

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA
METALÚRGICA



T E S I S

**Caracterización química y mineralógica de relaves en el diagnóstico de
tierras raras en Nexa Resources Sac - Milpo – 2022**

**Para optar el título profesional de:
Ingeniero Metalurgista**

Autor:

Bach. Teodosio Saul ALANIA PARDAVE

Asesor:

Mg. Yoni Edgar AIRE MENDOZA

Cerro de Pasco – Perú – 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA
METALÚRGICA



T E S I S

**Caracterización química y mineralógica de relaves en el diagnóstico de
tierras raras en Nexa Resources Sac - Milpo – 2022**

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Dr. Marco Antonio SURICHAQUI HIDALGO
PRESIDENTE

Dr. Ramiro SIUCE BONIFACIO
MIEMBRO

Mg. Manuel Antonio HUAMAN DE LA CRUZ
MIEMBRO



Universidad Nacional Daniel Alcides
Carrión Facultad de Ingeniería
Unidad de Investigación

INFORME DE ORIGINALIDAD N° 172-2023-UNDAC/UIFI

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

Tesis:

**CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MINERALÓGICA DE
RELAVES EN EL DIAGNÓSTICO DE TIERRAS RARAS EN
NEXA RESOURCES SAC - MILPO - 2022**

Apellidos y nombres de los tesistas:

Bach. ALANIA PARDAVE, Teodosio Saul

Apellidos y nombres del Asesor:

Mg. AIRE MENDOZA, Yoni Edgar

Escuela de Formación Profesional

Ingeniería Metalúrgica

Índice de Similitud

22 %

APROBADO

Se informa al decanato para los fines pertinentes:

Cerro de Pasco, 14 de diciembre del 2023


UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
Luis Villa Requís Carbajal
DOCTOR EN CIENCIAS - DIRECTOR

DEDICATORIA

Dedico a mis padres
quienes con el mayor cariño
y amor que profesan hacia sus hijos,
me forjó por el sendero del bien.

AGRADECIMIENTO

Mi gratitud a mi alma mater, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión; a toda la plana docente de la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Metalúrgica por sus enseñanzas en mi formación profesional. En especial al Mg. Yoni Edgar Aire Mendoza, asesor de la presente investigación, por su apoyo y aporte profesional en la presente investigación.

Al superintendente de la planta concentradora El Porvenir – empresa minera Nexa Resources SAC, ingeniero Fredy Tixe y trabajadores por darme la confianza y la oportunidad para realizar la presente investigación.

RESUMEN

El estudio tiene como objetivo realizar la caracterización química y mineralógica de relaves en el diagnóstico de tierras raras, el tipo de investigación es exploratoria y descriptiva, desarrollando consecuentemente el nivel explicativo; la población comprende el acopio de relave por 15 días, bajo el sistema de muestreo aleatorio, los instrumentos empleados para el acopio de los resultados de los experimentos fueron tablas prediseñadas para cada etapa, los resultados obtenidos son el reconocimiento microscópico a los minerales en estudio, que demuestra la presencia de galena, esfalerita, pirita, goetita, pirrotita, gangas mayormente; las pruebas ICP MS demuestran la presencia de elementos de tierras raras como son: Cerio (Ce), Disprosio (Dy), Erblio (Er), Europio (Eu), Gadolinio (Gd), Holmio (Ho), Lantano (La), Lutecio (Lu), Neodimio (Nd), Praseodimio (Pr), Samario (Sm), Terbio (Tb), Torio (Th), Tulio (Tm), Uranio (U), Ytrio (Y), Iterbio (Yb).

Palabras claves: Relaves, tierras raras, diagnóstico.

ABSTRACT

The study aims to carry out the chemical and mineralogical characterization of tailings in the diagnosis of rare earths, the type of research is exploratory and descriptive, consequently developing the explanatory level; the population includes the collection of tailings for 15 days, under the random sampling system, the instruments used to collect the result of the experiments used were predesigned tables for each stage, the results obtained are the microscopic recognition of the minerals under study, which demonstrates the presence of galena, sphalerite, pyrite, goethite, pyrrhotite, mostly gangues; ICP MS tests demonstrate the presence of rare earth elements such as: Cerium (Ce), Dysprosium (Dy), Erbium (Er), Europium (Eu), Gadolinium (Gd), Holmium (Ho), Lanthanum (La), Lutetium (Lu), Neodymium (Nd), Praseodymium (Pr), Samarium (Sm), Terbium (Tb), Thorium (Th), Thulium (Tm), Uranium (U), Yttrium (Y), Ytterbium (Yb).

Keywords: Tailings, rare earths, diagnosis.

INTRODUCCIÓN

La empresa minera Nexa Resources SAC viene operando hace más de medio siglo, resultado de sus operaciones tiene como pasivos ambientales un depósito de relaves con valores apreciables de plata, plomo y zinc, básicamente; a esto se suma otros elementos aún en proceso de investigación como son las tierras raras, que permite convertir en una importante fuente de reservas para posteriores procesos tecnológicos, extensión de la vida económica de la empresa entre otros, razón por la cual se está desarrollando una serie de experimentos preliminares, evaluando diversos factores para desarrollar procesos tecnológicos propios en el afán de obtener otros productos estratégicos, motivo del presente estudio.

La investigación se desarrolló del siguiente modo:

CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN, donde se ha considerado la descripción del problema, formulación del problema, los objetivos, variables, justificación e importancia de la investigación.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO, donde se ha considerado los antecedentes de la investigación, las bases teóricas de tierras raras y la definición de términos básicos.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN, se da a conocer las pautas a seguir para la obtención y tratamiento de datos descriptivos seguidos.

CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN DE RESULTADOS, se presenta en tablas y gráficos los resultados de las pruebas metalúrgicas, para luego contrastar con las investigaciones realizadas por diversos investigadores.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES, se han desarrollado principalmente las conclusiones del estudio de investigación y dar sugerencias para continuar investigaciones diversas.

ÍNDICE

Página.

DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
RESUMEN	
ABSTRACT	
INTRODUCCIÓN	
ÍNDICE	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.	Identificación y determinación del problema	1
1.2.	Delimitación de la investigación	2
1.2.1.	Delimitación espacial	2
1.2.2.	Delimitación temporal	2
1.2.3.	Delimitación conceptual	3
1.3.	Formulación del problema.....	3
1.3.1.	Problema general	3
1.3.2.	Problemas específicos	3
1.4.	Formulación de objetivos	3
1.4.1.	Objetivo general	3
1.4.2.	Objetivos específicos	3
1.5.	Justificación de la investigación	4
1.6.	Limitaciones de la investigación	4

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes de estudio	5
2.2.	Bases teóricas - científicas.....	7
2.3.	Definición de términos básicos	15

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1.	Tipo de investigación	17
3.2.	Nivel de investigación	17
3.3.	Métodos de investigación	17
3.4.	Diseño de investigación.....	18
3.5.	Población y muestra	18
	3.5.1. Población	18
	3.5.2. Muestra	18
3.6.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	19
3.7.	Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación.....	19
3.8.	Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	20
3.9.	Tratamiento estadístico.....	24
3.10.	Orientación ética filosófica y epistémica	24

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Descripción del trabajo de campo	25
4.2.	Presentación, análisis e interpretación de resultados.....	26
4.3.	Discusión de resultados	31

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

	Página.
Tabla 1. Grupo de elementos de tierras raras	8
Tabla 2 Clasificación de las tierras raras según peso atómico	9
Tabla 3 Principales minerales.....	10
Tabla 4 Producción mundial de tierras raras	12
Tabla 5.Principales usos de las tierras raras	14
Tabla 6. Desgaste de briquetas con abrasivos	22
Tabla 7. Pulido de las briquetas.....	23
Tabla 8. Composición mineralógica del relave	27
Tabla 9. Distribución granulométrica y grados de liberación	27
Tabla 10. Análisis multielemental de tierras raras en relaves de Nexa Resources.....	30

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página.
Figura 1. Concentración de elementos en la corteza terrestre a escala logarítmica	8
Figura 2. Pesaje de resina	21
Figura 3. Vaciado y secado de muestra	21
Figura 4. Desgaste de la muestra	22
Figura 5. Paños para el pulido	23
Figura 6. Sondaje manual en el depósito de relaves	26
Figura 7 Reconocimiento microscópico del relave 1	28
Figura 8. Reconocimiento microscópico del relave 2	28
Figura 9. Reconocimiento microscópico del relave 3	29
Figura 10. Espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente.....	30
Figura 11. Contenido total de tierras raras en relave.....	31

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

Los elementos de tierras raras (ETR) comprenden un grupo de elementos químicos de la serie de los lantánidos, integrado por las tierras raras ligeras (ETRL: La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm y Eu) y las tierras raras pesadas (ETRP: Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, y Lu). Estos elementos tienen radios iónicos y comportamientos químicos semejantes.

