>
4.1 Mineros .....	72
4.2 Procesamiento .....	76
4.3 Metalúrgicos.....	82
4.4 Económicos.....	86
4.5 Mercado.....	91
4.6 Legales .....	96
4.6.1 Marco legal minero .....	96
4.6.2 Marco legal ambiental.....	99
4.6.3 Artículos claves.....	100
4.7 Ambientales .....	102
4.8 Infraestructura .....	107
4.9 Sociales .....	110
4.10 Gubernamentales.....	112
<b>5. Programa técnico y económico de prospección de REE en Antioquia.....</b>	<b>114</b>
5.1 Diseño técnico.....	114
5.2 Presupuesto .....	116
<b>6. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>118</b>
6.1 Conclusiones.....	118
6.2 Recomendaciones.....	119
<b>A. Anexo: Mapa 1. Geología regional de Antioquia por edades .....</b>	<b>120</b>
<b>B. Anexo: Mapa 2. Geología local de targets de exploración de REE en Antioquia</b>	<b>121</b>
<b>C. Anexo: Mapa 3. Topografía de targets de exploración de REE en Antioquia ..</b>	<b>122</b>
<b>D. Anexo: Mapa 4. Títulos mineros y solicitudes en targets de exploración de REE en Antioquia .....</b>	<b>123</b>
<b>E. Anexo: Mapa 5. Contexto ambiental de targets de exploración de REE en Antioquia.....</b>	<b>124</b>
<b>F. Anexo: Mapa 6. Contexto social de targets de exploración de REE en Antioquia</b>	<b>125</b>
<b>G. Anexo: Mapa 7. Infraestructura de targets de exploración de REE en Antioquia</b>	<b>126</b>
<b>H. Anexo: Mapa 8. Bloques de prospección de REE en Antioquia .....</b>	<b>127</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>128</b>

## Lista de figuras

Figura 1. (a) Contenido promedio de TREO en 13 minas (Fernandez, 2017).....	22
Figura 2. Cadena de valor minera de REE (UPME & CRU Consulting, 2018). .....	26
Figura 3. Datos, realidad, simulación condicionada y estimación kriging (Matheron, 1981). .....	27
Figura 4. Representación esquemática del método de bandas rotantes (Samper & Carrera, 1990).....	29
Figura 5. Crecimiento de la demanda de REE con respecto al tamaño del mercado de Colombia (UPME, 2019). .....	35
Figura 6. Mapa geoquímico de Colombia del Neodimio (mg/kg) (Servicio Geológico Colombiano, 2018).....	37
Figura 7. Granos y composición química de la monacita en terrazas aluviales del río Nechí (Kerguelen, 2016). .....	38
Figura 8. Proporciones minerales como subproductos de minería aurífera a gran escala en el aluvión del río Nechí (Lamus et al., 2006). .....	39
Figura 9. Grano trifásico de monacita-xenotima-torita del aluvión del río Nechí (Lamus et al., 2006). .....	40
Figura 10. Contenido de REE en carbones colombianos (Henao, 2019).....	41
Figura 11. Gráfico Q-Q del TREO (ppm) de distribución gaussiana. ....	44
Figura 12. Gráfico Q-Q del TREO de distribución lognormal. ....	45
Figura 13. Gráfico Q-Q del TREO de distribución exponencial.....	45
Figura 14. <i>Boxplot</i> de tenor TREO (ppm). ....	47
Figura 15. <i>Boxplot</i> de tenor TREO gaussiano estandarizado. ....	47
Figura 16. Histograma del tenor TREO. ....	48
Figura 17. Histograma de variable TREO gaussiano estandarizado. ....	48
Figura 18. Semivariograma experimental del tenor TREO. ....	50
Figura 19. Semivariograma experimental del tenor TREO gaussiano. ....	51
Figura 20. Modelo de variograma Exponencial del tenor de TREO. ....	52
Figura 21. Modelo de variograma Exponencial del tenor TREO gaussiano. ....	52
Figura 22. <i>Cross-Validation</i> de variograma Exponencial del tenor TREO.....	53
Figura 23. <i>Cross-Validation</i> de variograma Exponencial del tenor TREO gaussiano.....	54
Figura 24. Escenario promedio de Simulación por BR del tenor TREO.....	56

Figura 25. Escenario optimista de Simulación por BR del tenor TREO.....	57
Figura 26. Escenario pesimista de Simulación por BR del tenor TREO.....	58
Figura 27. Estimación por KOB del tenor TREO.....	59
Figura 28. Tenor TREO real relativo (Simulación BR) vs. Tenor TREO estimado (Estimación KOB).....	61
Figura 29. Curva Tenor promedio TREO vs. <i>Cut-off</i> .....	62
Figura 30. Curva Proporción de recursos inferidos de TREO vs. <i>Cut-off</i> .....	63
Figura 31. Diagrama de tenor TREO versus tonelaje que muestra el tamaño del depósito de REE en Antioquia y algunos representativos del mundo (Jaireth et al., 2014). .....	65
Figura 32. Diagramas de caja de los contenidos de TREO por tipo de depósito y <i>cut-off</i> de exploración de REE (Hou et al., 2021).....	65
Figura 33. Mapa geológico de Antioquia por edades. Escala 1:3,000,000.....	66
Figura 34. Mapa de geología local de <i>targets</i> de exploración de REE en Antioquia. Escala 1:500,000. ....	68
Figura 35. Ciclo geoquímico manto-corteza-superficie para elementos de tierras raras (concentraciones de REE en partes por millón) (Jaireth et al., 2014). .....	70
Figura 36. Radios iónicos <i>versus</i> Carga iónica de REE (Jaireth et al., 2014). .....	71
Figura 37. Criterios de evaluación para minería de REE actualizados (Barakos & Mischo, 2021).....	73
Figura 38. Mapa de topografía de <i>targets</i> de exploración de REE en Antioquia. Escala 1:500,000. ....	75
Figura 39. Esquema de las etapas de procesamiento de REE para cada mineral (Comisión Chilena del Cobre -COCHILCO, 2016). .....	77
Figura 40. Rutas alternativas de proceso para el tratamiento de óxidos metálicos (O. Restrepo Baena, Bustamante Rúa, & Gaviria Cartagena, 2008). .....	77
Figura 41. <i>Flow-sheet</i> de un procesamiento de REE (Kumari et al., 2015).....	78
Figura 42. <i>Flow-sheet</i> para el procesamiento de monacita en USAM (Kumari et al., 2015). .....	78
Figura 43. <i>Flow-sheet</i> de granos de monacita en ácido sulfúrico (Kumari et al., 2015)...	79
Figura 44. <i>Flow-sheet</i> para separar concentrado de REE medios (Kumari et al., 2015). 79	
Figura 45. <i>Flow-sheet</i> del proceso mineral de REE de Chuktukon (Kumari et al., 2015). 80	
Figura 46. <i>Flow-sheet</i> del uranio a partir de monacita egipcia (Kumari et al., 2015). .....	80
Figura 47. <i>Flow-sheet</i> del procesamiento de REO: .....	81
Figura 48. Diagrama de Pourbaix para el sistema Ce-PO <sub>4</sub> -SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O en concentración sulfúrica de 1.0 M a temperaturas: (a) 25 °C, (b) 100 °C, (c) 200 °C and (d) 300 °C (Nasuha Yahya et al., 2019). .....	84
Figura 49. Diagrama de Pourbaix para el sistema La-PO <sub>4</sub> -SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O en concentración sulfúrica de 1.0 M a temperaturas: (a) 25 °C, (b) 100 °C, (c) 200 °C and (d) 300 °C (Nasuha Yahya et al., 2019). .....	85
Figura 50. Diagrama de Pourbaix para el sistema Nd-PO <sub>4</sub> -SO <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O en concentración sulfúrica de 1.0 M a temperaturas: (a) 25 °C, (b) 100 °C, (c) 200 °C and (d) 300 °C (Nasuha Yahya et al., 2019). .....	86
Figura 51. Precios anuales de REO livianas desde 1959 a 2015 (USD/kg) (Fernandez, 2017).....	87

Figura 52. Precios anuales de REO pesadas desde 1959 a 2015 (USD/kg) (Fernandez, 2017). .....	88
Figura 53. Precios actuales de REO de Terbio, Disprosio, Neodimio y Praseodimio (USD/kg) (Kitco Metals Inc., 2022). .....	89
Figura 54. Producción anual de REO desde 1900 a 2015 (toneladas métricas) (Fernandez, 2017). .....	92
Figura 55. Consumo anual de REO desde 2008 a 2017 (toneladas) por industria (UPME & CRU Consulting, 2018). .....	93
Figura 56. Comportamiento gráfico del índice mundial de REMX relacionado a mercados financieros claves durante el COVID-19 frente a: (a) el rendimiento financiero, (b) la volatilidad (Song et al., 2021). .....	95
Figura 57. Marco legal minero y marco legal ambiental de proyectos minero-ambientales (Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente, 2007). .....	96
Figura 58. Duración de un Contrato de concesión minera en Colombia (Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente, 2007). .....	97
Figura 59. Mapa de títulos y solicitudes mineras en <i>targets</i> de exploración de REE en Antioquia. Escala 1:500,000. ....	98
Figura 60. Mapa de contexto ambiental de <i>targets</i> de exploración de REE en Antioquia. Escala 1:500,000. ....	103
Figura 61. Matriz Causa-Efecto de las actividades durante la Exploración Geológica de Superficie o Fase I (Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente, 2007). .....	105
Figura 62. (a) Ubicación de los cultivos en un relave minero de REE en China. ....	107
Figura 63. Mapa de infraestructura de <i>targets</i> de exploración de REE en Antioquia. Escala 1:500,000. ....	109
Figura 64. Mapa de contexto social de <i>targets</i> de exploración de REE en Antioquia. Escala 1:500,000. ....	111
Figura 65. Mapa de bloques de prospección de REE en Antioquia. Escala 1:500,000. ....	115
Figura 66. Presupuesto de exploración mundial de REE desde 2008 a 2035 (MUSD) (UPME & CRU Consulting, 2018). .....	116



## Lista de tablas

Tabla 1. Lista de minerales estratégicos/críticos acogidos internacionalmente (Andersson, 2020; Galos et al., 2021; UPME, 2019). .....	30
Tabla 2. Sustitución de REE (UPME & CRU Consulting, 2018).....	32
Tabla 3. Cuantiles de variable TREO (ppm). .....	47
Tabla 4. Correlación de Pearson de los REE en Antioquia. ....	49
Tabla 5. Estimación de recursos minerales de TREO de Antioquia con cut-off de 0.08% de TREO por cada metro de profundidad. ....	64
Tabla 6. Estadísticas de Sc, REE+Y y LREE/HREE de <i>targets</i> en Antioquia.....	71
Tabla 7. Recuperaciones metalúrgica y de separación de diferentes proyectos mineros de REE (Riesgo García et al., 2017). ....	82
Tabla 8. CAPEX de proyectos mineros de REE (UPME & CRU Consulting, 2018). .....	90
Tabla 9. Resultados financieros de VPN, TIR y <i>Payback</i> de proyectos mineros de REE (Riesgo García et al., 2019).....	91
Tabla 10. Grupos de palabras claves para recursos minerales estratégicos (Zuo et al., 2021).....	93
Tabla 11. Modos de gobernanza de los recursos naturales (León & Muñoz, 2019).....	112
Tabla 12. Resumen de inversiones de la prospección detallada de REE en Antioquia..	117

## Introducción

Los elementos de tierras raras o REE (*Rare-Earth Elements*) son un grupo de 17 metales comprendido por 15 lantánidos (Lantano, Cerio, Praseodimio, Neodimio, Prometio, Samario, Europio, Gadolinio, Terbio, Disproσιο, Holmio, Erblio, Tulio, Iterbio y Lutecio) junto con el Escandio e Itrio. Su clasificación de elementos de tierras raras pesadas (*Heavy Rare Earth Elements*, HREE) y elementos de tierras raras livianas (*Light Rare Earth Elements*, LREE) está en función del número atómico, similitudes en las propiedades físico-químicas y origen geológico; teniendo los HREE mayor precio que los LREE (Comisión Chilena del Cobre -COCHILCO, 2016). Se les califica de "raras" puesto que los procesos metalúrgicos necesarios para separar individualmente los metales son complejos (Batapola et al., 2020).

Estos metales están atrayendo en gran medida la atención del mundo debido a su uso final y la importancia en una amplia variedad de aplicaciones tecnológicas avanzadas, siendo los imanes permanentes de neodimio la aplicación de mayor demanda, seguido del craqueo catalítico de fluidos de petróleo, autocatalizadores, pulidos para vidrios planos y ópticos, paneles de visualización, discos, baterías para vehículos híbridos y eléctricos, electrónica de consumo (portátiles, celulares, tabletas, etc.), vidrios con coloración y protección UV, eliminación de impurezas en vidrios, pantallas y cristal óptico, cerámicas para refractarios, aleaciones metálicas para hierro fundido, acero HSLA e inoxidable, fósforos y pigmentos para iluminación, y aplicaciones médicas (UPME & CRU Consulting, 2018). Son considerados materiales estratégicos por tener un bajo nivel de sustitución y ser de interés para sectores de defensa y desarrollo de tecnologías limpias (Andersson, 2020; Galos et al., 2021; UPME, 2019).

La producción mundial de REE se obtiene principalmente de óxidos de tierras raras o REO (*Rare-Earth Oxides*) de carbonatitas, rocas ígneas alcalinas, placeres, lateritas y arcillas de adsorción de iones, donde las mayores reservas minerales de REE están ubicadas en China, seguido por Vietnam, Brasil y Rusia (UPME & CRU Consulting, 2018). El óxido de Cerio, el óxido de Lantano, el óxido de Neodimio y el óxido de Praseodimio han liderado la oferta mundial de REO en los últimos años, y su proyección futura es creciente debido al interés mundial, la cual alcanzaría en el 2025 una producción superior a 250,000 toneladas de REO; en este contexto, los REE han sido ampliamente aceptados como elementos estratégicos en el mundo, lo que obliga a explorar nuevos recursos de REE y depósitos alternativos o secundarios (Batapola et al., 2020).

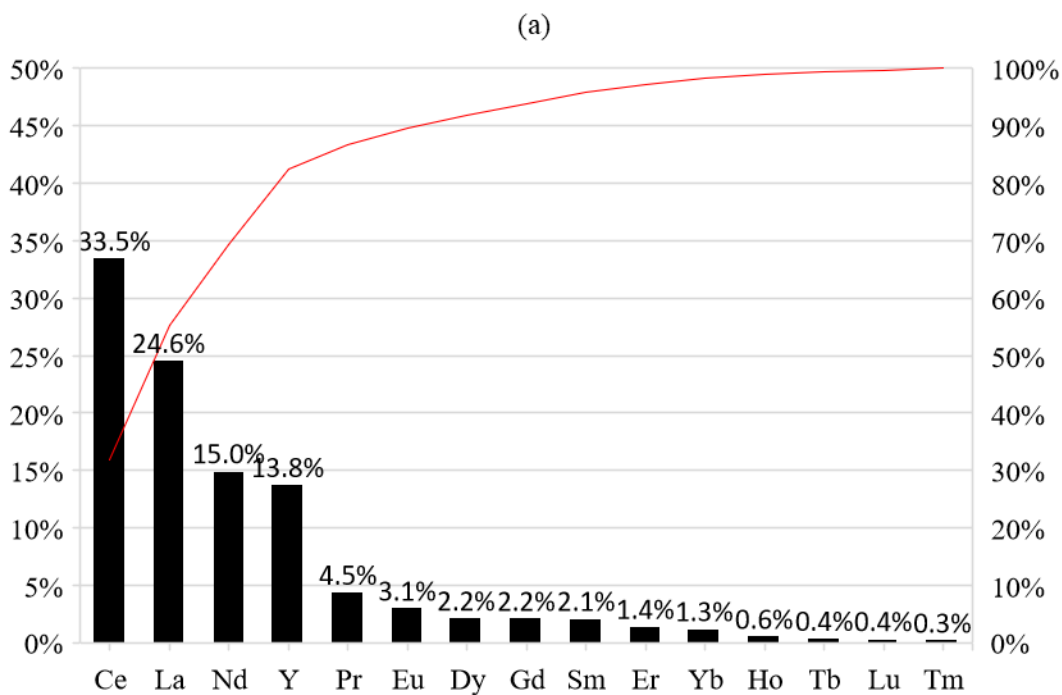
En el departamento de Antioquia (Colombia) se han caracterizado minerales de arenas negras que provienen de subproductos de minería aurífera, reportando concentraciones de Monacita del 1.1% en peso de arenas (Kerguelen, 2016). Estos datos son similares a los obtenidos en la caracterización de arenas negras provenientes de la extracción de oro a gran escala sobre las llanuras de inundación del río Nechí donde se encontró que el contenido de Monacita en el subproducto es en promedio 1.2% en peso, con valores máximos de 2.8% dependiendo de la corriente muestreada, y cuyos metales de tierras raras que predominan son el Cerio, Lantano y Neodimio, acompañados por Torio o Uranio en menor proporción (5% y 3% respectivamente); en resumen, el porcentaje en peso de estos elementos representaron el 63,43% (Lamus, Márquez, & Gaspar, 2006). También en Antioquia se reportó los carbones con mayor contenido de REE del país, según 24 muestras provenientes de 7 zonas carboníferas de las 12 que tiene Colombia, con contenidos de 3 muestras superiores a 200 ppm de REE que provenían de Amagá-Angelópolis de la zona carbonífera de Antioquia, convirtiéndola de interés para estos metales puesto que la concentración necesaria en carbón para poder ser explotados ronda los 115-130 ppm, y el promedio de REE en carbones a nivel mundial es de 68.5 ppm (Henaó, 2019).

La base de datos utilizada del tenor de REE en Antioquia fue construida entre el 2004 y el 2007 por la Universidad Nacional de Colombia, el Servicio Geológico Colombiano y la Secretaría de Productividad y Competitividad de la Gobernación de Antioquia, para el proyecto "*Mapa geoquímico del departamento de Antioquia*" (Sánchez Arredondo & Molina Escobar, 2009). Durante el proyecto geoquímico de Antioquia se realizó un muestreo de

sedimentos activos finos de corriente de baja a ultra baja densidad a escala regional, el cual reunió 464 muestras que formaron 101 compósitos bajo una malla de paneles exploratorios de 30 km x 20 km (600 km<sup>2</sup>). Estos compósitos de muestras fueron enviados al Instituto de Exploración Geofísica y Geoquímica de Beijing, República de China, del cual se obtuvieron los resultados de la concentración de 16 REE en unidades de *mg/kg* mediante análisis químicos con Fluorescencia de Rayos X (*XRF*), espectrómetro de masas de plasma acoplado inductivamente (*ICP-MS*), espectrómetro de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (*ICP-OES*) y Activación de Neutrones (*INAA*) (Sánchez Arredondo & Molina Escobar, 2009). El tenor de las muestras de REE se procesó mediante los *softwares Isatis, ArcMap y QGIS*, adicional de la interacción con datos de tipo *Web Map Service* (WMS) descargados de los geoportales de la Agencia Nacional de Minería (ANM) y del Servicio Geológico Colombiano (SGC). En este sentido el objetivo de este trabajo de investigación es simular con el método de bandas rotantes el tenor del total de óxidos de tierras raras (TREO) para valorar los blancos de exploración en el departamento de Antioquia que tengan un tenor de TREO por encima de 800 ppm, el cual ha sido aceptado a nivel mundial como un tenor de corte para la exploración de tierras raras (Hou et al., 2021). Dichas áreas potenciales, blancos o targets de exploración serán estratégicas para viabilizar en el país el desarrollo de la cadena de valor minera de estos materiales críticos. Adicionalmente se desarrolló Análisis Exploratorio de Datos (*EDA*), transformación gaussiana, variografía, validación cruzada, simulación por bandas rotantes, kriging ordinario de bloques, curvas tenor vs. tonelaje, y otras técnicas que permitieron el entendimiento geoestadístico y definir el potencial de prospectividad de los recursos minerales de REE en el territorio de Antioquia.

Dada la presencia de minerales con concentraciones importantes de REE en Antioquia, en la Figura 1(a) se identifica las concentraciones químicas promedio de 15 REE en 13 minas ubicadas en Australia, China, Estados Unidos, Rusia e India, de la cual se obtiene que el contenido de óxidos de Cerio, Lantano, Neodimio y Praseodimio en estos proyectos internacionales alcanzan en promedio el 77.6% en peso del TREO y hasta el 91.7% en minas que explotan depósitos de Monacita (Fernandez, 2017). De forma complementaria, el SGC, organismo responsable del conocimiento geológico de Colombia, realizó en el 2018 la publicación del Atlas Geoquímico de Colombia donde incluyó mapas geoquímicos para 15 de los REE a escala 1:6,000,000 a través del procesamiento de 411,936 registros

de sedimentos finos activos de corriente y sedimentos finos activos de lecho seco. En la Figura 1(b) se muestra el diagrama de Pareto del contenido promedio de estos REE, donde el Cerio, Lantano, Neodimio y Praseodimio representan el 66.3% de contenido en peso de los 15 REE (Servicio Geológico Colombiano, 2018). Adicionalmente se muestra en la Figura 1(c) el diagrama de Pareto del contenido promedio de los 16 REE muestreados por el proyecto “*Mapa geoquímico del departamento de Antioquia*” y se obtuvo que el Cerio, Lantano, Neodimio y Praseodimio suman en promedio el 65.1% del peso total de REE (Sánchez Arredondo & Molina Escobar, 2009).



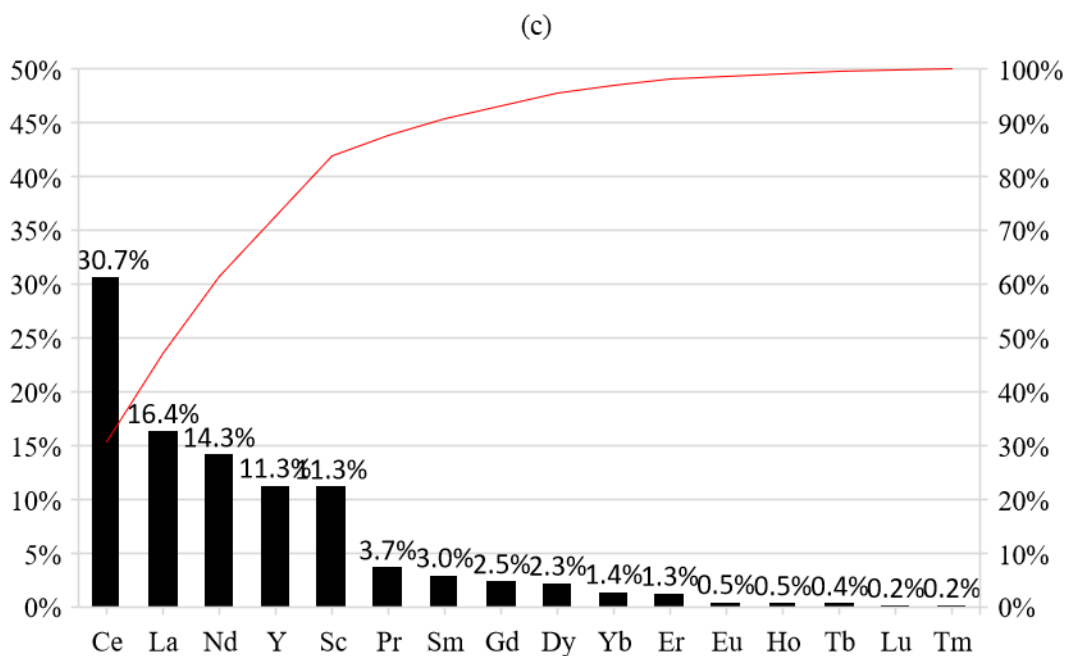
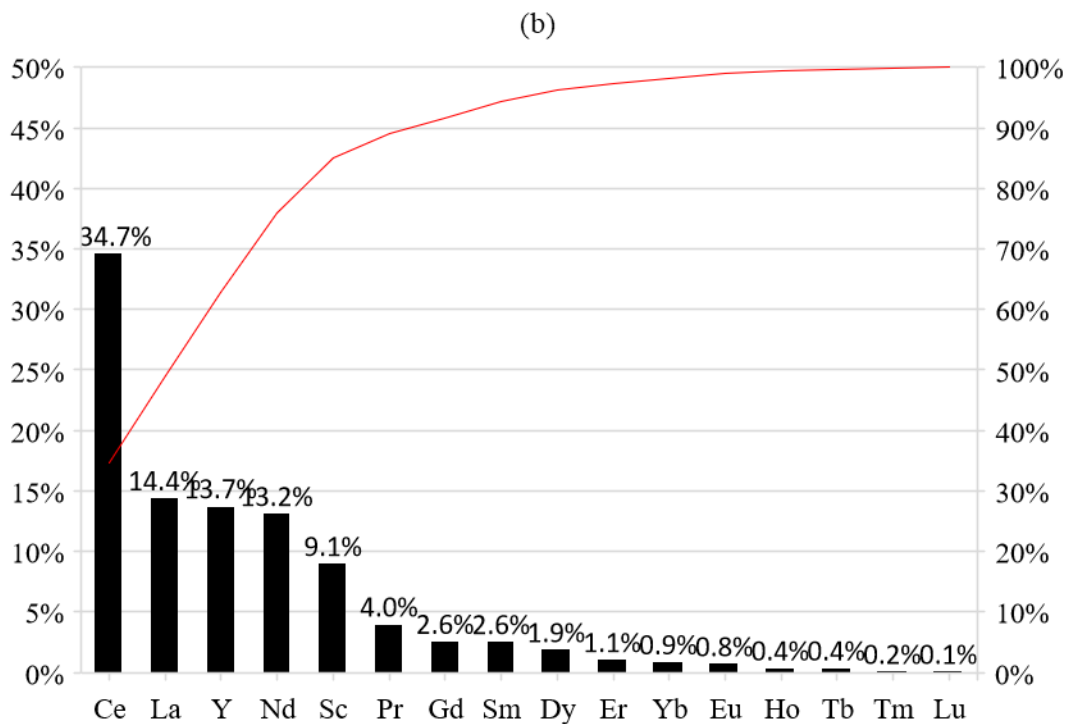


Figura 1. (a) Contenido promedio de TREO en 13 minas (Fernandez, 2017).  
 (b) Geoquímica de REE de Colombia (Servicio Geológico Colombiano, 2018).  
 (c) Geoquímica de REE de Antioquia (Sánchez Arredondo & Molina Escobar, 2009).

---

De acuerdo al Código de Minas vigente en Colombia y la Guía Minero Ambiental de Exploración se indica que la propuesta técnica y económica de actividades geológicas y mineras que contempla este trabajo estarían enmarcadas en la etapa final de la prospección de REE, denominada Prospección detallada, la cual permitirá delimitar el área para la solicitud de un contrato de concesión minera razonable de REE (Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente, 2007).

El estándar colombiano para el reporte público de resultados de exploración, recursos y reservas minerales (ECRR) de la Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales (CCRR), indica que un *target* de exploración es una estimación del potencial de exploración de un depósito mineral en un marco geológico definido, en términos de tonelaje o volumen y tenor, sin embargo, su mineralización es insuficiente para estimar recursos minerales (Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales -CCRR-, 2018). El estudio geoestadístico definirá los blancos o *targets* de exploración mediante simulación con bandas rotantes, los cuales pasarán a ser evaluados de forma independiente a través del análisis de los factores modificadores para la minería de REE en Antioquia. En dicho contexto, este trabajo utiliza el término de recursos minerales inferidos de TREO debido a: 1) se estima el potencial de prospectividad de los recursos minerales de TREO en términos de tenor y tonelaje por métodos geoestadísticos, 2) se identifica el ambiente geológico a escala regional y local, 3) se identifican los factores modificadores de tipo minero, de procesamiento mineral, metalúrgico, económico, legal, ambiental, social, de infraestructura y gubernamental asociado a los blancos de exploración, y 4) se diseña un programa técnico presupuestado para 1 año de labores de prospección detallada que permite validar los resultados de la estimación mineral.

# 1. Consideraciones teóricas

## 1.1 Marco teórico

El desarrollo económico de los países depende de la disponibilidad de materias primas, en especial recursos minerales, por lo tanto algunos minerales se han acogido de forma global como estratégicos o críticos ya que son difíciles de obtener y tienen pocas o nulas posibilidades de sustitución, haciéndolos indispensables para la economía futura por su relación con el desarrollo de alta tecnología, la defensa y seguridad económica de los países, un alto valor de consumo de los últimos años y la dependencia de las importaciones (Galos et al., 2021; Yu, Duan, & Cheng, 2021). También se puede considerar que un mineral es crítico cuando cumple una función importante para el país y su cadena de suministro está sujeta a riesgo de interrupción (Hayes & McCullough, 2018).

El mejor ejemplo del control de cadenas de valor de minerales estratégicos lo demuestra China, quien domina la industria de REE a nivel mundial y es el mayor proveedor de muchos de los recursos minerales críticos o estratégicos. Se considera que China lidera el tema de criticidad de materias primas ya que ha priorizado unos minerales sobre otros, centrando el interés en REE, un recurso con el que se posiciona como el mayor productor, consumidor y exportador del mundo, representando más del 85% de la oferta mundial (Andersson, 2020). En el Plan Nacional de Recursos Minerales de China (2016-2020) se definió los minerales estratégicos para este país, a su vez se limitó la producción anual de REE y Tungsteno, dos materias primas clasificadas como "ventajosas" para el país ya que domina las cadenas de suministro globales, y ambos productos se consideran críticos y estratégicos para las economías manufactureras avanzadas que dependen de estos recursos como la Unión Europea (UE), los EE. UU. y Japón (Andersson, 2020).



La cadena de valor en el sector de las industrias extractivas comprende desde las primeras actividades de exploración realizadas antes de confirmar la existencia de un depósito o una acumulación mineral hasta la extracción y venta de un producto básico (Halland, Lokanc, Nair, & Kannan, 2016). La exploración geológica es el paso inicial de la cadena productiva y está integrado por estudios de la geología regional y local, la topografía, la exploración superficial (trincheras, geoquímica de sedimentos activos, geofísica y otros), la exploración del subsuelo (perforaciones profundas, apiques, muestreo y otros), las asociaciones minerales y la geometalurgia (Silva, Petter, & Albuquerque, 2018). Las actividades de exploración geológica están orientadas a aumentar el conocimiento de los recursos y reservas minerales para disminuir el riesgo de inversión de los proyectos mineros.

Los focos de exploración acogidos a nivel mundial en depósitos primarios son rocas ígneas alcalinas, skarns, carbonatitas, granitoides peraluminosos y sus derivados como pegmatitas, vetas de cuarzo y greisens que albergan yacimientos primarios de REE; depósitos secundarios tipo placer o aluviales y depósitos de meteorización residuales derivados de depósitos primarios también son focos de exploración (Balaram, 2019; M. Sadeghi, Morris, Carranza, Ladenberger, & Andersson, 2013). Por ahora las reservas mundiales de REE están cuantificadas alrededor de 130 millones de toneladas, siendo China dueño de un tercio de las reservas mundiales y el país que lidera la exploración y explotación de REE (Balaram, 2019).

La Figura 2 muestra las actividades de la cadena de valor de REE, partiendo de realizar minería con la extracción de bastnasita, monacita o arcillas iónicas, continúa con el procesamiento mineral que incluye disminución de tamaño, beneficio por flotación, separación gravimétrica y magnética, hidrometalurgia, electrometalurgia y pirometalurgia para entregar productos individuales de REE, luego se realizan productos intermedios a nivel de óxidos, carbonatos, cloruros, fluoruros de REE y otros, y por último se desarrollan materiales avanzados de ingeniería para su uso final (UPME & CRU Consulting, 2018).

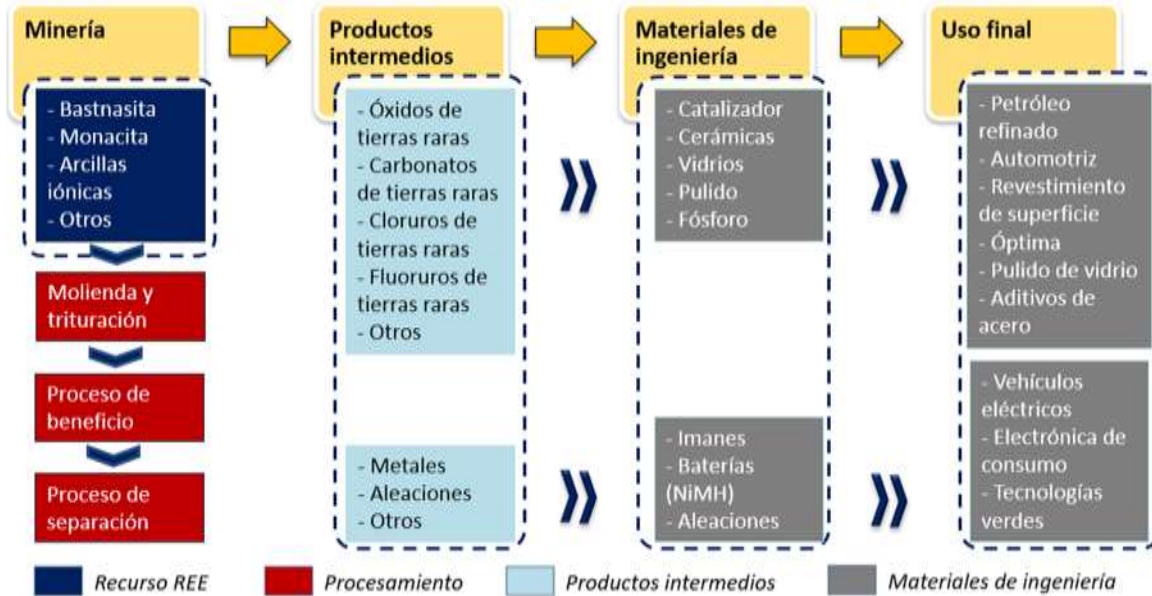


Figura 2. Cadena de valor minera de REE (UPME & CRU Consulting, 2018).

Los métodos geoestadísticos han sido fuertemente demandados por el sector minero y petrolero como herramientas poderosas para predecir atributos espaciales como el tenor y modelar la incertidumbre de las predicciones en ubicaciones no muestreadas, importantes como buenas prácticas de estimación y evaluación de recursos y reservas minerales (B. Sadeghi, Madani, & Carranza, 2015).

La Figura 3 ejemplifica el hecho de que la estimación provee para cada punto en el espacio un valor estimado que es más cerrado y conservador a lo que ocurre en realidad mientras que la simulación es una mejor reproducción de las fluctuaciones de la curva real; en este sentido, la estimación es preferible para localizar recursos minerales porque brinda seguridad mientras que la simulación es preferida para estudiar la dispersión de las características de dichos recursos y simular la representación de la realidad (Matheron, 1981).

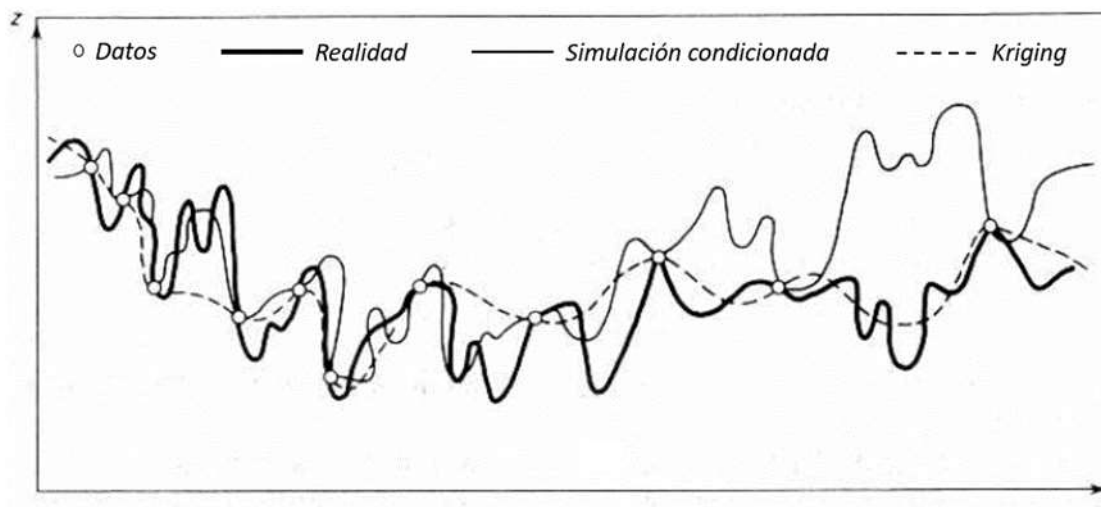


Figura 3. Datos, realidad, simulación condicionada y estimación kriging (Matheron, 1981).

El principio de condicionamiento considera la regionalización de una variable  $z_0(x)$ , que podría ser el tenor en el punto  $x$ . Esta variable regionalizada es interpretada como el resultado de la realización de una función aleatoria estacionaria  $Z_0(x)$ . En cuanto a la dispersión de la variable simulada, no hay diferencia entre el valor del depósito simulado  $\{z_s(x)\}$  y el valor real del depósito  $\{z_0(x)\}$  (Matheron, 1981).

El valor simulado condicionalmente para cada punto  $x$  de la variable de interés  $Z(x)$  está definido como el valor de kriging obtenido en esa ubicación  $\{z_{0K}^*(x)\}$  más un valor del error de kriging simulado  $\{z_s(x) - z_{sK}^*(x)\}$ , compuesto por el valor simulado del total de las realizaciones  $\{z_s(x)\}$  menos el valor del kriging de una realización para esa ubicación  $\{z_{sK}^*(x)\}$  (Matheron, 1981). Hay un número infinito de posibles realizaciones de una función regionalizada  $Z(x)$   $\{z_s(x), s = 1 \text{ a } \infty\}$  (Matheron, 1981). La Ecuación 1 muestra el planteamiento de una simulación condicionada.

$$z_{sc}^*(x) = z_{0K}^*(x) + [z_s(x) - z_{sK}^*(x)]$$

Ecuación 1. Planteamiento de la simulación condicionada (Matheron, 1981).

Simulación por bandas rotantes es uno de los principales métodos de simulación condicionada, el cual fue utilizado por primera vez por Chentsov en 1957 en el caso especial de funciones aleatorias brownianas; el principio general del método aparece como

una observación por Matérn en 1960, pero su desarrollo para simulaciones de recursos minerales se debe a Matheron en 1973 (Chilés & Delfiner, 1999). A diferencia de las simulaciones directas basadas en covarianza comunes en  $\mathbb{R}^n$ , la simulación por bandas rotantes es una simulación en 1D en una línea, que requiere dos pasos: (i) simulación incondicional usando la función de covarianza espacial de los datos en una línea y (ii) corrección de condicionamiento para conectar el valor simulado en una ubicación de datos con el valor de datos mediante kriging (Koike, Goto, & Nozaki, 2021).

En la Figura 4, P representa la región en dos o tres dimensiones donde se quiere generar simulaciones en una serie de puntos a lo largo de una malla (Samper & Carrera, 1990). En un sistema de coordenadas X-Y con el origen en 0 se generan una serie de líneas  $i$  cuyo azimut  $\Theta_i$  es una variable aleatoria uniformemente distribuida entre 0 y  $2\pi$ . A lo largo de cada línea  $i$  se genera a su vez una realización de una función aleatoria unidimensional de media nula y covarianza  $C_i(h_i)$ , donde  $h_i$  es la coordenada a lo largo de la línea  $i$ . Si N es el punto en la región P donde se desea simular  $Z(x)$ , N se proyecta sobre cada una de las líneas y se le asigna el valor de  $Z_i(h_{Ni})$  correspondiente a la contribución de la línea  $i$ , donde  $h_{Ni}$  es la proyección de N sobre la línea  $i$  (ver Figura 4). Sea  $u_i$  el vector unitario a lo largo de la dirección  $i$  con lo que  $h_{Ni} = x_N \cdot u_i$  donde  $(\cdot)$  denota producto punto escalar. Finalmente, si L es el número total de líneas, el valor simulado en el punto N viene dado por (Samper & Carrera, 1990):

$$Z_S(x_N) = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{i=1}^L Z_i(x_N \cdot u_i)$$

Ecuación 2. Planteamiento de la simulación condicionada por bandas rotantes (Samper & Carrera, 1990).

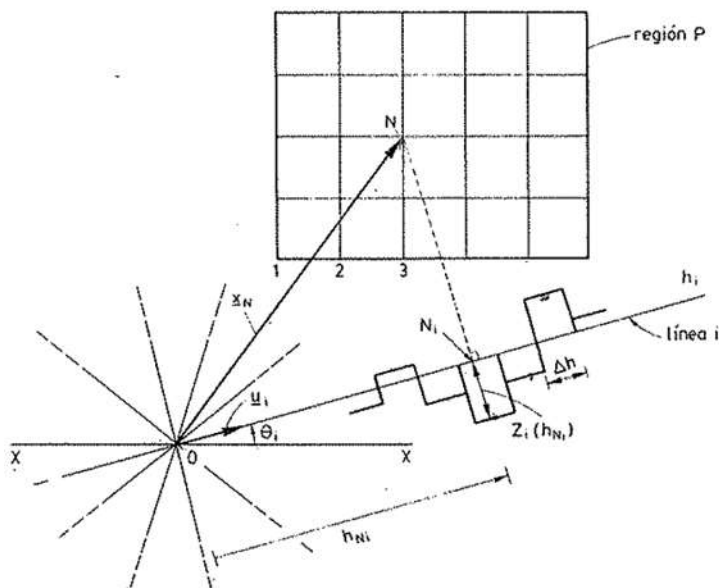


Figura 4. Representación esquemática del método de bandas rotantes (Samper & Carrera, 1990).

Los beneficios de la simulación condicionada por bandas rotantes es que permite calcular la distribución de los valores de calificación posibles para cada bloque, entre ellas la evaluación de riesgos e incertidumbre, *grade control*, clasificación de recursos, probabilidad de exceder el tenor de corte, estimación de recursos recuperables incluso con restricciones mineras, y los escenarios optimistas y pesimistas que pueden cuantificarse a un nivel particular de confianza. En general, los resultados de este método geoestadístico han demostrado simular la realidad de los depósitos minerales de forma más precisa (Matheron, 1981).

