

“CUANTIFICACIÓN DE ELEMENTOS DE TIERRAS RARAS EN MUESTRAS DE SUELOS DE LA VIII REGIÓN, CHILE”

J. Solís Grant¹, S. Collao Iturra² y M. Basso Aránguiz³

RESUMEN:

Las tierras raras constituyen un grupo compuesto por 17 elementos que permiten la fabricación de automóviles eléctricos, teléfonos inteligentes, computadores portátiles, aviones, turbinas eólicas, entre otros productos de alta tecnología. Por ello, se les considera clave en el desarrollo de la electro movilidad, la electrónica de consumo, la aeronáutica y las energías renovables. En esta investigación, se cuantifican lantánidos provenientes de suelos extraído de las cercanías de la ciudad de Penco y se comparan con suelos saprolíticos proveniente de pegmatitas de los sectores de Poñen y Coyanmahuida, VIII Región del Bio Bio, Chile. En dichas pegmatitas se ha aplicado litogeoquímica con resultados positivos en contenidos anómalos de lantánidos (tierras raras livianas y pesadas), mayormente hospedados en los minerales: uranopolicrasa, xenotima, monacita y euxenita. Los resultados en la geoquímica de suelos relativa a 15 muestras investigadas en este estudio, expresan contenidos de tierras raras muy altos, moderados y bajos (expresados en Total REO: 1.176,8 a 12,0 mg/kg.). Los valores considerados como promedios moderados, se detectaron en los saprolitos próximos o sobreyacentes a las pegmatitas de Coyanmahuida y Poñen, donde varían respectivamente entre 78.8 y 60.5 mg/kg. En los suelos aledaños a la zona en que se centra la planta de tratamiento de Biolantánidos (sector de Penco), el valor promedio es el más bajo 25.7 mg/kg, en tanto que promedio más alto se detectó en el sector denominado Itata, con un valor de 770,0 mg/kg. Esta información geoquímica se considera relevante, para la minería en la VIII Región, debido a que la gran explotación de tierras raras en la actualidad, proviene de los suelos, siendo China el mayor productor mundial de tierras raras.

PALABRAS CLAVES: Tierras raras; Radioactividad; Pegmatita.

ABSTRACT:

Summary: The rare earths constitute a group composed of 17 elements that allow the manufacture of electric cars, smart phones, laptops, airplanes, wind turbines, among other high-tech products. For this reason, they are considered key in the development of electro mobility, consumer electronics, aeronautics and renewable energies. In this research, lanthanides from soils extracted from the outskirts of the city of Penco are quantified and compared with saprolitic soils from pegmatites from the Poñen and Coyanmahuida sectors, VIII Region of Bio Bio, Chile. In these pegmatites, litho geochemistry has been applied with positive results in anomalous contents of lanthanides (light and heavy rare earths), mostly hosted in minerals: uranopolyxene, xenotime, monazite and euxenite. The results in soil geochemistry related to 15 samples investigated in this study, express very moderate and low rare earth contents (expressed in Total REO: 1.176.8 to 12.0 mg / kg.). The values considered as moderate averages were detected in the saprolites near or overlying the Poñen pegmatites, where they vary respectively between 78.8 and 60.5 mg / kg. In the soils surrounding the area where the Biolantánidos treatment plant is located (Penco sector), the average value is the lowest 25.7 mg / kg, while the highest average was detected in the Itata sector, with a value of mg / kg. This geochemical information is considered relevant for mining in the VIII Region, because the large exploitation of rare earths currently comes from the soil, with China being the world's largest producer of rare earths. **KEY WORDS:** Rare earths; Radioactivity; Pegmatite

KEYWORDS: Rare Eaths; Radioactivity; Pegmatite.