Las pruebas de tierras raras sólo se han considerado esporádicamente en los depósitos, y hay pocos precedentes sobre la presencia y el potencial minero de estos elementos. En el país, aún se desconoce la existencia de yacimientos de tierras raras, pero dada la demanda mundial, existe cierta inquietud por su investigación. El valor por kilogramo de ETR varía desde decenas de miles de dólares hasta miles de dólares, y China es el país que domina el mercado. Esta

extracción es poco convencional, muy valiosa y extremadamente dañina para el medio ambiente.

En el Perú, por desconocimiento del máximo aprovechamiento de los minerales existentes en los yacimientos, solo se extrae los metales comunes y se exporta en forma de concentrados; y en los costos no se considera los otros elementos que acompañan, los cuales son separados en los procesos complementarios en los países de destino, obteniendo un ingreso económico adicional.

En el yacimiento minero de Milpo, existe una apreciable cantidad de relaves producto de más de 50 años de concentración de los minerales de plomo y zinc, que requiere analizar y determinar si todavía es una materia prima para continuar con otros procesos metalúrgicos y generar tecnología, empleos y economía.

De continuar como relave depositado, solo será un pasivo ambiental que requiere el tratamiento posterior para evitar los posibles daños ambientales.

Realizando el diagnóstico de los posibles elementos existentes, entre ellos la existencia de tierras raras, nos encontraríamos ante la posibilidad de desarrollar nuevos procesos tecnológicos.

1.2. Delimitación de la investigación

1.2.1. Delimitación espacial

El trabajo de investigación se realizó en la zona de relave existente ubicado al pie de la planta concentradora El Porvenir, Milpo, donde se encuentra la mayor concentración de relaves, escenario que otorga las características mineralógicas del yacimiento.

1.2.2. Delimitación temporal

Abarcó diez meses; fecha de inicio: marzo del 2022 y fecha de término de la investigación: diciembre del 2022.

1.2.3. Delimitación conceptual

De los diferentes conceptos que abarcó la presente investigación se centra en:

- Caracterización química y mineralógica; otorgado por los procesos físico químico que permite reconocer que elementos contienen los minerales y/o residuos de procesos de concentración y la asociación iónica existente entre ellos.
- Diagnóstico de tierras raras, técnicas químicas que permite reconocer la presencia de estos elementos, cuantificándolos y reconociendo su asociación.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿Cómo desarrollar la caracterización química y mineralógica de relaves en el diagnóstico de tierras raras en Nexa Resources SAC – Milpo – 2022?

1.3.2. Problemas específicos

- a. ¿Cuál es la caracterización química de relaves en el diagnóstico de tierras raras en Nexa Resources SAC – Milpo – 2022?
- b. ¿Cuál es la caracterización mineralógica de relaves en el diagnóstico de tierras raras en Nexa Resources SAC – Milpo – 2022?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo de caracterización química y mineralógica de relaves en el diagnóstico de tierras raras en Nexa Resources SAC – Milpo – 2022.

1.4.2. Objetivos específicos

- a. Determinar y desarrollar el modelo de caracterización química de relaves en el diagnóstico de tierras raras en Nexa Resources SAC – Milpo – 2022.
- b. Determinar y desarrollar el modelo de caracterización mineralógica de relaves en el diagnóstico de tierras raras en Nexa Resources SAC – Milpo – 2022.

1.5. Justificación de la investigación

El presente trabajo de investigación se justifica porque no existe procesos de tecnología abierta difundida que permitan aplicar al reconocimiento de tierras raras, y desarrollar un proceso tecnológico es una aspiración del presente proyecto; además se pretende demostrar la posible existencia de tierras raras en los relaves almacenados al contorno de la planta concentradora de la empresa antes mencionada.

1.6. Limitaciones de la investigación

El factor económico es una limitante para desarrollar el trabajo de investigación con mayores evidencias, sin embargo, la necesidad de obtener alternativas de solución a un déficit de tecnología en el reconocimiento de tierras raras, motiva el desarrollo de la investigación.

La mayor limitación a pesar de la rigurosa búsqueda en la nube electrónica, es la falta de trabajos de tesis con variables y dimensiones similares actualizados; de manera que, para la discusión de resultados, se utilizará algunas tesis con publicación mayor a cinco años de antigüedad. A esto se suma la nula información estadística proveniente de las instituciones del estado en reconocimiento, menos producción y comercialización de tierras raras, representando un inconveniente para utilizarlo como referencia.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

Detrás de esto está el trabajo de investigación que procede a este proyecto de tesis, el cual está estrechamente relacionado con el propósito del estudio en cuestión, obtenido de fuentes como libros, artículos, revistas y publicaciones científicas. Cosas que deben escribirse en tiempo presente.

En este aspecto entra en juego la capacidad investigadora. Aquí se condensa todo lo que se ha escrito e investigado sobre el problema de investigación y lo relacionado con los antecedentes del problema. Son estudios realizados sobre una pregunta de investigación y pueden ampliar o continuar el tema de investigación. (Calderón Saldaña, Alzamora de los Godos Urcia, & del Águila Horna, 2009, págs. 7-8).

Antecedentes a nivel internacional

Miranda (2018), en su tesis “*Estudio de separación de tierras raras en medio sulfato mediante SX desde concentrados producidos por Minera Bio Lantánidos*”, Universidad de Concepción – Chile; el objetivo principal del estudio fue la investigación y evaluación del extractante Cyanex 572 para la separación de elementos de tierras raras contenidas en el PLS generado por la lixiviación del concentrado de tierras raras de la empresa Minera Bio Lantánidos.

Concluye:

- Las principales impurezas en el PLS del concentrado impuro fueron el Al con 2.800 ppm, Fe con 1.200 ppm y Ca con 2.800 ppm. Para el PLS del concentrado puro se obtienen 260 ppm de Al y 370 ppm de Fe y 3.000 ppm de Ca. La razón de una mayor concentración de calcio en el concentrado puro se sustenta en la cal utilizada para precipitación de impurezas, previo a la obtención del concentrado purificado en la empresa Bio Lantánidos. El resto de impurezas se encuentran con el mismo orden de magnitud en ambos PLS.
- Las principales impurezas en el PLS del concentrado impuro fueron 2800 ppm de Al, 1200 ppm de Fe y 2800 ppm de Ca. PLS de concentrado puro produce 260 ppm de Al, 370 ppm de Fe y 3000 ppm de Ca. La razón de la mayor concentración de calcio en el concentrado puro es la cal utilizada anteriormente para precipitar las impurezas. Empresa que adquiere concentrados purificados con Bio-Lantánidos. Las impurezas restantes son de la misma magnitud en ambos PLS.
- El extractante Cyanex 572 extrae más elementos como Tm, Yb y Lu en comparación con otros elementos probados.

- Elementos como La, Ce, Pr, Nd, Sm y Eu muestran un desajuste entre las etapas de extracción y re extracción. Probablemente esto se deba a errores relacionados con la complejidad de los análisis de la química de tierras raras.

Vernis (2013), en su tesis “Tierras raras componentes esenciales de tecnologías verdes, modelos de gestión de procesos de beneficio y concentración de mineral”, Instituto Politécnico Nacional de México; tiene como objetivo principal: desarrollar un modelo de gestión de procesos de beneficio de concentración mineral de tierras raras de tecnologías verdes.