## 1.2 Estado del arte

En el 2018 se realizó una revisión sistemática con 32 estudios de las tendencias de minerales críticos. Es interesante como de los 56 elementos o grupos evaluados, los tres más comúnmente identificados como críticos son los REE, los metales del grupo del platino (PGM) e Indio (Hayes & McCullough, 2018). Otra revisión sistemática realizada en el 2020 con 88 estudios permitió estudiar la demanda global de largo plazo de 48 metales críticos, se encontró que para el año 2050 la demanda de Disproseo tiene el rango más amplio de los metales críticos, seguido del Selenio y el Telurio (Watari, Nansai, & Nakajima, 2020).

La Tabla 1 resume la lista de minerales estratégicos o críticos declarados oficialmente por China (Andersson, 2020), EE. UU., Reino Unido, Japón, Unión Europea (UE), la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) (Galos et al., 2021) y Colombia (UPME, 2019), se destaca una canasta mineral estratégica diversificada, entre 20 y 40 minerales en promedio. En Colombia el listado de minerales estratégicos es de 11 productos, permitiendo la oportunidad de incluir nuevos minerales con sus respectivas cadenas de valor de acuerdo al potencial del subsuelo y las condiciones del mercado, además por ser un país miembro de la OCDE, debe orientar su visión estratégica hacia los 21 minerales definidos en la Tabla 1. Llama la atención el concepto de que “la cantidad de recursos minerales estratégicos es un indicador importante de la fuerza nacional general de un país” (Andersson, 2020).

Tabla 1. Lista de minerales estratégicos/críticos acogidos internacionalmente (Andersson, 2020; Galos et al., 2021; UPME, 2019).

<b>País</b>	<b>Indicadores / criterios</b>	<b>Minerales estratégicos / críticos</b>
<b>China</b>	Desarrollo económico, defensa nacional, riesgos de suministro, sustituibilidad.	24 minerales: REE, hierro, cromo, cobre, aluminio, oro, níquel, tungsteno, estaño, molibdeno, antimonio, cobalto, litio, circonio, petróleo, gas natural, carbón, carbón metano, uranio, fósforo, cloruro de potasio, grafito cristalino y fluorita.
<b>EE.UU.</b>	Riesgo de interrupción del suministro, crecimiento de la producción, desarrollo del mercado.	35 minerales: REE, aluminio (bauxita), antimonio, arsénico, barita, berilio, bismuto, cesio, cromo, cobalto, fluorita, galio, germanio, grafito (natural), hafnio, helio, indio, litio, magnesio, manganeso, niobio, metales del grupo del platino (PGM), sales de potasa, renio, rubidio, escandio, estroncio, tantalio, telurio, estaño, titanio, tungsteno, uranio, vanadio y circonio.
<b>Reino Unido</b>	Riesgo de interrupciones del suministro (concentración de la producción, distribución de recursos, índice de reciclaje, sustitución, situación política)	41 minerales: REE, antimonio, bismuto, germanio, vanadio, galio, estroncio, tungsteno, molibdeno, cobalto, indio, arsénico, magnesio, PGM, litio, barita, grafito, berilio, plata, cadmio, tantalio, renio, selenio, mercurio, flúor, niobio, circonio, cromo, estaño, manganeso, níquel, torio, uranio, plomo, hierro, diamante, titanio, cobre, zinc, aluminio y oro.
<b>Japón</b>	Riesgos de interrupción del suministro, riesgos de precios,	22 metales: neodimio, disprosio, tantalio, cromo, manganeso, cobalto, níquel, niobio, molibdeno, rodio,

	riesgos de demanda, restricciones de reciclaje.	paladio, indio, tungsteno, platino, aluminio, hierro, cobre, zinc, plata, estaño, oro y plomo.
<b>Unión Europea</b>	Riesgo de interrupción del suministro, importancia económica.	27 minerales: HREE, LREE, antimonio, barita, berilio, bismuto, boratos, coque, cobalto, fluorita, galio, germanio, hafnio, helio, indio, magnesio, grafito natural, caucho, niobio, metales del grupo del platino, fosfatos, fósforo, escandio, silicio metal, tantalio, tungsteno y vanadio.
<b>OCDE</b>	Riesgo de interrupción del suministro, importancia económica.	21 minerales: HREE, LREE, antimonio, barita, berilio, boratos, cromo, cobalto, fluorita, galio, germanio, indio, magnesitas, magnesio, grafito natural, niobio, PGM, fosforita, silicio metálico, tungsteno y vanadio.
<b>Colombia</b>	Crecimiento de la demanda proyectada futura, tamaño del mercado (% PIB).	11 minerales: oro, platino, cobre, minerales de fosfatos, minerales de potasio, minerales de magnesio, carbón metalúrgico y térmico, uranio, hierro y coltán.

Bajo la óptica de minerales estratégicos o críticos acogidos globalmente se aborda los estudios específicos de la cadena de valor de REE, ya que son un grupo de metales de alto precio que han sido declarados conjuntamente por los países más competitivos como materiales estratégicos o críticos para el desarrollo económico. En este contexto se presenta los recursos minerales de REE como una oportunidad para Colombia de incluirlos y diversificar su oferta de minerales estratégicos con la visión de mejorar su desarrollo económico.

En diciembre del 2018 la compañía CRU Consulting realizó un informe para la UPME definido “Tierras raras: Caracterización y análisis de mercado internacional de minerales en el corto, mediano y largo plazo con vigencia al año 2035” en el cual aborda el mercado de REE desde la demanda, la oferta, el balance del mercado y el precio, y un análisis de las cinco fuerzas de Porter (proveedores, clientes, entrada, sustitución y competidores) (UPME & CRU Consulting, 2018).

La proyección de la demanda mundial de REO se estima a una tasa de crecimiento anual compuesta (TCAC) del 3.6% entre 2018 y 2035, con una demanda de imanes superior al 6% anual; se alcanza para el 2035 una demanda proyectada de 280,000 toneladas anuales de REO, con un comportamiento acelerado luego del 2020 impulsado por los vehículos eléctricos y las turbinas eólicas (UPME & CRU Consulting, 2018). Otros estudios sugieren

una TCAC del 4.4% entre 2016-2026, alcanzando las 190,000 toneladas anuales de REO (Wang, Guo, Liu, & Wei, 2020).

La Tabla 2 muestra las posibles sustituciones de REE por uso final indicando el nivel de sustitución, los potenciales materiales sustitutos y los productos finales sustitutos, la información es recopilada del estudio de la demanda y de las cinco fuerzas de Porter para el mercado de estos minerales estratégicos. A partir de la información se concluye que la capacidad de sustituir REE por otros materiales es media-baja e incluso nula en algunos usos, aunque existen algunas posibilidades de sustitución que ofrecen menor rendimiento, es por esto que la demanda se ve afectada por una mayor eficiencia en el uso final de las aplicaciones permitiendo a su vez la posibilidad de aumentar los precios (UPME & CRU Consulting, 2018). Mientras que la tasa de sustitución de REE sea baja, se puede suponer que la seguridad del suministro será crucial para los productores y consumidores de REE en todo el mundo (Klossek, Kullik, & van den Boogaart, 2016). Según la metodología del análisis de fuerzas de Porter, una industria es atractiva si tiene un comportamiento de escaso poder de proveedores y de clientes, baja sustitución, grandes barreras de entrada y baja rivalidad entre competidores (UPME & CRU Consulting, 2018).

Tabla 2. Sustitución de REE (UPME & CRU Consulting, 2018).

Uso final	% de la demanda	Nivel de sustitución	Materiales sustitutos	Sustitución
Imanes permanentes (NdFeB) para motores en turbinas eólicas, industria automotriz, audio y electrónica	28%	Medio	Nd, Dy por otros REE, pero menor rendimiento	Imanes de ferrita se pueden utilizar en aplicaciones de bajo rendimiento
Craqueo catalítico de fluidos de petróleo	20%	Bajo	Ninguno	Hidrocraqueo, vehículos eléctricos
Autocatalizadores		Bajo	Ninguno	Vehículos eléctricos no necesitan catalizadores
Pulido para vidrios planos y ópticos, paneles de visualización y discos duros de ordenador	13%	Medio	Circonia (baja calidad)	Discos duros sólidos (SSD), reemplazo de discos duros (HDD)



Baterías (NiMH) para vehículos híbridos eléctricos, electrónica de consumo (computadoras portátiles, celulares)	9%	Alto	Litio	Baterías de NiMH están siendo reemplazadas por Li-ion en muchas aplicaciones
Vidrio para coloración, protección (UV, otros), eliminación de impurezas, en pantallas y cristal óptico	6%	Bajo	Ninguno	Ninguno
Cerámicas para refractarios, ingeniería y cerámica electrónica	5%	Bajo	Ninguno	Ninguno
Aleaciones metálicas para hierro fundido, acero HSLA e inoxidable, aleación de Mg y de Al	9%	Medio	Mg, Ca en un número limitado de aplicaciones	Ninguno
Fósforos y pigmentos para iluminación, paneles de visualización, aplicaciones médicas	5%	Bajo	Ninguno	Luces LED usan menos cantidades de REE que fluorescente e incandescentes

Los recursos minerales de REE provienen de cuatro ambientes geológicos que son carbonatitas, sistemas ígneos alcalinos, depósitos de adsorción de iones y depósitos de placer con monacita y xenotima (Balaram, 2019). El depósito mineral de REE más grande del mundo está ubicado en el Distrito Minero de Bayan Obo en China y su origen es de carbonatita, este tipo de depósito geológico aporta la mayor cantidad de REE que se produce en el mundo; por otra parte, los depósitos de placeres aluviales y pegmatitas también pueden contener altas concentraciones de REE que son aprovechables al mismo tiempo que otros metales, sin embargo se deben elaborar estudios de prospección específicos para REE (Batapola et al., 2020).

Los procesos para recuperar concentrados de REE son complejos, requieren alta inversión de capital y son desafiados por problemas ambientales (Riddle et al., 2021), además la I+D es un factor clave de inversión para estas empresas (Keilhacker & Minner, 2017). Podría afirmarse que el *know-how* de la separación final de REE es una competencia técnica y tecnológica que domina China, obligando a muchas empresas de otros países a producir sus productos finales desde China (Barakos, Gutzmer, & Mischo, 2016). En la actualidad China es el único país que ha logrado desarrollar una cadena de valor de REE completa,

apoyada por la industria de investigación y desarrollo de productos avanzados (Barakos et al., 2016).

Los impactos ambientales y sociales de la producción de REE están relacionados con contaminantes químicos, emisiones de gases de efecto invernadero, aguas residuales y desechos mineros con material radioactivo, los cuales pueden traer resultados negativos en la salud humana, vegetal y ganadera (Dutta et al., 2016; R. S. Pell, Wall, Yan, & Bailey, 2019). Se tiene identificado que la producción de 1 tonelada métrica de REE en China crea aproximadamente 60,000 m<sup>3</sup> de gases mezclados con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y HF, 200 m<sup>3</sup> de agua ácida y 1.4 toneladas de desechos radioactivos (Wang et al., 2020). Por problemas ambientales se pueden cerrar operaciones mineras de REE, como la mina *Mountain Pass* de Molycorp en California, EE. UU., en el 2002 (Wang et al., 2020). Estos impactos al medio ambiente son un factor que lleva a China a controlar su nivel de producción anual de REE, ocasionando que con la creciente demanda se estime una escasez mundial (Wang et al., 2020), incluso empresas chinas han comenzado a invertir en proyectos de REE fuera de China como una estrategia para asegurar el suministro de materias primas al largo plazo (Mancheri, Sprecher, Bailey, Ge, & Tukker, 2019). En este sentido se concluye que la extracción de REE en cualquier lugar del mundo conllevaría grandes retos en temas de sostenibilidad ambiental y social.

El Ministerio de Minas y Energía de Colombia mediante la Resolución 180102 del 30 de enero de 2012 catalogó 11 minerales de interés estratégico para Colombia (UPME, 2019), sin embargo, difiere con los demás países presentados en la Tabla 1 por no incluir los REE, entre otros. En el 2019 la UPME aborda un análisis de los minerales del futuro para Colombia para la diversificación de la matriz de producción nacional con una visión ambiental, social y económicamente sostenible. En la Figura 5 se indica cómo este estudio selecciona los minerales estratégicos para el país y nuevamente los REE fueron excluidos debido a su comportamiento macroeconómico por tener un aporte porcentual al PIB de Colombia inferior al 2.5%, indicando una baja participación en el mercado nacional, sin embargo, es notorio como en la proyección de largo plazo (2017-2035) el crecimiento de la demanda (cerca al 3.6%) está por encima de los minerales mencionados como “del futuro”, ya que con excepción de las arenas silíceas, la demanda de REE crece con mayor

velocidad que la demanda de minerales de oro, cobre, aluminio, hierro, carbón térmico y metalúrgico, níquel, plata, roca fosfórica, cinc, plomo, potasio y platino (UPME, 2019).

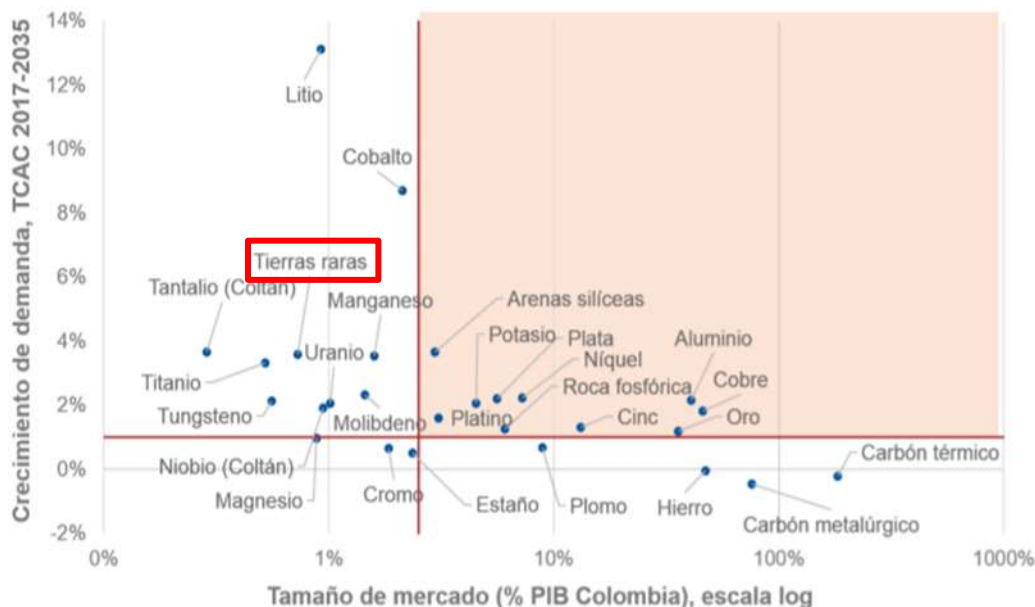


Figura 5. Crecimiento de la demanda de REE con respecto al tamaño del mercado de Colombia (UPME, 2019).

Los recursos minerales de REE en Colombia no se encuentran delimitados por lo cual es razonable que el país no fije su interés económico en el desarrollo de la cadena de valor de estos minerales, contrario a esta posición, en los últimos años muchos países están interesados en la exploración de REE en diferentes lugares del mundo porque estos recursos minerales se consideran los elementos más críticos y estratégicos del mundo (Batapola et al., 2020), y el alto riesgo asumido en la exploración minera se correlaciona con altos márgenes de utilidad (Paulick & Machacek, 2017). De esta forma el país podría aprovechar las oportunidades de variación del mercado para dar el primer paso que es la exploración y de esta forma habilitar proyectos técnica, económica, social, ambiental y legalmente viables que continúen las siguientes etapas de la cadena de valor (Schlinkert & van den Boogaart, 2015), teniendo en cuenta que los tiempos de exploración en proyectos mineros de REE generalmente tardan entre 6 y 10 años hasta llegar a la etapa productiva (Keilhacker & Minner, 2017). Además, existe el interés globalizado de desarrollar proyectos mineros de REE fuera de China como una medida de reducir la concentración de la producción en un solo país (R. Pell, Wall, Yan, Li, & Zeng, 2019), así

la creación de nuevas minas en el mundo se ha definido como una estrategia de mitigación de criticidad que reduce el riesgo de interrupción de la cadena de suministro global de REE (Keilhacker & Minner, 2017; Schmid, 2019).

El problema de desconocimiento de la potencialidad y ubicación de recursos de REE en Colombia se encuentra parcialmente resuelto por el SGC, quien ha indicado en el Atlas Geoquímico de Colombia las zonas de mayor concentración con sus estadísticas descriptivas; en total son 57 elementos analizados, de los cuales 16 son REE (Escandio, Itrio, Lantano, Cerio, Prometio, Neodimio, Samario, Europio, Gadolinio, Terbio, Disproso, Holmio, Erbio, Tulio y Lutencio), siendo el Praseodimio el único REE no caracterizado (Servicio Geológico Colombiano, 2018). En la Figura 6 se observa el mapa geoquímico de Colombia del Neodimio a escala 1:6,000,000 con la información de 27,332 muestras que el SGC compila y comparte en su geoportal, sin embargo, para el Neodimio (y para los demás REE) no se tiene información geoquímica completa que permita definir la ubicación de las concentraciones más altas dentro del departamento de Antioquia. En la Figura 6 las zonas con altas concentraciones de Neodimio en Antioquia, por encima de 70.33 mg/kg (percentil 98) (Servicio Geológico Colombiano, 2018), serían las más interesantes desde el punto de vista económico y permitirían orientar un proyecto de exploración a escala local, no obstante, por el desconocimiento geológico del resto del departamento se asumiría un alto costo de oportunidad de encontrar un mejor depósito de REE en otra subregión, de allí la necesidad de conocer inicialmente la geoquímica completa de Antioquia para los REE y luego proponer una exploración del subsuelo en las zonas más prometedoras que permitan continuar la cadena de valor de estos recursos minerales estratégicos. Adicional a la cartografía de isoacumulación de REE en Colombia, el SGC brinda los parámetros analíticos y estadísticos de las muestras recolectadas (Servicio Geológico Colombiano, 2018).

A nivel local se tienen tres estudios como antecedentes importantes de caracterización de minerales de tierras raras en el departamento de Antioquia, dos de ellos ubicados en la subregión del Bajo Cauca, en los municipios de Zaragoza y El Bagre, específicamente en títulos mineros autorizados para la extracción y comercialización de oro y sus concentrados, y otro estudio desarrollado sobre diferentes cuencas carboníferas del país para la identificación del contenido de REE en los carbones.

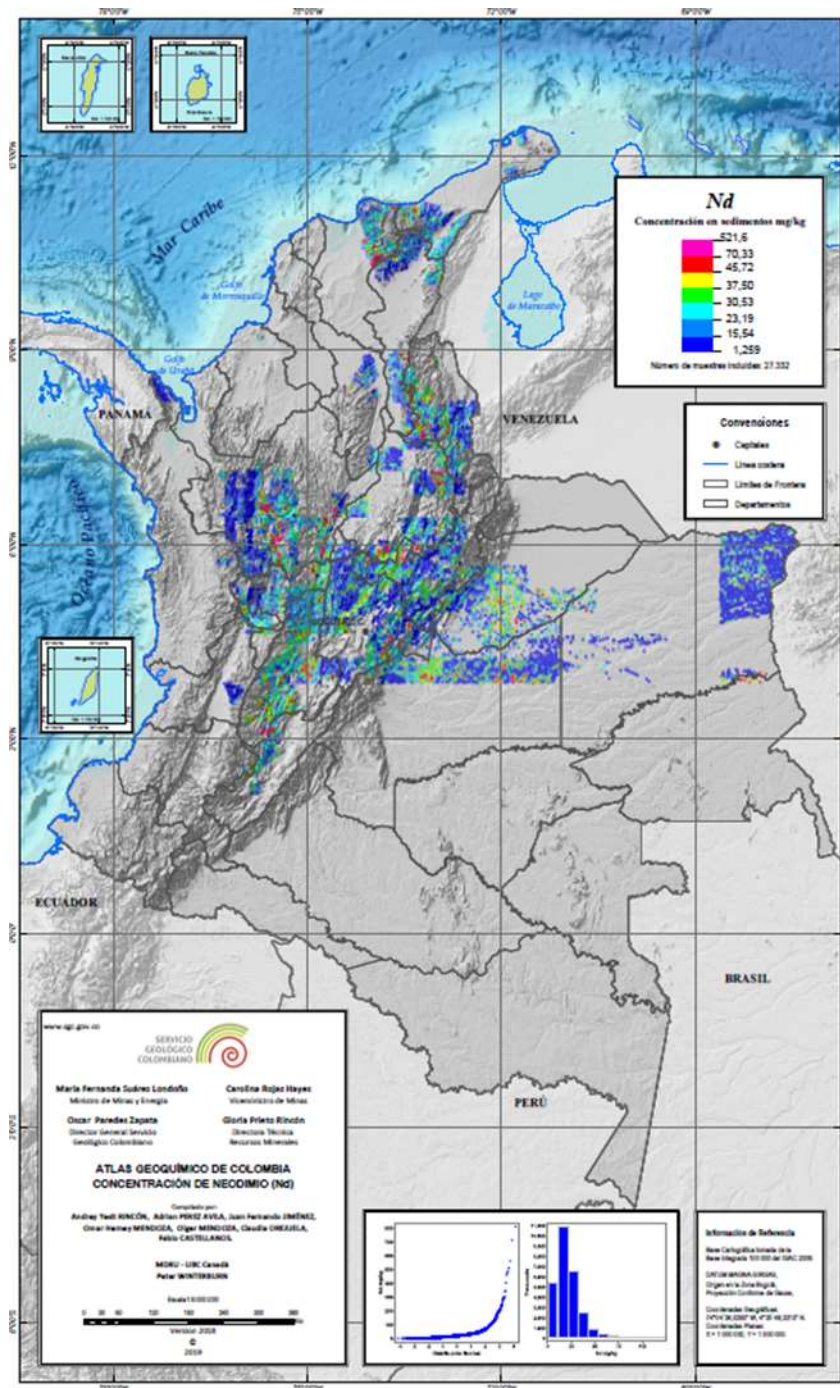


Figura 6. Mapa geoquímico de Colombia del Neodimio (mg/kg) (Servicio Geológico Colombiano, 2018).

Jorge Kergelen en el 2017 identificó a través de perforaciones y apiques sobre las terrazas aluviales del río Nechí en el título minero R57011C1, ubicado en el municipio de Zaragoza

y autorizado para extraer oro y sus concentrados, la existencia de minerales con altas densidades y de interés económico como oro, magnetita, titanomagnetita, ilmenita, leucoxeno, rutilo, monacita, circón y andalucita, gracias a las técnicas de caracterización de lupa binocular, microscopio óptica de luz reflejada, microscopio electrónico de barrido (SEM) integrado a un espectrómetro de energía dispersiva (EDS) y difracción de rayos X (DRX) (Kerguelen, 2016). El contenido de Monacita encontrado en las arenas del área de estudio es 1.1% en peso. La Figura 7 ilustra los granos de Monacita presentes en las terrazas aluviales del río Nechí, los cuales son en forma prismáticos, tabulares e irregulares, de color amarillo y rojizo; además, se muestra la composición química de la Monacita estudiada por DRX (Kerguelen, 2016).

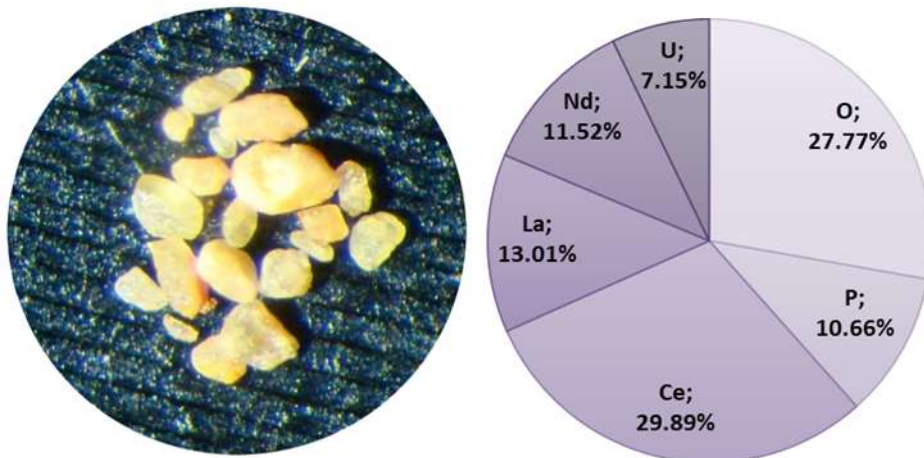


Figura 7. Granos y composición química de la monacita en terrazas aluviales del río Nechí (Kerguelen, 2016).

Los anteriores hallazgos se correlacionan a los encontrados en muestras del aluvión profundo del río Nechí en el municipio de El Bague por Clara Lamus en el 2006, quien caracterizó arenas negras tomadas en diferentes puntos del proceso de beneficio de oro de tres dragas de cucharas que operan dentro del título minero R57011, autorizado para la extracción de oro y sus concentrados, y encontró que el contenido de Monacita es en promedio el 1.2% en peso del subproducto de la extracción de metales preciosos a gran escala, incluso en la Figura 8 se observa que el contenido puede ser hasta del 2.8% dependiendo de la corriente de procesamiento (Lamus et al., 2006). Las nueve muestras



analizadas por Lamus fueron denotadas de la siguiente manera: D3JB, D5JB y D10JB, correspondientes a los concentrados de los jigs primarios de las dragas de cucharas 3, 5 y 10; D3R, D5R y D10R, correspondientes a las colas de las espirales en las dragas 3, 5 y 10 (arenas residuales); D3JST y D10JST, correspondientes a los sobreflujos o colas de los jigs terciarios de las dragas 3 y 10 respectivamente, y finalmente SM, correspondiente a la muestra tomada en el separador magnético de la draga 10. Los minerales encontrados en las arenas negras provenientes de la minería aurífera que fueron identificados en el estudio como de mayor interés económico fueron la ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ) con un promedio de 49% de  $\text{TiO}_2$ , titanomagnetita con hasta un 25% de  $\text{TiO}_2$ , magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) en granos individuales o asociados con otros minerales como hematita y silicatos ferromagnesianos rutilo ( $\text{TiO}_2$ ) con cantidades considerables de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  (0,1-3,7% en peso), circón ( $\text{ZrSiO}_4$ ) con 66% en peso de  $\text{ZrO}_2$ , y Monacita con un promedio de 63.43% en peso de REE (Lamus et al., 2006). Como principales REE se detectaron en orden de abundancia los siguientes: Cerio, Lantano y Neodimio, seguido por Torio o Uranio en menor proporción (5% y 3% respectivamente) (Lamus et al., 2006).

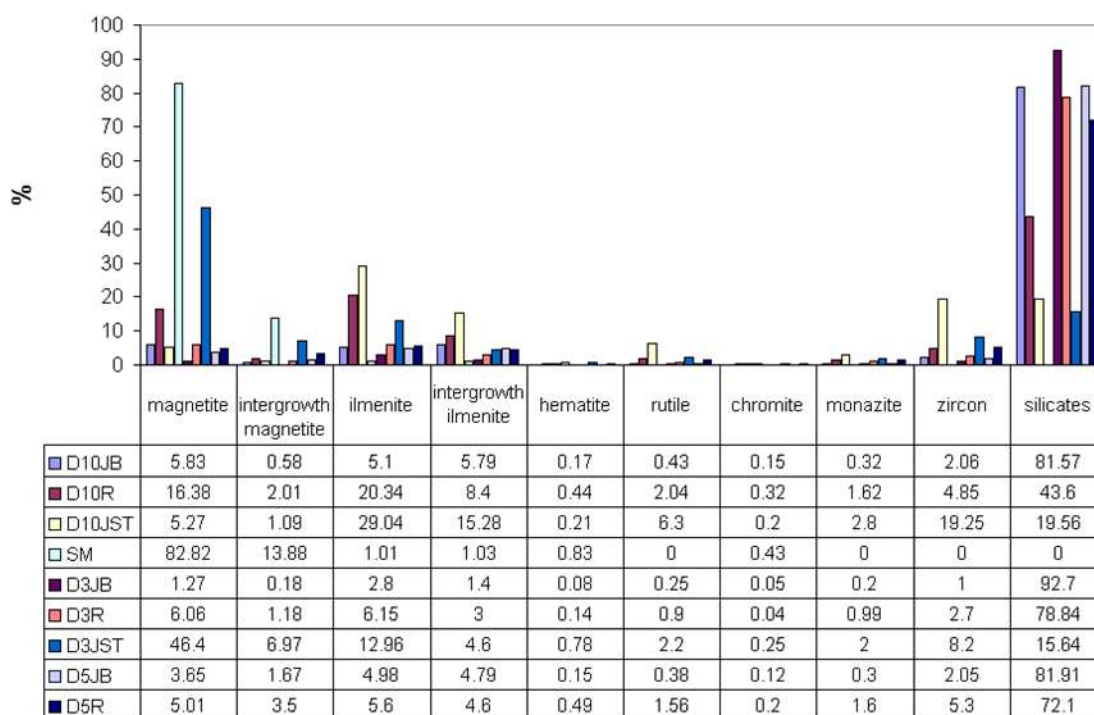


Figura 8. Proporciones minerales como subproductos de minería aurífera a gran escala en el aluvión del río Nechí (Lamus et al., 2006).

En las arenas negras de El Bagre el grado de liberación de las diferentes fases es variable, sin embargo, se considera que en minerales como la Monacita es de alrededor del 90%, donde solo el 10% de los granos presentan pequeñas inclusiones de otros minerales, frecuentemente xenotima y torita (Lamus et al., 2006). En la Figura 9 se observa un grano trifásico de monacita-xenotima-torita del depósito aluvial del río Nechí, donde la monacita aparece en forma anedral o subedral y formando exoluciones de xenotima con texturas muy finas como pequeñas gotas e intercrecimiento con torita (Lamus et al., 2006).

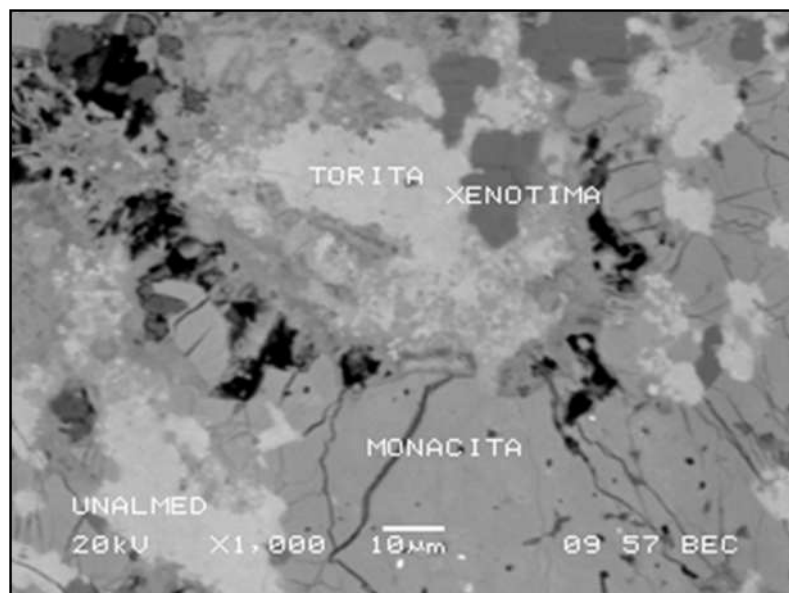


Figura 9. Grano trifásico de monacita-xenotima-torita del aluvión del río Nechí (Lamus et al., 2006).

También se ha caracterizado el contenido de REE en los carbones de Colombia, como se indica en la Figura 10, demostrando que los niveles de estos elementos en el territorio antioqueño están por encima del *cut-off* de exploración para REE en carbones a nivel mundial (Henao, 2019).



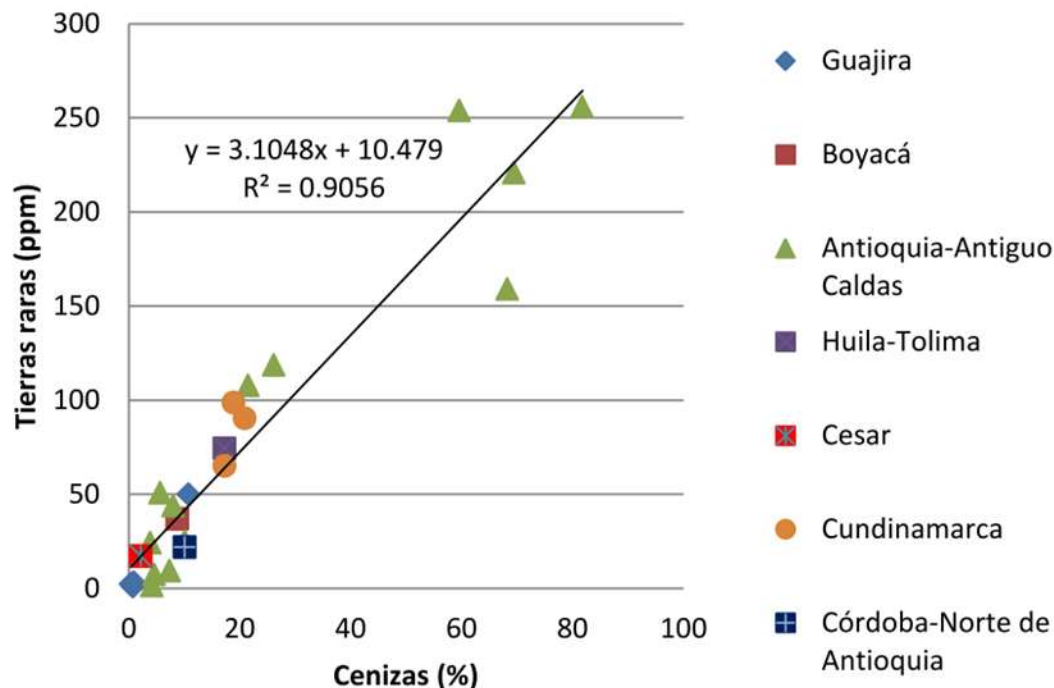


Figura 10. Contenido de REE en carbones colombianos (Henao, 2019).

Con base en los antecedentes presentados, la hipótesis de este trabajo de investigación es que en el departamento de Antioquia existe la prefactibilidad técnica y económica de ejecutar una campaña de prospección detallada de REE para desarrollar la cadena de valor de estos minerales estratégicos en Colombia, adicionalmente los granitos y depósitos aluviales con mineral de Monacita serán claves para la geolocalización de zonas potenciales.

### 1.3 Planteamiento del problema

Se entiende por recurso mineral a la concentración u ocurrencia de un material sólido con interés económico, donde su cantidad anómala, tenor o calidad permite la generación de perspectivas razonables para una eventual extracción económica. La ubicación, cantidad, calidad, continuidad y otras características geológicas de un recurso mineral son conocidas, estimadas o interpretadas a partir de evidencias y conocimientos geológicos específicos, incluyendo el muestreo (Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales -CCRR-, 2018).

Los factores modificadores son consideraciones usadas para convertir recursos minerales a reservas minerales, estos son factores relacionados a explotación minera, procesamiento mineral, metalurgia, infraestructura, aspectos económicos, legales, ambientales, sociales y gubernamentales (Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales -CCRR-, 2018).

En 1971 Georges Matheron definió la geoestadística como las “aplicaciones de la teoría de las variables regionalizadas” y fue desarrollada especialmente con referencia a la estimación de recursos y reservas minerales (Sinclair & Blackwell, 2004). La teoría geoestadística es importante porque proporciona una base teórica y matemática para optimizar las estimaciones y simulaciones de acuerdo con criterios bien aceptados y produce una medida de calidad (varianza del error) de esas estimaciones (Sinclair & Blackwell, 2004). Los métodos de estimación tradicionales, incluida la poligonal, la ponderación de distancia inversa y otras técnicas, son empíricos, e incluso si se basan en la experiencia en otros depósitos, pueden surgir problemas importantes en su aplicación a un nuevo depósito; la indicación cuantitativa de la calidad de las estimaciones empíricas debe esperar la reconciliación durante la producción (Sinclair & Blackwell, 2004). La geoestadística ofrece el potencial de la simulación condicional, una técnica que permite una visualización de la continuidad de la ley durante la exploración y se puede utilizar para la planificación de minas y molinos en etapas más avanzadas de evaluación (Sinclair & Blackwell, 2004). El método de simulación condicionada con que se abordará el análisis geoestadístico de este trabajo es a través de la simulación con bandas rotantes, desarrollada por Matheron en 1973, cuyo procedimiento simula valores dentro de un depósito mineral para que los datos simulados tengan el mismo valor que las observaciones en los puntos de muestra y tengan las mismas distribuciones estadísticas que la correlación espacial (D.D. Sarma, 2009).

Este trabajo estará enmarcado teóricamente en la simulación geoestadística, los recursos minerales estratégicos y el desarrollo de la cadena de valor minera de los REE para Colombia bajo la pregunta de investigación: ¿cómo se interpretan las simulaciones del tenor de TREO en el departamento de Antioquia en términos de prefactibilidad técnica y económica para ejecutar una campaña de prospección detallada en búsqueda de estos materiales estratégicos?

## 2. Estudio geoestadístico de REE en Antioquia

El estudio geoestadístico se desarrolló para las variables del tenor de TREO y del tenor de TREO transformado a una distribución gaussiana normalizada, de esta forma se estimó los contenidos de metal total en bloques de 1 km x 1 km bajo los métodos de simulación de bandas rotantes (BR) y kriging ordinario de bloques (KOB), con el objetivo de identificar blancos o *targets* de exploración con significancia geoestadística por encima del *cut-off* de exploración asumido a nivel mundial de 800 ppm o 0.08% de TREO. En las Ecuaciones 3-4 se presenta la interpretación matemática de las dos variables estudiadas.

$$TREO (ppm) = CeO_2 + Er_2 O_3 + Eu_2 O_3 + Dy_2 O_3 + Gd_2 O_3 + Ho_2 O_3 + La_2 O_3 + Lu_2 O_3 \\ + Nd_2 O_3 + Pr_6 O_{11} + Sc_2 O_3 + Sm_2 O_3 + Tb_4 O_7 + Tm_2 O_3 + Y_2 O_3 + Yb_2 O_3$$

Ecuación 3. Fórmula del tenor TREO (ppm).

Una vez se obtuvo la suma de los óxidos de tierras raras de cada punto muestreado se procedió a realizar el procedimiento de anamorfosis de la transformación logarítmica.

$$TREO_{gaussiano} = \ln(TREO)$$

Ecuación 4. Fórmula de la variable TREO gaussiano.

## 2.1 Análisis Exploratorio de Datos (EDA)

### 2.1.1 Q-Q plots

Para identificar el comportamiento de la distribución estadística que presentan los datos de TREO es útil los gráficos cuantil-cuantil (Q-Q). En las Figuras 11-13 se prueban los datos mediante gráficos Q-Q con una distribución teórica de tipo gaussiana, lognormal y exponencial, respectivamente.

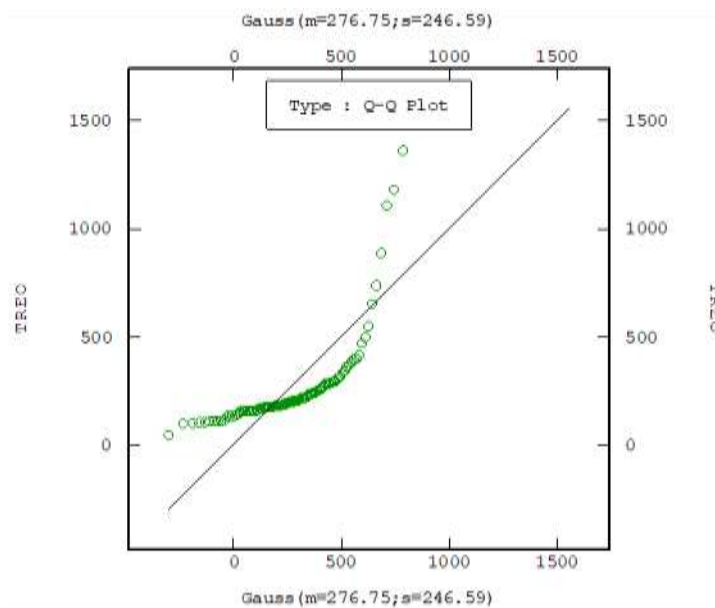


Figura 11. Gráfico Q-Q del TREO (ppm) de distribución gaussiana.

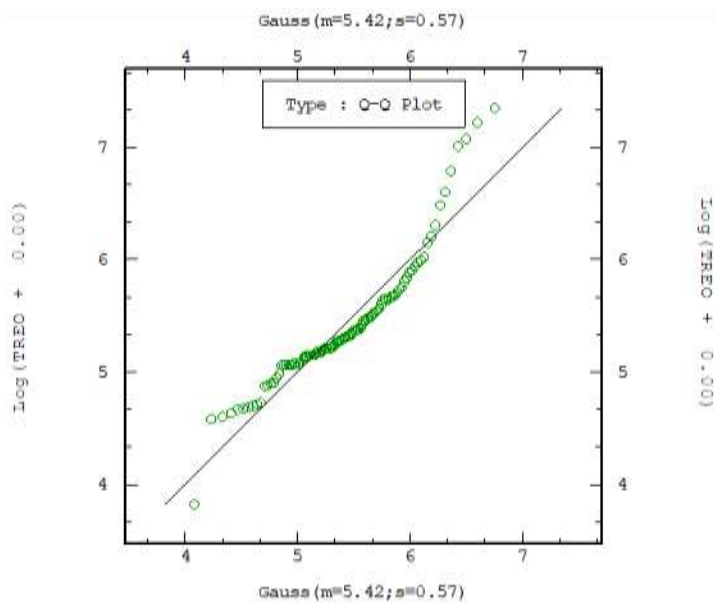


Figura 12. Gráfico Q-Q del TREO de distribución lognormal.

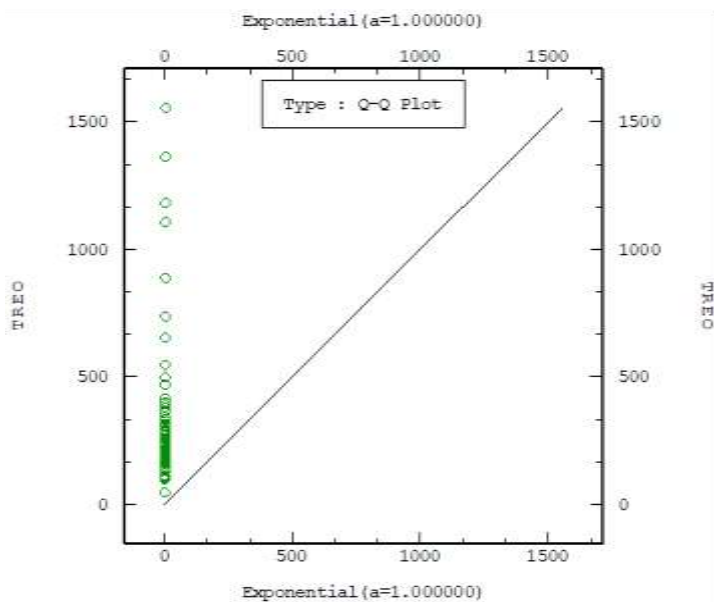


Figura 13. Gráfico Q-Q del TREO de distribución exponencial.