1. INTRODUCCIÓN:

La explotación de tierras raras para la producción de nuevas tecnologías ha aumentado considerablemente en los últimos años, junto con esto, también se ha ido monopolizando el mercado. China es el país que concentra la mayor cantidad de toneladas de tierras raras extraídas, quedándose con un 95% a nivel mundial. Bastante más atrás están Rusia e India con un 2% cada uno, y cerrando el listado de los cinco países más ricos en tierras raras, Malasia y Brasil con un 0,5% y 0,3% respectivamente. (Liao *et al.*, 2018). Debido a la monopolización del mercado grandes potencias reclaman que China aprovecha su control de estos minerales para ejercer presiones políticas. A fines del 2010, Japón arresto al capitán de un barco pesquero chino en medio de mares en disputa. Luego de este incidente, se cortaron las exportaciones de REE a Tokio por un tiempo. En 2012, Estados Unidos, Japón y la Unión Europea, presentaron una denuncia ante la Organización Mundial del Comercio (OMC) acusando las tácticas de China, hace uso aprovechando su posición dominante de estos minerales. (Universidad de Concepcion , 2016)

Hace un par de años, Chile se sumó a la carrera por la exploración de “Tierras Raras”. Debido a esto se encontraron concentraciones relativamente rentables en sectores aledaños a cerros de Penco, esta información junto con la investigación de Collao 2015, que a partir de los resultados obtenidos de dicha investigación nace este trabajo, el cual abarca el tópico de cuantificación de REE en saprolito aledaños a pegmatitas ubicadas en sector de Poñen y Coyanmahuida y compararlas con suelos de Penco donde se pretende realizar una extracción futura por parte de empresas de rubro minero.

Tabla 1. Vlores promedios de U, Th y REE+Y en granitoides según Turekian y WAdephlo (T-W) (1961), vinogradov (V) (1962), versus áreas de Concepción (C). Pegmatitas de Rössing (1) Dahlkamp (1993) y Distrito de Petaca (2) McLemore et al.(1988), versus Coyanmahuida (Cy), Poñen (P) y Vertientes (Vt). Modificado de Collao et al 2015.

Elemento ppm	Granitoides			Pegmatitas				
	T-W	V	C	1	2	CY	P	Vt
U	3.0	3.5	3.0	30-1000	s/i	922	2096	73
Th	17.0	18.0	12.0	2.0-98	10332	768	489	23
REE+Y	300	313	138	s/i	3117	10070	321	610

1.1 Ubicación.

El área de estudio se ubica en la Costa de la Región del Biobío, entre los 36°44' y 36°49' latitud S y los 72°58' y 72°43' longitud W, abarcando las provincias de Concepcion, Nuble y Biobio. Las localidades cercanas más importantes son Penco, Florida y Poñen (Figura1).

1.2 Relieve y Geomorfología.

Börgel (1983), reconoce cinco grandes regiones de norte a sur. La Región del Biobío se enmarca en lo que él denomina “Región central de las cuencas y del llano fluvio-glacio-volcánico” que se caracteriza por la presencia de cinco macro formas: Planicies litorales, Cordillera de la Costa, Depresión Intermedio, Precordillera y Cordillera de los Andes.

La principal unidad geomorfológica presente en el área de estudio es la Cordillera de la Costa que corresponde a una unidad morfoestructural compuesta por rocas intrusivas graníticas y metamórficas paleozoicas, cuya evolución ha sido controlada por la tectónica de bloques del Neógeno. Se caracteriza por presentar relieves relativamente bajos, con un promedio de 100 a 275 m s.n.m.. Una intensa meteorización de las rocas intrusivas provocó la formación de un espeso manto meteorizado denominado “maicillo”. Según cálculos de Börgel (1983) más de 60% de la cordillera costera está afectada por erosión moderada a muy severa.

1.3 Marco Geológico

1.3.1 Generalidades.

Las rocas más antiguas que afloran en el área de estudio pertenecen al Paleozoico Superior y corresponden a rocas metamórficas de las Series Oriental y Occidental, las cuales son intruidas por las rocas del Batolito Costero del Sur. Estas unidades afloran en el sector occidental del área de estudio (Figura1).

Durante el Jurásico, rocas de composiciones básicas a intermedias intruyen al Batolito Costero del Sur (Suazo, 2005), estos cuerpos afloran en las cercanías de la comuna de Florida y Quillón. Durante el Triásico se depositan Rocas sedimentarias y conforman la Formación Santa Juana.