Concluye:

- Se ha confirmado el potencial de las tierras raras como elementos esenciales para las tecnologías verdes en el sector energético, y los elementos Nd, Eu, Th, Dy, Y son importantes para las tecnologías verdes en el sector energético, entre ellos: imanes permanentes, convertidores catalíticos, baterías y luces fluorescentes.
- Se ha estudiado el mercado de tierras raras y se ha llegado a la conclusión de que invertir en proyectos pesados de tierras raras presenta el menor riesgo. Esto se debe a que generalmente es menos probable que existan tierras raras pesadas en la corteza terrestre y están bajo mayor presión que en la corteza terrestre. Este es el caso de las tierras raras ligeras.

2.2. Bases teóricas - científicas

Tierras raras

Los elementos metálicos, conocidos colectivamente como elementos de tierras raras (RET), son un grupo de 17 elementos químicos de la tabla periódica, 15 de los cuales pertenecen a la familia de los lantánidos (del lantano al lutecio), junto con el itrio (Y) y el escandio (Sc) Como se muestra en la Tabla 1.

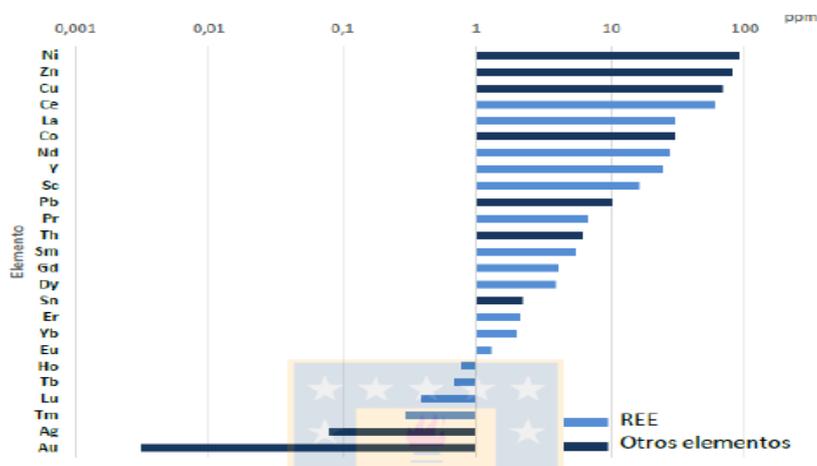
Tabla 1. Grupo de elementos de tierras raras

Lantánidos			
Lantano	La	Gadolinio	Gd
Neodimio	Nd	Holmio	Ho
Europio	Eu	Iterbio	Yb
Disproσιο	Dy	Praseodimio	Pr
Tulio	Tm	Samarario	Sm
Cerio	Ce	Terbio	Tb
Prometio	Pm	Erbio	Er
		Lutecio	Lu
Otros			
Escandio	Sc	Ytrio	Y

Fuente: Miranda (2018)

A pesar del nombre de "tierras raras", no son elementos raros que se encuentran en la corteza terrestre en comparación con otros metales. Por ejemplo, el cerio (Ce), el lantano (La) y el neodimio (Nd) son más abundantes que el plomo (Pb) en la corteza terrestre y en todas las tierras raras. Con excepción del prometio (Pm) que es el elemento más escaso del grupo, son más abundantes que cualquiera de los metales preciosos (Au, Ag, Rh, Pd y Pt) o el mercurio (Hg) (Ver Figura 2). Además, los metales de tierras raras con números atómicos pares son hasta siete veces más comunes en la corteza terrestre que aquellos con números atómicos impares. [8]. En la Figura 2 se presentan las concentraciones de estos elementos en la corteza terrestre (Miranda, 2018, p. 7).

Figura 1. Concentración de elementos en la corteza terrestre a escala logarítmica



Fuente: Cochilco (2016)

Tierras raras livianas y pesadas

En general, los lantánidos con números atómicos más bajos son más comunes que los lantánidos con números atómicos más altos. Como resultado, las tierras raras se dividen en dos grupos relativamente comunes; tierras raras ligeras y tierras raras.

El itrio (Y) a pesar de tener un número atómico menor que las tierras raras livianas, es considerado del grupo de las tierras raras pesadas por sus similitudes en las propiedades físico-químicas y por tender a presentarse junto a ellas en la naturaleza (Miranda, 2018, p. 8).

Con base en las investigaciones en curso sobre el tema, se cree que existe un grupo intermedio formado por samario, europio, gadolinio y terbio, denominados "tierras raras intermedias". Elementos como el neodimio (Nd), el erbio (Er), el terbio (Tb), el disprosio (Dy) y el itrio (Y) se consideran importantes en términos de riesgo de suministro e importancia para el desarrollo de energías limpias. En la Tabla 2 se muestra la clasificación de las tierras raras (Miranda, 2018, p. 9).

Tabla 2 Clasificación de las tierras raras según peso atómico

Livianas		Pesadas		Otros
Livianas	intermedias	Pesadas		
La; Ce; Pr; Nd; Sc	Sm; Eu; Gd	Tb; Dy; Ho; Er; Tm; Yb; Lu; Y		Pm

Fuente: Miranda (2018)

En términos de propiedades, los elementos de tierras raras tienen propiedades físicas y químicas similares y, por lo tanto, se encuentran juntos en la naturaleza. Todos ellos, excepto Ce⁺⁴ y Eu⁺², son iones trivalentes (estado de oxidación +3) y tienen radios iónicos similares. Esta similitud permite la intercambiabilidad de elementos de tierras raras dentro de diferentes redes

cristalinas, razón por la cual algunos elementos de este grupo se encuentran dentro del mismo mineral. Este conjunto de elementos químicos tiene propiedades magnéticas, ópticas, conductivas, específicas que los hacen únicos, y por lo mismo tan requeridos por la industria contemporánea (Miranda, 2018, p. 9).

Minerales que contienen tierras raras

Las tierras raras se encuentran en altas concentraciones en varios minerales. Los más importantes para uso económico se enumeran en la Tabla 3 a continuación.

Tabla 3 Principales minerales

Grupo	Mineral	Fórmula química
Carbonatos	Bastnasita	$(Ce, La)(CO_3)F$
	Parisita	$Ca(Ce, La)_2(CO_3)_3F_2$
	Cebaita	$Ba_3(Ce, Nd)_2(CO_3)_5F_2$
	Huanghoita	$Ba(Ce, La, Nb)(CO_3)_2F$
Fosfatos	Monacita	$(Ce, La, Nd, Th)PO_4$
	Xenotima	YPO_4
	Apatito	$Ca_5(PO_4)_3(F, Cl, OH)$
Silicatos	Cerita	$(Ce, Ca)_9(Mg, Fe)(SiO_4)_3(HSiO_4)_4(OH)_3$
	Gadolinita	$(Ce, La, Nd, Y)_2FeBe_2(OSiO_4)_2$
	Allanita	$(Ca, Ln)_2(Al, Fe)_3(SiO_4)_3(OH)$
Óxidos	Euxenita	$(Ln, Ca, U, Th)(Nb, Ta, Ti)_2O_6$
	Loparita	$(Na, Ce, Ca, Sr, Th)(Ti, Nb, Fe)O_3$

Fuente: Miranda (2018)

Aunque los metales de tierras raras están presentes en cantidades significativas, rara vez se encuentran en concentraciones que puedan extraerse de forma económica. Los minerales de tierras raras tienden a estar menos concentrados en depósitos explotables, por lo que la mayoría de los suministros mundiales provienen de unas pocas fuentes.

El itrio se encuentra típicamente en concentraciones económicas con los lantánidos, mientras que el escandio es químicamente similar a los lantánidos y se encuentra comúnmente en depósitos de tierras raras, aunque se encuentra en concentraciones económicas en condiciones geológicas diferentes a las de los depósitos de tierras raras. Itrio y lantánidos.

En cuanto a la clasificación de los yacimientos minerales, considerando la frecuencia de diversificación entre los elementos de interés y los antecedentes geológicos de cada ubicación, su clasificación se vuelve muy difícil, además, múltiples categorías dentro de una misma categoría. Hay que entender que aparecen innumerables yacimientos minerales que son compatibles con el. Los yacimientos más importantes explorados en los últimos años se encuentran en China, además de Rusia, Australia, Estados Unidos y Kazajstán. Por tanto, es posible desarrollar investigaciones sobre tierras raras desde la perspectiva de las siguientes clasificaciones de depósitos minerales: Rocas ígneas alcalinas, carbonatitas, óxidos de hierro - tierras raras, pegmatitas graníticas, depósitos residuales, arcillas iónicas, placeres de minerales pesados o paleo tierras. Placeres y depósitos venosos (carbonatos y/o fosfatos).