Journel y Huijbregts (1978) proporcionan los antecedentes matemáticos del kriging lognormal, y David (1988) ofrece un resumen con advertencias sobre las aplicaciones

prácticas. Los datos se transforman logarítmicamente y con anamorfosis gaussiana, y luego se realiza kriging ordinario sobre los valores transformados logarítmicamente (Sinclair & Blackwell, 2004). Este procedimiento se aplica cuando los datos se distribuyen lognormalmente; en consecuencia, el valor estimado es el valor medio transformado logarítmicamente, cuya transformación inversa es la media geométrica. En distribuciones lognormales, la media geométrica es sustancialmente menor que la media aritmética; en consecuencia, la media aritmética y la dispersión del error asociado deben calcularse a partir de las estimaciones de los parámetros logarítmicos (Sinclair & Blackwell, 2004). Considere una variable  $Y(x) = \ln[Z(x)]$  (es decir,  $Z$  representa los datos sin procesar e  $Y$  los datos transformados logarítmicamente) (Sinclair & Blackwell, 2004).

La variable TREO sigue un comportamiento estadístico preferencialmente de tipo lognormal. David (1988) plantea los inconvenientes del uso del kriging lognormal, debido a que las variaciones en los parámetros del semivariograma cargados pueden arrojar diferencias significativas en los resultados de la varianza del kriging. El autor concluye que “una persona deshonesto puede tomar el tenor estimado que desee, simplemente cambiando el rango de los parámetros del variograma. Esto no hace el kriging lognormal una herramienta recomendable” (Sinclair & Blackwell, 2004).

### 2.1.2 Boxplots

Se analizó 101 compósitos de TREO en la geoquímica de sedimentos activos sobre el territorio de Antioquia, los cuales indicaron que el tenor promedio es 276.75 ppm, su valor mínimo es 45.73 ppm y el valor máximo es 1,554.83 ppm. También se obtuvo que la desviación estándar es 246.59 ppm, la varianza es 60,805.84 ppm<sup>2</sup> y el coeficiente de variación es 0.89. En la Tabla 3 se presentan los cuantiles correspondientes al 5%, 25%, 50%, 75%, 90% y 98% de los datos. El diagrama de bigotes de la variable TREO que se presenta en la Figura 14 representa gráficamente la distribución de las anteriores estadísticas.

Por otra parte, la variable TREO gaussiano fue estandarizada como parte del procedimiento geoestadístico de anamorfosis de la simulación condicionada (Chilés &

Delfiner, 1999). La Figura 15 indica el diagrama de bigotes de la variable TREO gaussiano estandarizado.

Tabla 3. Cuantiles de variable TREO (ppm).

Q5	Q25	Q50	Q75	Q90	Q98
107.24	162.60	201.43	283.78	413.84	1,181.50

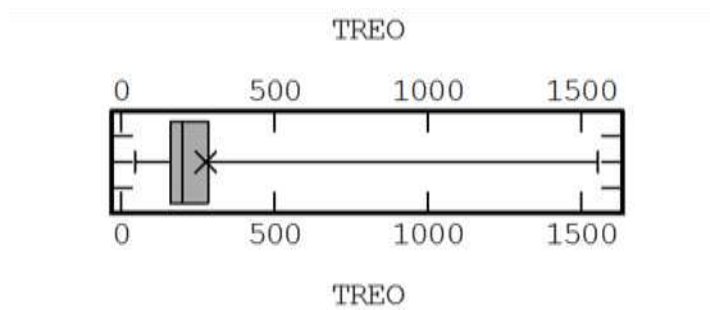


Figura 14. *Boxplot* de tenor TREO (ppm).

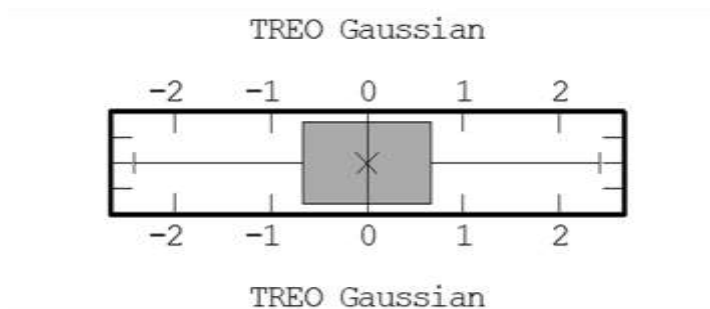


Figura 15. *Boxplot* de tenor TREO gaussiano estandarizado.

### 2.1.3 Histogramas

El histograma de frecuencias de la variable TREO indica un comportamiento de distribución lognormal según la Figura 16. Por su parte el histograma de frecuencias de la variable TREO gaussiano estandarizado en la Figura 17 muestra una campana uniforme, con promedio de 0.00 y desviación estándar de 0.99, lo cual es característico de las distribuciones normales.

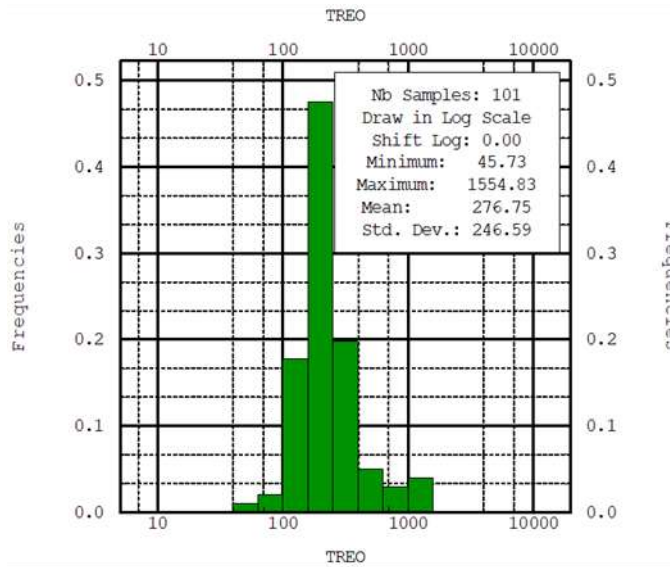


Figura 16. Histograma del tenor TREO.

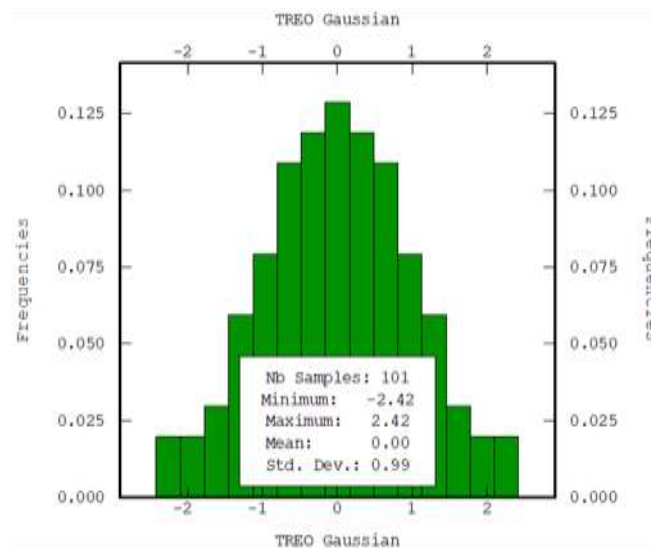


Figura 17. Histograma de variable TREO gaussiano estandarizado.

### 2.1.4 Análisis de correlación

El análisis de correlación de Pearson, medida de dependencia lineal, se realizó con el tenor de cada metal de tierras raras en Antioquia (ver Tabla 4). Los resultados muestran fuertes correlaciones entre las tierras raras livianas (pares La-Ce-Pr-Sm) y buenas correlaciones entre los metales de tierras raras pesadas (Er-Lu-Yb-Tm), y ninguna relación espacial del



escandio (Sc) con el resto de REE. Los metales que presentan la menor dependencia lineal del conjunto de REE son principalmente el escandio, el europio y el iterbio.

Tabla 4. Correlación de Pearson de los REE en Antioquia.

Ce	1																
Dy	0.88	1															
Er	0.71	0.95	1														
Eu	0.66	0.85	0.86	1													
Gd	0.97	0.96	0.84	0.78	1												
Ho	0.81	0.98	0.98	0.87	0.92	1											
La	1.00	0.87	0.68	0.64	0.97	0.79	1										
Lu	0.70	0.92	0.98	0.82	0.82	0.96	0.68	1									
Nd	1.00	0.9	0.74	0.69	0.98	0.84	0.99	0.73	1								
Pr	1.00	0.89	0.72	0.68	0.98	0.83	1.00	0.72	1.00	1							
Sc	-0.27	0.00	0.12	0.23	-0.13	0.05	-0.27	0.12	-0.23	-0.25	1						
Sm	0.99	0.93	0.78	0.73	0.99	0.87	0.99	0.77	1.00	0.99	-0.19	1					
Tb	0.94	0.99	0.89	0.81	0.99	0.95	0.93	0.87	0.95	0.95	-0.07	0.97	1				
Tm	0.71	0.95	0.99	0.83	0.84	0.98	0.69	0.98	0.74	0.73	0.12	0.79	0.9	1			
Y	0.81	0.98	0.98	0.86	0.92	1.00	0.79	0.96	0.84	0.83	0.03	0.87	0.95	0.98	1		
Yb	0.70	0.93	0.99	0.83	0.83	0.97	0.68	1	0.74	0.72	0.12	0.78	0.88	0.99	0.97	1	
	Ce	Dy	Er	Eu	Gd	Ho	La	Lu	Nd	Pr	Sc	Sm	Tb	Tm	Y	Yb	

## 2.2 Variografía

### 2.2.1 Semivariogramas experimentales

El semivariograma experimental del tenor TREO se calculó con 101 datos de forma omnidireccional con una distancia de *lag* o paso de 19 km, un porcentaje de tolerancia del *lag* del 50% y con un número de 10 *lags*. La Figura 18 muestra la varianza estadística del tenor TREO, correspondiente a 60,805.84 ppm<sup>2</sup>, comparada a la meseta o *sill* de la curva que resulta del semivariograma, el cual es presentado con sus respectivos números de pares y el histograma de la nube de puntos. Se observa que la meseta se estabiliza por encima de la varianza estadística.

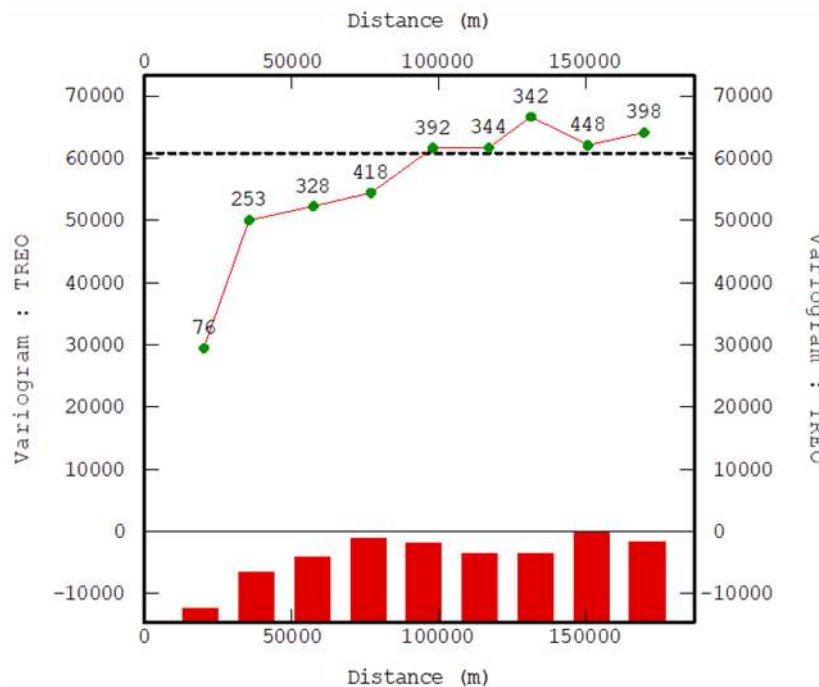


Figura 18. Semivariograma experimental del tenor TREO.

Por otra parte, en la Figura 19 se muestra el semivariograma experimental del tenor TREO gaussiano, cuya meseta se estabiliza por debajo de la varianza estadística de 0.974. Este semivariograma fue calculado de forma omnidireccional con 101 datos, *lag* de 14 km, tolerancia del 50% y 10 *lags*.

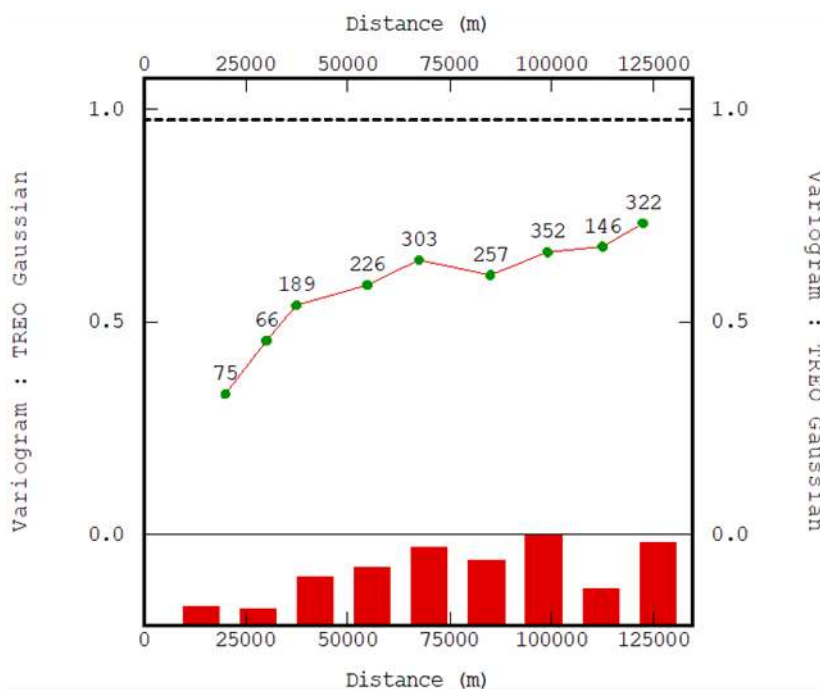


Figura 19. Semivariograma experimental del tenor TREO gaussiano.

## 2.2.2 Modelo de variogramas

Sobre la variable TREO se ajustó un modelo de variograma Exponencial de 1 estructura básica, *sill* de 62,480 ppm<sup>2</sup>, con rango efectivo de 81.4 km, es decir que las muestras de REE tienen un rango de influencia en Antioquia aproximado de 27.1 km. La Figura 20 muestra el variograma propuesto para representar los datos de los tenores de TREO sobre Antioquia.

De igual forma se fijó un modelo de variograma para la variable TREO gaussiano de tipo Exponencial de 1 estructura básica, rango efectivo de 84.6 km (muy similar a su contraparte original) y *sill* de 0.696 (ver Figura 21).

El método de mínimos cuadrados ponderados propuesto por Cressie (1985) fue el usado para ajustar los semivariogramas experimentales a los modelos de variograma. Se ha investigado que el método de mínimos cuadrados ponderados es una forma adecuada de ajustar modelos de variograma (Cressie, 1985).

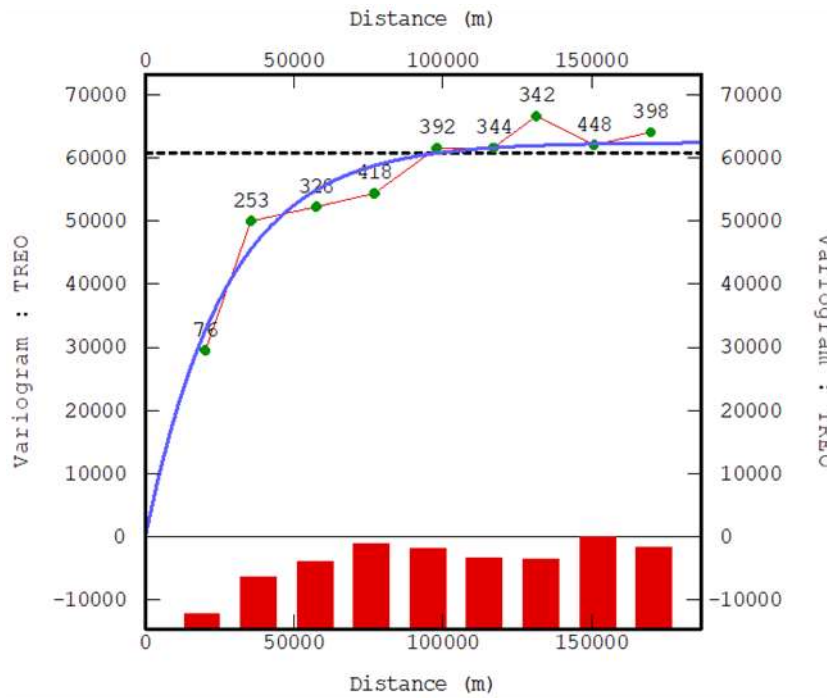


Figura 20. Modelo de variograma Exponencial del tenor de TREO.

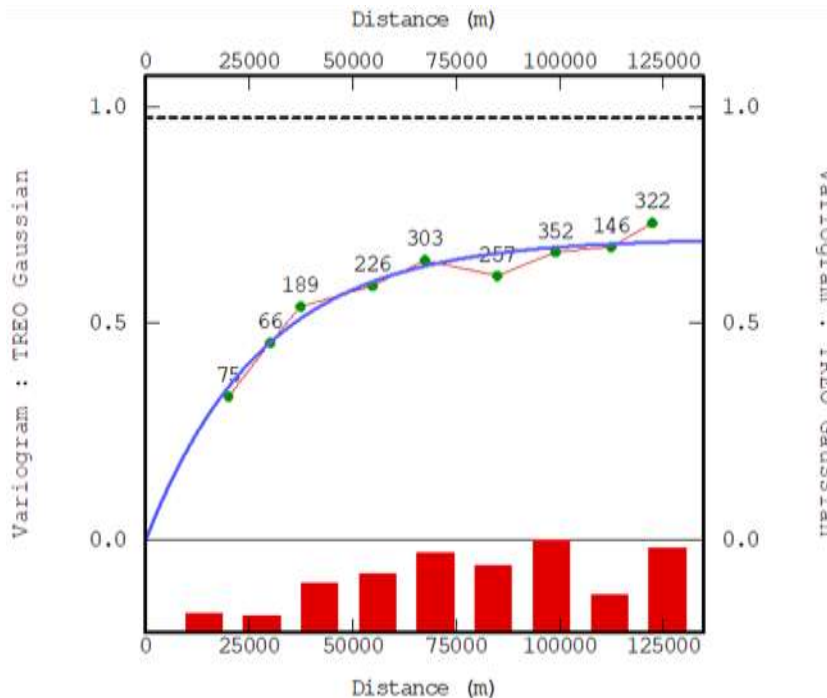


Figura 21. Modelo de variograma Exponencial del tenor TREO gaussiano.

## 2.2.3 Validación cruzada

Para aceptar los modelos propuestos se fijó un porcentaje máximo de rechazo de muestras del 6% y estadísticas basadas en los 101 datos de prueba donde el promedio del error estandarizado estuviera cercano a 0 y la varianza del error estandarizado cercana a 1. En la Figura 22 se muestra los resultados de la validación cruzada del variograma Exponencial del tenor TREO, indicando que los valores estimados se ajustan a los reales con un coeficiente  $\rho$  de 0.547, también se presenta la ubicación de tenores reales vs estimados, las estadísticas de la variable estandarizada y los 6 datos que no logra representar el modelo. Las estadísticas basadas en 101 datos de prueba del tenor TREO resultaron que el promedio del error estandarizado fue 0.017 y la varianza del error estandarizado fue 1.086. En este sentido se aceptó el modelo con un porcentaje de rechazo de muestras del 5.94%, es decir 5 datos que no fueron clasificados como robustos de 101 muestras, teniendo que un dato es robusto cuando su error estandarizado se encuentra entre -2.5 y 2.5 (ver Figura 22).

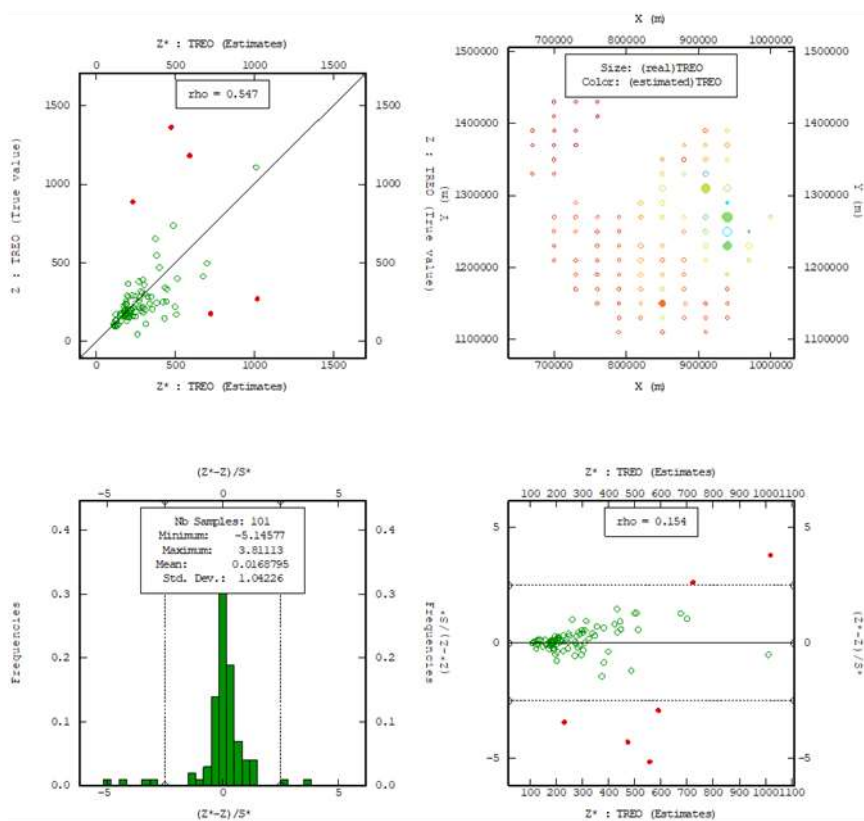


Figura 22. Cross-Validation de variograma Exponencial del tenor TREO.

Los resultados de la validación cruzada del variograma del tenor TREO gaussiano se presentan en la Figura 23, donde se destaca una correlación entre los valores estimados y los reales a través del coeficiente de Pearson de 0.712, indicando buena dependencia lineal positiva, además fueron excluidos 3 datos, quedando así 98 datos robustos. Se acepta el modelo con un porcentaje de rechazo de datos del 2.97%, y estadísticas basadas en 101 datos del promedio del error estandarizado de 0.024 y varianza del error estandarizado de 1.071.

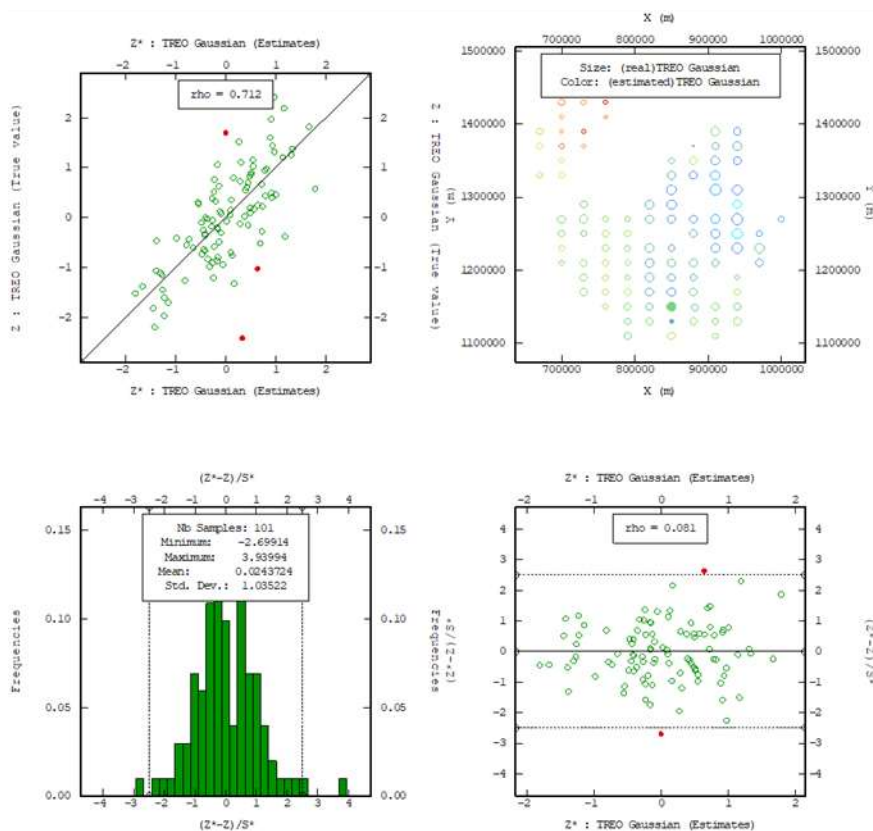


Figura 23. *Cross-Validation* de variograma Exponencial del tenor TREO gaussiano.

## 2.3 Simulación con Bandas Rotantes (BR)

Utilizando el variograma Exponencial del tenor TREO gaussiano, su rango efectivo de 84.6 km y sobre una malla de estimación sobre Antioquia de 1 km x 1 km, se realizaron 100 simulaciones condicionadas con 400 bandas rotantes para la variable TREO gaussiano, ya que el método requiere que la variable se encuentre transformada a logaritmo

---

neperiano. El resultado final es una macrovariable que alberga cada simulación realizada, su valor mínimo, el máximo y el promedio de las 100 simulaciones.

### 2.3.1 Escenario promedio

El promedio de las 100 simulaciones por BR se presenta en la Figura 24, categorizando el tenor TREO simulado en 7 colores o clases, desde el tenor mínimo (70 ppm), pasando por los percentiles 5% (122 ppm), 25% (184 ppm), 50% (224 ppm), 75% (340 ppm), 90% (545 ppm) y 98% (881 ppm), hasta el tenor máximo (1,493 ppm). De forma complementaria se realizó una envolvente o curva de isotenor a 800 ppm, que corresponde al cut-off de exploración para tierras raras aceptado a nivel mundial (Barakos et al., 2016; Hou et al., 2021; Jaireth, Hoatson, & Mieзитis, 2014), identificando dos áreas con potencial de prospectividad para el desarrollo de la cadena de valor minera de REE en Antioquia, localizadas en las subregiones de Nordeste y Bajo Cauca. Las dos áreas que superaron el *cut-off* de 800 ppm y que fueron delimitadas sobre el promedio de las 100 simulaciones por BR constituyen oficialmente los blancos o *targets* de prospección detallada REE en Antioquia, de ahora en adelante *Target* Nordeste y *Target* Bajo Cauca.

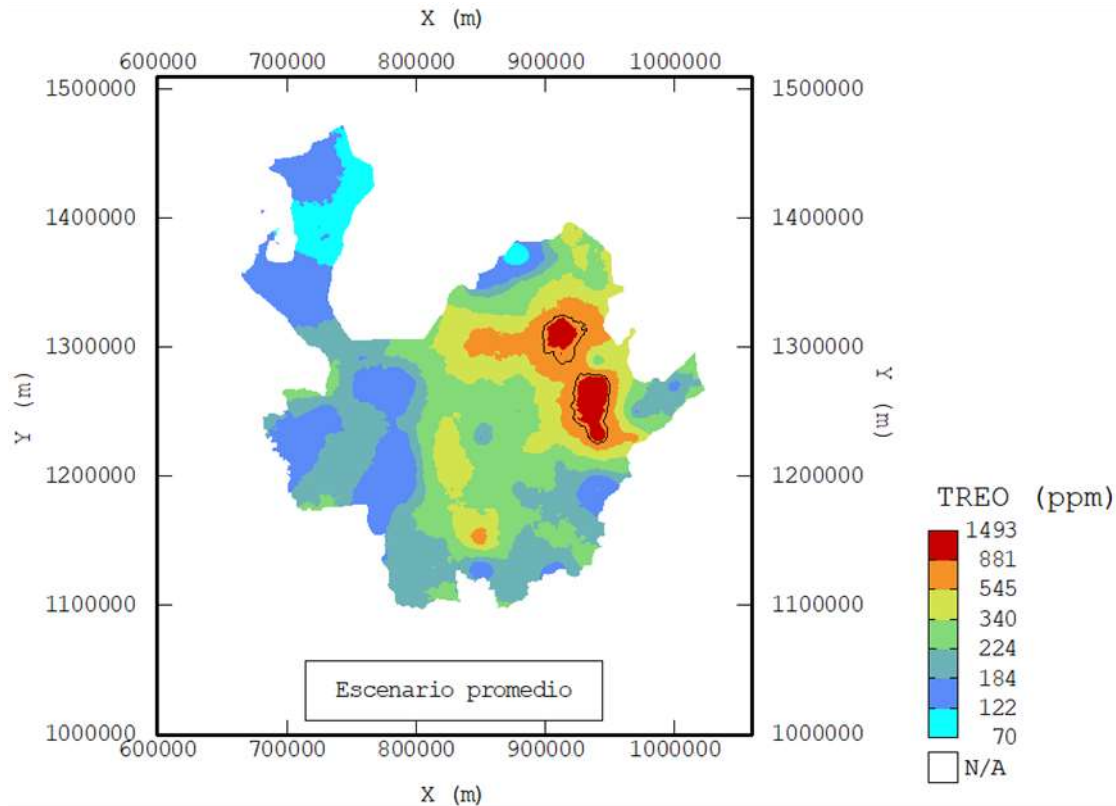


Figura 24. Escenario promedio de Simulación por BR del tenor TREO.

### 2.3.2 Escenario optimista

Se estudia la simulación con los valores mayores, resultado del tenor promedio más la desviación estándar de cada bloque, de forma que representa el escenario optimista para la búsqueda de áreas con potencial de prospectividad de REE. La Figura 25 ilustra el mapa de Antioquia clasificando el tenor TREO simulado en 7 colores de acuerdo al valor mínimo (89 ppm), Q5% (187 ppm), Q25% (313 ppm), Q50% (613 ppm), Q75% (1,298 ppm), Q90% (1,535 ppm), Q98% (1,549 ppm) y tenor máximo (1,555 ppm). Basados en la Figura 25 se puede afirmar que más de 1/3 del territorio antioqueño tendría viabilidad de prospección detallada de REE, puesto que la envolvente de isotenor que supera el *cut-off* de 800 ppm es representativo especialmente en las subregiones de Nordeste, Bajo Cauca, Norte, Valle de Aburrá y parte de Oriente.



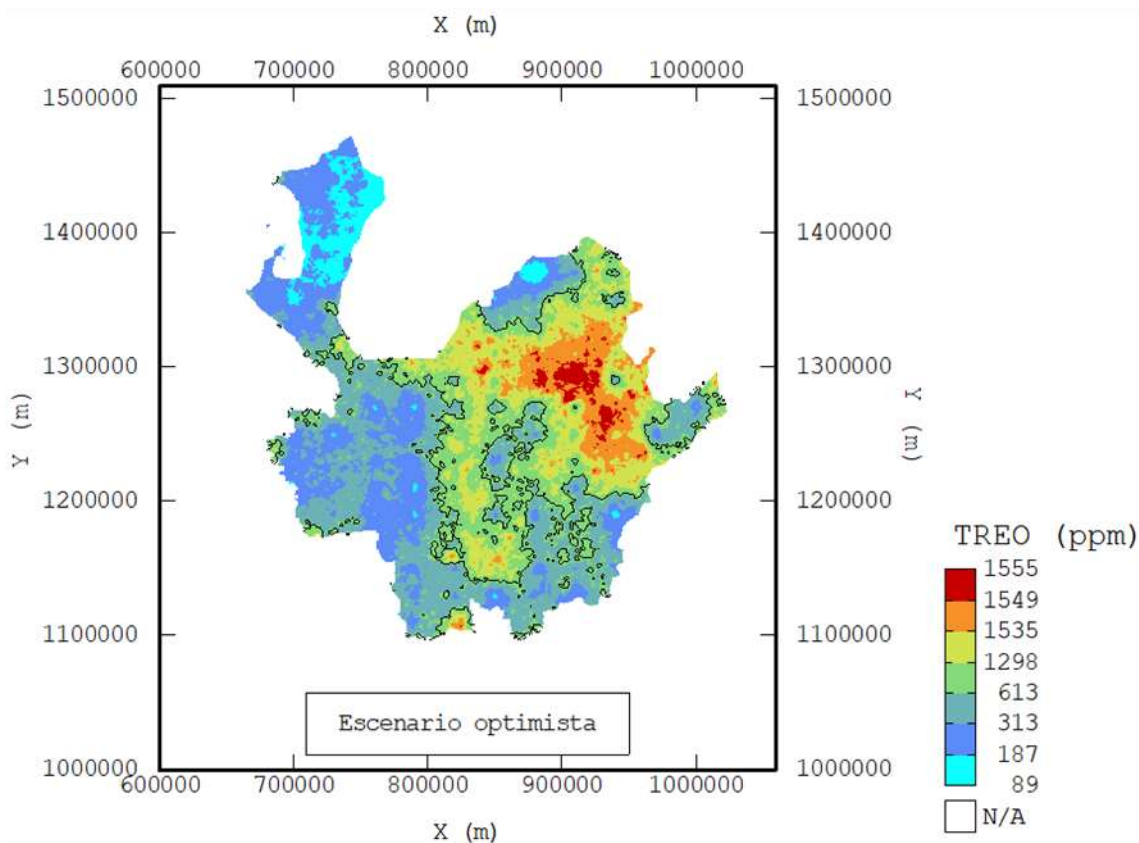


Figura 25. Escenario optimista de Simulación por BR del tenor TREO.

### 2.3.3 Escenario pesimista

Por último, se presenta en la Figura 26 la simulación por BR de valores menores que representa el escenario más pesimista para buscar REE en Antioquia, diferenciado en 7 clases según el tenor mínimo (46 ppm), Q5% (47 ppm), Q25% (105 ppm), Q50% (126 ppm), Q75% (171 ppm), Q90% (193 ppm), Q98% (261 ppm) y tenor máximo (1,381 ppm). Sin embargo es interesante que, en el peor de los escenarios simulados, continúan existiendo dos áreas o envolventes en el Nordeste y Bajo Cauca por encima del *cut-off* de 800 ppm y que permitiría la inversión de prospección detallada en estas ubicaciones. Este mapa es el resultado de la resta entre el tenor promedio menos la desviación estándar simulada para cada bloque.

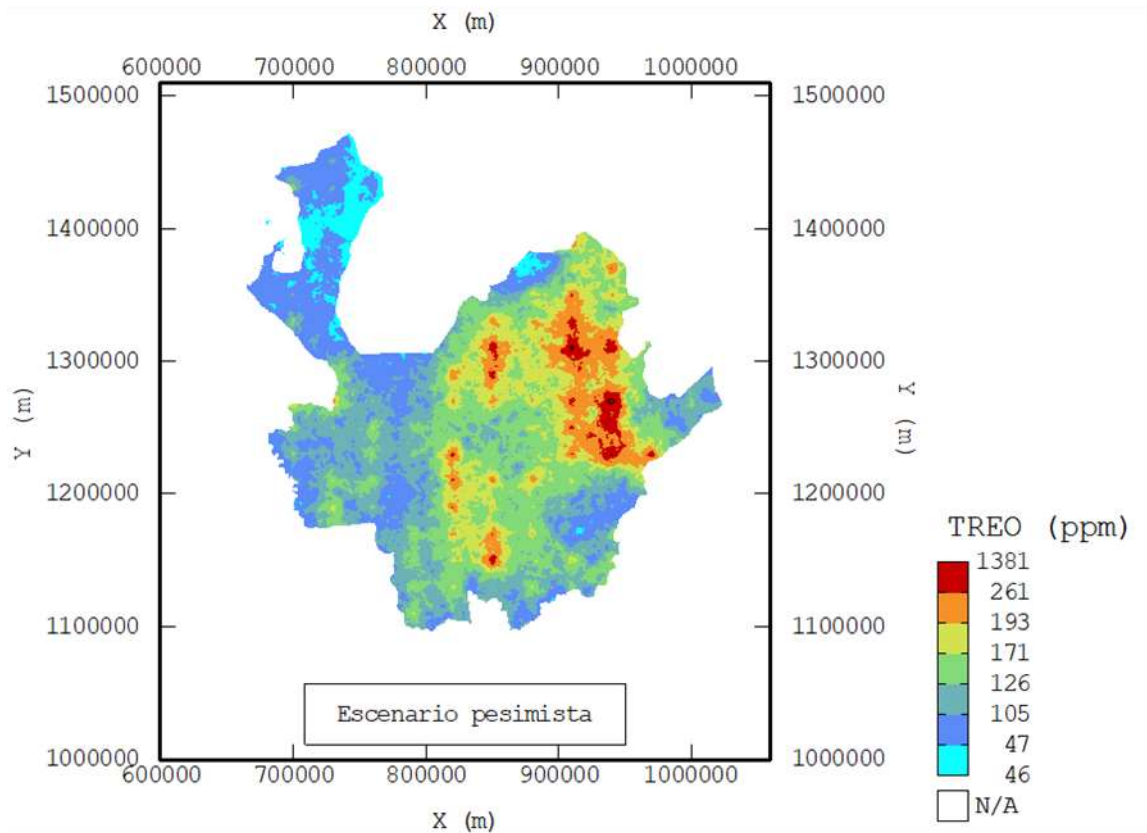


Figura 26. Escenario pesimista de Simulación por BR del tenor TREO.

## 2.4 Estimación con Kriging Ordinario de Bloques (KOB)

Se ejecutó la estimación por KOB en Antioquia utilizando el variograma del tenor TREO, cuyo rango efectivo del variograma exponencial fue 81.4 km y sobre una malla de estimación de 1 km x 1 km. La Figura 27 muestra el mapa de tenores estimados y clasificados según el valor mínimo (49 ppm), Q5% (119 ppm), Q25% (183 ppm), Q50% (226 ppm), Q75% (325 ppm), Q90% (550 ppm), Q98% (974 ppm) y tenor máximo (1,532 ppm). También se presentan los isotenores a 800 ppm, dando como resultado 3 áreas con potencial minero para REE en Antioquia, localizadas en las subregiones del Nordeste y Bajo Cauca (misma ubicación espacial que delimitó la simulación por BR), y una tercera de menor área pero por encima del *cut-off* que se ubica en el municipio de La Ceja.

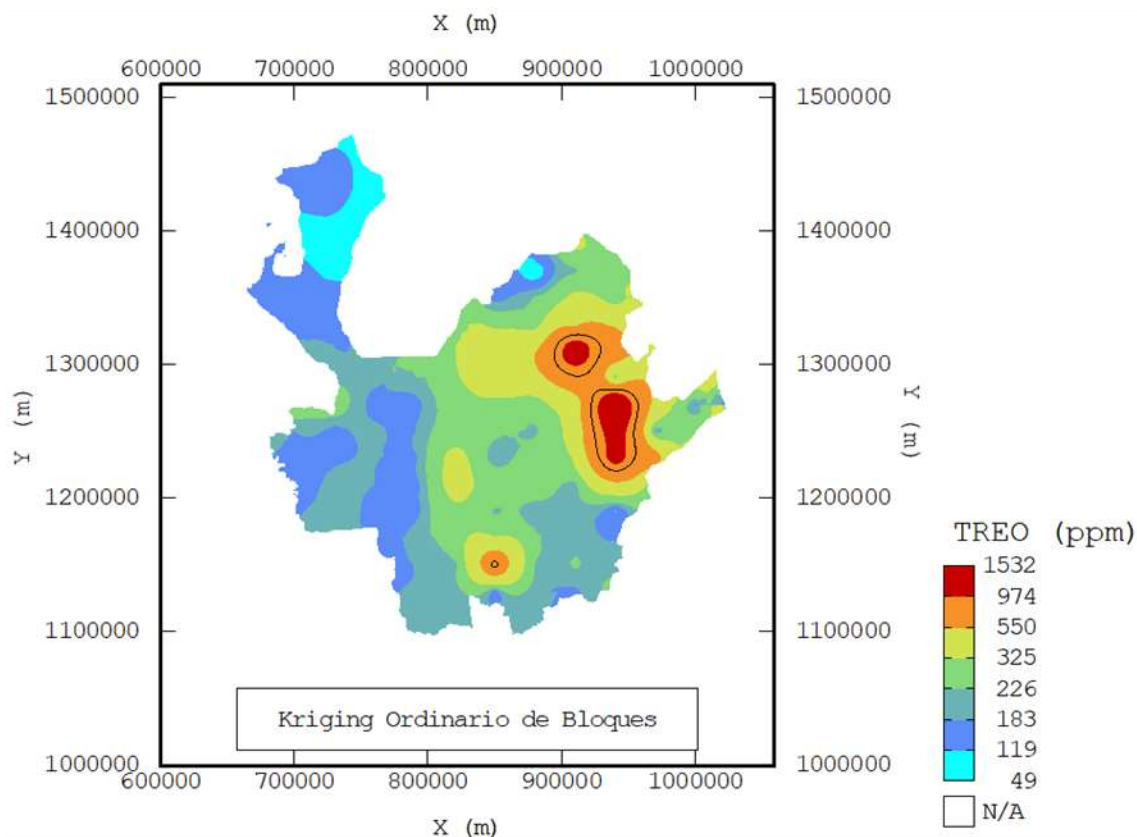


Figura 27. Estimación por KOB del tenor TREO.