Los depósitos modernos y no consolidados se generan principalmente en ambientes litorales y fluviales.

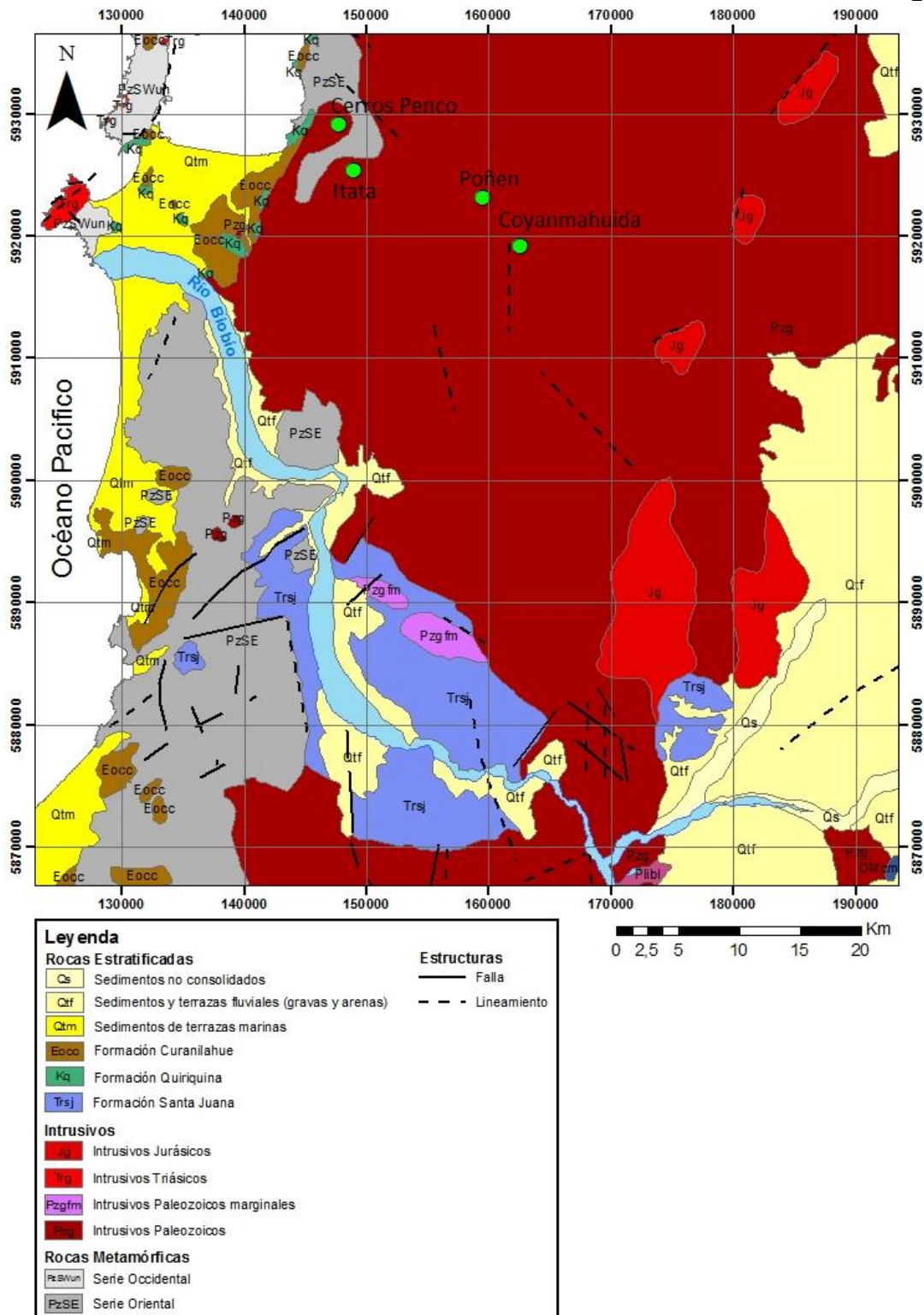


Figura 1. Mapa Geológico con puntos de extracción de muestras. Modificado de Collao et al 2009.