Mercado de tierras raras

Según un informe de la Comisión Europea, desde 1900, el mundo ha producido una media de 2.000 toneladas de óxidos de tierras raras (REE) al año. Sin embargo, desde 1966 ha registrado un aumento significativo de más de 10.000 toneladas, lo que se puede observar en el gráfico 2. Desde entonces, la producción mundial ha aumentado una media del 4,2% anual desde 2012 (110.000 toneladas). En los últimos seis años, la producción de tierras raras oxidadas ha oscilado entre 110.000 y 130.000 toneladas. En este sentido, las propiedades únicas de los elementos conducen esencialmente a una industria de alta tecnología y, en particular, al uso de las llamadas energías limpias, un factor clave que llevó a

China a concentrar su producción en 2016 en el 85% de la producción mundial. Además, desde 2010, la Unión Europea se ha consolidado como "crítica"; para LREE y HREE en términos de oferta e importancia económica para garantizar la estabilidad, el crecimiento y la aplicación continua de este campo en la industria del siglo XXI y el mundo actual.

En el sector energético, el neodimio, el praseodimio y el disprosio se utilizan para producir baterías recargables para coches híbridos/eléctricos y turbinas eólicas. El cerio y el lantano se utilizan en catalizadores y catalizadores de craqueo líquido. En alta tecnología, elementos como el europio y el itrio se utilizan en pantallas planas, láseres, radares y sistemas de guía de armas. A diferencia de los metales comunes, los lantánidos encuentran constantemente nuevas aplicaciones debido a sus propiedades únicas.

Las proyecciones para 2020 apuntan a un exceso de oferta de tierras raras ligeras y la consiguiente escasez de tierras raras pesadas. El siguiente diagrama muestra esta proyección (Miranda, 2018, p. 13).

Tabla 4 Producción mundial de tierras raras

País	Producción minera		Reservas
	2017	2018	
China	105 000	120 000	44 000 000
Australia	19 000	20 000	3 400 000
Estados Unidos	No Precisa	15 000	1 400 000
Burma	No Precisa	5 000	No precisa
Rusia	2 600	2 600	12 000 000
India	1 800	1 800	6 900 000
Tailandia	1 300	1 000	No precisa
Burundi	No Precisa	1 000	No precisa
Brasil	1 700	1 000	22 000 000
Vietnam	200	400	22 000 000
Otros países	No Precisa	No precisa	4 400 000
TOTAL	132 000	170 000	120 000 000

Fuente: Servicio geográfico de USA (2019)

Tratamiento de concentrados de tierras raras

“Los procesos de extracción de tierras raras incluyen la descomposición de este tipo de mineral y la subsiguiente lixiviación como tratamiento a los elementos de interés, además de su posterior separación en forma selectiva de la solución. La naturaleza de la extracción depende del tipo de mineral en el concentrado, la calidad asociada y el objetivo de tratamiento como proceso.

En cuanto a las características de los procesos de extracción, se debe mencionar que existen varias rutas de procesamiento para diferentes minerales de tierras raras, es decir, no existe una ruta de diagrama absoluto para proyectar un estudio análogo o aproximable; existen opciones de procesamiento tales como el tratamiento vía ácida de minerales de bastanita y la vía ácida y alcalina para minerales tales como la monacita y xenotima.

La separación de los elementos valiosos está enlazada con los procesos hidrometalúrgicos estudiados, en donde el tratamiento químico (como etapa intermedia) puede ser acompañado por etapas pirometalúrgicas dentro del sistema hidrometalúrgico. Esto revela entonces, la extrema complejidad y relatividad existente cuando se implementa una operación productiva de tierras raras” (Miranda, 2018, p. 14).

Dado que la disolución de óxidos de tierras raras en presencia de ácido sulfúrico no ha sido reportada previamente, se propone describir en detalle las propiedades de disolución de los óxidos y presentar una reacción global que impulse el proceso de extracción antes mencionado.

Los compuestos tales como: Ce_2O_3 , Dy_2O_3 , Er_2O_3 , Eu_2O_3 , Gd_2O_3 , Ho_2O_3 y Tm_2O_3 son solubles en ácido. Ahora bien, La_2O_3 , Nd_2O_3 , Yb_2O_3 y Y_2O_3 son

solubles en ácido diluido y óxidos de Lu, Pr, Sm y Tb no tienen antecedentes de solubilidad.

La reacción global se muestra a continuación.



Aplicaciones de las tierras raras

Los principales usos de los metales de tierras raras son catalizadores para automóviles, refinación de petróleo, fósforos para televisores en color y tabletas (teléfonos móviles y portátiles), imanes permanentes (que contienen varios componentes de neodimio, gadolinio, disprosio y terbio), electricidad, electrónica y generadores eólicos. turbinas), baterías recargables, vehículos híbridos y eléctricos y numerosos dispositivos médicos y sin olvidar que existen importantes aplicaciones en el ámbito militar como aviones de combate, sistemas de misiles guiados, defensa antimisiles y satélites espaciales y sistemas de comunicación.

Tabla 5. Principales usos de las tierras raras

Tierras raras ligeras		Principales usos
Escandio		Luces de estadios deportivos
Lantano		Motores híbridos, baterías híbridas y aleaciones metálicas
Cerio		Catalizadores de automóviles, refinерías de petróleo, aleaciones metálicas, motores híbridos y baterías híbridas
Praseodimio		Baterías híbridas, imanes, motores híbridos, discos duros de computadora, teléfonos móviles, cámaras, reflectores, piezas de aviones.
Prometio		Unidades portátiles de rayos X
Neodimio		Catalizadores de automóviles, discos duros de computadoras y laptops, refinерías de petróleo, teléfonos móviles, auriculares, cámaras, motores híbridos, baterías híbridas, imanes de alta fuerza.
Samario		Imanes
Europio		Color rojo para pantallas de televisión, de computadora y fibra óptica
Tierras raras pesadas		Principales usos
Gadolinio		Imanes

Disproσιο	Imanes permanentes, motores híbridos, baterías híbridas, discos duros de ordenador, teléfonos móviles y cámaras
Terbio	Fósforos, imanes permanentes, discos duros de computadora, teléfonos móviles y cámaras
Erbio	Fósforos
Itrio	Color rojo, lámparas fluorescentes, cerámica, aleaciones metálicas, fibra óptica
Holmio	Coloración de vidrio, láser
Tulio	Instrumentos médicos como rayos X
Lutecio	Catalizadores en la refinación de petróleo
Yterbio	Láser y aleaciones de acero

Fuente: Elaboración propia (Fuente: Steven M. Franks, Rare Earth Minerals. Policies and Issues, Nova Science Publishers, Nueva York, 2011)

2.3. Definición de términos básicos

Tierras raras: son los elementos del bloque ‘f’ de la tabla periódica, además del Ytrio y el Escandio, con radios iónicos muy parecidos y comportamientos físico-químicos muy semejantes que hacen muy difícil la separación entre ellos. Son muy buenos conductores de electricidad y destacan por sus propiedades magnéticas, pudiendo ‘personalizar’ su magnetismo mediante la variación de sus aleaciones con el fin de crear imanes con comportamientos específicos según su uso final. Son elementos críticos porque son únicos e insustituibles, siendo vulnerables a las restricciones de suministro y su uso esencial.

Diagnóstico: Reconocimiento de los materiales a través de ciertas técnicas preestablecidas y utilizando ciertos insumos que permiten otorgarle alguna cualidad medible.

Reconocimiento químico: Técnicas que permiten identificar y diferenciar la presencia de elementos o asociaciones químicas a través de ciertas observaciones visuales como puede ser: cambio de color, desprendimiento de gases, precipitación o cambio de temperatura.

Reconocimiento mineralógico: Técnicas físicas preestablecidas para el reconocimiento de los minerales, su asociación y sugiere los siguientes tratamientos posteriores a seguir para su concentración y aprovechamiento.