## 2.5 Simulación BR vs. Estimación KOB

El promedio de los escenarios simulados por BR y la estimación por KOB se correlacionaron con un coeficiente de Pearson de 0.957, logrando una excelente regresión lineal positiva entre los valores obtenidos por ambos métodos geoestadísticos. La principal similitud entre los mapas de la simulación por BR (Figura 24) con el mapa de la estimación por KOB (Figura 27) es que los altos tenores de TREO en Antioquia se encuentran distribuidos espacialmente en las mismas ubicaciones geográficas, dando positivos blancos o *targets* de exploración en el Nordeste, Bajo Cauca y en el municipio de La Ceja. Sin embargo, debido al potencial de la simulación de representar con mayor precisión la realidad relativa de los datos en el espacio, se opta por generar los *targets* oficiales de prospección detallada con la envolvente isotenor de 800 ppm sobre el promedio de las 100 simulaciones en lugar de la estimación por KOB, en este sentido el área potencial del municipio de La Ceja no se tendrá en cuenta en el diseño técnico y económico de prospección detallada de REE de Antioquia en capítulos posteriores. Así, el método por BR fue más conservador para altos tenores que los resultados obtenidos por KOB, lo cual

es más prudente para la fase de prospección detallada debido a que es un negocio de alto capital y alto riesgo.

En la Figura 28 se muestra el diagrama de correlación de los tenores o leyes simuladas por BR entendiéndolas como la realidad relativa del terreno *versus* los tenores estimados por KOB vistos como normalmente se aplican a la estimación de recursos minerales. Se organizaron 4 cuadrantes a partir del tenor de corte de 800 ppm de TREO, que corresponden a lo que ambos métodos geoestadísticos clasifican como Mena, Dilución, Mena perdida y Estéril. De la Figura 28 se entiende como Dilución la proporción del depósito mineral que se estima por encima del tenor de corte y en la realidad se encuentra por debajo del mismo, lo cual ocasiona incumplimiento de la producción planeada; por su parte, una menor proporción del diagrama de correlación considerada Mena perdida, corresponde al área que no fue estimada para desarrollar minería porque se estimó por debajo del *cut-off* cuando el depósito mineral realmente sí contenía dicho tenor, lo cual se convierte a pérdida de recursos y reservas. El material que se considera Estéril obedece a lo que ambos métodos estimaron por debajo de 800 ppm y es rechazado para fines productivos.

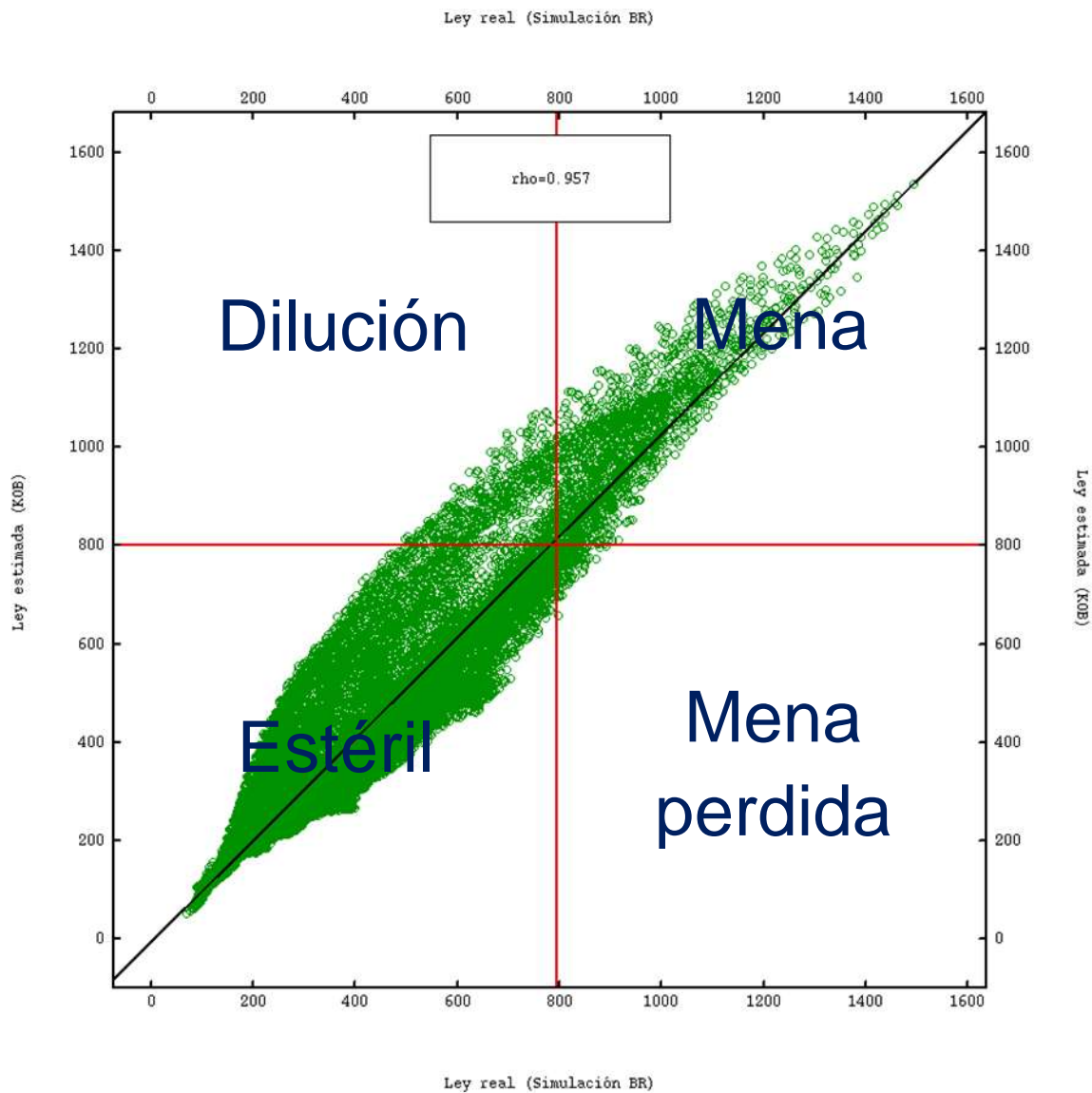


Figura 28. Tenor TREO real relativo (Simulación BR) vs. Tenor TREO estimado (Estimación KOB).

## 2.6 Reporte de recursos minerales inferidos de TREO

La estimación de recursos minerales de TREO en el departamento de Antioquia se calculó con el método de simulación por BR, debido a que es una técnica geoestadística más robusta que el KOB.

### 2.6.1 Tenor promedio de TREO vs. *Cut-off*

Se encontró que los *targets* de exploración de REE en Antioquia por encima del *cut-off* de 800 ppm simulados por BR cumplen con un tenor promedio de TREO de 900 ppm aproximadamente, como lo indica la curva de la Figura 29 que representa el promedio de las 100 simulaciones y su relación del tenor promedio TREO frente a cualquier *cut-off* dado por condiciones técnicas o del mercado de tierras raras.

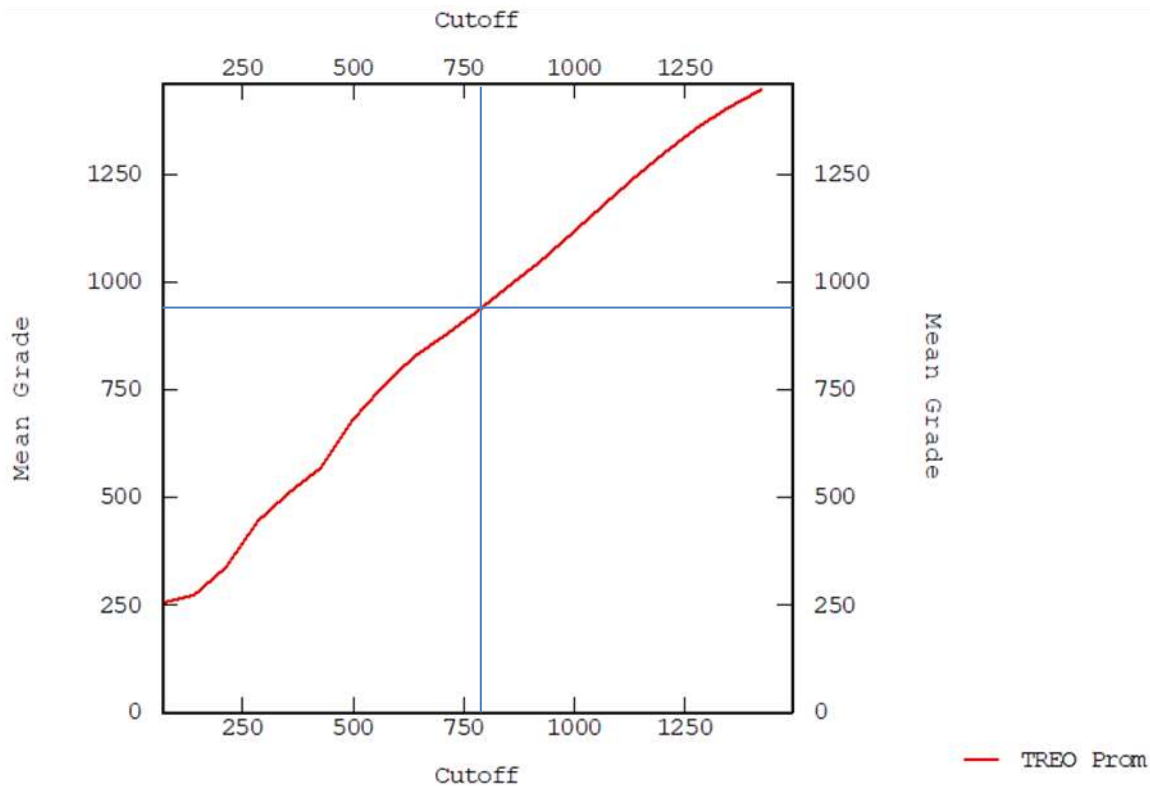


Figura 29. Curva Tenor promedio TREO vs. *Cut-off*.

### 2.6.2 Proporción de recursos inferidos vs. *Cut-off*

Frente a la cantidad o proporción de recursos inferidos de TREO *versus* el *cut-off* se encontró en la Figura 30 que para 800 ppm de tenor de corte se estima aproximadamente un 2% del área de Antioquia bajo la proporción de recursos minerales inferidos de TREO.

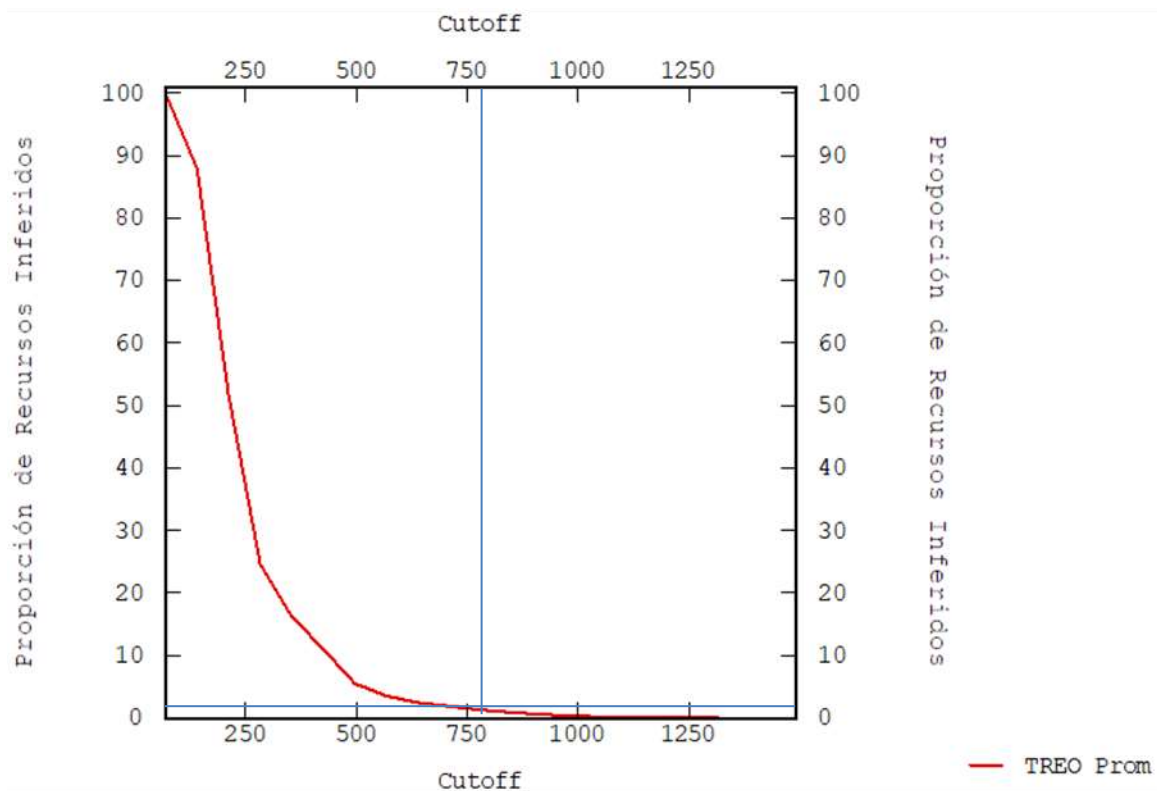


Figura 30. Curva Proporción de recursos inferidos de TREO vs. *Cut-off*.

Con base en la Ecuación 5 se calculó el contenido de óxido total de REE que contienen los *targets* de exploración en Antioquia y que definen el potencial de prospectividad.

$$TREO (t) = \text{Área de targets (m}^2\text{)} * \text{Profundidad del depósito (m)} \\ * \text{Densidad de la roca (t/m}^3\text{)} * \text{Tenor TREO (\%)}$$

Ecuación 5. Fórmula de la concentración de TREO (t).

En la Tabla 5 se presenta la estimación de recursos minerales de óxidos de tierras raras reportada por encima del *cut-off* de 0.08% de TREO que contiene el departamento de Antioquia a enero de 2022 por cada metro de profundidad del depósito mineral. Las dos envolventes con *cut-off* de 800 ppm encerraron un área total de 201,646 ha, correspondientes a 83,098 ha del *Target* Bajo Cauca y 118,547 ha del *Target* Nordeste, las cuales presentan un tenor promedio de 900 ppm o 0.09% de TREO, y asumiendo una densidad promedio de 2.7 t/m<sup>3</sup> para las rocas contenedoras de REE, en dichos *targets* se

estiman recursos inferidos de 4.9 millones de toneladas (Mt) de TREO por cada metro de profundidad. Estos recursos inferidos lo componen 2.9 Mt de recursos inferidos de TREO del *Target* Nordeste y 2 Mt inferidas de TREO del *Target* Bajo Cauca. En fases posteriores de inversión en exploración se definirá la profundidad de los prospectos, leyes y densidades para afinar el cálculo de recursos inferidos y posiblemente delimitar recursos indicados, de acuerdo al nivel de conocimiento del subsuelo.

Tabla 5. Estimación de recursos minerales de TREO de Antioquia con cut-off de 0.08% de TREO por cada metro de profundidad.

Recursos Minerales (Clasificación CRIRSCO)	Toneladas (Mt)	TREO (%)	TREO (Mt)
Medido	0	0	0
Indicado	0	0	0
Inferido	5,444	0.09%	4.9
<b>Total recursos</b>	<b>5,444</b>	<b>0.09%</b>	<b>4.9</b>

Para dar magnitud de los resultados obtenidos en Antioquia, en la Figura 31 se comparan con los tamaños de los principales depósitos de REE de Australia y el mundo, a través de un diagrama de tenor TREO *versus* tonelaje, clasificados en 9 tipos de yacimientos asociados (Jaireth et al., 2014). Se evidencia que los depósitos de mayor tenor son los que se encuentran asociados con carbonatitas, *skarn*, laterita residual, venas con apatito y/o fluorita, pasando por arenas de minerales pesados, rocas alcalinas hasta suelos lateríticos ricos en Escandio (Sc). De acuerdo a la Figura 31 y al tenor obtenido para los *targets* de exploración en Antioquia con la geoquímica de sedimentos activos finos de corriente de 0.09% de TREO se puede esperar depósitos de arenas con minerales pesados (de tipo aluvial o marino), asociado con rocas alcalinas o a regolitos enriquecidos en REE.

Estos hallazgos también pueden ser validados según las estadísticas reportadas en la Figura 32, donde se clasifica en 5 yacimientos minerales algunos depósitos estudiados de REE en el mundo y se compara su tenor de TREO con el *cut-off* de exploración de 800 ppm o 0.08% (Hou et al., 2021). Como se estudiará a continuación, el depósito de Antioquia está asociado a un origen granítico hidrotermal y en depósitos sedimentarios (aluviones).



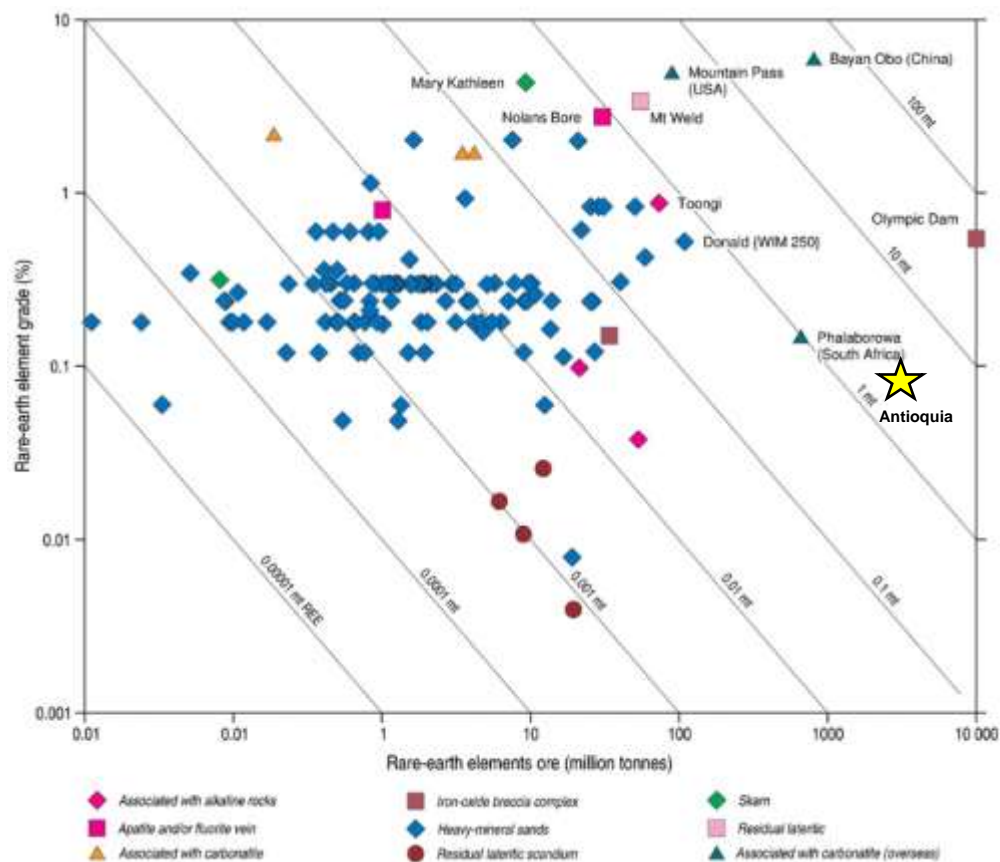


Figura 31. Diagrama de tenor TREO versus tonelaje que muestra el tamaño del depósito de REE en Antioquia y algunos representativos del mundo (Jaireth et al., 2014).

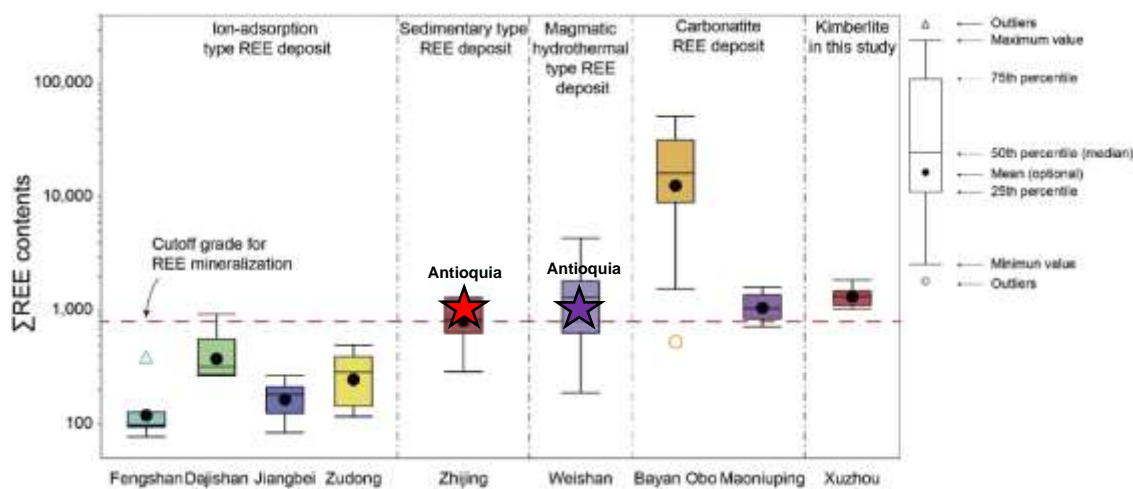


Figura 32. Diagramas de caja de los contenidos de TREO por tipo de depósito y *cut-off* de exploración de REE (Hou et al., 2021).

### 3. Ambiente geológico de blancos de exploración

#### 3.1 Geología regional de Antioquia

El departamento de Antioquia tiene un área de 63,612 km<sup>2</sup> y se encuentra en la región noroccidental de Colombia, sobre la cadena de Los Andes en las cordilleras Central y Occidental (González, 2001). Como se muestra en la Figura 33 la edad de las rocas que componen este territorio varía desde el Proterozoico hasta el Cuaternario.

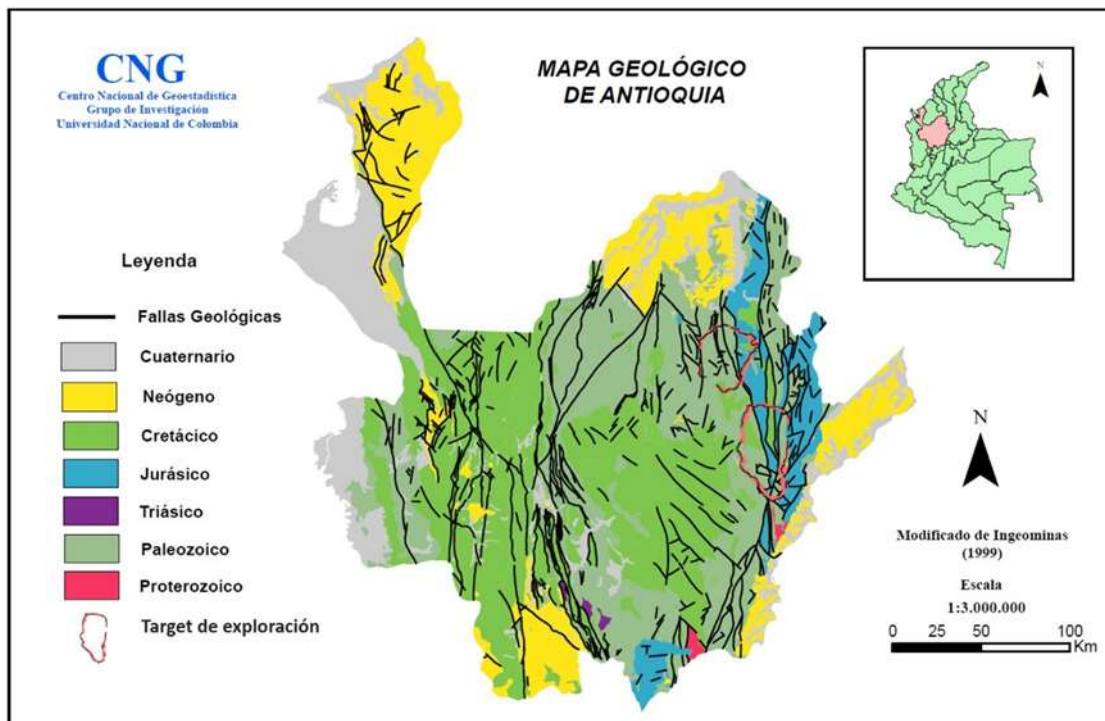


Figura 33. Mapa geológico de Antioquia por edades. Escala 1:3,000,000.

De los 6 terrenos tectonoestratigráficos identificados en el departamento de Antioquia: Terreno Cuna, Terreno Calima, Terreno Cauca-Romeral, Terreno Tahamí, Terreno Nechí y Terreno Chibcha (Restrepo & Toussaint, 2020), los altos tenores de TREO se ubicaron geográficamente en la zona de contacto de los terrenos Tahamí y Chibcha, sobre la Falla Otú. Un alto control estructural dominado por sistemas de fallas separa, en algunos casos, las unidades litológicas, como es el caso del *Target* Nordeste y *Target* Bajo Cauca, a quienes los intercepta la Falla de Otú que a su vez divide las rocas de periodo Jurásico del Cretácico y Paleozoico.

Estructuralmente la Cordillera Central está limitada por grandes sistemas de fallas: Romeral al occidente separándola de la Cordillera Occidental y Palestina-Mulató, al este; sin embargo, al oriente parece ser más importante en la evolución estructural y tectónica de esta cordillera la Falla Otú-Pericos, que la delimitaría geológicamente de la Cordillera Oriental. Las unidades relacionadas con estos sistemas de fallas desarrollan una esquistosidad o foliación cataclástica, por metamorfismo dinámico, que se superpone a la esquistosidad o estratificación de las rocas originales y aún es perceptible en algunas rocas ígneas (González, 2001).

Durante el Jurásico se emplazaron en la Cordillera Central los batolitos de Segovia y Sonsón, de composición cuarzodiorítica a tonalítica, a los cuales se asociaron importantes mineralizaciones hidrotermales de oro y plata, con sulfuros básicos asociados y stocks adamelíticos (González, 2001). Por su parte durante el Cretácico tardío-Paleoceno se intruyeron en la Cordillera Central el Batolito Antioqueño y los plutones relacionados, formando una aureola de contacto bien definida sobre las metamórficas del Complejo Cajamarca (González, 2001).

Los valles de los ríos Magdalena, Cauca, Atrato, Nechí y sus afluentes mayores presentan depósitos aluviales del Cuaternario, de espesores que pueden ir hasta los 35 metros y estar compuestos por diversas terrazas. Estos depósitos de placer han sido importantes en el contexto minero de Antioquia ya que han sido objeto principalmente de explotaciones auríferas (González, 2001).

### 3.2 Geología local de blancos de exploración

La Figura 34 muestra el mapa de la geología local de los blancos o *targets* de exploración de REE en Antioquia superpuesto a las unidades cronoestratigráficas y sistemas de fallas.

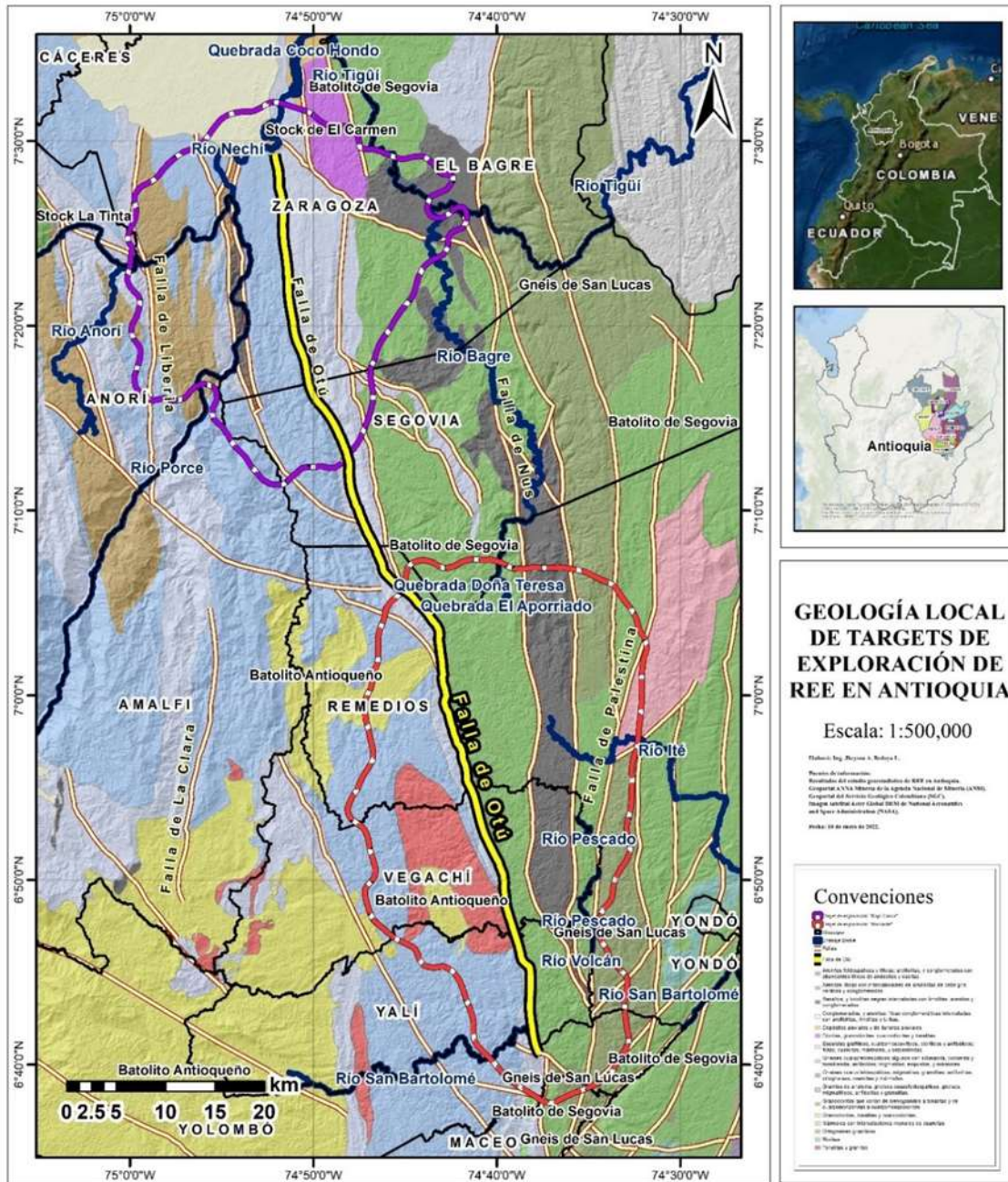


Figura 34. Mapa de geología local de *targets* de exploración de REE en Antioquia. Escala 1:500,000.



Para mejorar el entendimiento de las Figuras 33-34 y siguientes mapas, se recomienda estudiar los 8 Anexos presentados como archivos digitales independientes (.pdf) para que el lector pueda estudiar con alta resolución la información geológica, topográfica, minera-legal, ambiental, hidrográfica, social, de infraestructura, político-administrativa, etc., cuyo contexto es clave para el entendimiento de los factores que modifican un proyecto de prospección detallada con miras a realizar minería de REE los *Target* Nordeste y *Target* Bajo Cauca.

Es importante resaltar de la Figura 34 que la Falla de Otú atraviesa con dirección preferente N20°W sobre el área de interés local, cuyo rumbo indicará la traza o guía de prospección detallada. En el *Target* Nordeste se incluyen formaciones como el Batolito de Segovia, Batolito Antioqueño y Gneis de San Lucas; mientras que el *Target* Bajo Cauca incluye rocas como del Batolito de Segovia y Stock de El Carmen. También se evidencia que los blancos de exploración se encuentran superpuestos a varios municipios de influencia, el *Target* Nordeste se encuentra en jurisdicción de los municipios Segovia, Remedios, Vegachí, Yalí, Yolombó y Maceo, y el *Target* Bajo Cauca se encuentra en los municipios de Cáceres, Zaragoza, El Bagre, Anorí, Segovia y Amalfi, es decir que cada target se asocia con 6 municipios de influencia directa. La hidrografía más representativa para el *Target* Nordeste la definen el río Ité, río Pescado, río Volcán y río San Bartolomé, y para el *Target* Bajo Cauca el río Porce, río Anorí, río Nechí, río Tigüí y río Bagre.

La Figura 35 muestra el ciclo geoquímico manto-corteza-superficie para elementos de tierras raras, cuyas concentraciones de REE están dadas en partes por millón (Jaireth et al., 2014), de acuerdo a ella se puede comparar indicadores que son claves para entender el origen de un depósito de REE con la información geoquímica de LREE/HREE (ppm), REE+Y (ppm) y Sc (ppm) de las muestras que influyen los *targets* en Antioquia.

En el área envolvente de los blancos de exploración el promedio del contenido de Sc es 13.6 ppm (se acerca a 8 ppm, correspondiente a granitos según Figura 35), el promedio de REE+Y= 420.79 ppm (se acerca a 270 ppm) y la relación promedio LREE/HREE= 10.29 ppm (cercano a 7 ppm). Las estadísticas de estos indicadores locales se presentan en la Tabla 6. Por lo tanto, basados en el ciclo geoquímico manto-corteza-superficie y los resultados estadísticos obtenidos se puede concluir inicialmente que los REE en los *targets* Nordeste y Bajo Cauca tienen un origen en la corteza, específicamente en ambientes

graníticos. En este nuevo marco, las unidades geológicas a escala local de mayor interés minero serán las granodioritas del Batolito de Segovia y Batolito Antioqueño, junto con otros plutones que se ilustran en geología local de la Figura 34.

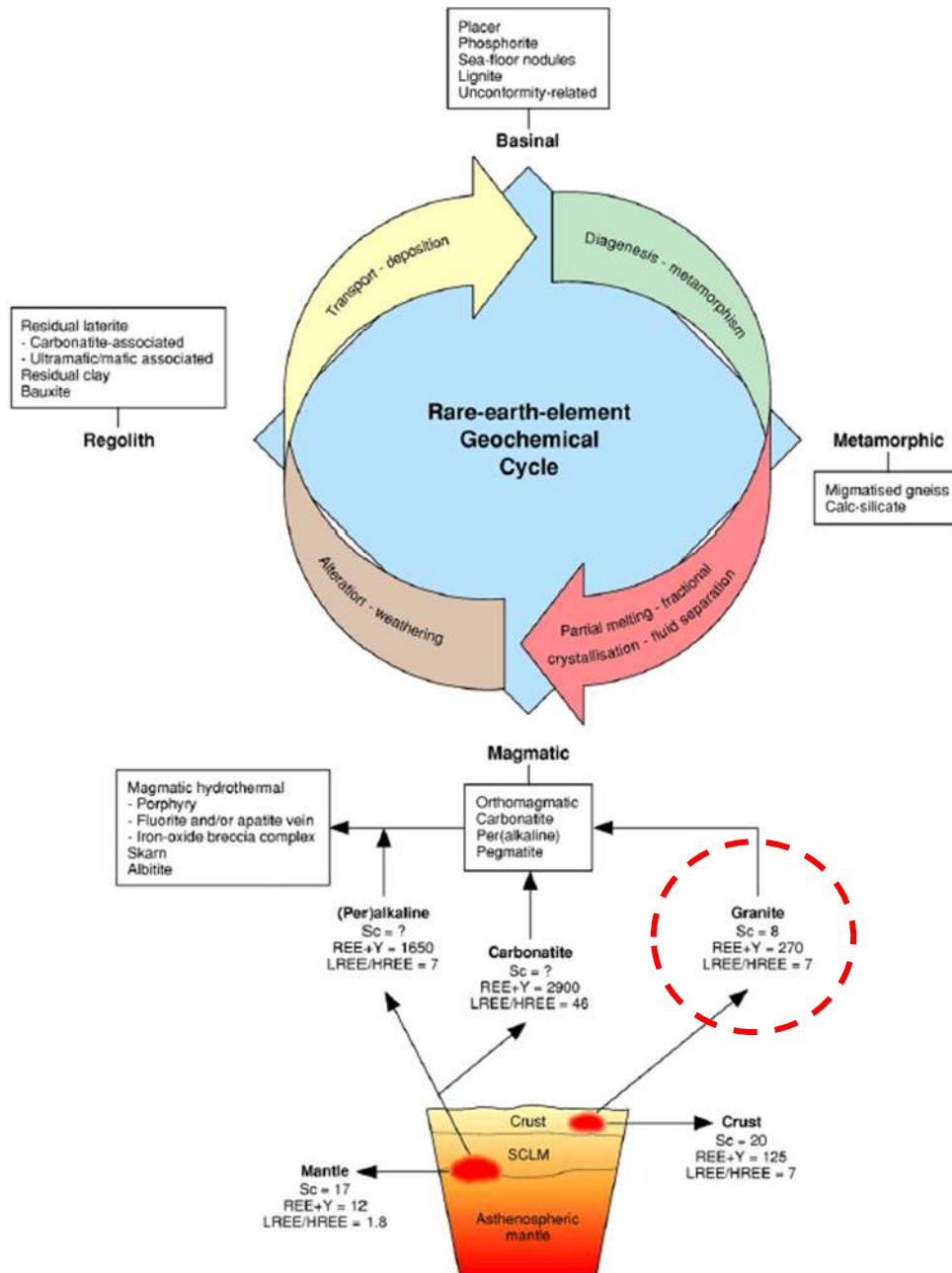


Figura 35. Ciclo geoquímico manto-corteza-superficie para elementos de tierras raras (concentraciones de REE en partes por millón) (Jaireth et al., 2014).

Tabla 6. Estadísticas de Sc, REE+Y y LREE/HREE de *targets* en Antioquia.

Variable	Muestras	Mínimo (ppm)	Máximo (ppm)	Promedio (ppm)	Desv. Est. (ppm)
Sc	16	6.64	20.65	13.60	3.51
REE + Y	16	101.38	1,061.98	420.79	289.79
LREE/HREE	16	5.78	17.40	10.29	3.17

Por otra parte, como los contenidos de REE muestreados por sedimentos activos están indicando un promedio de las rocas de la corteza, es importante conocer si dichos elementos se han transportado largas distancias desde su origen; sin embargo, de la Figura 36 se evidencia que los REE son elementos de alta intensidad de campo dentro de la categoría de elementos incompatibles, es decir, la relación definida por carga iónica/radio iónico, también conocida como intensidad de campo o potencial iónico, coloca a las tierras raras como elementos inmóviles (Jaireth et al., 2014).

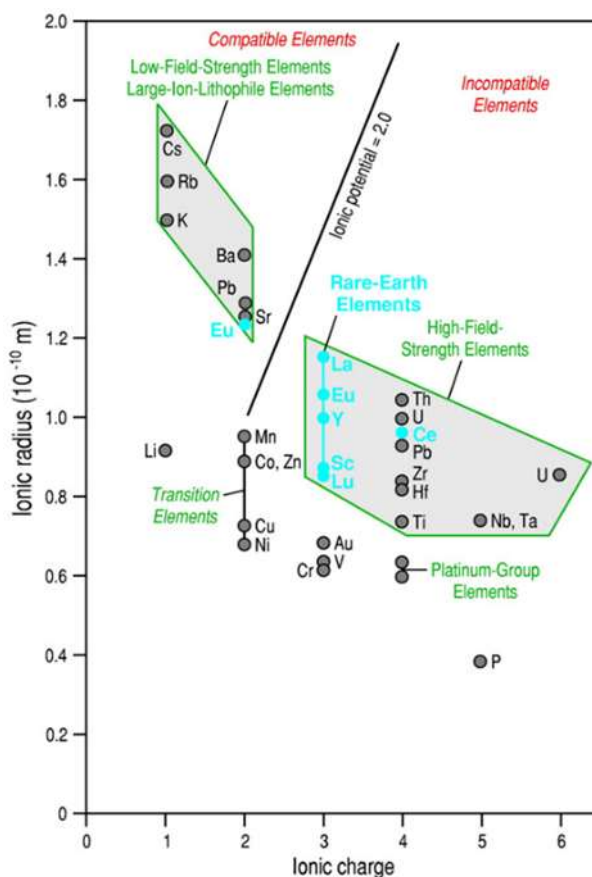


Figura 36. Radios iónicos versus Carga iónica de REE (Jaireth et al., 2014).

## 4. Factores modificadores de la minería de REE

Hasta ahora, los resultados del estudio geoestadístico y el ambiente geológico donde indicó viabilidad de explorar el *Target* Nordeste y *Target* Bajo Cauca han sido totalmente coherentes con el ambiente geológico encontrado a escala local, por lo cual serán otras consideraciones, aquí llamados factores modificadores, quienes terminarán delimitando el área donde finalmente podría llevarse a cabo la actividad minera de REE en Antioquia, para el *Target* Nordeste sobre los municipios de Segovia, Remedios, Vegachí, Yalí, Yolombó y Maceo, y para el *Target* Bajo Cauca en los municipios de Cáceres, Zaragoza, El Bagre, Anorí, Segovia y Amalfi.

### 4.1 Mineros

Concluidas las actividades de exploración y una vez delimitados los recursos minerales medidos y/o indicados a través de un modelo geológico se podrá continuar con la actividad de planeación minera que contempla el análisis de factores técnicos, tecnológicos, de infraestructura, financieros, legales, ambientales y sociales. En esta etapa se define el método de minería, la infraestructura y equipos requeridos, el proceso de beneficio, ritmos de producción, plan de producción, secuencia de extracción, flujos de caja futuro descontados y demás análisis relacionados con la viabilidad del proyecto. Las decisiones tomadas en la etapa de planeación minera tienen fuertes impactos en los costos de construcción y montaje de la mina y en los costos de operación durante la vida del proyecto, por lo tanto nuevos estudios plantean criterios de evaluación actualizados para la selección idónea de métodos de minería para REE (Barakos & Mischo, 2021).



La Figura 37 muestra 53 criterios distribuidos en 8 categorías que deben ser analizados para la selección del método de minería de REE y destaca en los cuadros grises los nuevos conceptos que deben ser evaluados en la planificación de estos recursos minerales, dentro de los cuales se incluyen criterios relacionados con lo social, ambiental, político y factores específicos de la industria de REE (Barakos & Mischo, 2021). Estos criterios deberán ser considerados en estudios de prefactibilidad y factibilidad para analizar en detalle el método de minería en un negocio de REE; sin embargo, dependiendo de las propiedades del depósito y la condiciones específicas del proyecto minero, no todos los criterios deberán ser necesariamente evaluados, excluyendo aquellos que son neutrales y no afectan la selección del método de minería o el planeamiento minero integrado (Barakos & Mischo, 2021).