1.3.2 Serie Oriental

Esta Serie aflora continuamente, con rumbo NNE-SSW, entre los 32°30'S hasta los 38°S (Gajardo y Alfaro, 1980). El protolito correspondería a una secuencia detrítica depositada durante el Silúrico-Devónico en un ambiente de margen continental estable profundo de condiciones reductoras, con circulación restringida de agua fresca, donde la sedimentación fue episódica con aportes de material desde el talud continental por medio de corrientes de turbidez y/o cañones submarinos (Hervé, 1977; Cartes, 2004; Glodny *et al.*, 2005).

Estos depósitos fueron expuestos a una fase de acreción frontal (F1), la cual sería la responsable del metamorfismo regional de bajo grado de tipo Barroviano, expresado por asociaciones pretectónicas de estaurolita, granate y biotita (Vasquez, 2001). Este evento alcanza la facies de transición anfibolita-granulita, según Hervé (1977), con temperaturas de de 400°-720°C y presiones de 3±0,5 kbar (Willner, 2005). Como resultado se generaron metagrauvas, filitas, metarenitas, hornfels, gneises y algunos lentes de rocas calcosilicatadas (Hervé, 1977; Hervé *et al.*, 2007).

Posteriormente, se sobreimpone un metamorfismo de tipo Buchan, como resultado de la intrusión del Batolito Costero durante el Carbonífero-Pérmico y que causa la formación de tres zonas mineralógicas: zona de biotita, zona de andalucita y zona de sillimanita (Hervé, 1988; Creixell, 2001; Vásquez, 2001; Charrier *et al.*, 2007; Hervé *et al.*, 2007).

1.3.3 Serie Occidental

Aflora continuamente al sur de los 38° S, mientras que al norte de la misma latitud lo hace en forma dispersa. Aflora en la península de Tumbes y en Hualpén, al norte de la desembocadura del río Biobío (Velásquez, 2012).

La Serie Occidental está conformada por esquistos micáceos grises, metacherts ferruginosos, esquistos verdes, esquistos azules, metacherts manganíferos, metaturbiditas, esquistos de clorita, serpentinitas y metabasitas (Hervé, 1977; Collao y Almeida, 1996 en Velásquez, 2012), cuyo protolito corresponde a basaltos de afinidad toleítica y secuencias pelíticas. Esta asociación de rocas junto con la fuerte deformación y recristalización, indican un metamorfismo de alto P/T que afectó a rocas volcánicas y sedimentarias de fondo oceánico (Martin *et al.*, 1999; Glodny *et al.*, 2005).

Esta serie se formó debido a la adhesión de corteza oceánica en la parte inferior del paleoprisma de acreción Paleozoico produciendo una acreción basal. En este proceso se sugieren condiciones de formación con presiones entre 7 y 11 kbar y temperaturas entre los 196 y 451 °C o 380° y 420°C, alcanzando la facies de esquistos verdes y localmente la facies de esquistos azules. Posteriormente se produce una exhumación a razón de 0,2-0,6 km Ma⁻¹ (Collao & Alfaro, 2000; Willner, 2005; Willner *et al.*, 2005; Glodny *et al.*, 2005).

1.3.4 Intrusivos Triásicos

Las rocas intrusivas triásicas, afloran como cuerpos de dimensiones reducidas, con ausencia de xenolitos y composición monzogranítica, en la mitad Norte de la Península de Hualpén y en forma dispersa en la Península de Tumbes (Creixell, 2001; Vásquez y Franz, 2008). Intruyen a esquistos pelíticos del Basamento Metamórfico de la Serie Occidental y han sido correlacionados con otros plutones triásicos encontrados hacia el norte, específicamente en las localidades de Cobquecura, Constitución, Pichilemu y La Estrella (Vásquez *et al.*, 2011).