Concentración química: Denominado también lixiviación, que es la disolución de un elemento valioso a partir de los minerales con un reactivo previamente seleccionado en un medio acuoso.

Extracción por solventes: Se realiza con tecnologías de extracción por solventes específicos para cada elemento o para cada conjunto de elementos puestos en solución en la etapa anterior.

Fuera de China en muy pocos lugares del mundo existen plantas de separación de tierras raras individuales, y dentro de Europa solo la planta de la Rochelle, en Francia, perteneciente a la empresa Solvay tiene capacidad para separar HREE.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

La tesis es de tipo descriptivo; se pretende analizar a través del análisis y reconocimiento de los relaves la existencia de tierras raras; probar las hipótesis de este estudio. Este trabajo corresponde a la denominada *Caracterización química y mineralógica*, que consiste en el estudio sobre el reconocimiento de los minerales que contienen las denominadas tierras raras, para demostrar la existencia o no de estos elementos. (Vera *et al*, 2018, pág. 14).

3.2. Nivel de investigación

Debido a la colección de datos y organización de la información de la presente investigación, es explicativo. (Selltiz *et al*, 2017, pág. 68).

3.3. Métodos de investigación

La presente investigación tiene como finalidad, comprender la naturaleza de los hechos, explicar la génesis o la presencia de tierras raras, y para ello se

parte de dos premisas; una universal (leyes y teorías científicas) y otra experimental (que sería la observación de los resultados y motiva la indagación), para llevarla a una contrastación empírica.

El método de investigación, es el hipotético-deductivo, porque se inicia de premisas generales para llegar a una conclusión particular, que son la hipótesis a falsar para contrastar su veracidad, en caso de que fuera no solo permite el incremento de la teoría de la que partió (generando así un avance cíclico en el conocimiento), sino también el planteamiento de soluciones a problemas tanto de corte teórico o práctico (llamado también pragmático, aplicativo o tecnológico), en tanto no, podría impulsar su reformulación hasta agotar los intentos para hacerla veraz, o abandonarla y replantearla sobre la base de otros preceptos teóricos que indiquen una alternativa a la anterior (Sánchez, 2018, pág. 108).

3.4. Diseño de investigación

Asimismo, la tesis se caracteriza por tener el diseño experimental, donde el método hipotético tiene como propósito medir o especificar las propiedades, dimensiones o características de las variables a estudiar, y deduce o intenta medir el grado de asociación existente entre las variables en un contexto particular, para luego analizar la manera cómo interactúan entre sí (Hernández *et al.*, 2015, pág. 158).

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

La población es un conjunto de individuos que comparten por lo menos una característica común y en nuestro caso la población está conformado por el relave depositado en la zona destinada para tal fin, hace más de 50 años.

3.5.2. Muestra

Se realizó un muestreo aleatorio simple para determinar una muestra representativa, donde cada muestra tiene una probabilidad de inclusión igual y conocida n/N (n : muestra, N : población) y que representa a una calicata realizada para obtener una muestra; cabe recalcar que los trabajos de muestreo se realizaron en el borde de la relavera y en la zona compactada, tomando muestras con el muestreador en espiral.

De toda la muestra obtenida se procedió a realizar la homogenización a través de sucesivas etapas de cono y cuarteado, para obtener la muestra representativa final que asciende a 30 kilos aproximadamente, con los cuales se realizó todo el trabajo de investigación.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la recolección de datos se realizó las siguientes actividades:

- Elaboración de planos de muestreo.
- Análisis mineralógico.
- Análisis químico de las muestras obtenidas.
 - Técnicas de recolección de muestras

La técnica a emplear para la obtención de la muestra representativa se realizó a través del cono y cuarteado para posteriormente determinar el contenido de elementos vía ICP.

- Instrumentos de recolección de datos

Los instrumentos de recolección de datos son las tablas preestablecidas.

3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación

En cuanto a la selección, validez y confiabilidad de los instrumentos de investigación, se desarrolló teniendo en cuenta tres factores:

- a) Verificando el acopio de muestra y procesamiento del mismo, en calidad y cantidad; del mismo modo la calidad de los equipos instalados.
- b) Intervención del ser humano; analizando su experiencia y dificultades.
- c) Revisando los antecedentes bibliográficos y usos de los equipos requeridos para la experimentación.

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

- **Recolección de muestra**

Para recolectar una muestra representativa, se obtuvo mediante un sistema de cono y cuarto., trabajos realizados por el personal de la empresa por razones de seguridad y evitar problemas sociales.

- **Liberación del mineral**

Por ser un material, procesado el grado de molienda media es el 65% malla - 200, y para la presente investigación no requiere mayor liberación. El análisis se presenta en los resultados.

- **Análisis cuantitativo**

Para llevar a cabo el análisis químico por elementos de tierras raras, se encargó al laboratorio ALS mineral (Lima – Perú) mediante el método de espectroscopia de masas ICP-MS.

- **Reconocimiento mineralógico**

- ✓ **Preparación de briquetas**

Se pesaron muestras de aproximadamente 10 g de muestra (relave), también 14 gramos de resina epóxica, 2 gramos de endurecedor por muestra.

Figura 2. Pesaje de resina



Fuente: Elaboración propia

El relave previamente pulverizado y homogenizado en tamaños, se depositó en moldes de 30 mm de diámetro estandarizado, luego se vierte la resina más el endurecedor, con el mayor cuidado para evitar las reacciones exotérmicas propias al mezclar (resina + endurecedor).

Figura 3. Vaciado y secado de muestra



Fuente: Elaboración propia

- ✓ Lapeado o desgastado

La muestra se molió sobre la superficie del vidrio con arena de carburo de silicio. agua como lubricante en el siguiente orden:

Tabla 6. Desgaste de briquetas con abrasivos

Abrasivo (SiC) Malla (micras)	Cantidad (g)	Tiempo (min)	Lado
200	15	10	Cara - reverso
400	10	10	Cara
600	7	5	Cara - reverso
1000	3	5	Cara

Fuente: Elaboración propia

Figura 4. Desgaste de la muestra



Fuente: Elaboración propia

✓ Pulido preliminar, intermedio y fino

Primer pulido; esto se hizo con una mezcla 1:1 de mezclilla-alúmina y agua durante 3-5 minutos.

Segundo pulido; esto se realizó con una pulidora semiautomática Labopol-6 Struer con paños a juego, aceite lubricante orgánico.

Los tejidos utilizados para el pulido eran adecuados: p.e. Cerda autoadhesiva o magnética de baja elasticidad con buena retención de suspensión de diamante, prácticas desarrolladas en los laboratorios de San Marcos según la siguiente tabla.

Tabla 7. Pulido de las briquetas

Suspensión de diamantes (micrones)	Tiempo (min)	Velocidad (RPM)	Presión (Newton)
6 a 10	3 a 8	400 - 600	30 a 40
3 a 6	3 a 4	300	20
1 a 1.4	1	100 - 150	10

Fuente: Extraído del manual de adhesivos (2016).

Figura 5. Paños para el pulido



Fuente: Elaboración propia

Se pretende que las briquetas cumplan las siguientes características

- La briqueta no presente micro porosidad.
- La briqueta no presente rayaduras.
- La briqueta debe tener una superficie totalmente plana por ambos lados.

Con la briqueta preparada colocada frente al microscopio se obtuvo información sobre la mineralogía, generación, cantidad de liberación, número de granos y composición de la muestra; explotar las propiedades ópticas como el color, el hábito, el pleocroísmo, la

macla y la reflexión que exhiben los minerales cuando se exponen a la luz polarizada.

✓ Reconocimiento microscópico

Para la identificación microscópica se utilizó un microscopio polarizador de luz reflejada Leitz Ortholux II del Laboratorio de Microscopía Óptica de la Escuela de Ingeniería Geológica de la UNMSM.

3.9. Tratamiento estadístico

Utilizando el software EXCEL se organizó los datos obtenidos en tablas y gráficos; los ensayos químicos, análisis granulométrico y conclusiones del reconocimiento mineralógico de los relaves.

3.10. Orientación ética filosófica y epistémica

La ética es una ciencia que tiene como objetivo estudiar la moral de los científicos y el comportamiento humano.