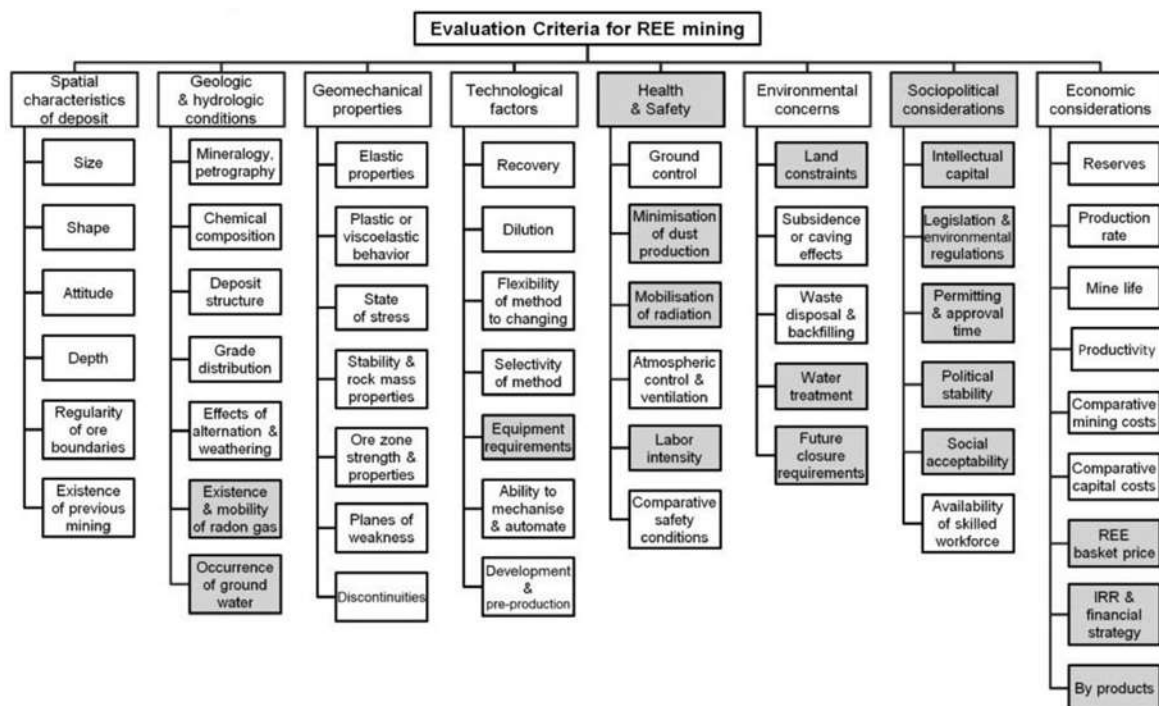


Figura 37. Criterios de evaluación para minería de REE actualizados (Barakos & Mischo, 2021).

Con la información geológica disponible se han abordado consideraciones espaciales del depósito de tipo preliminar que han permitido inferir la forma de *los targets*, tamaño o potencial de prospectividad, existencia de minería previa, y algunas condiciones geológicas como composición química y distribución del tenor en superficie; a pesar de

esto, es muy temprano para ubicar con certeza una mina de tierras raras en Antioquia debido a la escala de los *targets* y la falta de información del subsuelo que valide los tenores de REE por encima del *cut-off*.

Por tal motivo se identifica en la Figura 36 los factores relacionados a la topografía de los *targets* de exploración, evidenciando un gradiente de elevaciones desde 2,074.5 m.s.n.m. hasta su punto más bajo a 24.8 m.s.n.m. Esta topografía es importante para identificar el techo de los prospectos minerales de REE en superficie, así como modelar el contenido total de recursos, validar que el área se encuentra despejada de ecosistemas de páramo, y orientar sobre la ubicación de zonas estratégicas para realizar las actividades de exploración, construcción y montaje, excavación y relleno, y cierre minero. Estos asuntos deberán ser tenidos en cuenta a la hora de elegir el método de minería.

Se evidencia de la Figura 38 que el área de mayor elevación corresponde al sistema montañoso de la Cordillera Central que se extiende sobre el Batolito Antioqueño. También en el sector nororiental del área estudiada existe un levantamiento pronunciado del terreno que obedece a las formaciones del Batolito de Segovia y Gneis de San Lucas. El *Target* Bajo Cauca se encuentra localizado en un área de baja elevación desde 30 hasta 600 m.s.n.m., mientras que el *Target* Nordeste se emplaza en elevaciones desde 400 hasta 1,000 m.s.n.m.

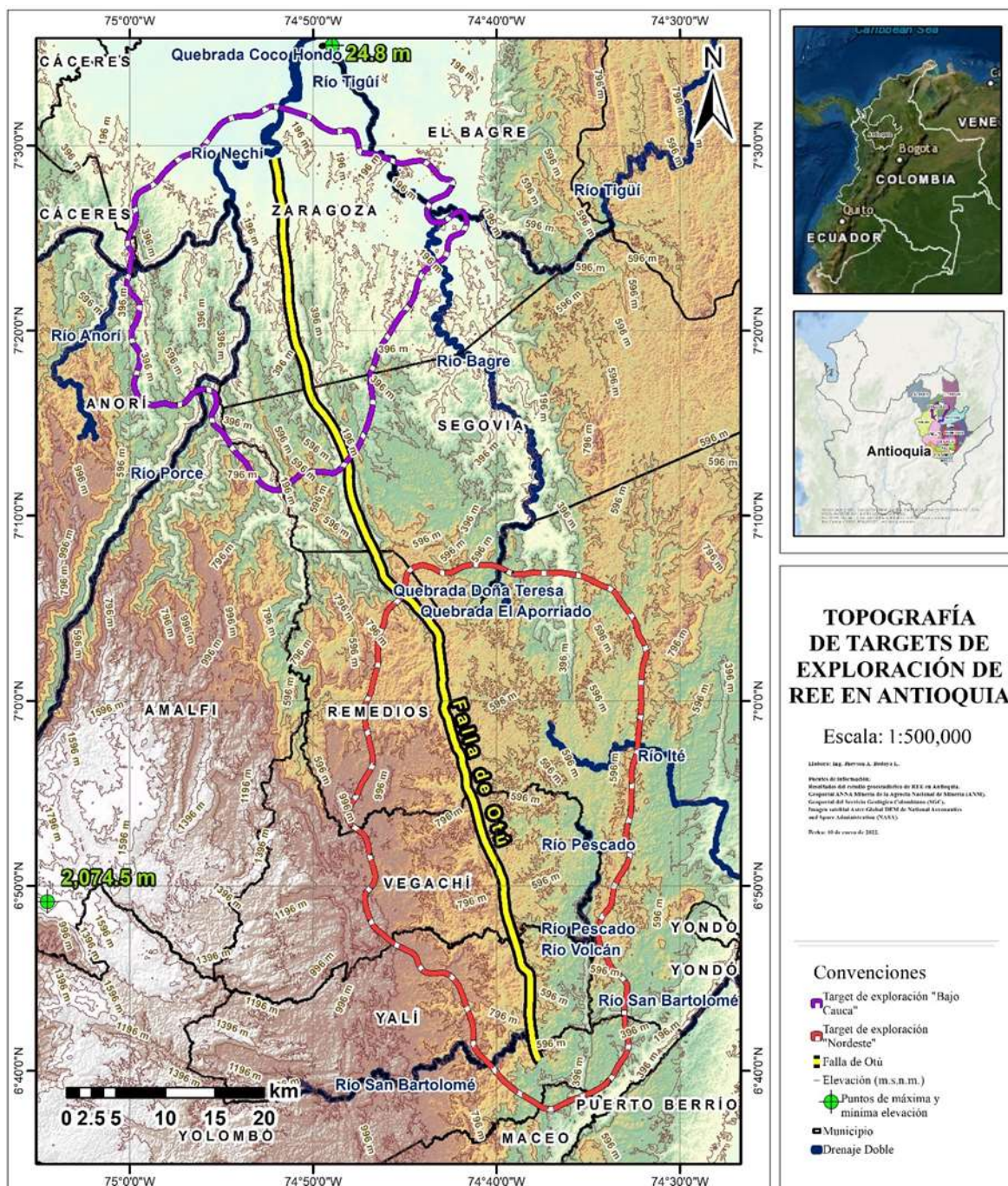


Figura 38. Mapa de topografía de *targets* de exploración de REE en Antioquia. Escala 1:500,000.

## 4.2 Procesamiento

Dependiendo del tipo de yacimiento o fuente mineral será el procesamiento del mismo, ya que en los *targets* el mineral de interés o mena que contiene los REE puede ser monacita, xenotima, bastnasita, arcillas iónicas, entre otros, por lo cual es necesario un diseño acorde a las características de cada depósito. De igual forma, el mineral de interés puede estar asociado con diferentes tipos de mineralizaciones, incluso puede encontrarse en granos libres como los evidenciados en subproductos de explotaciones auríferas localizadas en las llanuras del río Nechí sobre los municipios de Zaragoza y El Bagre (Kerguelen, 2016; Lamus et al., 2006).

En términos generales, las operaciones de metalurgia extractiva consisten en una primera etapa de concentración por vía húmeda en la que los minerales de interés pasan a concentrados, una segunda etapa de formación de óxidos de tierras raras los cuales pueden ser comercializados como REO que es lo más común o bien pasar por una tercera etapa de procesamiento electrometalúrgico y/o pirometalúrgico en la que se obtienen metales puros de tierras raras (REM) a través de electrólisis y por reducción metalotérmica o gaseosa (Comisión Chilena del Cobre -COCHILCO, 2016). El esquema de las etapas de procesamiento de REE para cada mineral se muestra en la Figura 39. La purificación del metal individual desde el óxido metálico o REO se puede entender en la Figura 40, clasificando las etapas del procesamiento metalúrgico según el objetivo final.

Normalmente se procesa las menas de REE utilizando varias operaciones unitarias diferentes, incluidas técnicas de flotación, gravimetría, separación magnética y electrostática. Debido a las gravedades específicas relativamente altas de los REE (entre 4 y 7), la separación por gravedad se puede utilizar para concentrar minerales de tierras raras mediante la eliminación de minerales de ganga de baja gravedad específica, como el cuarzo. En el contexto del beneficio de minerales de tierras raras, la separación magnética se usa típicamente para dos propósitos: la separación magnética de baja intensidad se usa para eliminar los minerales de ganga ferromagnética, como los óxidos de hierro, y la separación magnética de alta intensidad se usa para separar la monacita y la xenotima de otros minerales pesados (Jordens, Sheridan, Rowson, & Waters, 2014).

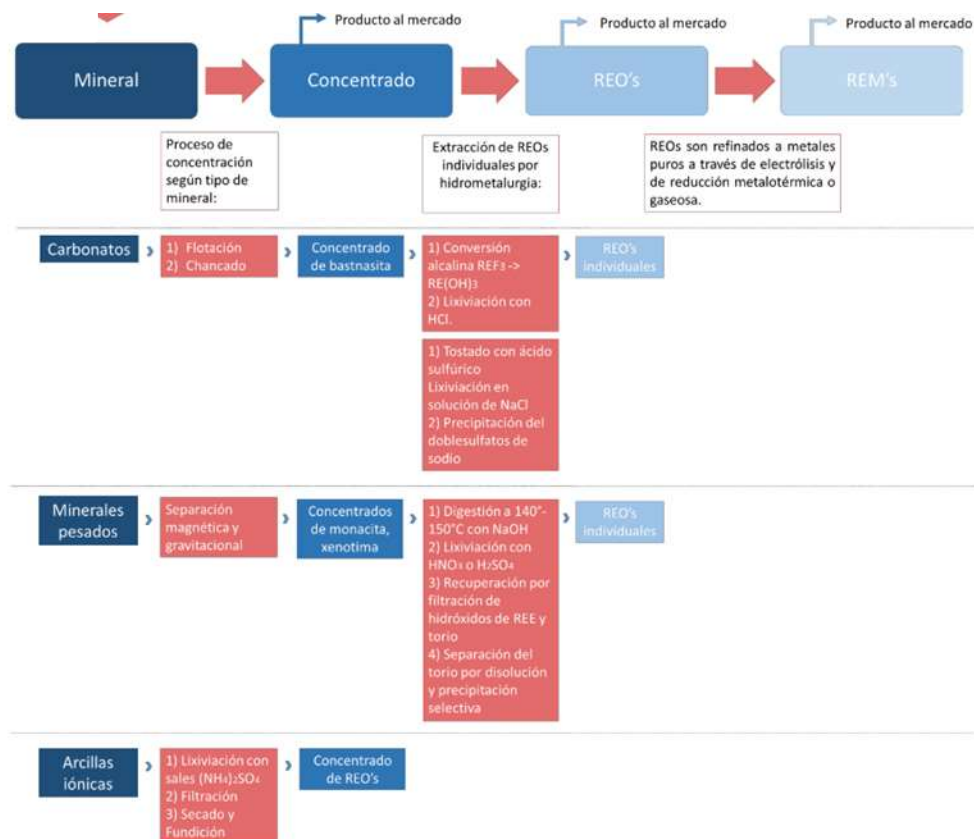


Figura 39. Esquema de las etapas de procesamiento de REE para cada mineral (Comisión Chilena del Cobre -COCHILCO, 2016).

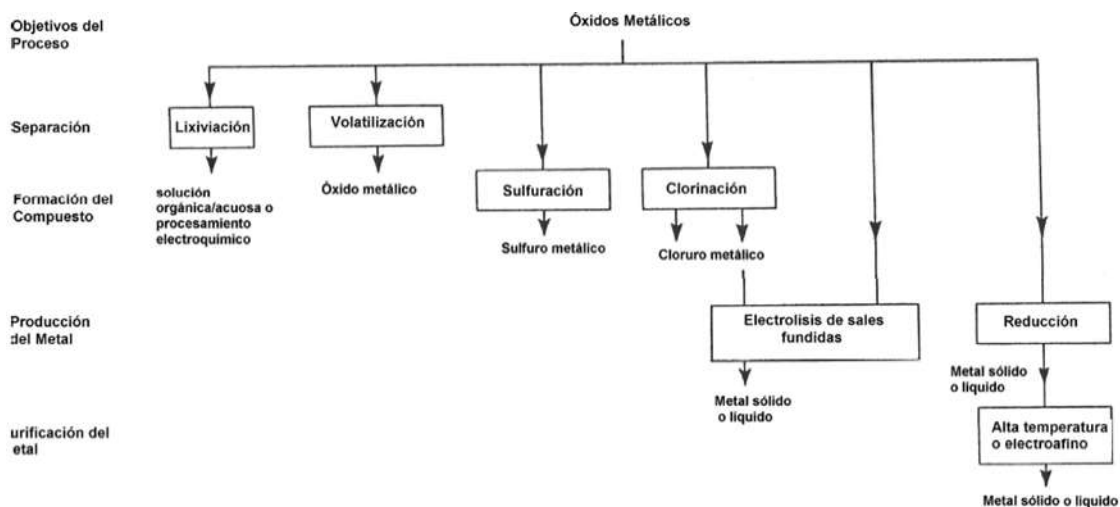


Figura 40. Rutas alternativas de proceso para el tratamiento de óxidos metálicos (O. Restrepo Baena, Bustamante Rua, & Gaviria Cartagena, 2008).



A continuación se presentan en las Figuras 41-46 algunos diagramas o *flow-sheets* para el procesamiento de menas de REE con diferentes métodos y productos finales (Kumari, Panda, Jha, Kumar, & Lee, 2015).

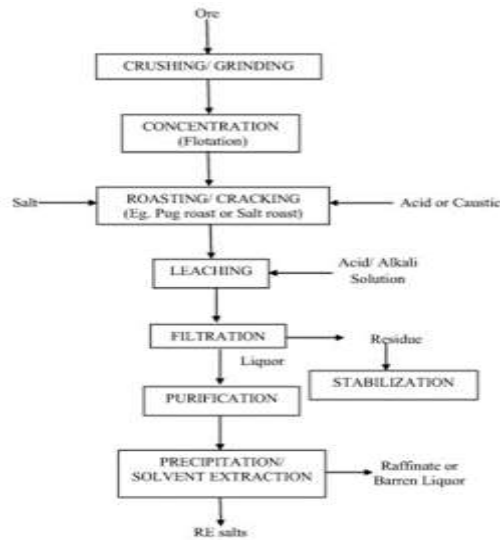


Figura 41. *Flow-sheet* de un procesamiento de REE (Kumari et al., 2015).

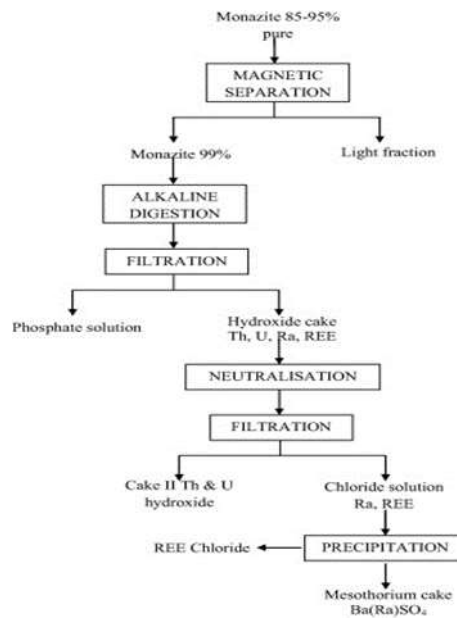


Figura 42. *Flow-sheet* para el procesamiento de monacita en USAM (Kumari et al., 2015).

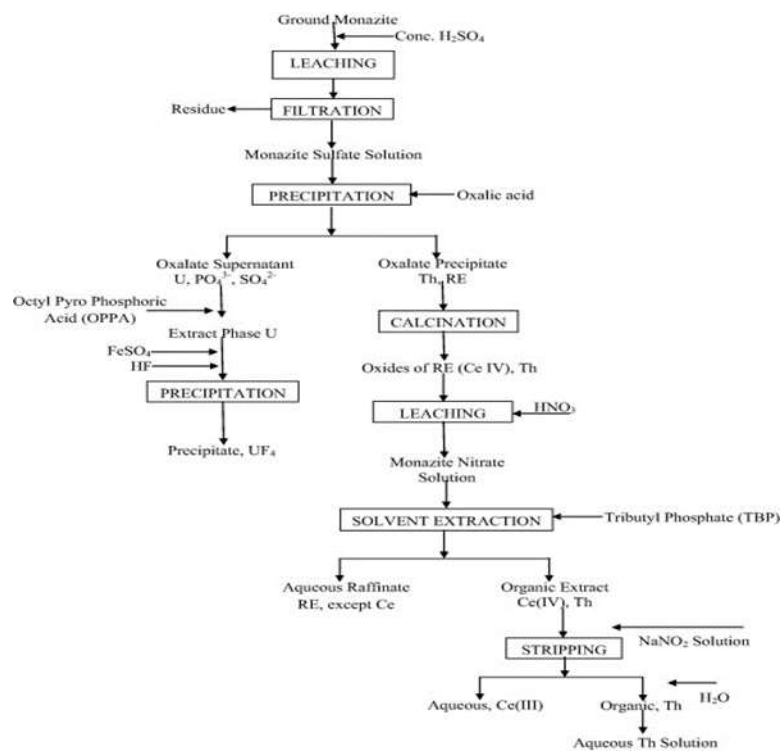


Figura 43. *Flow-sheet* de granos de monacita en ácido sulfúrico (Kumari et al., 2015).

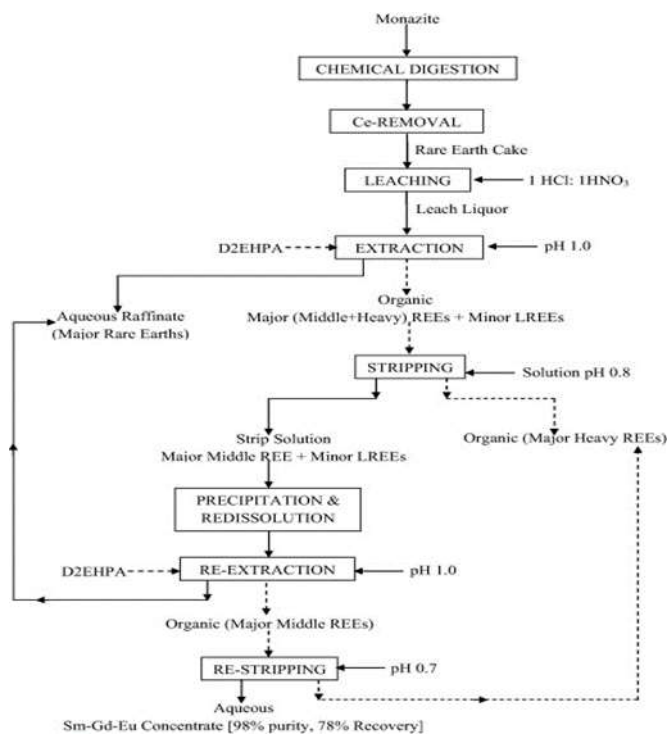


Figura 44. *Flow-sheet* para separar concentrado de REE medios (Kumari et al., 2015).

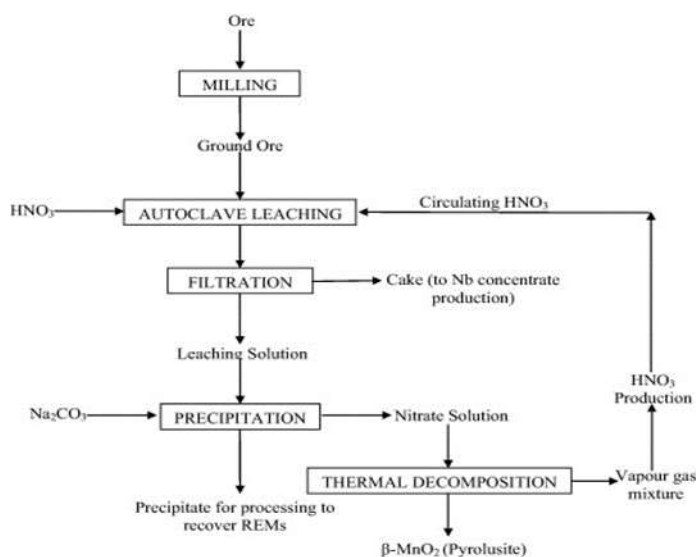


Figura 45. *Flow-sheet* del proceso mineral de REE de Chuktukon (Kumari et al., 2015).

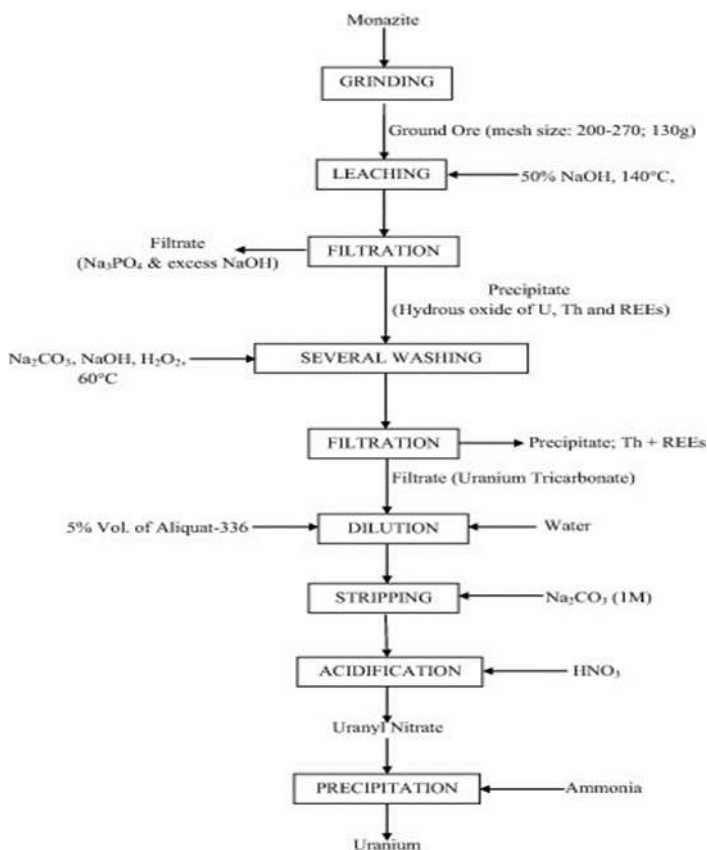


Figura 46. *Flow-sheet* del uranio a partir de monacita egipcia (Kumari et al., 2015).



Según los procesos minerales vistos anteriormente, los principales métodos de producción de REO en la actualidad incluyen el método de precipitación. Debido a los méritos de bajo requerimiento de equipo, bajo costo de materia prima y control de proceso simple, el método de precipitación es el más comúnmente utilizado para la producción industrial de REO (Meng, Zhao, Pan, & Zhang, 2020). Un *flow-sheet* del procesamiento de REO con el método de precipitación se muestra en la Figura 47 (a) (Meng et al., 2020). Para solucionar el problema de la contaminación ambiental causada por el proceso de precipitación en la actual industria de REE ya se ha propuesto un método más limpio de electrólisis de membrana catiónica (CME) por medio de transformación eléctrica para producir REO con eficiencias entre el 66-97% (Meng et al., 2020), descrito en la Figura 47 (b).

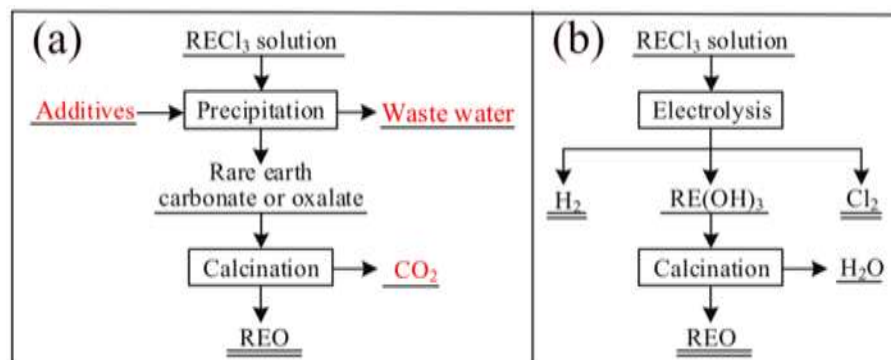


Figura 47. *Flow-sheet* del procesamiento de REO:

- a) método de precipitación utilizado típicamente en la industria;  
 (b) nuevo método CME más limpio (Meng et al., 2020).

Los problemas asociados al método de precipitación en el procesamiento de REE son: (1) debido al uso de aditivos se introducen nuevas impurezas que afectan la ley del producto final, resultando 1.6 t  $NH_4HCO_3$  (bicarbonato de amonio que es un a sal ácida) por cada tonelada de REO; (2) se produce gran cantidad de aguas residuales, cerca de 10 m<sup>3</sup> de aguas residuales / t REO) que contienen nitrógeno amoniacal, alto contenido de sal y ácido oxálico, que pueden contaminar el medio ambiente y no son fáciles de tratar; (3) durante la calcinación se liberan grandes cantidades de gases de efecto invernadero, aproximadamente 3 t  $CO_2$  / t REO, de difícil recuperación por su bajo valor añadido y su mezcla de gases (amoníaco y vapor de agua) (Meng et al., 2020).

Por su parte, el método CME tiene dos ventajas principales: (1) no se introducen impurezas en el sistema y el agua residual desaparece de la fuente porque el proceso de conversión eléctrica no requiere ningún aditivo químico; (2) no se producen gases residuales durante el proceso, y los subproductos valiosos (el gas de cloro de alta pureza y el gas de hidrógeno) se generan simultáneamente por electrólisis, lo que puede compensar parte del costo de producción (Meng et al., 2020).

### 4.3 Metalúrgicos

Basados en el promedio de los valores de la Tabla 7 es posible establecer que las recuperaciones metalúrgicas para un proyecto de REE en Antioquia deberán estar del orden de 79% la recuperación metalúrgica y, si aplicase, 97% la recuperación por separación (Riesgo García, Krzemień, Manzanedo del Campo, Menéndez Álvarez, & Gent, 2017).

Tabla 7. Recuperaciones metalúrgica y de separación de diferentes proyectos mineros de REE (Riesgo García et al., 2017).

Proyecto	Recuperación metalúrgica	Recuperación de separación
Nechalacho	80%	98%
Zandkopsdrift	71%	96%
Bear Lodge	79%	-
Kvanefjeld	79%	-
Dubbo Zirconia	61%	-

El principal desafío en el mercado global de REE es aumentar la recuperación de los elementos durante el procesamiento metalúrgico (Lin, Yang, Werner, & Honaker, 2021). Para lograr esto, es necesario considerar la termodinámica del proceso, ya que puede brindar la guía fundamental en la elección de la combinación de reactivos y su concentración de ácido adecuada, especialmente para procesos de lixiviación ácida; por lo tanto, las condiciones que favorecen la disolución de metales de tierras raras específicos pueden derivarse de los datos termodinámicos presentados en los diagramas de Pourbaix, que también se conocen como diagramas Eh-pH (Lin et al., 2021).

Desde la perspectiva metalúrgica, los diagramas de Pourbaix son la forma más conveniente de representar la termodinámica de sistemas acuosos en forma gráfica, por lo cual son ampliamente utilizados por los hidrometalurgistas ya que permiten visualizar posibilidades de reacciones sin tener que recurrir al cálculo termodinámico para los fenómenos que ocurren en medios acuosos; sin embargo, una importante restricción en la aplicación práctica de los diagramas termodinámicos es que predicen tendencias a que ocurran fenómenos, pero no la velocidad con que éstos puedan ocurrir (O. J. Restrepo Baena, 2017).

El diagrama de Pourbaix muestra el rango de estabilidad de las especies acuosas y los compuestos sólidos en condiciones específicas de potencial Eh y valor de pH. El eje de potencial Eh se basa en la escala del electrodo de hidrógeno estándar (SHE) y puede representar el cambio de electrones, mientras que el pH del sistema representa la capacidad de los elementos para suministrar protones  $H^{(+a)}$  a la especie (Nasuha Yahya, Nadirah Mat Suli, Hanisah Wan Ibrahim, & Abdul Rasid, 2019). El diagrama Eh-pH se ve afectado por las reacciones de oxidación-reducción, las reacciones ácido-base, la temperatura y la presión en un sistema acuoso (Nasuha Yahya et al., 2019).

Los diagramas Eh-pH de Cerio, Lantano y Neodimio se presentan a 25 °C, 100 °C, 200 °C y 300 °C en las Figuras 48-50 (Nasuha Yahya et al., 2019), ya que presentan los metales de mayor producción a nivel mundial. Estos diagramas son capaces de mapear el área de estabilidad del sistema acuoso, lo que será útil para determinar las condiciones del proceso que favorecen la disolución y los posibles metales de tierras raras que puedan estar presentes en el sistema. La condición del proceso se basó en la lixiviación con ácido sulfúrico del concentrado de monacita. La adición de los iones de sulfato del ácido sulfúrico como solvente de lixiviación introduce complejos de sulfato de metal solubles. Con el aumento de la temperatura, aumenta la estabilidad de estos complejos. Comparando los 3 elementos de tierras raras mayor producidos, se determinó que a temperaturas elevadas el orden de estabilidad es  $Ce > Nd > La$  (Nasuha Yahya et al., 2019).

Los diagramas de Pourbaix presentados para los sistemas La-, Nd- y Ce- $PO_4$ - $SO_4$ - $H_2O$  muestran que la temperatura adecuada utilizada en el proceso de lixiviación está entre 200 °C y 300 °C, lo cual está probado con estudios experimentales en la literatura (Nasuha Yahya et al., 2019).

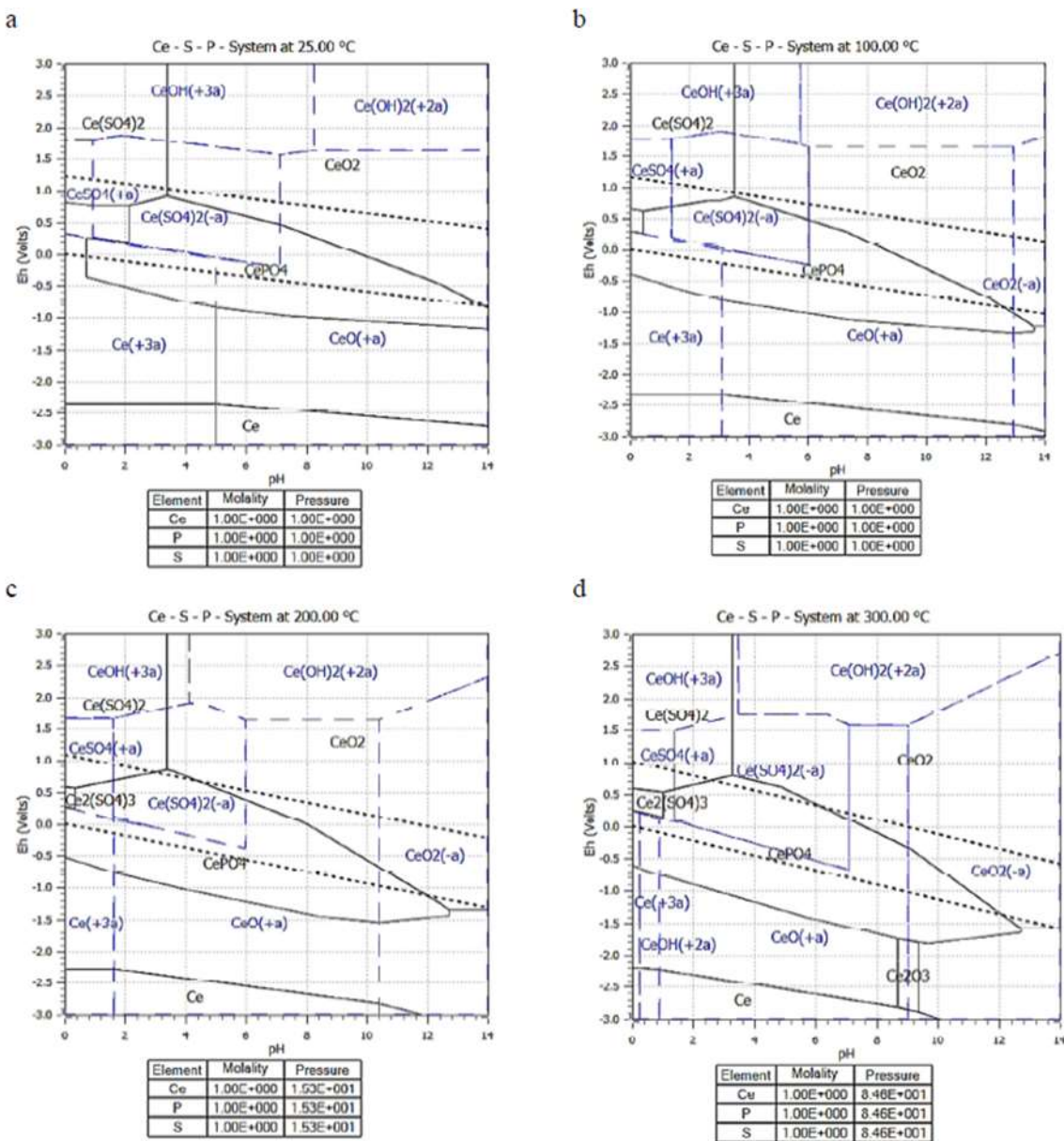


Figura 48. Diagrama de Pourbaix para el sistema Ce-PO<sub>4</sub>-SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O en concentración sulfúrica de 1.0 M a temperaturas: (a) 25 °C, (b) 100 °C, (c) 200 °C and (d) 300 °C (Nasuha Yahya et al., 2019).

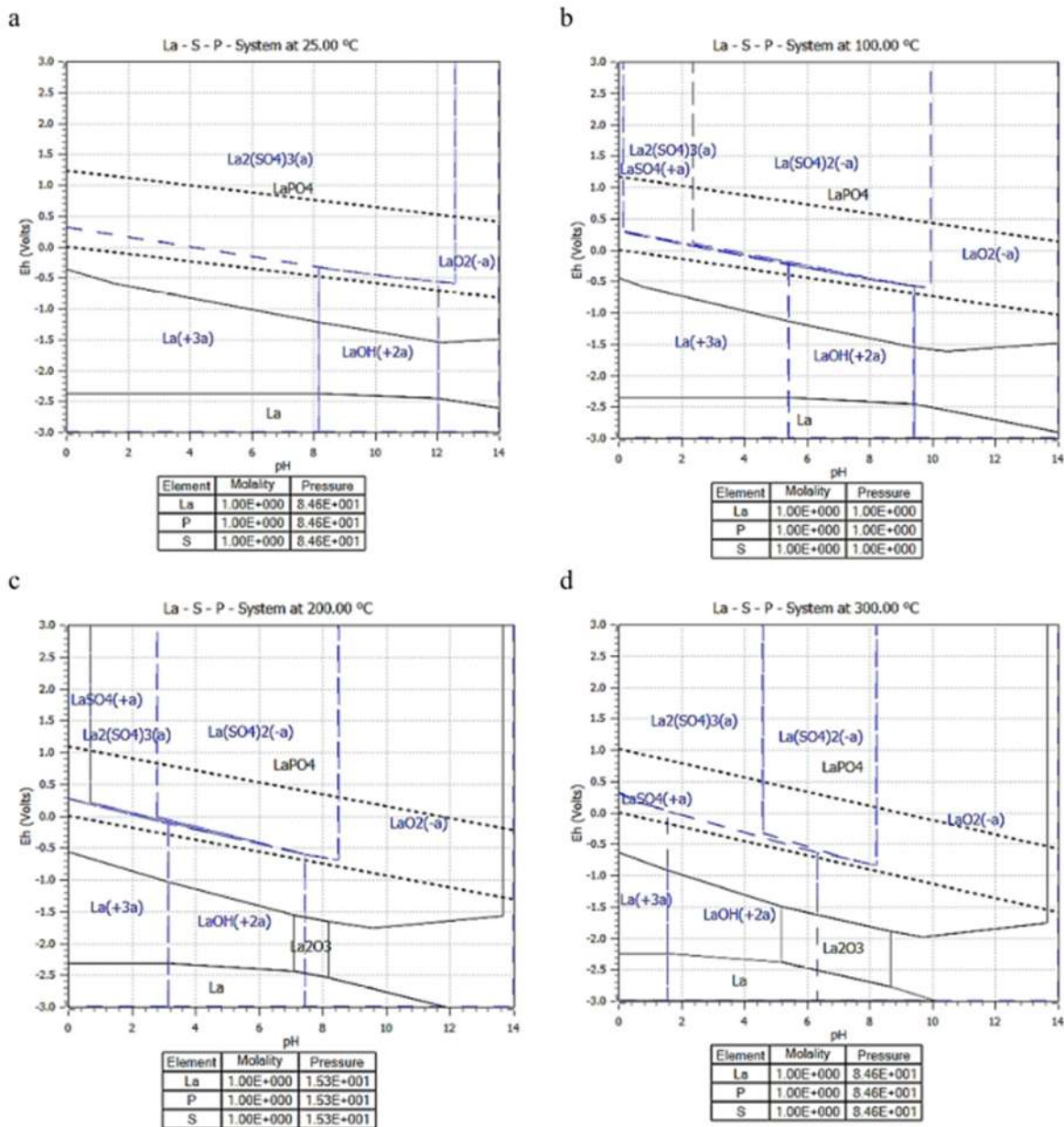


Figura 49. Diagrama de Pourbaix para el sistema La-PO<sub>4</sub>-SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O en concentración sulfúrica de 1.0 M a temperaturas: (a) 25 °C, (b) 100 °C, (c) 200 °C and (d) 300 °C (Nasuha Yahya et al., 2019).

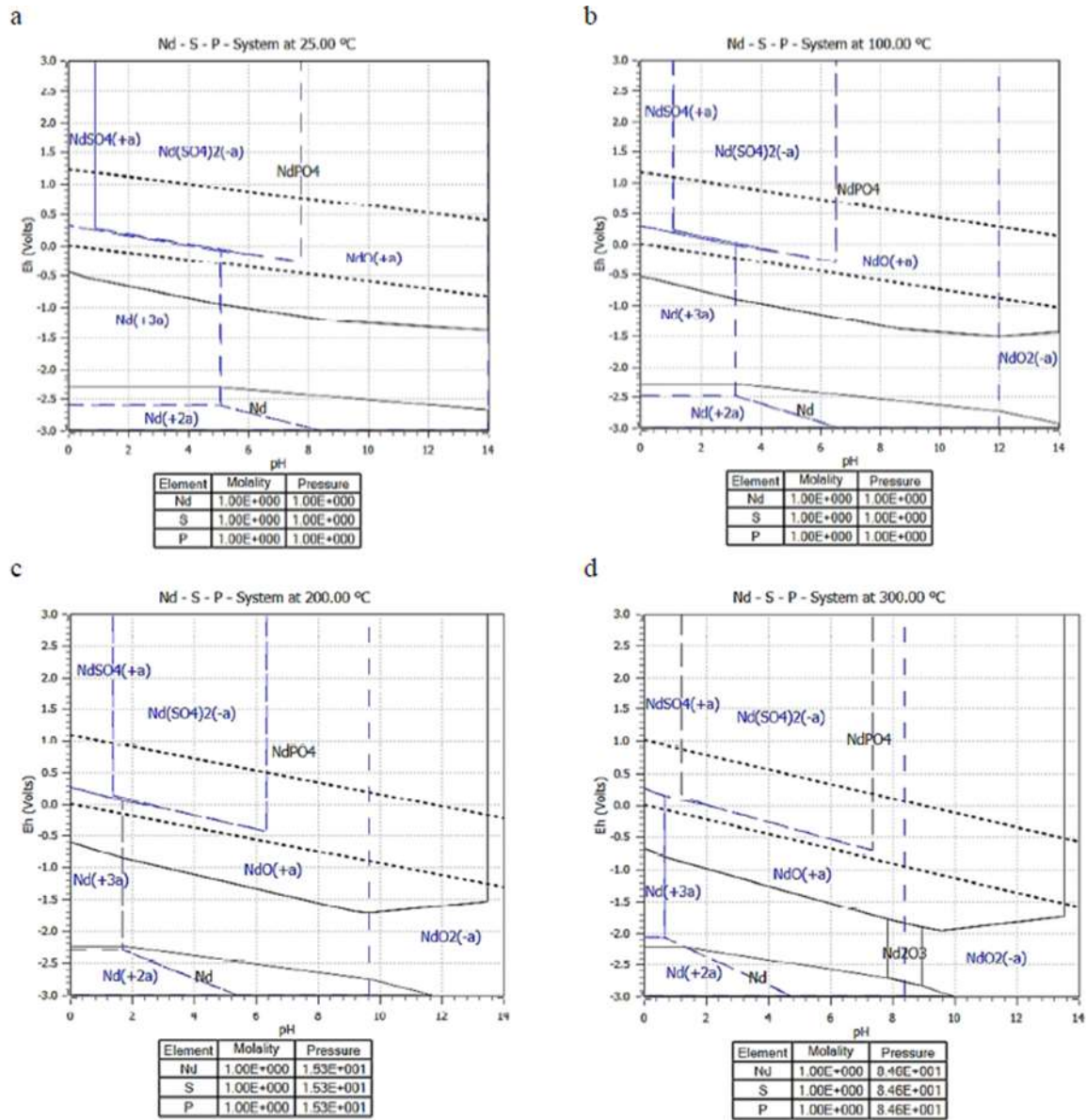


Figura 50. Diagrama de Pourbaix para el sistema Nd-PO<sub>4</sub>-SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O en concentración sulfúrica de 1.0 M a temperaturas: (a) 25 °C, (b) 100 °C, (c) 200 °C and (d) 300 °C (Nasuha Yahya et al., 2019).