1.3.5 Intrusivos Jurásicos

Entre los 36°S y 37°S, Gajardo (1981) afirma que existen afloramientos de cuerpos plutónicos de posible edad jurásica en los puntos más elevados de la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa. Este autor se basa en las observaciones de Escobar *et al.* (1977), quienes señalan que los plutones que afloran en los cerros de mayor altura, al norte de los 35°S, son de edad jurásica debido a un fenómeno de erosión diferencial.

En la Región del Biobío, estas rocas intruyen a rocas intrusivas del Paleozoico que pertenecen al Batolito Costero del Sur (Suazo, 2005).

2. METODOLOGÍA:

En este estudio se analizó 15 muestras representativas de suelo de 4 puntos de muestreo, 2 de ellos cercanos a pegmatitas, en cada punto se extrajo muestras de distintas profundidades, estas provenientes de los cerros de Penco, Ruta Itata, Poñen y Coyanmahuida. Las muestras de suelo han sido almacenadas en bolsas herméticas para no contaminar ni alterar las muestras, en la cual se han alojado aproximadamente 3 kg de muestra. Las 16 muestras fueron sometidas a la medición de radioactividad con un espectrómetro de integración de rayos gama portátil modelo GIS-5 (Figura 2.)

A)



B)



Figura 2. A) Espectrómetro de integración de rayos gama portátil. B) Muestra extraída en Poñen.

Posterior a la medición de radioactividad y antes de la realización de proceso de desorción secuencia de arcillas para cuantificar la cantidad de REE en las muestras, el material se preparó de acuerdo al manual de “aseguramiento y control de calidad de proceso de desorción secuencial de arcillas” del departamento de Ingeniería Metalúrgica (DIMET).

2.1 Secado de Arcillas

Las muestras de arcillas recolectadas en terreno previamente rotuladas, son sometidas a un proceso de secado. Para ello cada muestra se vierte en un bandeja de aluminio cubierta con papel kraft, la bandeja se deja secando durante 72 horas a una temperatura de 40°C.

2.2 Preparación mecánica de arcillas previa a desorción.

Una vez secadas, las muestras de arcilla son sometidas a un proceso de disgregación manual y clasificación utilizando el tamiz 10# (1.68 mm), donde el sobre-tamaño se muele utilizando un mortero manual hasta lograr una granulometría 100% -10#. Posteriormente, las muestras de arcilla se homogenizan y se obtienen 2 muestras representativas de 50 g (± 0.20 g).

A continuación cada muestra de arcilla de 50g es rotulada y almacenada para luego ser utilizadas en las pruebas de desorción. El remanente de las muestras de arcillas es también rotulado y utilizado para la cuantificación del porcentaje de humedad de la muestra de arcilla que ingresa a la etapa de desorción.

2.3 Medición de humedad de las arcillas.

La medición de humedad de las muestras de arcillas obtenidas luego de la etapa de preparación mecánica se realiza de acuerdo al siguiente procedimiento descrito en la tabla 2.

Primer Peso de Muestra.	Se pesan entre 20 y 30 g de muestra representativa de arcilla desde el remanente obtenido de la sección 2.
Primer Calentamiento de Muestra.	La muestra de arcilla se somete a calentamiento en un horno a 110°C por 1 hora.
Primer Enfriamiento y Segundo Peso de Muestra.	La muestra se retira del horno y se deja enfriar, para a continuación ser pesada.
Segundo Calentamiento de Muestra.	La muestra se calienta nuevamente a 110°C durante 1 hora.
Segundo enfriamiento y Tercer Peso de Muestra.	La muestra se retira del horno y se deja enfriar para ser pesada nuevamente
Repetición.	El procedimiento de secado y enfriado se repite hasta que no se observe variación en las masas de arcilla.
Calculo.	Finalmente se calcula la cantidad de agua que existía en la muestra de arcilla por diferencia entre las masas inicial y final.

Tabla 2. Procedimiento para medición de humedad en las arcillas. Adaptado de (Leopoldo Gutierrez Briones, 2018)

2.4 Desorción de tierras raras desde arcillas con sulfato de amonio.

El proceso de desorción de tierras raras desde muestras de arcilla se realiza utilizando una de las dos muestras de arcilla de 50g obtenidas luego de la preparación mecánica. La muestra no utilizada se deja como contra-muestra y es almacenada. El proceso de desorción se realiza según el procedimiento que aparece en la Tabla 3.