La aceptación o el rechazo se basa en la aceptabilidad ética del estudio, incluido su valor tecnológico y validez científica, la relación aceptable entre beneficios potenciales y riesgos adversos, minimización de riesgos, procedimientos apropiados de consentimiento informado (incluido el ajuste cultural y los mecanismos de garantía de la investigación), modificables. procedimientos de selección y consideración del impacto del estudio sobre el material estudiado y su futuro tecnológico, económico y medioambiental.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo

El concentrado es una mezcla de material no compactado, muros de contención (si es necesario) y agua limpia (según el tipo y si están activas), material producido por el proceso de flotación. Este residuo debe ser depositado en forma segura y ambientalmente responsable, en conformidad a las normativas legales vigentes.

Para perforar este tipo de yacimientos y obtener datos y muestras representativas, a continuación, se detallan los principales métodos de perforación utilizados para lograr estos objetivos:

- a. Sondaje de Percusión
- b. Sondaje de Aire Reverso
- c. Sondaje de Diamantina
- d. Sondaje Manual
- e. Sondaje Sónico

- f. Sondaje CPT-FRX
- g. Sondaje con Barreno

Cuando se realiza el muestreo sistemático, considerar que las velocidades de perforación dependen del tipo de roca, granulometría, nivel de compactación, altura del relave, presencia de agua, etc.

La colección de muestras, la empresa Nexa Resources, desarrolló la técnica del sondaje manual, en puntos regularmente espaciados que van de 2,00 a 3,00 metros, por las siguientes ventajas:

- ✓ Acceso a los depósitos y fácil transporte
- ✓ Presenta un menor costo en comparación al resto de los sondajes
- ✓ Necesita poco personal
- ✓ Técnica poco invasiva con el medioambiente.

Figura 6. Sondaje manual en el depósito de relaves



Fuente: Elaboración propia

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

La caracterización mineralógica permitió observar todos los minerales que componen las muestras de investigación.

Determinación de la composición mineralógica

La siguiente tabla muestra los minerales que fueron observados y no fueron incluidos en el análisis modal de las muestras residuales de Milpo.

Tabla 8. Composición mineralógica del relave

Minerales	Fórmula	Abreviatura	Relave Nexa Resources
Calcopirita	CuFeS ₂	Cp	X
Esfalerita	ZnS	Ef	X
Galena	PbS	Gn	X
Goetita	α -FeO(OH)	Gt	X
Magnetita	Fe ₃ O ₄	Mt	X
Marcasita	FeS ₂	Ms	X
Pirita	FeS ₂	Py	X
Pirrotita	Fe _{1-x} S	Po	X
Tetraedrita	(Cu,Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃	tn	X
Gangas		GGs	X

Fuente: Elaboración propia.

Distribución volumétrica y grado de liberación

Las distribuciones volumétricas se reportan en porcentajes, al igual que los grados de liberación; los cuales se observa en la tabla siguiente.

Tabla 9. Distribución granulométrica y grados de liberación

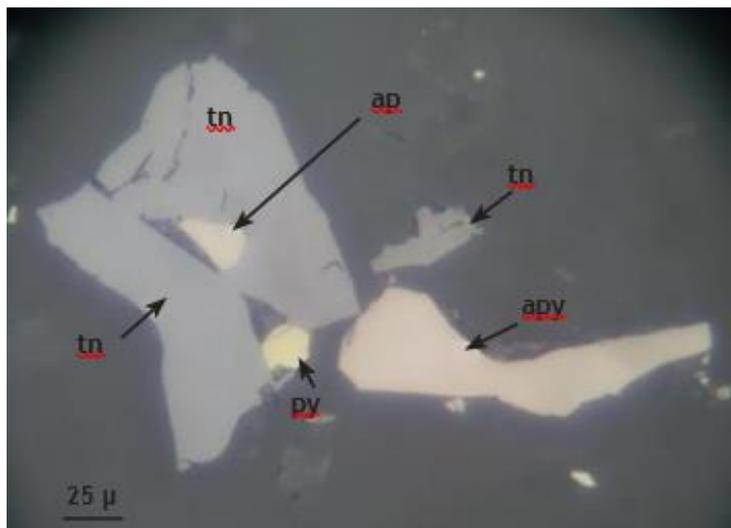
Minerales	Volumen (%)	Grado de liberación
Calcopirita	0,59	0,59
Esfalerita	12,06	12,06
Galena	1,82	1,82
Goetita	0,07	0,07
Magnetita	1,39	1,39
Marcasita	0,14	0,14
Pirita	25,65	25,65
Pirrotita	0,38	0,38
Tetraedrita	0,15	0,15
Gangas	57,81	57,81

Fuente: Elaboración propia.

Reconocimiento microscópico

A continuación, se muestran los trabajos desarrollados en los laboratorios de microscopía de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, donde se puede observar a las micrografías tomadas durante el estudio, siendo pruebas fehacientes de las observaciones.

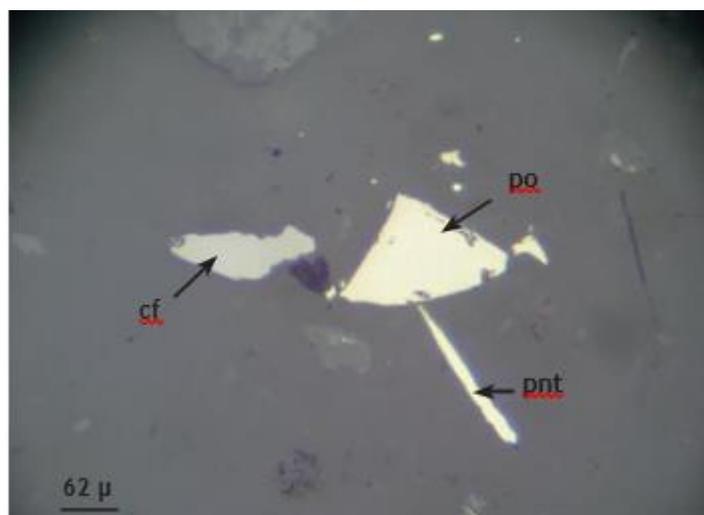
Figura 7 Reconocimiento microscópico del relave 1



Fuente: Gagliuffi (2022)

Comentario: Se observa partículas libres de arsenopirita (apy) y partículas entrelazadas de tenantita (tn), arsenopirita y pirita (py) cuando se utiliza nícoles paralelos. Magnificación: 500X.

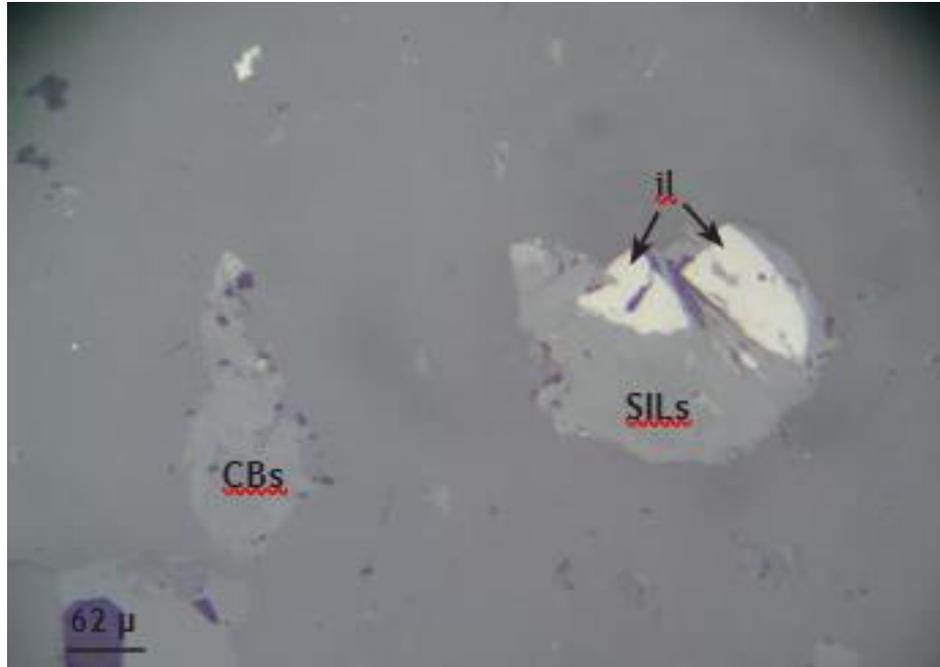
Figura 8. Reconocimiento microscópico del relave 2



Fuente: Gagliuffi (2022)

Comentario: Partículas libres de esfalerita (ef) y partículas entrelazadas de pirrotita (po) y pentlandita (pnt) en nicoles paralelos. Magnificación: 200X

Figura 9. Reconocimiento microscópico del relave 3



Fuente: Gagliuffi (2022)

Comentario: Se observa partículas entrelazadas de gangas (SILs) e Ilmenita (Il) y cobres grises (CBs). Magnificación: 200X.