## 4.4 Económicos

En las Figuras 51 y 52 se indican los precios anuales (en USD/kg) desde 1959 hasta el 2015 de óxidos de tierras raras livianas y pesadas, respectivamente (Fernandez, 2017). A



pesar de que el comportamiento de los precios de REO indica una deflexión general desde 1959, en la actualidad continúa existiendo gran interés económico de países consumidores de REE. Según la Figura 53 el precio de algunos REO se ha valorado significativamente desde el 2021, luego de la recesión económica mundial ocasionada por la pandemia del COVID-19. Al 11 de enero de 2022, el precio del óxido de Terbio con 99.5% de pureza es de 3,502.0 USD/kg, 744.0 USD/kg el óxido de Disprobio con 99.5% de pureza, 231.3 USD/kg el óxido de Neodimio con 99% de pureza, y 218.2 USD/kg el óxido de Praseodimio con 99.5% de pureza (Kitco Metals Inc., 2022).

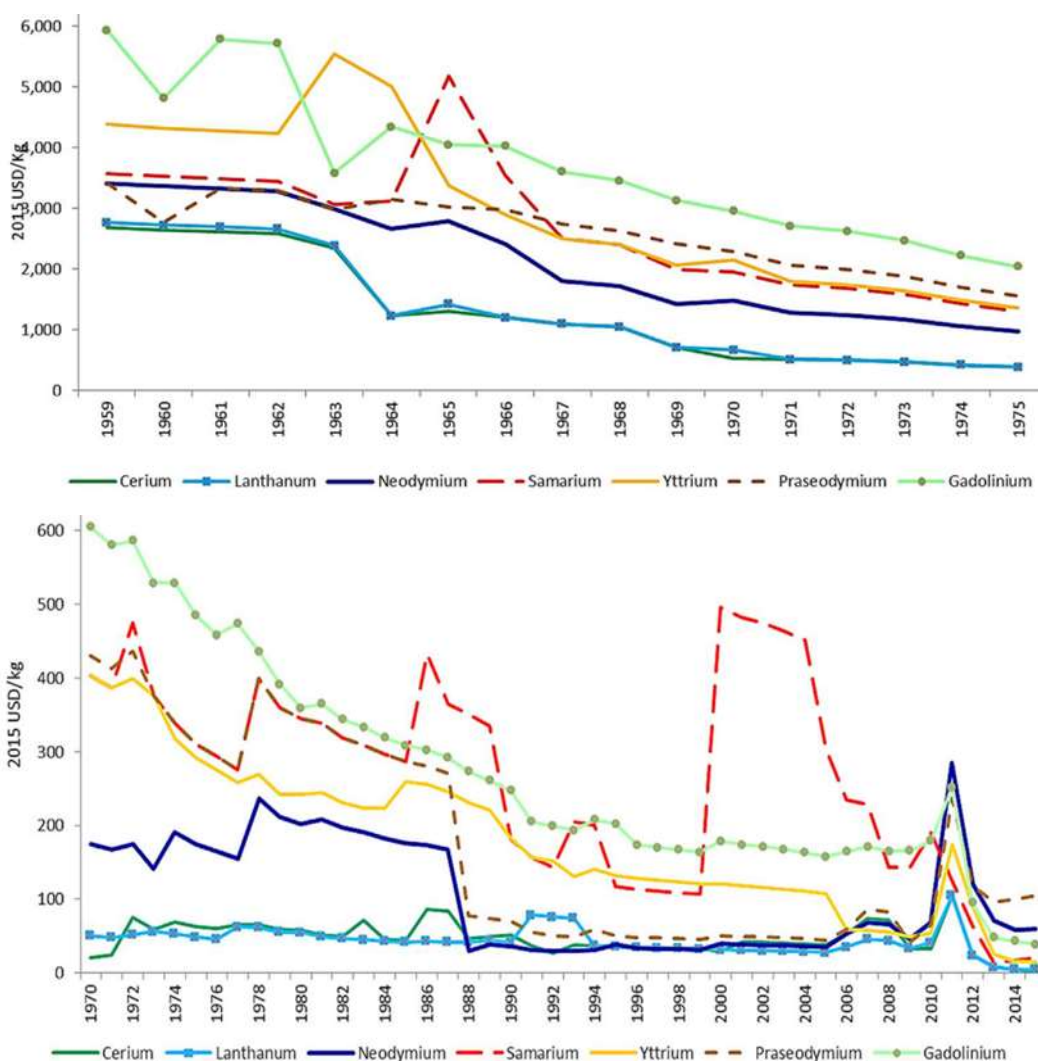


Figura 51. Precios anuales de REO livianas desde 1959 a 2015 (USD/kg) (Fernandez, 2017).

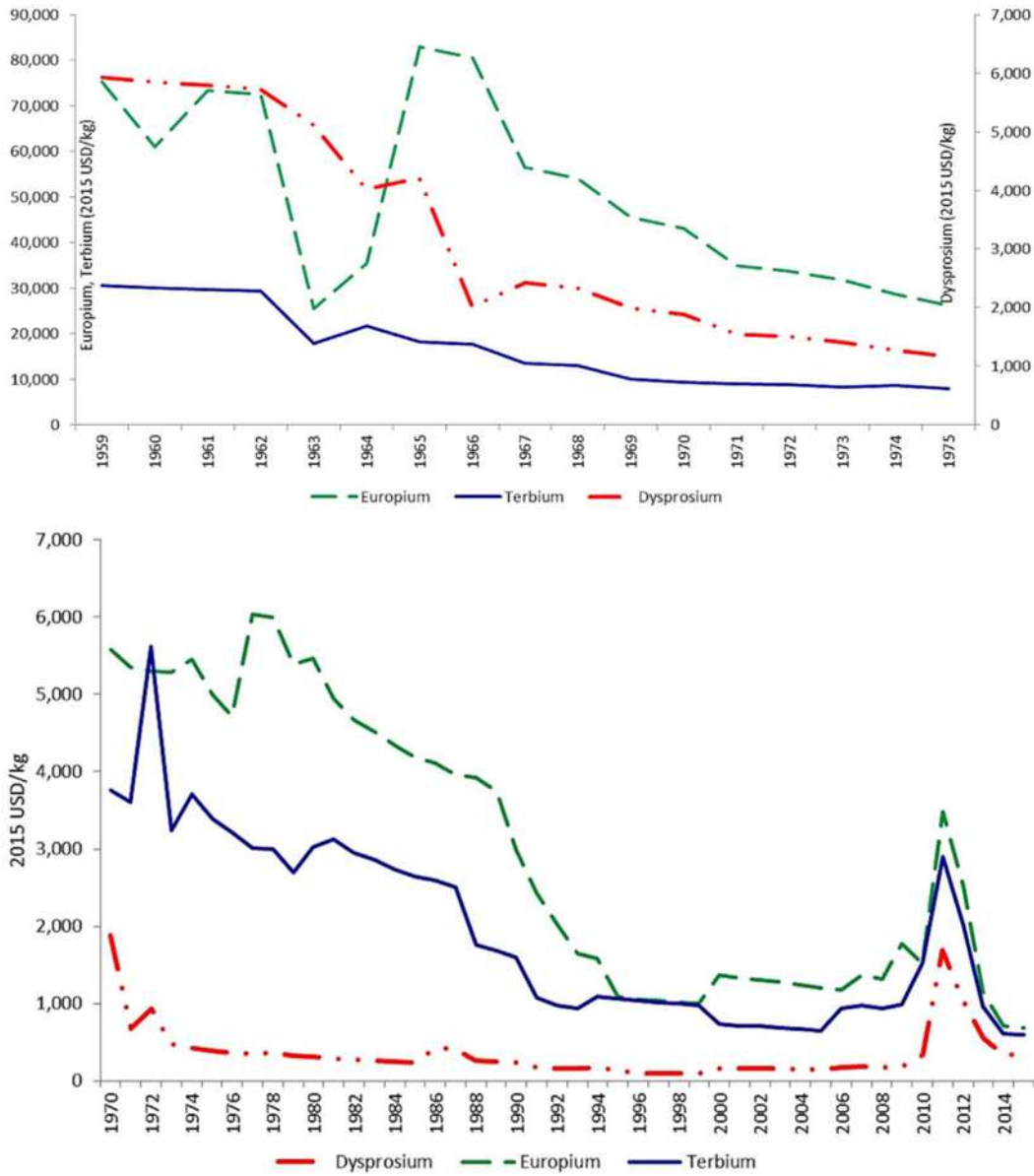


Figura 52. Precios anuales de REO pesadas desde 1959 a 2015 (USD/kg) (Fernandez, 2017).



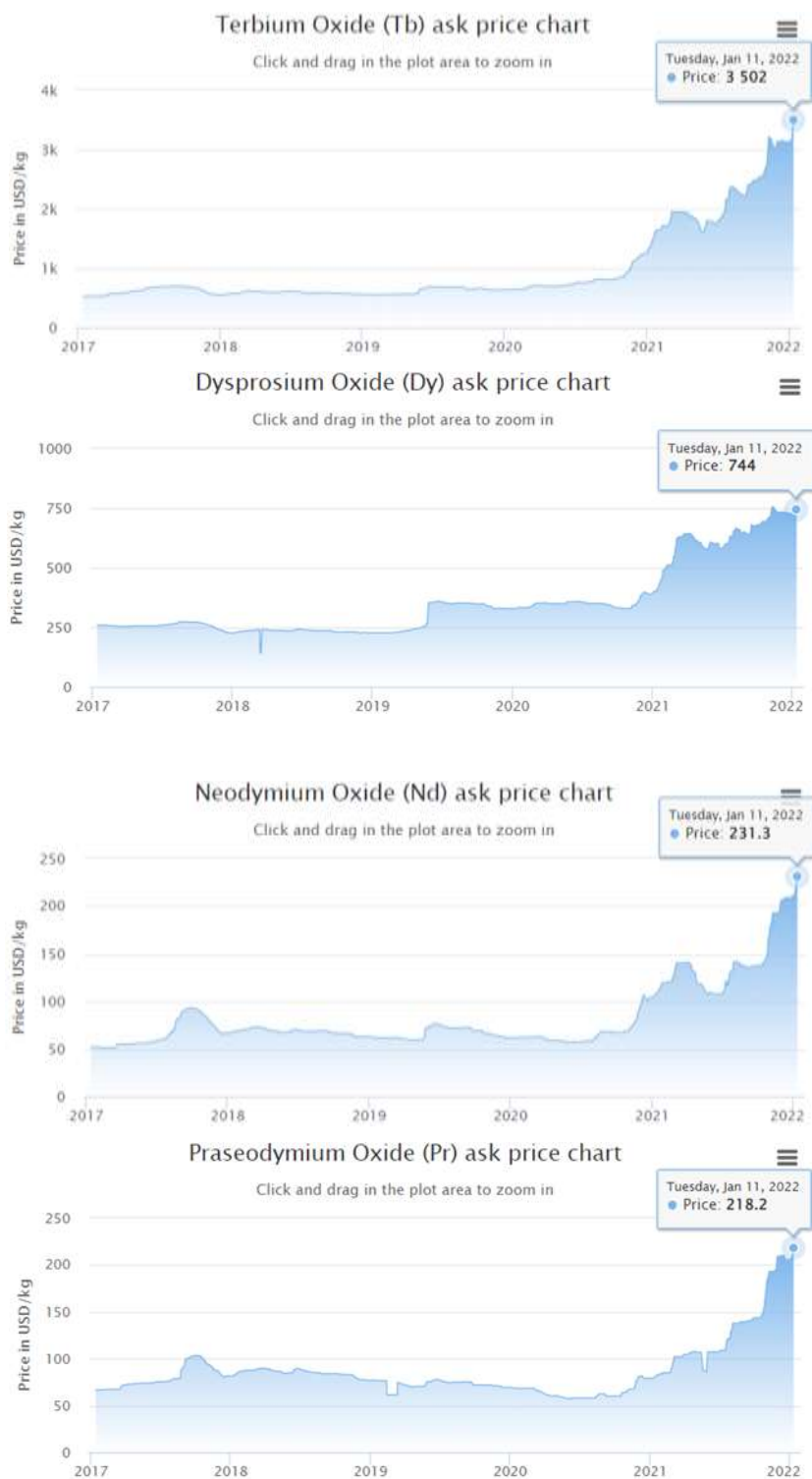


Figura 53. Precios actuales de REO de Terbio, Disprosio, Neodimio y Praseodimio (USD/kg) (Kitco Metals Inc., 2022).

La Tabla 8 relaciona el CAPEX inicial de algunos proyectos internacionales de REE, cuyo capital requerido para la puesta en marcha de estas operaciones mineras se encuentra desde 241 millones de dólares produciendo un carbonato de tierras raras mixto, a 1,600 MUSD produciendo REO separados, evidenciando requerimientos de alta inversión (UPME & CRU Consulting, 2018).

Tabla 8. CAPEX de proyectos mineros de REE (UPME & CRU Consulting, 2018).

País	Proyecto	Compañía	CAPEX (MUSD)	Producción REO (t)	CAPEX (\$/kg)	Producto
Australia	Nolans	Arafura Res.	680	14,000	48.6	REO separado
Tanzania	Ngualla	Peak Res.	365	9,290	39.3	REO separado
Australia	Dubbo	Alkane Res.	500	6,522	76.7	REO separado
Australia	Yangibana	Hastings Tech.	241	8,500	28.4	Carbonato RE mixto
EE. UU.	Bear Lodge	Rare Element Res.	300	7,500	40.0	Concentrado mixto de RE
Australia	Mount Weld	Lynas Corp	1,000	22,000	45.5	REO separado
EE. UU.	Mountain Pass	Molycorp	1,600	19,000	84.2	REO separado
Groenlandia	Kvanafjelt	Groenlandia minerals	832	24,391	34.1	Precipitado RE mixto

A pesar de que los proyectos mineros requieren de gran inversión inicial o CAPEX, los resultados financieros que pueden esperarse en este tipo de negocio cumplen con valores presentes netos (VPN) después de impuestos desde 249 hasta 2,097 MUSD (con una tasa de descuento del 10%), tasas internas de retorno (TIR) después de impuestos entre 16.8% y 43.4%, y periodos de recuperación del capital o *payback* de 3 a 9 años, según lo evidencia los resultados financieros que resume la Tabla 9 de algunos proyectos mineros de REE (Riesgo García, Krzemień, Sáiz Bárcena, Diego Álvarez, & Castañón Fernández, 2019).

Tabla 9. Resultados financieros de VPN, TIR y *Payback* de proyectos mineros de REE (Riesgo García et al., 2019).

Proyecto	VPN después de impuestos (10% de descuento) (MUSD)	TIR después de impuestos	<i>Payback</i> (años)
Nechalacho	900	19.6%	6.3
Zandkopsdrift	2,097	29.5%	-
Bear Lodge	330	28.6%	2.9
Kvanefjeld	1,593	43.4%	5
Dubbo Zirconia	793	19.3%	4
Sarfartog	249	16.8%	9

Basados en los precios de REO y anteriores indicadores financieros, el negocio de minería de REE en el departamento de Antioquia tendría viabilidad económica y podría esperarse un desempeño del proyecto con alto flujo de capital y rentabilidad, con un CAPEX inicial requerido de 690 MUSD, VPN después de impuestos de 994 MUSD (con una tasa de descuento del 10%), TIR después de impuestos del 26.2% y *payback* de 5.4 años, de acuerdo a los promedios de algunos proyectos mineros de REE (Riesgo García et al., 2019; UPME & CRU Consulting, 2018). Estos valores deberán ser ajustados en los estudios de prefactibilidad y factibilidad para los depósitos minerales de REE que se encuentren sobre los *targets* Nordeste y Bajo Cauca.

## 4.5 Mercado

El mercado de tierras raras se encuentra dominado por China a lo largo de toda la cadena de valor de estos materiales estratégicos, desde la producción de REO hasta la elaboración de materiales avanzados para uso final. La Figura 54 muestra la evolución de la oferta o producción de óxidos de tierras raras desde 1900 hasta 2015, representando las toneladas de REO producido a nivel mundial y las cantidades aportadas a lo largo de la historia por China, Estados Unidos, Australia y otros países, evidenciando que desde el año 2,000 y hasta la actualidad China lidera la producción mundial de REO con una participación en el mercado superior al 80% (Fernandez, 2017).

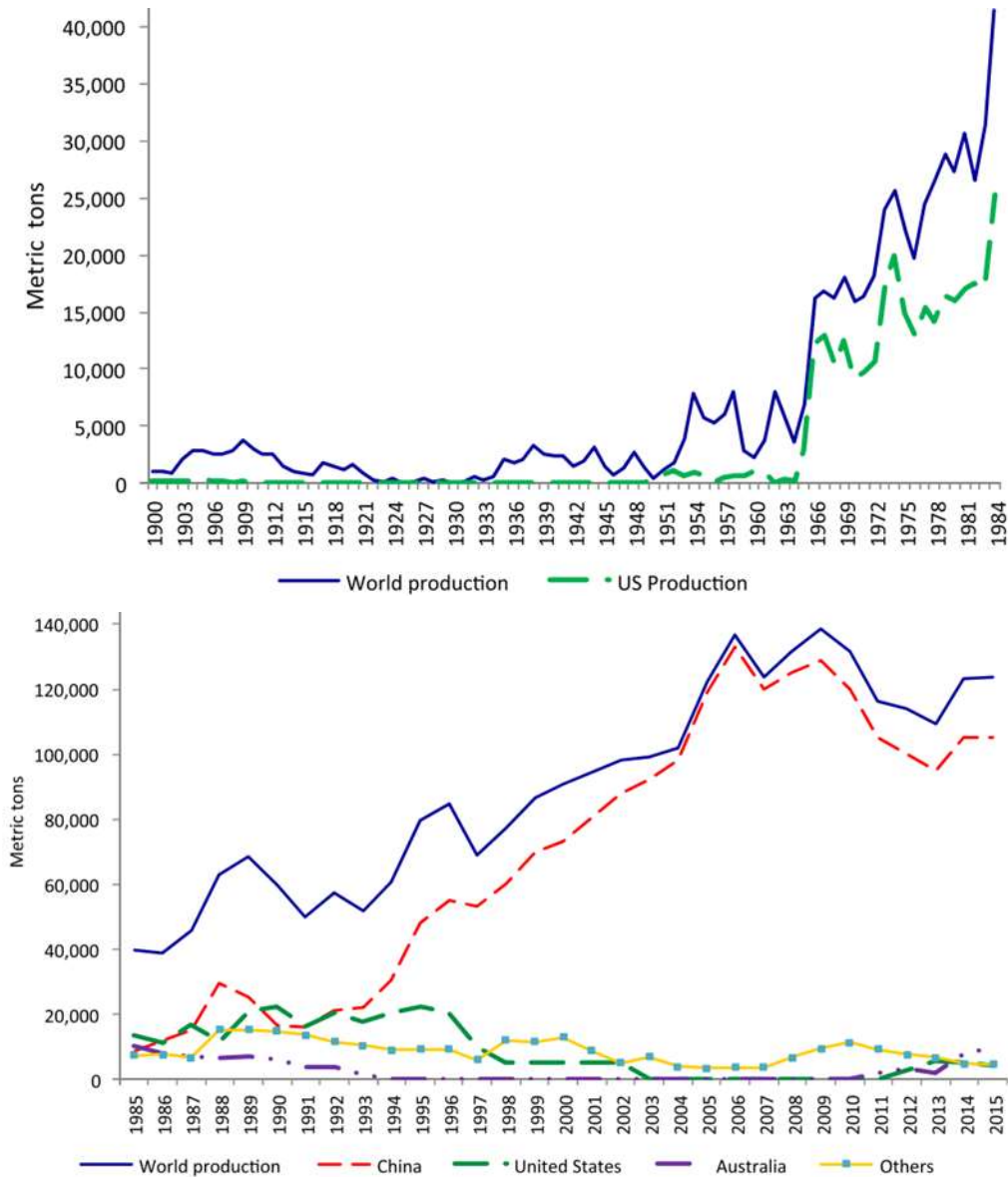


Figura 54. Producción anual de REO desde 1900 a 2015 (toneladas métricas)  
(Fernandez, 2017).

En la Figura 55 se muestra la demanda o consumo histórico global de REO de los últimos años, el cual se ha segmentado por uso final en las industrias de imanes, catalizadores, aleaciones, pulido, vidrio y otros usos. En los últimos años se consumen en el mundo cerca de 180,000 toneladas de REO por año, y el comportamiento del consumo anual ha sido creciente desde hace una década (Batapola et al., 2020; UPME & CRU Consulting, 2018).

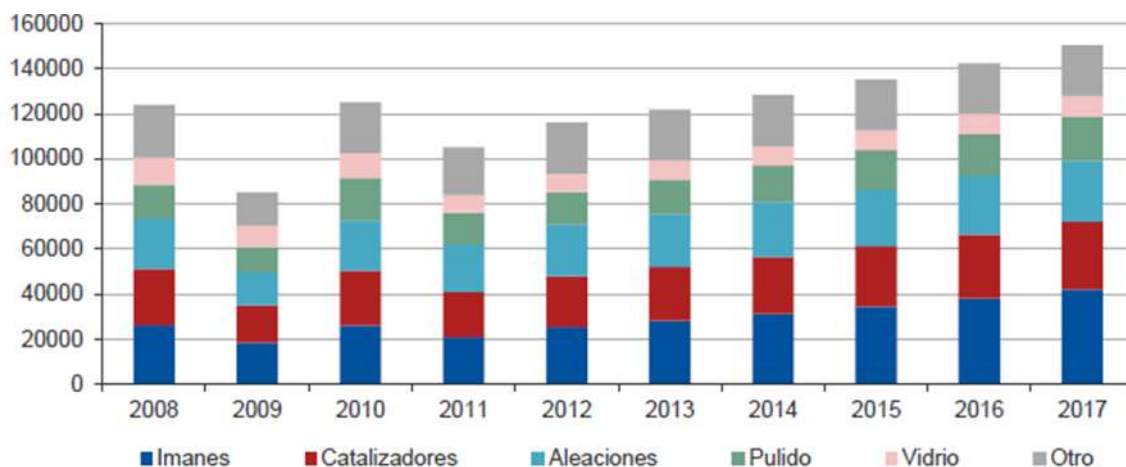


Figura 55. Consumo anual de REO desde 2008 a 2017 (toneladas) por industria (UPME & CRU Consulting, 2018).

Adicional a los factores de mercado de oferta y demanda de REO a nivel mundial, es importante señalar que las tierras raras se encuentran relacionadas con los primeros *hotspots* o tópicos de investigación en recursos minerales estratégicos (Zuo, Cheng, Guo, & Li, 2021), evidenciando el interés creciente de esta industria desde múltiples perspectivas. La Tabla 10 muestra que los estudios de materiales estratégicos se han centrado principalmente en la extracción, utilización y protección de tierras raras, con algunas investigaciones sobre datos de patentes y desarrollo sostenible de tierras raras (Zuo et al., 2021).

Tabla 10. Grupos de palabras claves para recursos minerales estratégicos (Zuo et al., 2021).

No.	Grupo principal	Subgrupos
1	Tierras raras	Análisis de patentes; tendencia de desarrollo; ventajas potenciales; costos de externalidades; materiales alternativos; asimetría; reciclaje; modelo de transferencia de impuestos; manual de código Derwent
2	Mercado de tierras raras	Mercado de tierras raras; exportación de tierras raras; industria de tierras raras; Instituto de Investigación de Tierras Raras de Baotou; impacto y contramedidas; método de investigación de eventos
3	Concentrado de tungsteno	Asociación de la Industria de Tungsteno de China; situación del mercado de tungsteno; análisis multiplicador; 11° Plan Quinquenal de Desarrollo de China

4	Industria de tierras raras	Industria de tierras raras; exportación de tierras raras; elección diversificada; política de tierras raras; comercio de tierras raras; adhesión a la Organización Mundial del Comercio (OMC); industria biotecnológica; alta tecnología; reserva material nacional
5	Ecosistema del área de minería	Seguridad ecológica; contaminación del suelo; entorno ecológico; tecnología de energía limpia; contaminación por metales pesados; índice de carga contaminante; evaluación de riesgos; riesgo de salud
6	Mercado	Modelo de evaluación; máquina de vector de soporte de wavelet; análisis de fuentes; características de distribución; tecnología de detección
7	Minerales clave	Minerales clave; riesgo de suministro; grado de dependencia externa; criterios de evaluación; materiales de imanes permanentes de tierras raras; industrias emergentes estratégicas; leyes de mineralización; pensamiento estratégico; disputa internacional; precios de las tierras raras; previsiones de demanda
8	Productos de tierras raras	Ferroaleaciones; consorcio; acero ordinario; silicio metálico; demanda de acero; producción de acero inoxidable; industria metalúrgica

Por otra parte, se evidencia a partir del comportamiento de los precios de REO vistos en la Figura 51 que estos materiales estratégicos incrementaron su valor en la crisis mundial del COVID-19, en parte porque las cadenas de suministro de tierras raras se han interrumpido, incrementando la incertidumbre de los *stocks* que controla China y por ende es quien termina fijando los precios, y segundo porque la creciente tensión en la relación comercial entre EE. UU. y China altera el mercado global (Song, Bouri, Ghosh, & Kanjilal, 2021).

En vista de que el mercado global aún se encuentra bajo los impactos e incertidumbre de la pandemia por COVID-19, es importante los estudios relacionados al rendimiento financiero y volatilidad que ha tenido el mercado de tierras raras durante este periodo. La Figura 56 muestra la representación gráfica del rendimiento y volatilidad durante COVID-19 del índice mundial de metales de tierras raras estratégicos (REMX) comparado con otros cinco índices globales claves: WILDERHILL *Clean Energy Index* (ECO), MSCI *World Equity Index* (MSCI), S&P/TSX *Global Base Metals Index* (SPGBM), S&P/TSX *Global Gold Index* (SPGOLD) y S&P *Global Oil Index* (SPOIL).

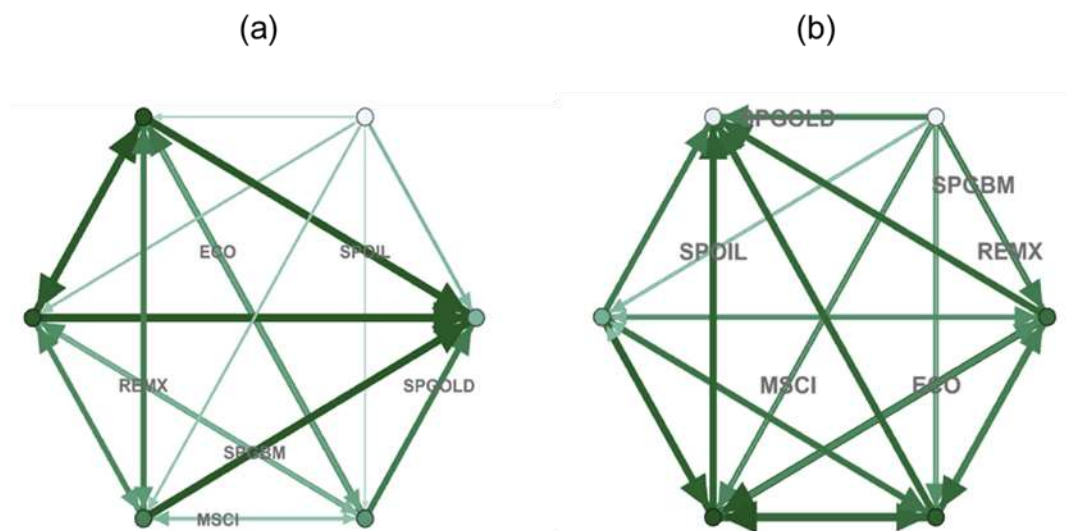


Figura 56. Comportamiento gráfico del índice mundial de REMX relacionado a mercados financieros claves durante el COVID-19 frente a: (a) el rendimiento financiero, (b) la volatilidad (Song et al., 2021).

Las series de datos del análisis del mercado de tierras raras de la Figura 56 se extrajeron de la plataforma financiera *Bloomberg* durante el período comprendido entre el 21 de septiembre de 2010 y el 28 de agosto de 2020, e indican que durante el brote de COVID-19 el índice bursátil de tierras raras se vuelve más central para la red de conectividad tanto para el rendimiento como para la volatilidad, mostrando una fuerte interdependencia con la energía limpia y la renta variable mundial; además, se encontró que la volatilidad del índice bursátil de tierras raras exhibe una fuerte interdependencia con la de los precios del petróleo crudo (Song et al., 2021).

Basados en los anteriores resultados que ayudan a enmarcar los factores modificadores para la minería de REE, se concluye que en el departamento de Antioquia se tiene viabilidad de mercado para el desarrollo de la cadena de valor minera de REO ya que las tierras raras se han consolidado como materiales estratégicos para la humanidad, especialmente desde los requerimientos de REE para llevar a cabo la transición de energías limpias lejos de los combustibles fósiles (Song et al., 2021).

## 4.6 Legales

La legislación colombiana actúa bajo dos marcos jurídicos para proyectos de exploración y minería, un marco jurídico minero y otro de tipo ambiental (Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente, 2007). En la Figura 57 se resumen estos marcos legales basado en la Guía Minero Ambiental de Exploración, referente técnico para todo proyecto minero en Colombia a nivel de exploración (Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente, 2007).

MARCO LEGAL MINERO LEY 685 DE 2001	MARCO LEGAL AMBIENTAL LEY 99 DE 1993
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Registro Minero</li> <li>• Normas Reglamentarias y Complementarias</li> <li>• Trámites Mineros</li> <li>• Medios e Instrumentos Mineros y Ambientales</li> <li>• Trámites Ambientales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Licenciamiento Ambiental</li> <li>• Permisos Ambientales</li> <li>• Competencias Tramites Ambientales</li> <li>• Normas Ambientales Generales</li> </ul>

Figura 57. Marco legal minero y marco legal ambiental de proyectos minero-ambientales (Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente, 2007).

### 4.6.1 Marco legal minero

La actividad minera del país está regulada por la Ley 685 de 2001, “Código de Minas”, cuyos objetivos fundamentales son: fomentar la exploración técnica y la explotación de los recursos mineros estatales y privados; estimular las actividades de exploración y explotación minera, con el fin de satisfacer los requerimientos de la demanda interna y externa de los mismos; incentivar el aprovechamiento racional de los recursos mineros, de manera que armonice con los principios y normas de explotación de los recursos naturales no renovables; promover el aprovechamiento de los recursos mineros dentro del concepto integral de desarrollo sostenible y fortalecimiento económico y social del país, entre otras regulaciones (Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente, 2007).

En la Figura 58 se presentan los tiempos máximos de duración que establece el Código de Minas para el ciclo de vida del negocio minero en Colombia y se menciona la situación



en que estos períodos pueden ser mayores o menores (Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente, 2007).

Etapas	Período años	Prórroga años	Disminución del período	
			Situación	Condición
Exploración	3	2	Podrá ser menor a 3 años por solicitud del proponente	Cumplimiento de las obligaciones mínimas exigidas para esta etapa del contrato
Construcción y Montaje	3	1	Podrá ser menor cuando la explotación se realice en forma anticipada y lo permitan la infraestructura y montajes provisionales o incipientes	Aviso previo y por escrito a la autoridad minera y presentación del Programa de Obras y Trabajos de la explotación anticipada
Explotación	24		Será menor cuando el concesionario haga uso de las prórrogas en los períodos de exploración, construcción y montaje.	
Total Concesión	30	30		

Figura 58. Duración de un Contrato de concesión minera en Colombia (Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente, 2007).

Se tiene que la cantidad anual de títulos mineros en Colombia desde 2006 al 2019 ha disminuido, con 6,959 títulos registrados legalmente en el año 2006, pasando por un *boom* de 12,000 títulos en el 2011 asociado al incremento del precio del oro y disminuyendo a 6,237 títulos en el año 2019 (Herrera, Maldonado, Blandón, Cardona, & Sosa, 2021). De estos 6,237 títulos mineros que tenía Colombia al 2019, ninguno se encuentra direccionado a la extracción, beneficio y comercialización de óxidos de tierras raras (REO).

Basados en la oportunidad que plantea el Artículo 63 (*Concesiones concurrentes*), se muestra en la Figura 59 el mapa de títulos mineros y solicitudes vigentes al 28 de diciembre del 2021 asociados a los targets de exploración de REE, evidenciando que la mayoría del área de interés se encuentra titulada o bajo solicitudes mineras, especialmente para el mineral de oro y sus concentrados.

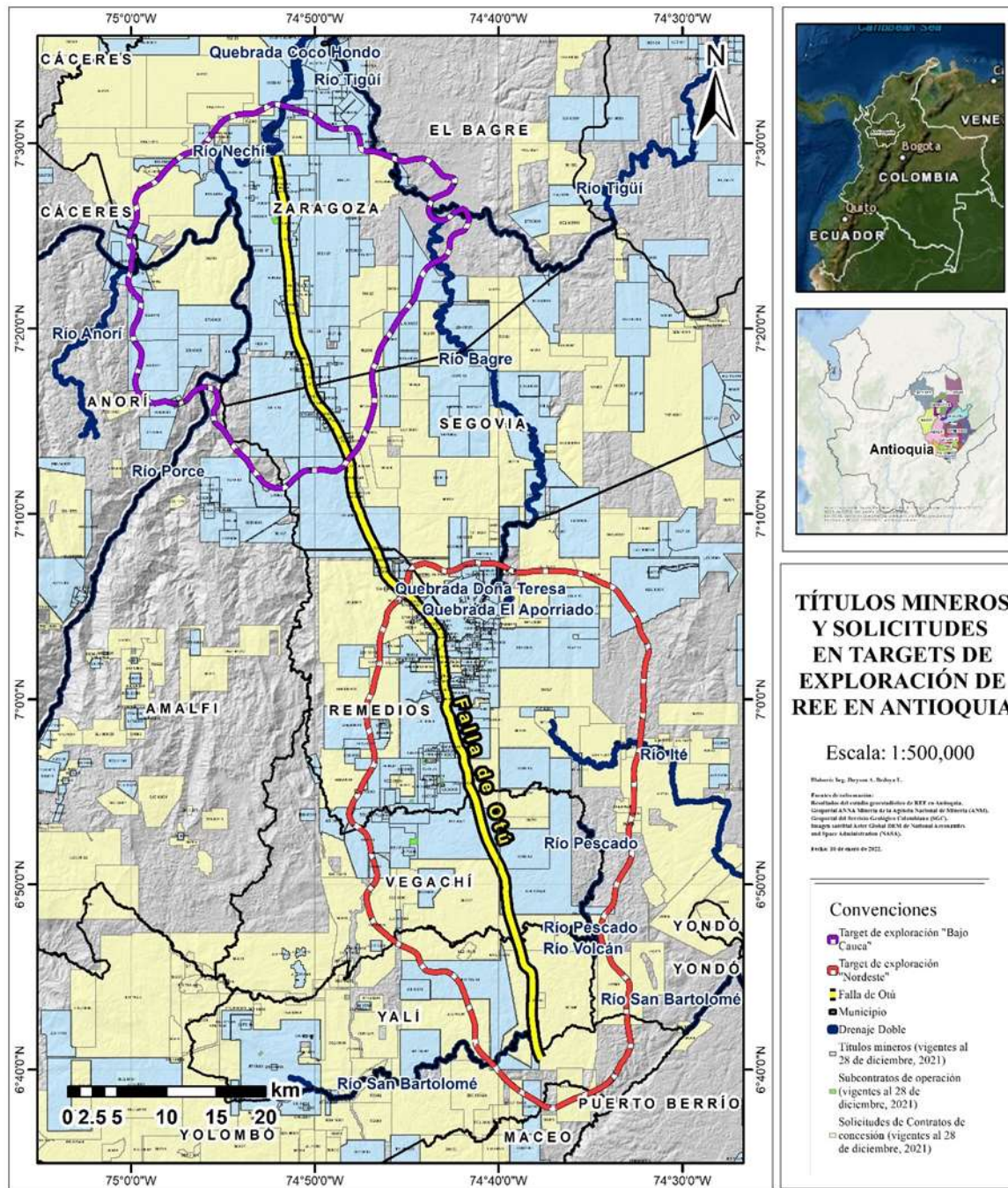


Figura 59. Mapa de títulos y solicitudes mineras en *targets* de exploración de REE en Antioquia. Escala 1:500,000.

## 4.6.2 Marco legal ambiental

Para cumplir con la normatividad relacionada con la solicitud y trámite de permisos, autorizaciones y concesiones de recursos naturales renovables requeridos para Los Trabajos de Exploración (LTE), es necesario tener conocimiento de la oferta y demanda de recursos naturales objeto de uso, aprovechamiento o afectación, con el fin de establecer las asignaciones, el manejo y el grado de intervención que pueda realizarse sobre los mismos. La solicitud de los permisos debe realizarse de acuerdo con la información que se presenta a continuación. La obtención de los mismos, es indispensable para dar inicio a los trabajos de exploración (Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente, 2007).

La guía minero-ambiental es el instrumento de referencia para el manejo ambiental y por tanto, el concesionario deberá ajustarla a las características y condiciones específicas del área solicitada (Art. 272 del Código de Minas). Antes de iniciar los trabajos de exploración deberá diligenciar el formato de inscripción de las medidas de manejo ambiental, de acuerdo con la guía y con la reglamentación expedida por el Ministerio del Medio Ambiente (Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente, 2007).

Durante la ejecución de LTE el concesionario podrá dar uso a los recursos naturales renovables, siempre y cuando la autoridad competente le haya otorgado los permisos, concesiones o autorizaciones ambientales correspondientes. Se deberá justificar técnicamente el uso de estos recursos naturales renovables y tramitar los permisos en caso de planearse aprovechamiento forestal, ocupación de cauces, concesión de aguas superficiales, vertimiento de residuos líquidos o emisiones atmosféricas (Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente, 2007).

Con el Artículo 9, parágrafo segundo, del Decreto 1728 de 2002, Los Trabajos de Exploración minera estarán sujetos a la guía ambiental y el seguimiento correspondiente será competencia de las Corporaciones Autónomas Regionales o Grandes Centros Urbanos, quienes tendrán en cuenta la reglamentación que para estos efectos expida el Ministerio del Medio Ambiente (Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente, 2007).

Antes de iniciar los trabajos de exploración el concesionario minero debe identificar si sobre el área de interés se presenta algún tipo de situación legal que impida el normal desarrollo de la actividad. Por ejemplo: Las zonas excluibles son aquellas áreas del territorio nacional, donde, según el Artículo 34 de la Ley 685, no podrán adelantarse trabajos y obras de exploración y explotación minera. En el artículo 35 se describen las zonas y lugares donde, de manera restringida, se pueden adelantar trabajos y obras de exploración y explotación. El concesionario deberá presentar los estudios que demuestran la compatibilidad de las actividades a desarrollar; la entidad competente podrá autorizar los trabajos.

### 4.6.3 Artículos claves

Se mencionan a continuación algunos Artículos del Código de Minas que fundamentan este trabajo desde el marco legal de las zonas excluibles de la minería, las zonas de minería restringida, la prospección de minas, los medios de prospección, y las concesiones concurrentes.

“Artículo 34. *Zonas excluibles de la minería*. No podrán ejecutarse trabajos y obras de exploración y explotación mineras en zonas declaradas y delimitadas conforme a la normatividad vigente como de protección y desarrollo de los recursos naturales renovables o del ambiente y que, de acuerdo con las disposiciones legales sobre la materia, expresamente excluyan dichos trabajos y obras. Las zonas de exclusión mencionadas serán las que se constituyan conforme a las disposiciones vigentes, como áreas que integran el sistema de parques nacionales naturales, parques naturales de carácter regional y zonas de reserva forestales” (República de Colombia - Gobierno Nacional, 2001).

“Artículo 35. *Zonas de minería restringida*. Podrán efectuarse trabajos y obras de exploración y de explotación de minas en las siguientes zonas y lugares, con las restricciones que se expresan a continuación: a) Dentro del perímetro urbano de las ciudades o poblados, señalado por los acuerdos municipales adoptados de conformidad con las normas legales sobre régimen municipal, salvo en las áreas en las cuales estén prohibidas las actividades mineras de acuerdo con dichas normas; b) En las áreas ocupadas por construcciones rurales, incluyendo sus huertas, jardines y solares anexos,

siempre y cuando se cuente con el consentimiento de su dueño o poseedor y no haya peligro para la salud e integridad de sus moradores; c) En las zonas definidas como de especial interés arqueológico, histórico o cultural siempre y cuando se cuente con la autorización de la autoridad competente; d) En las playas, zonas de bajamar y en los trayectos fluviales servidos por empresas públicas de transporte y cuya utilización continua haya sido establecida por la autoridad competente, si esta autoridad, bajo ciertas condiciones técnicas y operativas, que ella misma señale, permite previamente que tales actividades se realicen en dichos trayectos; e) En las áreas ocupadas por una obra pública o adscritas a un servicio público siempre y cuando: *i.* Cuento con el permiso previo de la persona a cuyo cargo estén el uso y gestión de la obra o servicio; *ii.* Que las normas aplicables a la obra o servicio no sean incompatibles con la actividad minera por ejecutarse, y *iii.* Que el ejercicio de la minería en tales áreas no afecte la estabilidad de las construcciones e instalaciones en uso de la obra o servicio; f) En las zonas constituidas como zonas mineras indígenas siempre y cuando las correspondientes autoridades comunitarias, dentro del plazo que se les señale, no hubieren ejercitado su derecho preferencial a obtener el título minero para explorar y explotar, con arreglo a lo dispuesto por el Capítulo XIV de este Código; g) En las zonas constituidas como zonas mineras de comunidades negras siempre y cuando las correspondientes autoridades comunitarias, dentro del plazo que se les señale, no hubieren ejercitado su derecho preferencial a obtener el título minero para explorar y explotar, con arreglo a lo dispuesto por el Capítulo XIV de este Código; h) En las zonas constituidas como zonas mineras mixtas siempre y cuando las correspondientes autoridades comunitarias, dentro del plazo que se les señale, no hubieren ejercitado su derecho preferencial a obtener el título minero para explorar y explotar, con arreglo a lo dispuesto por el Capítulo XIV de este Código” (República de Colombia - Gobierno Nacional, 2001).