Nombre del proceso	Descripción del proceso.
Preparación de mezcla	Se miden 150 mL de agua destilada los cuales se mezclan con arcilla bajo agitación que permita mantener los sólidos en suspensión.
Ajuste de pH	Se ajusta el pH a 4.0 utilizando H ₂ SO ₄ diluido o NaOH dependiendo de las condiciones de acidez o alcalinidad requeridas.
Suministro de sulfato de amonio	Se agregan 2.97 g de sulfato de amonio para obtener una solución 0.15 mol/L
Periodo de Agitación	Después de agregar el sulfato de amonio se mantiene la agitación constante por 20 minutos, manteniendo el pH ajustado a 4.0 durante todo el proceso.
Filtrado de Muestra	Luego se filtra la suspensión hasta que no se genere goteo del embudo (Figura 2.), y se mide y registra la cantidad de solución extraída del queque.
Almacenamiento de Solución	Se guarda la solución obtenida de la desorción en una botella debidamente rotulada, para ser sometida posteriormente a un proceso de titulación.
Retiro del Material Sobrante.	Se retira el queque del embudo y se vierte en un vaso precipitado cuidando tener la menor pérdida posible de material.
Preparación de Segunda Mezcla.	Luego, se adiciona el equivalente de agua retirada al queque que está en el vaso precipitado, y se agita hasta que el total de la muestra esté en suspensión. En esta etapa se ajusta el pH a 4.0.
2° Suministro de sulfato de amonio	Se agregan 2.97 g de sulfato de amonio para obtener una solución 0.15 mol/L y se mantiene la agitación constante durante 20 minutos manteniendo el pH ajustado a 4.0 durante todo el proceso.
2° Filtrado de Muestra	Se filtra la solución hasta que no se genere goteo del embudo, y se mide y registra la cantidad de solución extraída del queque.
2° Almacenamiento de Muestra.	Se guarda el líquido de la desorción en una botella debidamente rotulada para su posterior de titulación.

Tabla 3. Proceso de desorción de tierras raras. Adaptado de (Leopoldo Gutierrez Briones, 2018)

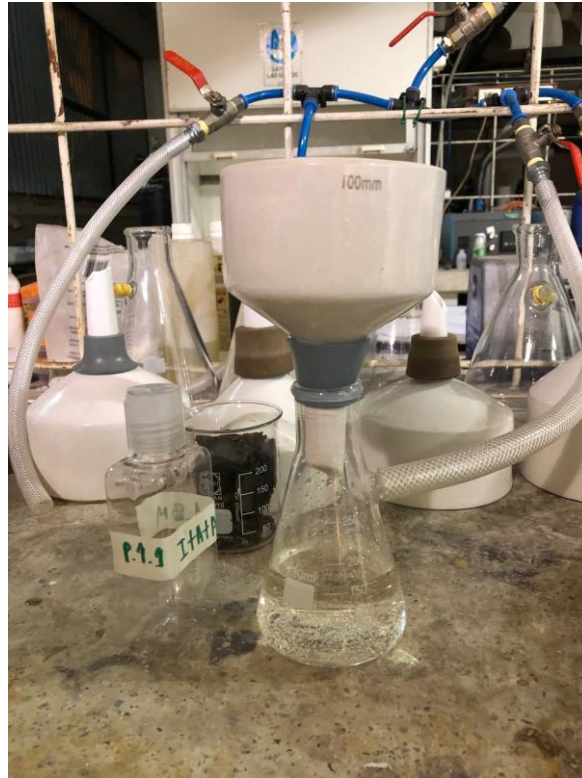


Figura 3. Proceso de Filtración de Muestra mediante bomba de vacío.

2.5 Medición de contenido total de REE a través de titulación de muestras líquidas.

El proceso de titulación de muestras líquidas obtenidas de la desorción, se realiza según el procedimiento que se muestra en la tabla 4.