Análisis cualitativo y cuantitativo de elementos

“La Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS) es altamente sensible y capaz de determinar en forma cuantitativa casi todos los elementos presentes en la tabla periódica. Se basa en el acoplamiento de un método para generar (plasma acoplado inductivamente), separar y detectar iones (espectrómetro de masas)” (Aracema, 2019).

Ventajas:

- a. Límites de detección bajos para la mayoría de los elementos, detectando algunos ppb – ppt, lo que lo hace ideal para el análisis de elementos traza
- b. El mayor número de los elementos e isótopos de la tabla periódica se

analizan simultáneamente en 5 minutos

- c. Bajo costo
- d. Resultados rápidos
- e. Amplia gama de aplicaciones en biología, física de materiales, medio ambiente y geoquímica.

Figura 10. Espectrómetro de masas con plasma acoplado inductivamente



Fuente: Laboratorio ALS Mineral

El análisis combinado de espectrometría de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS), es una técnica que lo convierte en un potente instrumento en el análisis multielemental, permitió el análisis de elementos trazas y tierras raras en relaves en un área de hasta 50 μm , cuyo resultado se presenta en la siguiente tabla.

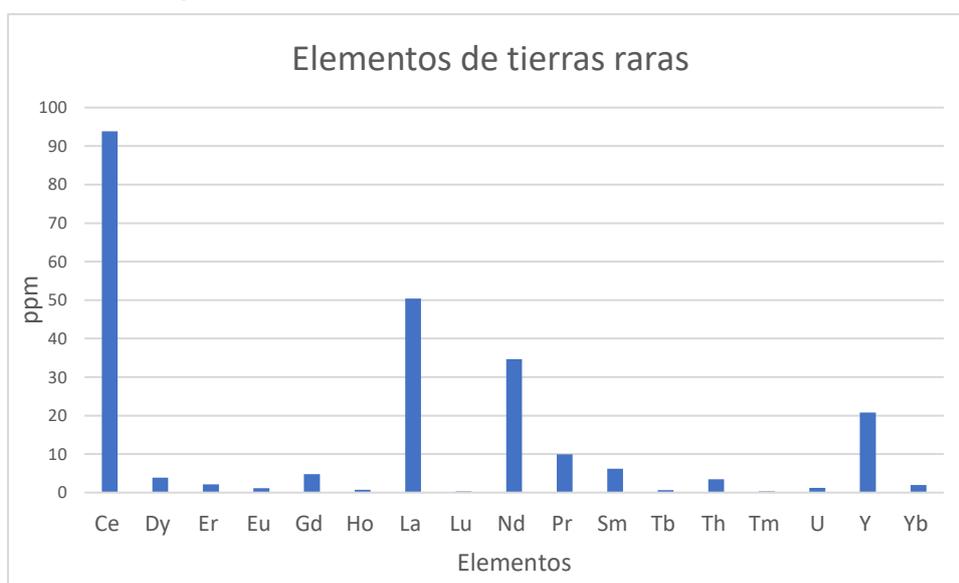
Tabla 10. Análisis multielemental de tierras raras en relaves de Nexa Resources

Descripción	Peso (kg)	Ce ppm	Dy ppm	Er ppm	Eu ppm	Gd ppm	Ho ppm	La ppm	Lu ppm	Nd ppm	Pr ppm	Sm ppm	Tb ppm	Th ppm	Tm ppm	U ppm	Y ppm	Yb ppm	Suma REE ppm
Relave final Milpo	0,21	93,8	3,9	2,15	1,17	4,83	0,75	50,4	0,28	34,6	9,92	6,17	0,63	3,47	0,31	1,19	20,8	1,94	236,31

Fuente: Laboratorio ALS Mineral (2022).

Comentario: Nos da como resultado del análisis empleando la técnica de ICP MS confirma la presencia de elementos de tierras raras tales como: Cerio (Ce), disprosio (Dy), Erblio (Er), Europio (Eu), Gadolinio (Gd), Hafnio (Ho), Lantano (La), Lutecio (Lu), Neodimio (Nd), Praseodimio (Pr), Samario (Sm), Terbio (Tb), Torio (Th), Tulio (Tm), Uranio (U) que son elementos de tierras raras de interés económico, reportado en forma cuantitativa.

Figura 11. Contenido total de tierras raras en relave



Fuente: Elaboración propia

4.3. Discusión de resultados

Los resultados de la investigación indican que existe una relación positiva entre “caracterización química y mineralógica” y “diagnóstico de tierras raras” con un nivel de significancia, realizado a través del reconocimiento mineralógico y análisis por elementos utilizando la espectroscopia de masas, demostrando la existencia de tierras raras en la presa de relaves presentes en el depósito situado en la parte baja de la planta concentradora el Porvenir – Milpo, perteneciente a la empresa minera Nexa Resources SAC.

Estos resultados coinciden con Valderrama (2018), al realizar estudios de detección de tierras raras en relaves y desmontes en la empresa minera La Nacional – Atacama; demostrando que la mayor concentración de los elementos de tierras raras se encuentra en los depósitos de desmontes en una concentración que fluctúa entre 124 a 951,1 ppm, con una concentración promedio de 380 ppm, mientras que en los depósitos de relaves el contenido de elementos de tierras raras fluctúa entre 113 a 293 ppm, con una concentración promedio es de 176 ppm. Tanto en los depósitos de relaves como en los depósitos de desmontes los elementos de las tierras raras más abundantes son: Cerio seguido de Lantano, Neodimio e Itrio; y los elementos menos abundantes son Tulio y Lutecio.

Asimismo, la investigación desarrollada por Pávez (2020) es similar en cuanto a objetivos y metodologías, con resultados que muestran que aproximadamente el 56% de los suelos de relaves chilenos contienen concentraciones totales de tierras raras entre 100 y 500 ppm. , 36%. que sea entre 50-100 ppm y un 8% menos. Cabe mencionar cinco residuos con valores superiores a 1000 ppm que son de interés científico.

CONCLUSIONES

- ✓ El análisis mineralógico se realizó a través de la microscopía óptica, para diagnosticar las especies minerales presentes en el depósito de relaves existente en la empresa minera Nexa Resources SAC – unidad El Porvenir; y el análisis por elementos se desarrolló utilizando la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), por ser altamente sensible y capaz de determinar en forma cuantitativa casi todos los elementos presentes en la tabla periódica en cinco minutos y a bajo costo.
- ✓ El reconocimiento mineralógico, a una magnificación de 200X, demuestra la presencia de especies minerales como: esfalerita, galena, goetita, magnetita, pirita, pirrotita y gangas preferentemente; con un grado de liberación aceptable para la recuperación de valores comunes como son plomo y zinc.
- ✓ Los análisis por elementos realizado con la técnica de ICP MS, confirmó la presencia de elementos de tierras raras como: Cerio (Ce), Disprosio (Dy), Erblio (Er), Europio (Eu), Gadolinio (Gd), Holmio (Ho), Lantano (La), Lutecio (Lu), Neodimio (Nd), Praseodimio (Pr), Samario (Sm), Terbio (Tb), Talio (Th), Tulio (Tm), Uranio (U); siendo los elementos con mayor cantidad: Cerio – 93,8 ppm; Lantano – 50,4 ppm; Itrio – 20,8 ppm. Y los elementos de menor cantidad: Lutecio – 0,28 ppm; Tulio – 0,31 ppm; Terbio – 0,63 ppm.