“Artículo 39. *Prospección de minas.* La prospección de minas es libre, excepto en los territorios definidos como zonas mineras para minorías étnicas tal como lo contempla el Capítulo XIV de este Código. Cuando haya de efectuarse en terrenos de propiedad particular, se requerirá dar aviso previo al dueño, poseedor, tenedor o administrador, directamente o a través del alcalde” (República de Colombia - Gobierno Nacional, 2001).

“Artículo 40. *Medios de prospección.* La prospección es un proceso para investigar la existencia de minerales delimitando zonas prometedoras y sus métodos consisten, entre

otros, en la identificación de afloramientos, la cartografía geológica, los estudios geofísicos y geoquímicos y la investigación superficial, en áreas no sujetas a derecho exclusivos. De la prospección se excluyen los métodos del subsuelo” (República de Colombia - Gobierno Nacional, 2001).

“Artículo 63. *Concesiones concurrentes*. Sobre el área objeto de una concesión en la que se cuente con el Programa de Trabajos y Obras, podrán los terceros solicitar y obtener un nuevo contrato sobre minerales distintos de los de aquella si el concesionario no ha ejercitado el derecho a adicionar el objeto de su contrato, en los términos del Artículo 62 anterior. En este evento las solicitudes de dichos terceros sólo se podrán aceptar una vez que la autoridad minera haya establecido, por medio de peritos designados por ella, que las explotaciones de que se trate sean técnicamente compatibles. Este experticio se practicará con citación y audiencia del primer proponente o contratista y la materia se resolverá al pronunciarse sobre la superposición de las áreas pedidas por los terceros” (República de Colombia - Gobierno Nacional, 2001).

En conclusión, es viable desde el marco legal minero y legal ambiental realizar actividades de exploración en Antioquia, por lo tanto, el primer paso será la actividad de prospección de minas en los *targets* de exploración definidos en el estudio geoestadístico y por fuera de zonas excluibles de la minería con miras a desarrollar un Contrato de concesión para minerales de REE y sus concentrados. Es importante mencionar la alternativa de establecer un negocio minero de REE sobre el título minero o solicitud minera que otra compañía tenga autorizado, siempre y cuando no haya incluido las tierras raras dentro de los minerales solicitados y la coexistencia de ambas operaciones mineras no interfieran sus procesos productivos.

## 4.7 Ambientales

La Figura 60 indica el contexto ambiental de los *targets* de exploración de REE en Antioquia, resaltando los ríos y quebradas, área de reserva forestal de Ley Segunda, zonas de protección y desarrollo de los recursos naturales no renovables, sistema de área protegida informativa, y proyectos públicos-privados que se encuentran con licencia ambiental.



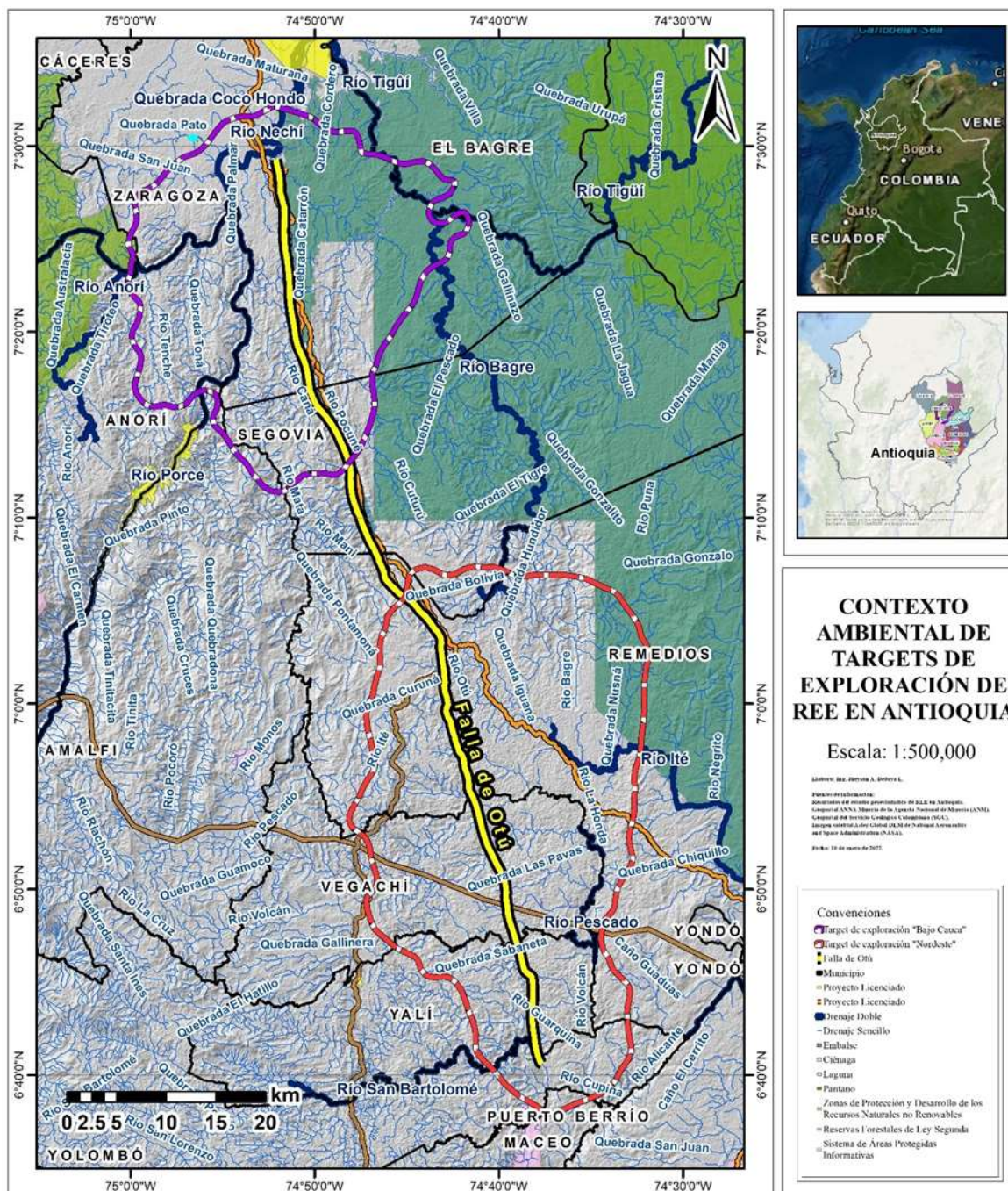


Figura 60. Mapa de contexto ambiental de *targets* de exploración de REE en Antioquia.

Escala 1:500,000.

Se evidencia que el *Target* Nordeste se superpone con la restricción ambiental de reserva forestal de Ley Segunda, mientras que el *Target* Bajo Cauca se encuentra relacionado a las restricciones ambientales de reserva forestal de Ley Segunda y una zona declarada de

protección de desarrollo de los recursos naturales no renovables, por lo cual deberán ser excluidas y no podrán ejecutarse trabajos y obras de exploración y explotación mineras en aquellos lugares. Es importante anotar que el área del *Target* Nordeste y *Target* Bajo Cauca se encuentra bajo la competencia ambiental de la Corporación Autónoma Regional CORANTIOQUIA. El reconocimiento de estos criterios son claves dentro de los factores modificadores de aspecto ambiental para delimitar las áreas que efectivamente podrán ser objeto de prospección minera para REE, basados en el Artículo 34 (*Zonas excluibles de la minería*) del Código de Minas.

La evaluación de impactos ambientales desde el componente biótico, abiótico y social se presenta en la Figura 61 para un proyecto de exploración minera en la etapa de Exploración Geológica de Superficie o Fase I (Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente, 2007). Se tiene identificado que los impactos ambientales más potenciales de la exploración en la Fase I están relacionados con la adecuación y construcción de campamentos y helipuertos, la utilización y/o adecuación de accesos, la apertura de trincheras y apiques, y las actividades de geofísica (Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente, 2007).



ACTIVIDADES		ACTIVIDADES GENERALES Y ESPECÍFICAS DE LA EXPLORACIÓN GEOLÓGICA DE SUPERFICIE															
		PLANIFICACIÓN	PREOPERATIVA				OPERACIÓN										
		Reconocimiento de campo	Socialización y vista de campo	Ubicación de campamentos	Definición y uso de accesos	Contratación de personal	Adecuación y construcción de campamentos y helipuertos	Utilización y/o adecuación de accesos	Base topográfica y levantamiento topográfico	Cartografía geológica	Apertura de trincheras y apiques	Geoquímica	Geofísica	Levantamiento topográfico			
COMPONENTE AMBIENTAL	ABIÓTICO	Cambios en la calidad físico química del agua						●	●								
	Afectación de la dinámica de aguas superficiales y subterráneas																
	Sedimentación de cuerpos de agua						●	●		●							
	Emisión de material particulado y de gases						●	●		●		●					
	Generación de ruidos						●	●					●				
	Remoción en masa y pérdida del suelo						●	●			●						
	Generación de estériles y escombros						●	●			●						
	Desestabilización de pendientes							●									
	BIÓTICO	Remoción y pérdida de cobertura vegetal						●	●		●		●				
	Afectación de comunidades faunísticas						●	●									
	SOCIAL	Generación de expectativas	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Generación de empleo					●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
	Afectación de la infraestructura pública y privada						●	●									
	Incremento del uso de bienes y servicios						●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Cambios en el uso del suelo						●											
Afectación del patrimonio cultural						●											
Modificación del paisaje						●											

Figura 61. Matriz Causa-Efecto de las actividades durante la Exploración Geológica de Superficie o Fase I (Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente, 2007).

Respecto a los impactos ambientales asociados a la minería de REE es de preocupación ambiental crítica el manejo los elementos radioactivos asociados a las menas de tierras raras, como el Torio (Th) y Uranio (U) (Dushyantha et al., 2020). Se ha informado de un alto nivel de radiación en áreas de extracción y almacenamiento de monacita en la India, relacionándose con diferentes peligros para la salud humana; además, en noviembre de 2008 se observaron en Malasia fuertes protestas públicas citando los impactos adversos de los desechos radiactivos contra la emisión de la licencia de operación de Lynas Company para procesar REE en Malasia, y Australia experimentó una disminución

significativa en las exportaciones de monacita de 1989 a 1992 debido a las preocupaciones sobre la radiactividad y, por lo tanto, las empresas de energía renovable prefirieron los concentrados de energía renovable de China en lugar de Australia (Dushyantha et al., 2020). En este sentido, los componentes radiactivos implican que la extracción de REO sea más costosa y desafiante (Dushyantha et al., 2020).

Desafortunadamente, los límites máximos aceptables para REE en el agua potable no están disponibles en ninguna organización internacional de la salud y tampoco hay suficientes datos disponibles sobre su toxicidad para la salud humana (Balaram, 2019).

Para estabilizar eficazmente los contaminantes en los relaves de las minas de REE es posible utilizar la fitoestabilización, que tiene como objetivo establecer una cubierta vegetal en la superficie de suelos contaminados, reteniendo así los contaminantes dentro de la zona vadosa a través de la acumulación de raíces o la precipitación de contaminantes dentro de la rizósfera (Liu et al., 2022). La planta de fibra ramio (*Boehmeria nivea L.*) es una hierba perenne o que subsiste al menos 2 años, con un complejo sistema subterráneo compuesto por finas raíces fibrosas, raíces de rábano y rizoma. En otros estudios el ramio se considera una planta tolerante a múltiples metales, con una fuerte tolerancia al Plomo (Pb), Cinc (Zn), Cadmio (Cd) y Arsénico (As), y tiene una gran adaptabilidad a entornos hostiles como la sequía; también se ha descubierto que el ramio tiene una gran tolerancia a los REE y retiene la mayoría de los REE en las raíces bajo cultivo hidropónico (Liu et al., 2022).

En la Figura 62 se muestra una experiencia exitosa de la fitoestabilización de suelos contaminados con plantas de ramio que realizó una mina de REE en China, ocasionado por el procesamiento metalúrgico de lixiviación en pilas. Los resultados en 2 años mostraron que esta estrategia de fitoestabilización no solo mejora las propiedades del suelo, sino que también disminuye las concentraciones extraíbles de elementos potencialmente tóxicos (REE y Al), logrando retener la mayor cantidad de REE dentro de las raíces gruesas (Liu et al., 2022). En resumen, la fitoestabilización con plantas de ramio podría ser un candidato potencial para la remediación ambiental de relaves mineros de REE (Liu et al., 2022).

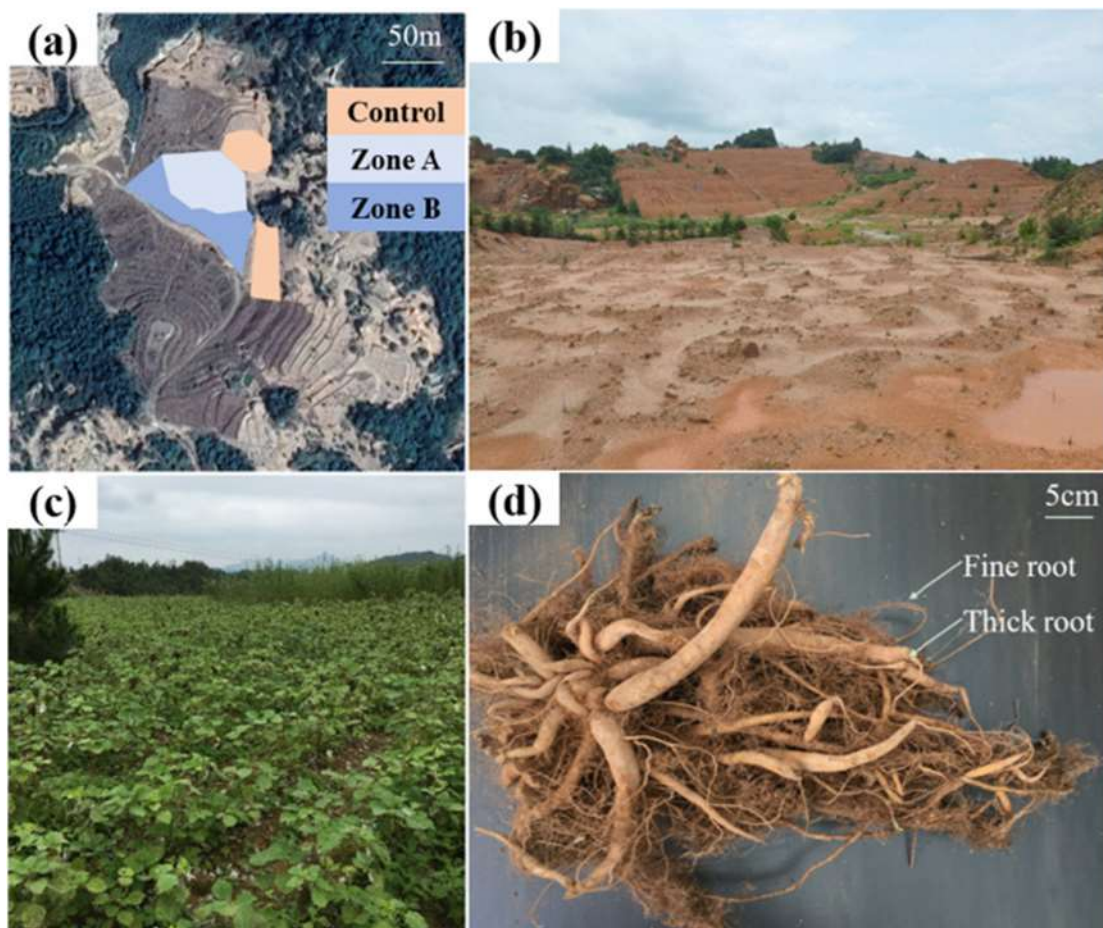


Figura 62. (a) Ubicación de los cultivos en un relave minero de REE en China.  
 (b) Relaves sin remediación.  
 (c) Relaves después de la remediación mediante la adición de capa orgánica y la siembra de ramio.  
 (d) Estructura de la raíz de la planta de ramio cultivada en los relaves (Liu et al., 2022).

## 4.8 Infraestructura

La infraestructura aérea (aeropuertos), terrestre (vías, carretera Proyecto de Interés Nacional Estratégico-PINE) y energética (hidroeléctrica, red de alta tensión) se detalla en la Figura 63, interceptada con los *targets* de exploración, los perímetros urbanos de cada municipio de influencia y los principales ríos que pueden servir para el desarrollo de infraestructura fluvial.

Es destacable de la Figura 63 que cada *target* de exploración cuenta con un aeropuerto local asociado que puede facilitar algunos aspectos logísticos del proyecto, el *Target* Nordeste incluye el Aeropuerto Alberto Jaramillo Sánchez, localizado en el municipio de Remedios, y el *Target* Bajo Cauca está cerca del Aeropuerto El Tomín, en el municipio de El Bagre. Adicionalmente se evidencia que ambos *targets* se encuentran interceptados por carreteras o vías que permitirían el desplazamiento y acceso a la mina de REE; sin embargo, al interior del *Target* Bajo Cauca existe menos desarrollo de infraestructura terrestre. También se evidencia que sobre ambos *targets* cruza una carretera 4G concesionada como proyecto PINE y que actualmente se encuentra en construcción, facilitando el acceso entre blancos de exploración y su conectividad con el resto del país.

La hidrografía en detalle analizada en el contexto ambiental (ver Figura 60) y la topografía del terreno (ver Figura 38) presenta grandes oportunidades de realizar una Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH) con capacidades de generación de energía de 1 MW a 10 MW, lo cual disminuiría sustancialmente los costos operaciones en la minería de REE y bajaría el *cut-off*, aumentando a su vez el inventario de recursos y reservas de TREO. Sin embargo, a 5 km del *Target* Bajo Cauca, se encuentra el Proyecto Hidroeléctrico Porce IV de Empresas Públicas de Medellín (EPM), el cual está diseñado para una capacidad instalada de 400 MW (República de Colombia - Gobierno Nacional, 2008), con la oportunidad de realizar conexiones a través de la línea de alta tensión para el suministro de energía eléctrica en cada *target*. En cualquier caso, de encontrar uno y varios yacimientos de REE, sería posible el suministro de energía eléctrica a las operaciones mineras a través del montaje de una PCH o la compra de energía a EPM, cuya infraestructura eléctrica de líneas de alta tensión intercepta ambos blancos de exploración.



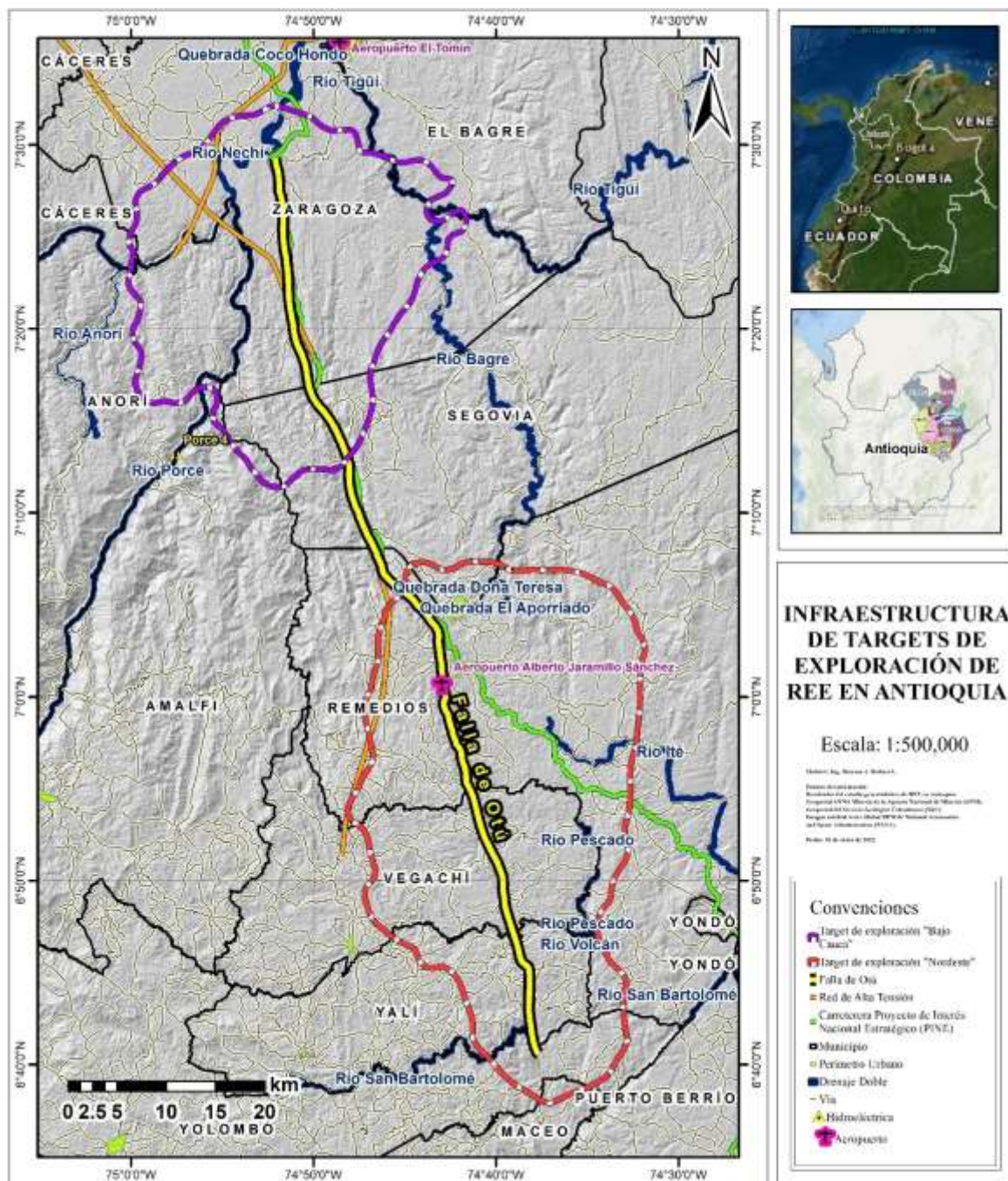


Figura 63. Mapa de infraestructura de *targets* de exploración de REE en Antioquia.

Escala 1:500,000.

## 4.9 Sociales

Está demostrado que todos los parámetros sociales, incluyendo las Licencias Sociales para Operar (LSO), deben ser evaluados desde el inicio del proceso de evaluación de un proyecto minero junto con los factores modificadores de mercado, geológicos, técnicos, económicos, legales, políticos y ambientales (Barakos & Mischo, 2021). La inserción de parámetros sociales en el proceso de evaluación se hace particularmente en el proceso de selección del método minero más adecuado y en la evaluación del riesgo de inversión, una vez se obtienen resultados de exploración positivos (Barakos & Mischo, 2021).

Si bien este trabajo se enmarca en la etapa de prospección detallada, es importante analizar el contexto social que presenta el *Target* Nordeste y *Target* Bajo Cauca, ya que el propósito superior será la materialización de un proyecto minero de REE. Además, está claro que la presencia de comunidades étnicas puede representar restricciones para los trabajos de exploración y explotación de minas.

En la Figura 64 se detalla la información de tipo social más relevante de los *targets* de exploración, como las divisiones político-administrativas de municipios y veredas, perímetros urbanos, centros poblados, rutas colectivas, zonas mineras étnicas, consejos comunitarios afrocolombianos, resguardos indígenas y zonas de reserva campesina. En el *Target* Bajo Cauca se ubica el perímetro urbano del municipio de Zaragoza y se tiene la presencia de las comunidades indígenas Pablo Múnera y Zince La 18, además de zonas mineras étnicas y consejos comunitarios afrocolombianos establecidos. Por su parte el *Target* Nordeste alberga los perímetros urbanos de Segovia y Remedios.

Según el Artículo 35 (*Zonas de minería restringida*) del Código de Minas, en los perímetros urbanos están restringidas las actividades de exploración según los acuerdos municipales; al igual que están restringidas en las áreas constituidas como zonas mineras indígenas, zonas mineras de comunidades negras y zonas mineras de comunidades mixtas, siempre y cuando las correspondientes autoridades comunitarias no hubieren ejercido su derecho preferencial a obtener el título minero.



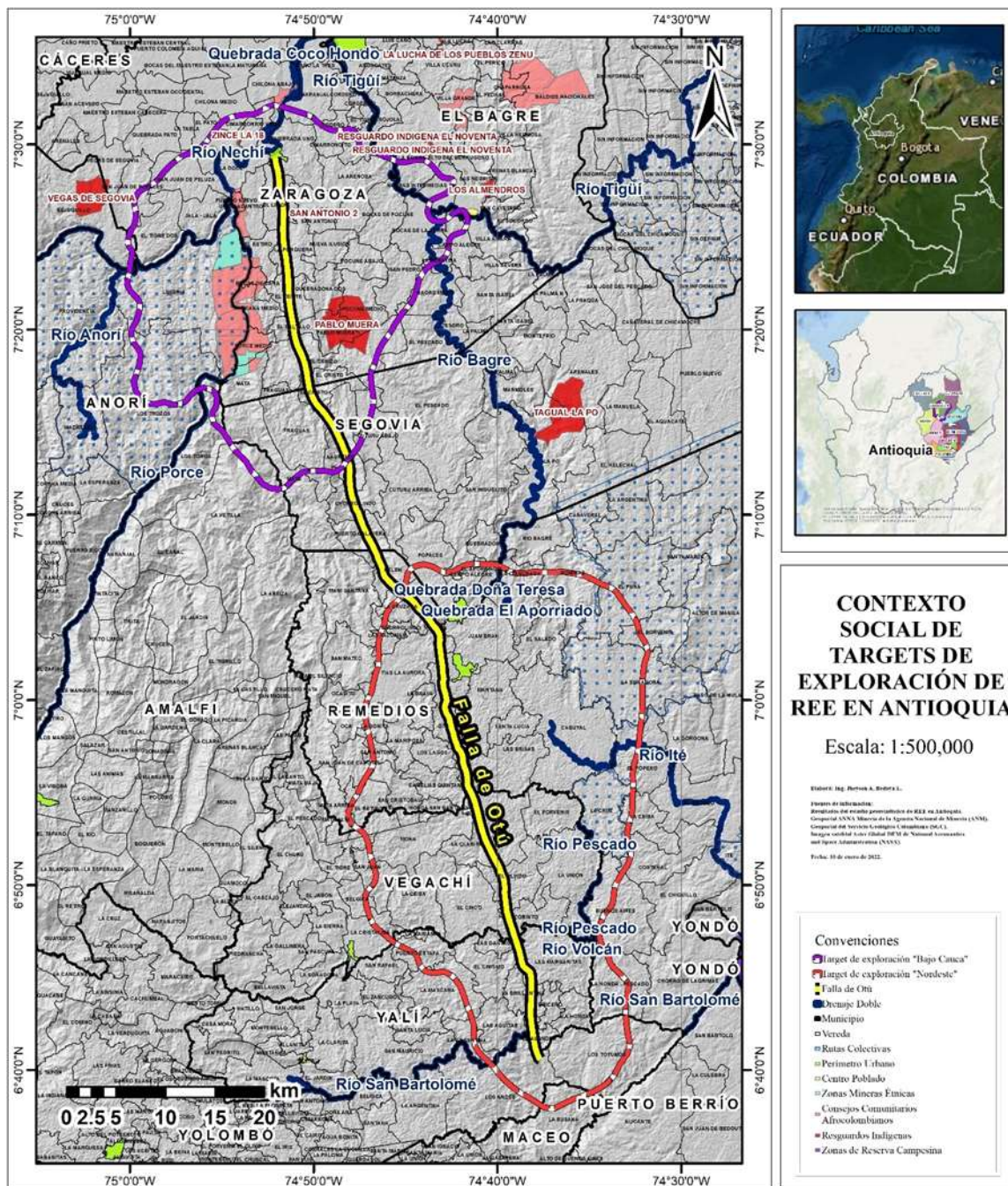


Figura 64. Mapa de contexto social de *targets* de exploración de REE en Antioquia. Escala 1:500,000.

## 4.10 Gubernamentales

La gobernanza y gestión de los recursos naturales no renovables hace referencia a la administración de los procesos de interacción y toma de decisiones entre diferentes actores del Estado, las empresas y la sociedad, involucrados en un problema colectivo que está relacionado con la propiedad, acceso, extracción, uso, conservación, apropiación y distribución de rentas provenientes de los recursos naturales (León & Muñoz, 2019).

En Colombia la gobernanza de los recursos minerales se realiza de modo de gobernanza de mercado, en la cual el gobierno otorga a empresas del sector privado las concesiones de los minerales para la gestión de su cadena de valor, desde la exploración de los recursos minerales hasta la comercialización de productos minerales para uso final. En la Tabla 11 se resumen los modos de gobernanza asociados a la gestión de los recursos naturales (León & Muñoz, 2019). La gobernanza jerárquica ocurre cuando es el Estado quien administra directamente las empresas que explotan los recursos minerales, y la gobernanza de red funciona cuando los actores se organizan o asocian y ejercen la función de gobierno (León & Muñoz, 2019).

Tabla 11. Modos de gobernanza de los recursos naturales (León & Muñoz, 2019).

	<b>De mercado</b>	<b>Jerárquica</b>	<b>En red</b>
<b>Base de las relaciones</b>	Contrato y derechos de propiedad	Relación de empleo	Intercambio de recursos
<b>Grado de dependencia</b>	Independiente	Dependiente	Independiente
<b>Medio de intercambio</b>	Precios	Autoridad	Confianza
<b>Medios de resolución de conflictos y coordinación</b>	Regateo y las cortes	Reglas y mando	Diplomacia
<b>Cultura</b>	Competencia	Subordinación	Reciprocidad

Las contribuciones más claras del sector minero a la economía de un país son los ingresos fiscales e ingresos por concepto de divisas, aunque también se aporta al crecimiento económico desde la demanda de bienes y servicios locales e inversiones en infraestructura de uso compartido entre los proyectos extractivos y las comunidades de influencia (Banco Interamericano de Desarrollo (BID), 2018). Por esta razón, la explotación de minerales de



REE en Antioquia se convertiría en una fuente de riqueza para el desarrollo del territorio nacional si se administra adecuadamente la cadena de valor de estos recursos. Dentro de los beneficios estarían la utilización de impuestos y regalías para impulsar el desarrollo sostenible en los territorios, crear empleos, construir infraestructura, mejorar conocimiento del subsuelo, innovar procesos, desarrollar tecnología, diversificar la oferta minera del país lo cual mejora la estabilidad macroeconómica, entre otros. Para iniciar estos procesos el Estado deberá adjudicar contratos de concesión para REE y otorgar las licencias técnicas y ambientales a empresas públicas, privadas o alianza público-privada para la exploración, explotación y comercialización de estos metales estratégicos; los siguientes pasos para un buen gobierno de la cadena de valor de REE serán la regulación y seguimiento de las operaciones, la recaudación de impuestos y regalías, la distribución y gestión de los ingresos, y la aplicación de políticas y ejecución de proyectos de desarrollo sostenible (Halland et al., 2016).

Recursos minerales medidos de REE en Colombia no se encuentran delimitados por lo cual es razonable que el país no fije su interés económico en el desarrollo de estos metales, contrario a esta posición, en los últimos años muchos países están interesados en la explotación de REE en diferentes lugares del mundo porque se consideran los elementos más críticos y estratégicos del mundo (Batapola et al., 2020), y el alto riesgo asumido en la exploración minera se correlaciona con altos márgenes de utilidad (Paulick & Machacek, 2017).

Bajo este contexto, el país deberá aprovechar las oportunidades de variación del mercado para incluir los REE como minerales estratégicos y habilitar proyectos técnica, económica, social, ambiental y legalmente viables que continúen las siguientes etapas de la cadena de valor (Schlinkert & van den Boogaart, 2015), teniendo en cuenta que los tiempos de exploración en proyectos mineros de REE generalmente tardan entre 6 y 10 años hasta llegar a la etapa productiva (Keilhacker & Minner, 2017). Además, existe el interés globalizado de desarrollar proyectos mineros de REE fuera de China como una medida de reducir la concentración de la producción en un solo país (R. Pell et al., 2019), así la creación de nuevas minas en el mundo se ha definido como una estrategia de mitigación de criticidad que reduce el riesgo de interrupción de la cadena de suministro global de REE (Keilhacker & Minner, 2017; Schmid, 2019).

## 5. Programa técnico y económico de prospección de REE en Antioquia

### 5.1 Diseño técnico

Los bloques o unidades de prospección selectiva fueron creados inicialmente desde el componente técnico (geológico-minero-metalúrgico) sobre los *targets* de exploración indicados en el estudio geoestadístico de REE en Antioquia, los cuales están interceptados por la Falla de Otú con dirección N20°W y tienen concentraciones promedio por encima del *cut-off*, mayor a 800 ppm de TREO. Al mismo tiempo, depósitos aluviales y unidades graníticas como el Batolito de Segovia, Batolito Antioqueño y otros plutones interceptan los bloques de exploración, incrementando la posibilidad de encontrar un yacimiento de REE por ser favorables los ambientes geológicos.

El programa técnico de prospección detallada está planeado con 86 bloques regulares de 5 km x 5 km (25 km<sup>2</sup>) distribuidos en 26 bloques de prospección en el *Target* Bajo Cauca, correspondientes a un área de muestreo de 650 km<sup>2</sup>, y 60 bloques en el *Target* Nordeste que encierran 1,500 km<sup>2</sup> (ver Figura 65). El programa completo de prospección detallada de REE en Antioquia cubre un área de 2,150 km<sup>2</sup> en jurisdicción de 10 municipios: Cáceres, Anorí, Amalfi, Zaragoza, Segovia, Remedios, Vegachí, Yalí, Yolombó y Maceo.

El área excluida de minería que ha sido declarada como reserva forestal de Ley Segunda se superpone al *Target* Bajo Cauca y *Target* Nordeste, siendo el factor modificador que disminuyó el área de exploración de forma más representativa, de aquí la importancia de visualizar el componente ambiental en los proyectos mineros. El segundo factor

modificador que restringió la campaña de prospección detallada es de tipo social, asociado al resguardo indígena Pablo Múnera en el *Target* Bajo Cauca; sin embargo, es posible negociaciones con dicha comunidad para incluir el área que se encuentra en su territorio dentro de los trabajos de exploración.

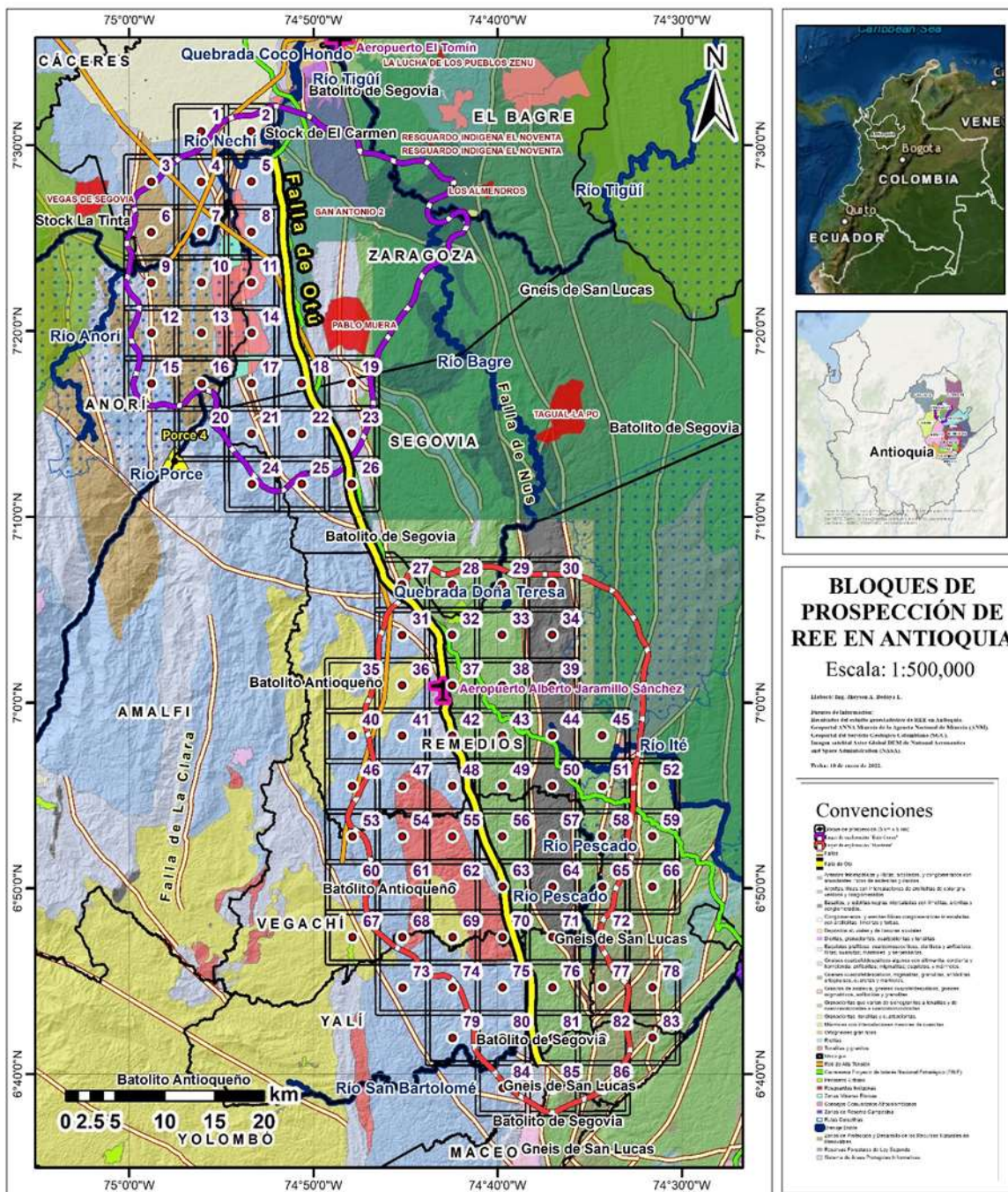


Figura 65. Mapa de bloques de prospección de REE en Antioquia. Escala 1:500,000.

Los trabajos que se ejecutarán sobre cada bloque de prospección serán a nivel de superficie y comprende: muestreo de suelos, muestreo de sedimentos activos finos de corriente, muestreo de concentrados de batea/concentrador y muestreo de rocas. Lo anterior con el objetivo de delimitar las áreas de alto tenor de TREO y disminuir el riesgo geológico en las campañas de exploración de superficie y del subsuelo con perforaciones profundas, con miras a desarrollar minería de tierras raras.

## 5.2 Presupuesto

Frente al gasto mundial en exploración de yacimientos de REE se ha evidenciado una disminución progresiva desde el 2011 hasta el 2016, no obstante, la Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia (UPME) espera una recuperación mundial en los próximos años influenciada principalmente por el alza del precio del Neodimio y Praseodimio, y proyecta un presupuesto global en exploración de REE con tendencia positiva al largo plazo según movimientos en el precio y la demanda (UPME & CRU Consulting, 2018). De la Figura 66 se evidencia que para el 2022 se estimó un presupuesto de 65 millones de USD para la exploración de REE en el mundo (UPME & CRU Consulting, 2018).

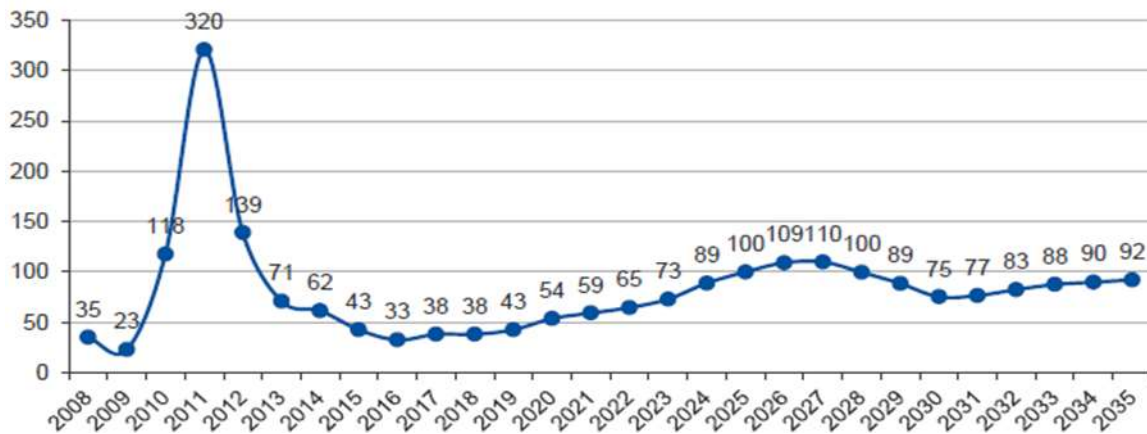


Figura 66. Presupuesto de exploración mundial de REE desde 2008 a 2035 (MUSD)  
(UPME & CRU Consulting, 2018).

Para iniciar la prospección detallada de REE y ejecutar el programa técnico en los 86 bloques durante el primer año se requieren aproximadamente 1.84 MUSD,

presupuestados en la Tabla 12 como inversiones en materiales y equipos, personal, viáticos, procesamiento multi-elemental de muestras, asesores, oficina, *benchmarking*, imprevistos, impuestos y administración del proyecto.

Tabla 12. Resumen de inversiones de la prospección detallada de REE en Antioquia.

DESCRIPCIÓN	VALOR (USD)	Valor (%)
<b>Materiales y equipos</b>	<b>29,270</b>	<b>1.6%</b>
Muestreador (x4)	920	0.0%
Mallas Taylor No. 40, 80, 100 y 200 (x4)	2,000	0.1%
Concentrador Knelson KC-MD3 (x1)	25,000	1.4%
Motor 1/4 HP (x1)	100	0.0%
Bateas (x4)	250	0.0%
Canalones hidráulicos (x4)	1,000	0.1%
<b>Personal</b>	<b>108,000</b>	<b>5.9%</b>
Profesionales de ingeniería de minas/geológica (x4)	60,000	3.3%
Estudiantes de ingeniería de minas/geológica (x4)	24,000	1.3%
Auxiliares de muestreo (x8)	24,000	1.3%
<b>Viáticos</b>	<b>528,571</b>	<b>28.7%</b>
Alimentación	200,000	10.8%
Hospedaje	200,000	10.8%
Transporte	128,571	7.0%
<b>Procesamiento de muestras</b>	<b>154,800</b>	<b>8.4%</b>
Muestras de suelos	25,800	1.4%
Muestras de sedimentos activos	25,800	1.4%
Muestras de concentrados	25,800	1.4%
Muestras de rocas	77,400	4.2%
<b>Asesores</b>	<b>24,000</b>	<b>1.3%</b>
<b>Oficina</b>	<b>15,000</b>	<b>0.8%</b>
<b>Benchmarking</b>	<b>27,000</b>	<b>1.5%</b>
<b>Imprevistos (10%)</b>	<b>88,664</b>	<b>4.8%</b>
<b>TOTAL SIN IMPUESTOS</b>	<b>975,306</b>	<b>52.9%</b>
<b>Impuestos</b>	<b>341,357</b>	<b>18.5%</b>
<b>TOTAL CON IMPUESTOS</b>	<b>1,316,663</b>	<b>71.4%</b>
<b>Administración</b>	<b>526,665</b>	<b>28.6%</b>
<b>TOTAL CON IMPUESTOS + ADMINISTRACIÓN</b>	<b>1,843,328</b>	<b>100.0%</b>

## 6. Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

La principal conclusión de este trabajo de investigación es que existen recursos minerales estratégicos de tierras raras por encima del *cut-off* establecido a nivel mundial de 0.08% de TREO en dos *targets* de exploración identificados en las subregiones del Nordeste y Bajo Cauca del departamento de Antioquia, estimados por simulación geoestadística de bandas rotantes y kriging ordinario de bloques, con un potencial de prospectividad de recursos inferidos por cada metro de profundidad de 5,444 millones de toneladas con un tenor de 0.09% de TREO, equivalentes a 4.9 millones de toneladas de TREO.

En el área de influencia de los blancos de exploración el promedio del contenido de Escandio fue 13.6 ppm, el promedio de REE+Itrio fue 420.8 ppm y la relación promedio LREE/HREE fue 10.3. Basados en el ciclo geoquímico manto-corteza-superficie y los resultados estadísticos obtenidos se puede concluir inicialmente que los REE en el *Target* Nordeste y *Target* Bajo Cauca tienen un origen en la corteza, específicamente en ambientes graníticos y/o en depósitos sedimentarios de arenas pesadas aluviales. La monacita, xenotima, bastnasita y arcillas iónicas son los minerales de interés o menas para la prospección de tierras raras en los blancos de exploración.

Los factores modificadores para realizar minería de REE en los *targets* permitieron delimitar un programa técnico y económico de prospección detallada sobre un área total de 2,150 km<sup>2</sup> con viabilidad de mercado, minera, de procesamiento, metalúrgica, económica, legal, ambiental, social, de infraestructura y gubernamental. De los anteriores factores, el ambiental y social fueron los más representativos para delimitar las áreas



efectivas de prospección detallada, ya que las reservas forestales de Ley Segunda son áreas excluidas de minería y los territorios de comunidades indígenas y étnicas se encuentran con restricciones para ejecutar trabajos de exploración y explotación de minerales. Además, el análisis económico indicó que un negocio minero de REE podría materializarse con un CAPEX de 690 MUSD, y de estos proyectos podría esperarse un VPN después de impuestos de 994 MUSD (con una tasa de descuento del 10%), TIR después de impuestos del 26.2% y *payback* de 5.4 años.

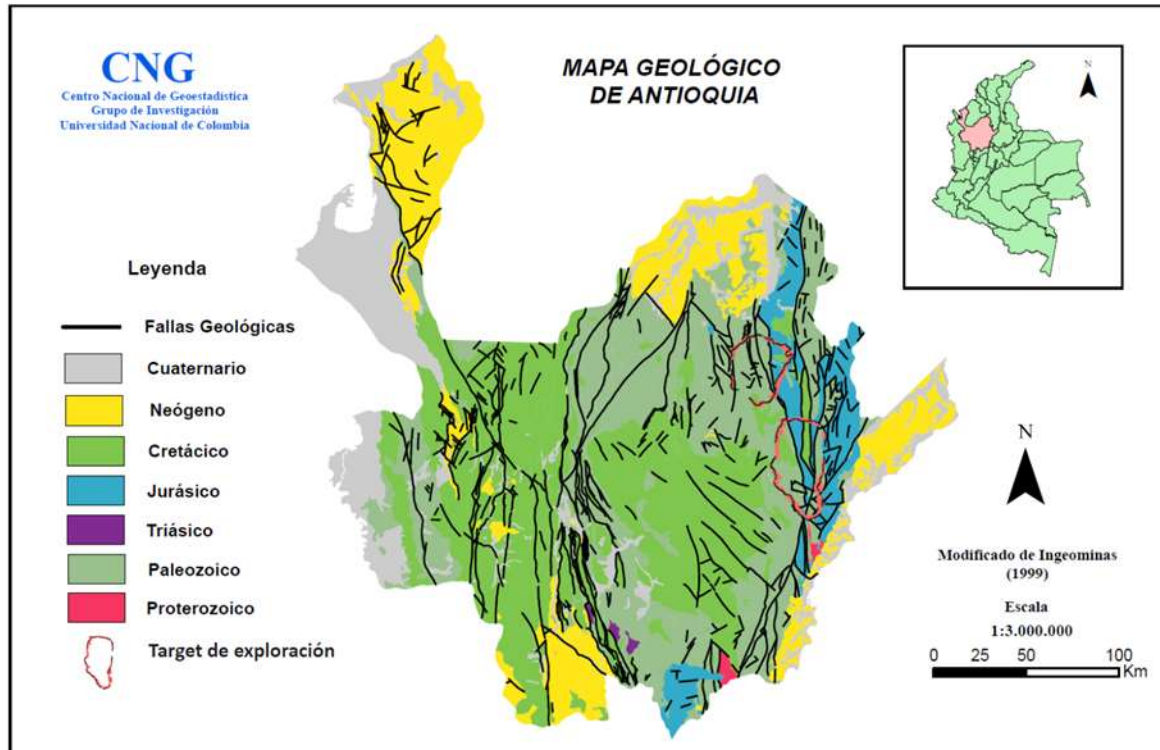
Para llegar a cuantificar con mayor certeza recursos minerales inferidos, indicados y medidos de REE en Antioquia es necesario ejecutar inicialmente trabajos de prospección detallada, con una inversión proyectada de 1.84 MUSD durante el primer año, que permitiría desarrollar en 86 bloques campañas sistemáticas de muestreo de sedimentos activos finos de corriente, suelos, rocas y concentrados. Los resultados geoquímicos de REE del programa técnico guiarán las siguientes fases de exploración geológica de superficie y del subsuelo con perforaciones profundas.

## 6.2 Recomendaciones

Se recomienda invertir en la cadena de valor minera de tierras raras en Antioquia ya que existen áreas con concentraciones de TREO que superan el *cut-off* para su exploración, además su alto valor económico los clasifica a nivel global como minerales estratégicos, haciendo que la demanda futura sea cada vez mayor debido a la criticidad de estos materiales para los países en el desarrollo de aplicaciones de energía limpia, tecnológicas y de defensa.

Debido a que las anomalías geoquímicas de REE pueden estar representando una relación espacial con el depósito mineral de tipo concéntrica, excéntrica, adyacente o lateral, se recomienda adicionar un *buffer* de seguridad respecto a los *targets* definidos de 10 a 50 km para limitar la prospección detallada de tierras raras en Antioquia. La anterior decisión estará basada en análisis financieros y de riesgos que realice el inversionista, ya que incrementaría considerablemente los costos del programa.

## A. Anexo: Mapa 1. Geología regional de Antioquia por edades

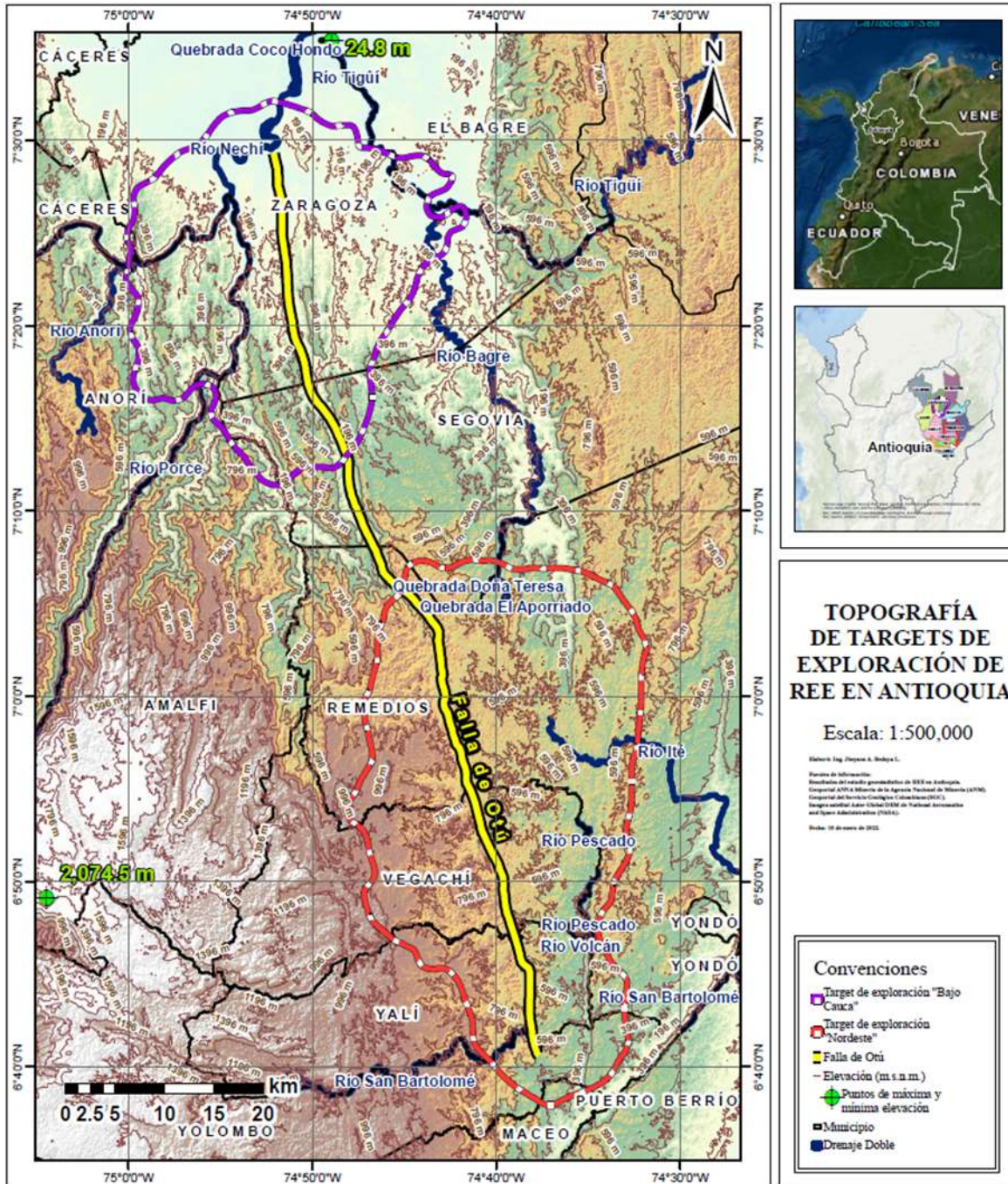






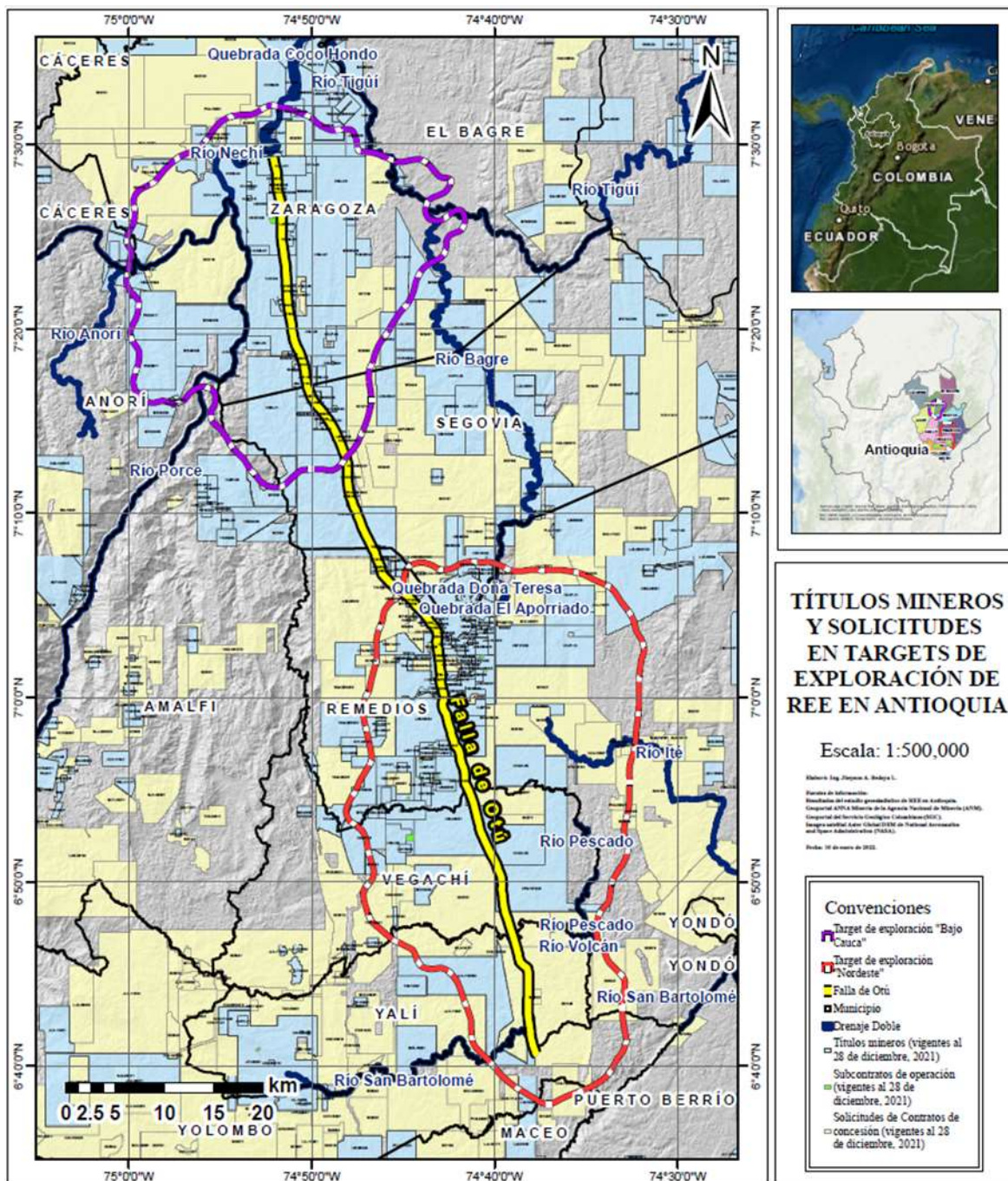


### C. Anexo: Mapa 3. Topografía de targets de exploración de REE en Antioquia



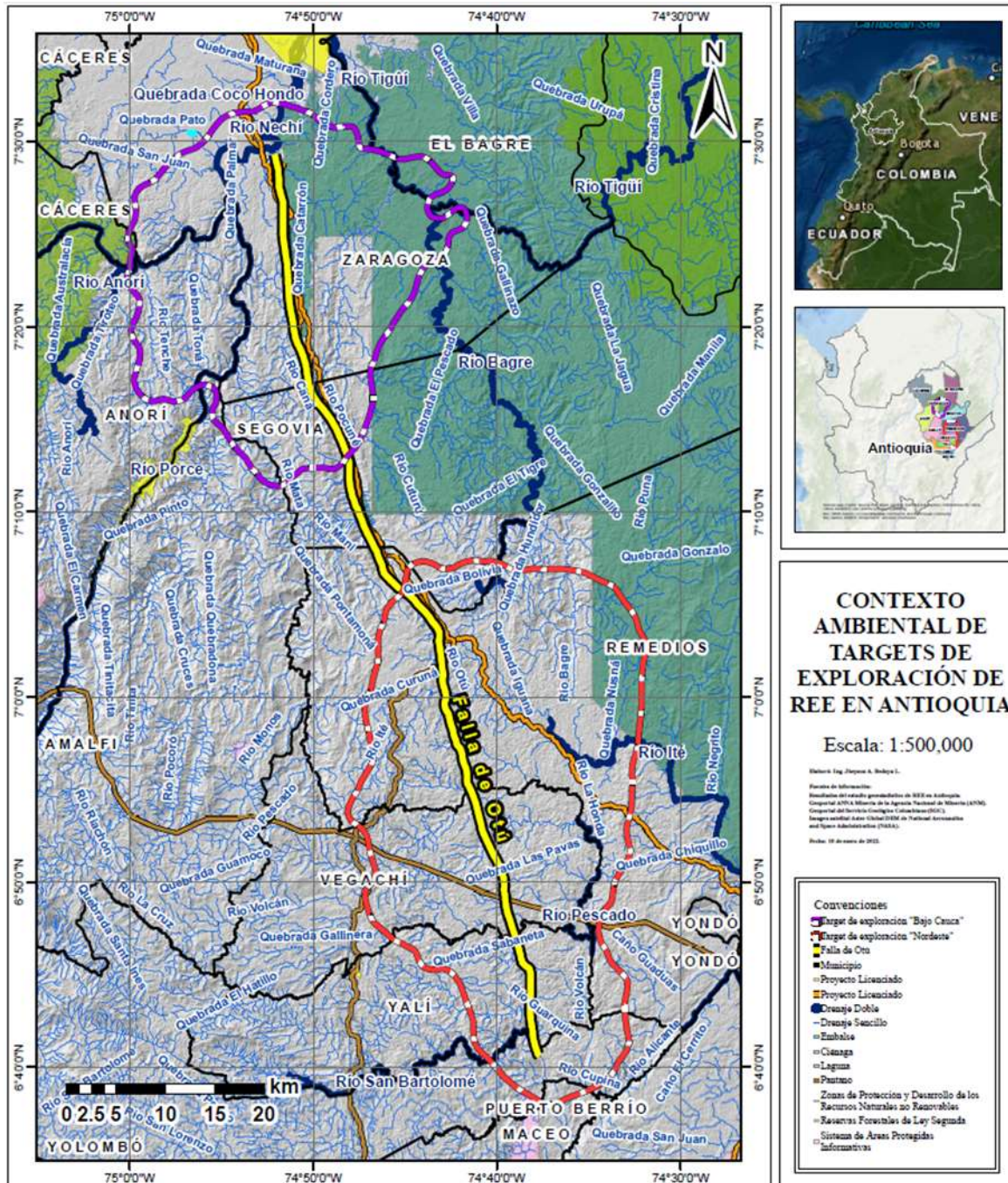


## D. Anexo: Mapa 4. Títulos mineros y solicitudes en targets de exploración de REE en Antioquia



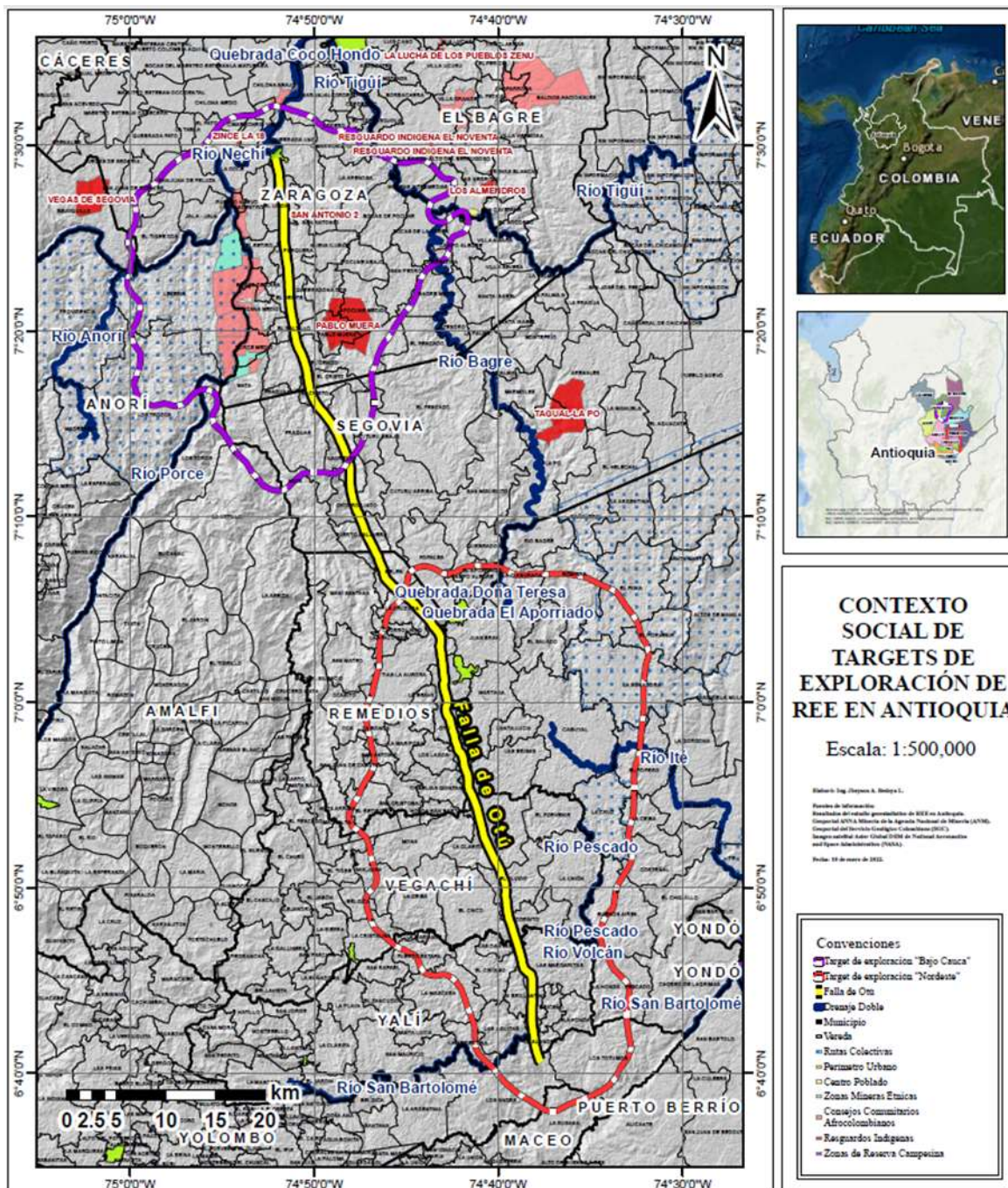


## E. Anexo: Mapa 5. Contexto ambiental de targets de exploración de REE en Antioquia



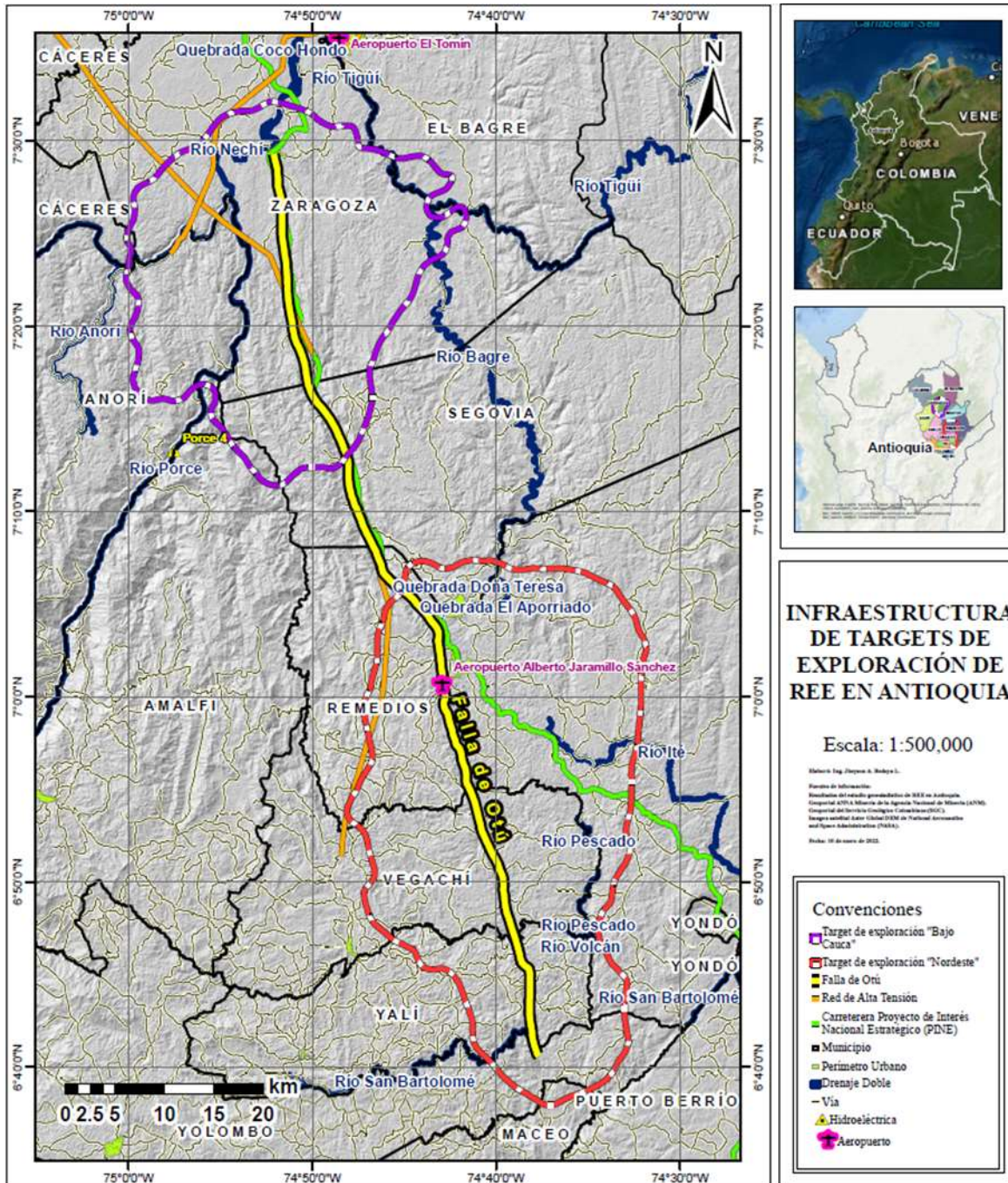


# F. Anexo: Mapa 6. Contexto social de targets de exploración de REE en Antioquia





# G. Anexo: Mapa 7. Infraestructura de targets de exploración de REE en Antioquia







## Bibliografía

- Andersson, P. (2020). Chinese assessments of “critical” and “strategic” raw materials: Concepts, categories, policies, and implications. *Extractive Industries and Society*, 7(1), 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.01.008>
- 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>
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2018). *Buenas prácticas en la gestión de recursos minerales - Nota técnica 1602*.
- Barakos, G., Gutzmer, J., & Mischo, H. (2016). Strategic evaluations and mining process optimization towards a strong global REE supply chain. *Journal of Sustainable Mining*, 15(1), 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2016.05.002>
- Barakos, G., & Mischo, H. (2021). Insertion of the social license to operate into the early evaluation of technical and economic aspects of mining projects: Experiences from the Norra Kärr and Bokan Dotson rare earth element projects. *The Extractive Industries and Society*, 8(2), 100814. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2020.09.008>
- Batapola, N. M., Dushyantha, N. P., Premasiri, H. M. R., Abeyasinghe, A. M. K. B., Rohitha, L. P. S., Ratnayake, N. P., ... Dharmaratne, P. G. R. (2020). A comparison of global rare earth element (REE) resources and their mineralogy with REE prospects in Sri Lanka. *Journal of Asian Earth Sciences*, 200(June), 104475. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2020.104475>
- Chilés, J.-P., & Delfiner, P. (1999). Geostatistics - Modeling Spatial Uncertainty. In *John Wiley & Sons*. <https://doi.org/10.2307/2685361>
- Comisión Chilena del Cobre -COCHILCO. (2016). *Situación actual del mercado de tierras raras y su potencial en Chile*.
- Comisión Colombiana de Recursos y Reservas Minerales -CCRR-. (2018). *Estándar*



- colombiano para el reporte público de resultados de exploración, recursos y reservas minerales (ECRR)* (p. 84). p. 84. Retrieved from <https://comisioncolombianarecursosyreservas.com/estandar-colombiano-reporte-publico-resultados-exploracion-recursos-minerales-reservas-ecrr/>
- Cressie, N. (1985). Fitting variogram models by weighted least squares. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 17(5), 563–586. <https://doi.org/10.1007/BF01032109>
- D.D. Sarma. (2009). *Geostatistics with Applications in Earth Sciences* (Second Edi). Springer.
- Dushyantha, N., Batapola, N., Ilankoon, I. M. S. K., Rohitha, S., Premasiri, R., Abeysinghe, B., ... Dissanayake, K. (2020). The story of rare earth elements (REEs): Occurrences, global distribution, genesis, geology, mineralogy and global production. *Ore Geology Reviews*, 122(March), 103521. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103521>
- Dutta, T., Kim, K. H., Uchimiya, M., Kwon, E. E., Jeon, B. H., Deep, A., & Yun, S. T. (2016). Global demand for rare earth resources and strategies for green mining. *Environmental Research*, 150, 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.05.052>
- Fernandez, V. (2017). Rare-earth elements market: A historical and financial perspective. *Resources Policy*, 53(May), 26–45. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.05.010>
- Galos, K., Lewicka, E., Burkowicz, A., Guzik, K., Kot-Niewiadomska, A., Kamyk, J., & Szlugaj, J. (2021). Approach to identification and classification of the key, strategic and critical minerals important for the mineral security of Poland. *Resources Policy*, 70(October 2020). <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101900>
- González, H. (2001). Mapa Geológico del Departamento de Antioquia. Escala 1:400,000. *Ministerio de Minas y Energía*, p. 241. Retrieved from <https://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010040024267/documento/pdf/0101242671101000.pdf>
- Halland, H., Lokanc, M., Nair, A., & Kannan, S. P. (2016). *El sector de las industrias extractivas*.
- Hayes, S. M., & McCullough, E. A. (2018). Critical minerals: A review of elemental trends in comprehensive criticality studies. *Resources Policy*, 59(August), 192–199. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.06.015>
- Henao, J. (2019). *Identificación de elementos de tierras raras en carbones colombianos*.

---

Universidad Nacional de Colombia.

- Herrera, C. M., Maldonado, M. I., Blandón, V., Cardona, J. S., & Sosa, J. C. (2021). *Minería y Sostenibilidad: ¿Una realidad alcanzable?* Medellín.
- Hou, Q., Yang, X., Tang, J., Ren, Y., Zhou, Q., & Shi, J. (2021). A discovery of extremely REE-rich kimberlites: A possible new type of REE-deposit. *Solid Earth Sciences*, (xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.sesci.2021.08.002>
- Jaireth, S., Hoatson, D. M., & Mieziotis, Y. (2014). Geological setting and resources of the major rare-earth-element deposits in Australia. *Ore Geology Reviews*, 62, 72–128. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.02.008>
- Jordens, A., Sheridan, R. S., Rowson, N. A., & Waters, K. E. (2014). Processing a rare earth mineral deposit using gravity and magnetic separation. *Minerals Engineering*, 62, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.09.011>
- Keilhacker, M. L., & Minner, S. (2017). Supply chain risk management for critical commodities: A system dynamics model for the case of the rare earth elements. *Resources, Conservation and Recycling*, 125(July), 349–362. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.05.004>
- Kerguelen, J. (2016). *Caracterización y aprovechamiento de recursos minerales en colas de terrazas aluviales del Distrito Bagre-Nechí*.
- Kitco Metals Inc. (2022). Strategic Metals. Retrieved January 11, 2022, from <https://www.kitco.com/strategic-metals/>
- Klossek, P., Kullik, J., & van den Boogaart, K. G. (2016). A systemic approach to the problems of the rare earth market. *Resources Policy*, 50, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.09.005>
- Koike, K., Goto, T., & Nozaki, T. (2021). 3D geostatistical modeling of metal contents and lithofacies for mineralization mechanism determination of a seafloor hydrothermal deposit in the middle Okinawa Trough , Izena Hole. *Ore Geology Reviews*, 135(March 2020), 104194. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104194>
- Kumari, A., Panda, R., Jha, M. K., Kumar, J. R., & Lee, J. Y. (2015). Process development to recover rare earth metals from monazite mineral: A review. *Minerals Engineering*, 79, 102–115. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2015.05.003>
- Lamus, C. M., Márquez, M. A., & Gaspar, J. C. (2006). Applied mineralogical studies on Colombian (El Bagre, Antioquia) black sands. Retrieved June 16, 2021, from The Minerals, Metals & Materials Society website:

- [https://www.researchgate.net/publication/289646993\\_Applied\\_mineralogical\\_studies\\_on\\_Colombian\\_El\\_Bagre\\_Antioquia\\_black\\_sands](https://www.researchgate.net/publication/289646993_Applied_mineralogical_studies_on_Colombian_El_Bagre_Antioquia_black_sands)
- León, M., & Muñoz, C. (2019). Guía para la elaboración de estudios de caso sobre la gobernanza de los recursos naturales. *Serie Recursos Naturales y Desarrollo*, 192 (LC/TS(ISSN 2664-4541), 39. Retrieved from [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44779/1/S1900715\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/44779/1/S1900715_es.pdf)
- Lin, P., Yang, X., Werner, J. M., & Honaker, R. Q. (2021). Application of Eh-pH Diagrams on Acid Leaching Systems for the Recovery of REEs from Bastnaesite, Monazite and Xenotime. *Metals*, 11(5), 734. <https://doi.org/10.3390/met11050734>
- Liu, C., Liu, W., Huot, H., Guo, M., Zhu, S., Zheng, H., ... Qiu, R.-L. (2022). Biogeochemical cycles of nutrients, rare earth elements (REEs) and Al in soil-plant system in ion-adsorption REE mine tailings remediated with amendment and ramie (*Boehmeria nivea* L.). *Science of The Total Environment*, 809(132), 152075. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152075>
- Mancheri, N. A., Sprecher, B., Bailey, G., Ge, J., & Tukker, A. (2019). Effect of Chinese policies on rare earth supply chain resilience. *Resources, Conservation and Recycling*, 142(July 2018), 101–112. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.017>
- Matheron, G. (1981). *Mining Geostatistics* (Academic P). New York.
- Meng, D., Zhao, Q., Pan, X., & Zhang, T. an. (2020). Clean production of rare earth oxide from rare earth chloride solution by electrical transformation. *Hydrometallurgy*, 197(May), 105372. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105372>
- Ministerio de Minas y Energía & Ministerio del Medio Ambiente. (2007). Guía Minero Ambiental de Exploración. Retrieved from [https://www.anm.gov.co/sites/default/files/normativas/guia\\_mineroambiental\\_de\\_exploracion.pdf](https://www.anm.gov.co/sites/default/files/normativas/guia_mineroambiental_de_exploracion.pdf)
- Nasuha Yahya, F., Nadirah Mat Suli, L., Hanisah Wan Ibrahim, W., & Abdul Rasid, R. (2019). Thermodynamic Evaluation of the Aqueous Stability of Rare Earth Elements in Sulfuric Acid Leaching of Monazite through Pourbaix Diagram. *Materials Today: Proceedings*, 19, 1647–1656. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.193>
- Paulick, H., & Machacek, E. (2017). The global rare earth element exploration boom: An analysis of resources outside of China and discussion of development perspectives. *Resources Policy*, 52(February), 134–153. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.02.002>
- Pell, R. S., Wall, F., Yan, X., & Bailey, G. (2019). Applying and advancing the economic

- resource scarcity potential (ESP) method for rare earth elements. *Resources Policy*, 62(October 2018), 472–481. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.10.003>
- Pell, R., Wall, F., Yan, X., Li, J., & Zeng, X. (2019). Mineral processing simulation based-environmental life cycle assessment for rare earth project development: A case study on the Songwe Hill project. *Journal of Environmental Management*, 249(September), 109353. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109353>
- República de Colombia - Gobierno Nacional. (2001). Ley 685 de 2001 - Código de Minas. Retrieved January 11, 2022, from Agencia Nacional de Minería (ANM) website: [https://www.anm.gov.co/sites/default/files/ley\\_685\\_2001\\_0.pdf](https://www.anm.gov.co/sites/default/files/ley_685_2001_0.pdf)
- República de Colombia - Gobierno Nacional. (2008). Resolución 316 de 2008 - Porce IV. Retrieved January 12, 2022, from Ministerio de Minas y Energía website: <https://www.suin-juriscal.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Resolucion/4029154>
- Restrepo Baena, O., Bustamante Rúa, M., & Gaviria Cartagena, A. (2008). *Cuaderno de Pirometalurgia* (pp. 1–109). pp. 1–109. Retrieved from <https://minas.medellin.unal.edu.co/centro-editorial/cuadernos/cuaderno-de-pirometalurgia>
- Restrepo Baena, O. J. (2017). Metalurgia extractiva. *Universidad Nacional de Colombia*, p. 98. Retrieved from <https://minas.medellin.unal.edu.co/centro-editorial/cuadernos/notas-de-clase-metalurgia-extractiva>
- Restrepo, J. J., & Toussaint, J. F. (2020). Tectonostratigraphic terranes in Colombia: An up-date. First part: Continental terranes. *Publicaciones Geológicas Especiales*, 1, 37–63. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.35.2019.03>
- Riddle, M. E., Tatara, E., Olson, C., Smith, B. J., Bennett Irion, A., Harker, B., ... Graziano, D. J. (2021). Agent-based modeling of supply disruptions in the global rare earths market. *Resources, Conservation and Recycling*, 164(October 2020), 105193. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105193>
- Riesgo García, M. V., Krzemień, A., Manzanedo del Campo, M. Á., Menéndez Álvarez, M., & Gent, M. R. (2017). Rare earth elements mining investment: It is not all about China. *Resources Policy*, 53(May), 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.05.004>
- Riesgo García, M. V., Krzemień, A., Sáiz Bárcena, L. C., Diego Álvarez, I., & Castañón Fernández, C. (2019). Scoping studies of rare earth mining investments: Deciding on further project developments. *Resources Policy*, 64(November).

- <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101525>
- Sadeghi, B., Madani, N., & Carranza, E. J. M. (2015). Combination of geostatistical simulation and fractal modeling for mineral resource classification. *Journal of Geochemical Exploration*, 149, 59–73. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.11.007>
- Sadeghi, M., Morris, G. A., Carranza, E. J. M., Ladenberger, A., & Andersson, M. (2013). Rare earth element distribution and mineralization in Sweden: An application of principal component analysis to FOREGS soil geochemistry. *Journal of Geochemical Exploration*, 133, 160–175. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.10.015>
- Samper, J., & Carrera, J. (1990). *Geoestadística Aplicaciones a la hidrogeología subterránea* (Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Ed.). Barcelona.
- Sánchez Arredondo, L., & Molina Escobar, J. (2009). Geochemistry blocks to predict significant mineral deposits in the Antioquia department in Colombia. In *Imprenta Nacional de Colombia*. <https://doi.org/9789588256764>
- Schlinkert, D., & van den Boogaart, K. G. (2015). The development of the market for rare earth elements: Insights from economic theory. *Resources Policy*, 46, 272–280. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2015.10.010>
- Schmid, M. (2019). Mitigating supply risks through involvement in rare earth projects: Japan's strategies and what the US can learn. *Resources Policy*, 63(July), 101457. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101457>
- Servicio Geológico Colombiano. (2018). *Atlas geoquímico de Colombia*. Retrieved from [https://srvags.sgc.gov.co//Archivos\\_Geoportal/Recursos\\_Minerales/Atlas\\_Geoquimico\\_2018/Atlas\\_completo.pdf](https://srvags.sgc.gov.co//Archivos_Geoportal/Recursos_Minerales/Atlas_Geoquimico_2018/Atlas_completo.pdf)
- Silva, G. A., Petter, C. O., & Albuquerque, N. R. (2018). Factors and competitiveness analysis in rare earth mining, new methodology: case study from Brazil. *Heliyon*, 4(3), e00570. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00570>
- Sinclair, A. J., & Blackwell, G. H. (2004). Applied Mineral Inventory Estimation. In *Cambridge Iniversity Press* (Vol. 5). Retrieved from <https://ejournal.poltektegal.ac.id/index.php/siklus/article/view/298%0Ahttp://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.jana.2015.10.005%0Ahttp://www.biomedcentral.com/1471-2458/12/58%0Ahttp://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&P>
- Song, Y., Bouri, E., Ghosh, S., & Kanjilal, K. (2021). Rare earth and financial markets: Dynamics of return and volatility connectedness around the COVID-19 outbreak.

*Resources Policy*, 74(January), 102379.

<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102379>

UPME. (2019). *Los minerales del futuro en Colombia*. (Especial 25 años UPME).

UPME, & CRU Consulting. (2018). *Tierras raras: Caracterización y análisis de mercado internacional de minerales en el corto, mediano y largo plazo con vigencia al año 2035*. 65.

Wang, J., Guo, M., Liu, M., & Wei, X. (2020). Long-term outlook for global rare earth production. *Resources Policy*, 65(November 2019), 101569.

<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101569>

Watari, T., Nansai, K., & Nakajima, K. (2020). Review of critical metal dynamics to 2050 for 48 elements. *Resources, Conservation and Recycling*, 155(January), 104669.

<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104669>

Yu, S., Duan, H., & Cheng, J. (2021). An evaluation of the supply risk for China's strategic metallic mineral resources. *Resources Policy*, 70(September 2020), 101891.

<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101891>

Zuo, Z., Cheng, J., Guo, H., & Li, Y. (2021). Knowledge mapping of research on strategic mineral resource security: A visual analysis using CiteSpace. *Resources Policy*, 74(September), 102372. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102372>