RECOMENDACIONES

- ✓ Para el desarrollo de estudios futuros de reconocimiento y extracción de elementos de tierras raras, debe focalizarse en los depósitos antiguos de relaves y con grandes reservas acumuladas, entendiéndose por estudios revisados que los elementos de tierras raras se encuentran en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.
- ✓ Para los estudios de reconocimiento mineralógico de las muestras con rigor, debe emplearse las técnicas de microscopía óptica de barrido SEM, QUESCAM, para obtener una información precisa en cuanto a la composición química, su proporción presente en los minerales y/o relaves y de este modo complementar la información que se obtiene por la técnica ICP MS, referente a la distribución de elementos de tierras raras en las fases minerales.
- ✓ Para el desarrollo de pruebas de lixiviación ácida y/o básica, debe entenderse el comportamiento de las impurezas, analizarlas y controlar para obtener una buena recuperación de elementos de tierras raras.

BIBLIOGRAFÍA

- Addison, R. (1986). Gold and Silver Extraction from Sulfides ores. *Mining Congress Journal* (págs. 47 - 54). Melbourne: Congress.
- Argall, G. (1984). Precious Metals Extraction. *International Mining* (págs. 32 - 44). Utha: Congress.
- Avila, R. (2008). *Metodología de la investigación*. Lima: R. A.
- Bergamashi, G. (1987). *Oro*. Madrid - España: Mondadori.
- Biolantánidos, M. (15 de mayo de 2021). *biolantanidos.com/proyecto/*. Obtenido de www.Dong.Rui.com
- Bunge, M. (2008). *La investigación científica*. Barcelona: Ariel.
- Cánepa, C. (1992). *Mineralogía del Oro y su significación en Metalurgia*. Lima: Tecsup.
- COCHILCO. (2015). *Situación actual del mercado de tierras raras y su potencial en Chile*. Santiago: Dirección de estudio y políticas públicas.
- Dana, J. (1992). *Mineralogía de Dana*. Madrid - España: Reverte.
- Dorr, J. (1956). *Cyanidation and Concentration of Gold and Silver Ores*. New York: McGraw-Hill.
- Evans, C. (2016). *Episodes from the history of the Rare Earth Elements*. Amsterdam: Academia Publishers.
- Filmer, A. (1982). The Dissolution of Gold from roasted Pyrite Concentrates. *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy* (págs. 90 - 94). Johannesburgo: Journal Institute.
- Franks, S. (2020). *Rare Earth minerals. Policies and Issues*. New York: Nova Science publishers.
- Gonzales, L. (2016). Aproximación a una teoría de las potencias medianas. *Centro de Estudios Superiores Navales*, 5 - 6.

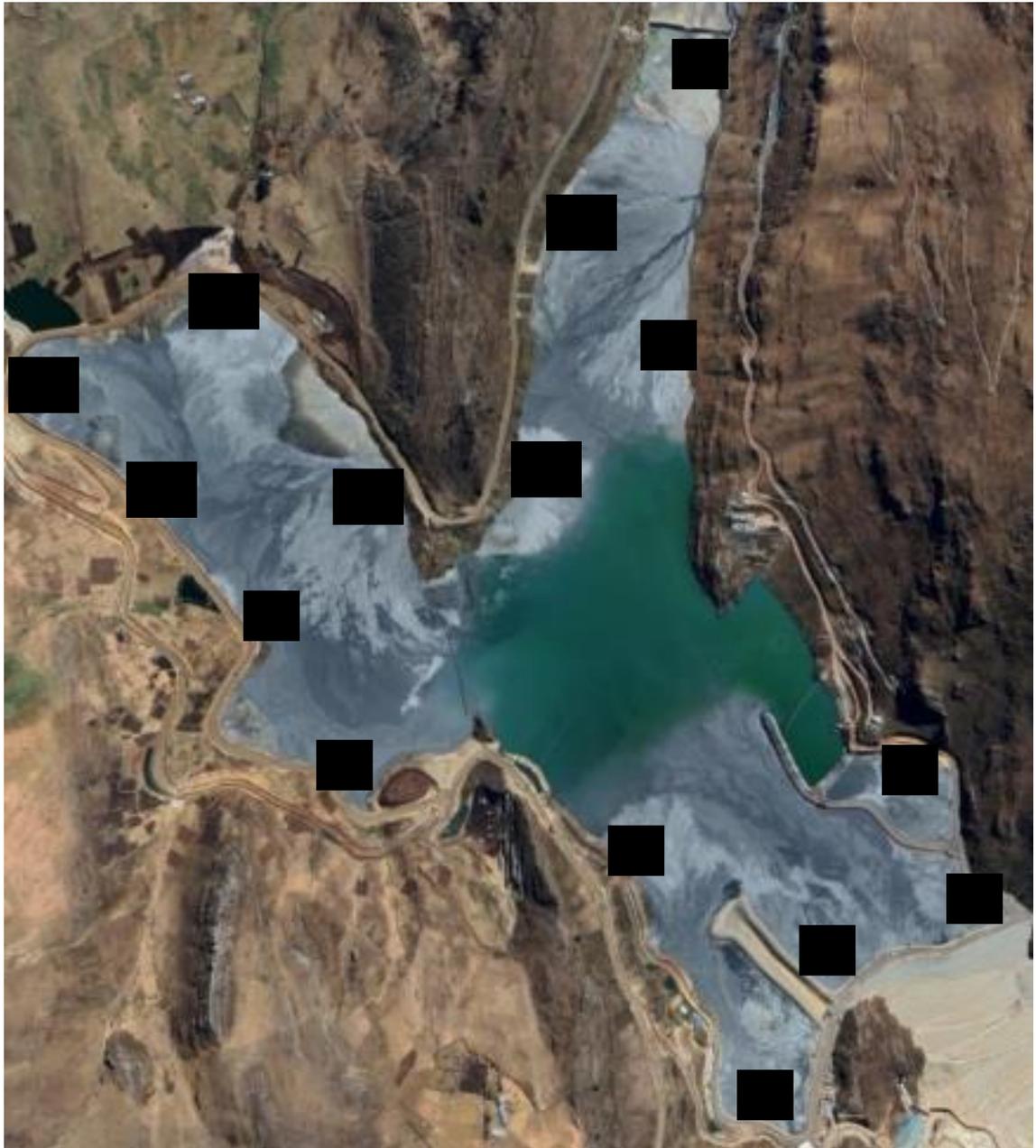
- Hurtado, H. (2003). *Oro oculto en el Perú*. Lima: UNAS.
- Kanazawa, Y. &. (2005). *Rare earth minerals and resoruces in the world*. Tokio: National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.
- Krishnamurthy, N. &. (2004). *Extractive Metallurgy of Rare Earths*. Arkansas: CRC Press.
- López, G. (2015). *Metales de tierras raras*. Murcia: Academia de Ciencias de Murcia.
- Misari, F. (2010). *Metalurgia del Oro*. Lima: CEPETEC.
- Montgomery, D. (2007). *Diseño y análisis de experimentos*. México: Iberoamericana.
- Reyes, P. (2009). *Diseño de experimentos aplicados*. México: Trillas.
- Ruiz, M. (2015). *Hidrometalurgia*. Concepción: Universidad de Concepción.
- Runge, K. (2010). An essential tool for ore characterisation. *Australasian Institute of Mining and Metallurgy*, 155 - 173.
- Smith, K. (2005). *Manual del Falcon Concentrator*. Australia: Falcon.
- Unidos, S. G. (2012). *Minerals Yearbook Rare Earths*. New York: Interno.
- Van, M. (2006). Nuevas Aplicaciones de Concentración Centrífuga. *VI Simposio Internacional de Mineralurgia*. Lima: Tecsup.
- Varios. (2008). Compañías mineras productoras de Oro en el Mundo y el Perú. *Mundo Minero*, págs. 70 - 72.
- Varios. (2008). Conferencias. *VIII Simposium Internacional del Oro* (pág. 257). Lima: snmp.
- Walpone, R. (2007). *Probabilidad y estadística*. México: McGraw Hill.
- Wills, B. A. (1991). *Mineral Processing Technology*. Mexico: Pergamon Press.

ANEXOS

DEPÓSITO DE RELAVE - EL PORVENIR NEXA



PUNTOS DE MUESTREO EN LA RELAVERA



CALICATA Y MUESTREO DE RELAVE