Nombre del Proceso	Descripción del Proceso.
Preparación de la titulación.	Se adicionan 5 mL de muestra líquida a un vaso precipitado.
	Se añaden 0.2 g de ácido ascórbico bajo agitación para disolver totalmente este reactivo, manteniendo el pH en un rango de entre 1 y 2.
	Se adiciona solución de hexametilentetramina previamente preparada hasta fijar el pH entre 5 y 5.5, preferiblemente en un valor de 5.2.
	Se agregan 2 gotas de indicador naranja de xilenol previamente preparado.
Titulación.	Se titula el producto con solución de EDTA previamente preparada. Figura 3.
	Se reporta el volumen de EDTA ocupado hasta obtener un color amarillento, sin rastros de rosado.

Tabla 4. Descripción del proceso de titulación. Adaptado de (Leopoldo Gutierrez Briones, 2018)



Figura 4. Proceso de Titulación.



Figura 5. Proceso de Titulación.



3. RESULTADOS

3.1 Obtención de radioactividad.

En la obtención de medición de radioactividad mediante espectrómetro de integración de rayos gama portátil modelo GIS-5 se obtuvo los resultados expuestos en la siguiente ta

Lugar	Muestra	Profundidad (m)	Cuentas por segundo	Promedio por Lugar
Ruta Itata	R.T.1/P.1.4	4	155	144,25
	R.T.2 / P.1.1	6	140	
	R.T.3 / P.2.1	8	153	
	R.T.4 / P.1.3	12	129	
Poñen	P.1 / P.1.4	2	121	129,5
	P.2 / P.1.1	4	128	
	P.3 / P.2.1	5	137	
	P.4 / P.1.3	12	132	
Coyanmahuida	C.1 / P.2.1	3	141	134,3
	C.2 / P.2.2	5	139	
	C.3 / P.2.3	6	123	
Cerro Penco	C.P.1 / P.1.1	4	160	154
	C.P.2 / P.1.4	6	150	
	C.P.3 / P.1.3	10	156	
	C.P.4 / P.1.2	15	150	

Tabla 5. Cuentas máximas registradas en cada muestra según lugar y profundidad.

3.2 Obtención de contenidos de tierras raras por Titulación Química.

LUGAR	Masa Húmedo (g)	Masa Seco (g)	Humedad (%)	1°Titulación (ml)	2° Titulación (ml)	Total REO (mg/kg)
COYANMAHUIDA						
P.2.2 (5m)	50	49,1	1,8%	0,58	0,14	131,9
P.2.3 (6m)	50	39,1	1,8%	0,42	0,11	95,8
P.2.1 (3m)	50	349,3	1,4%	0,05	0	8,7
POÑEN						
P.1.3 (12m)	50	49,2	1,6%	0,07	0	12,0
P.1.1 (4m)	50	49,0	2,0%	0,1	0	16,5
P.1.4 (2m)	50	49,2	1,5%	0,35	0,08	77,0
P.2.1 (5m)	50	49,4	1,3%	0,56	0,22	136,3
ITATA						
P.1.4 (4m)	50	49,4	1,2%	4,97	2,03	1176,8
P.1.3 (6m)	50	49,3	1,5%	3,76	1,23	832,1
P.1.2 (8m)	50	49,4	1,1%	3,2	1,18	727,7
P.1.1 (18m)	50	49,2	1,5%	1,28	0,64	343,3
PENCO						
P.1.1 (4m)	50	49,2	1,7%	0,12	0	20,4
P.1.4 (6m)	50	49,5	1,0%	0,18	0,06	40,1
P.1.3 (10)	50	49,4	1,1%	0,12	0	21,2
P.1.2 (15m)	50	49,2	1,6%	0,12	0	20,9

Tabla 6. Resultados de titulación, representa la cantidad total de Tierras raras.

Promedio	Coyanmahuida	Poñen	Penco	Itata
Radioactividad	134,3	129,5	154	144,25
REE ppm	79,1	60,45	25,65	769,97

Tabla 7. Valores promedios de Radioactividad en cuentas por segundas y de REE en ppm en puntos muestreados.

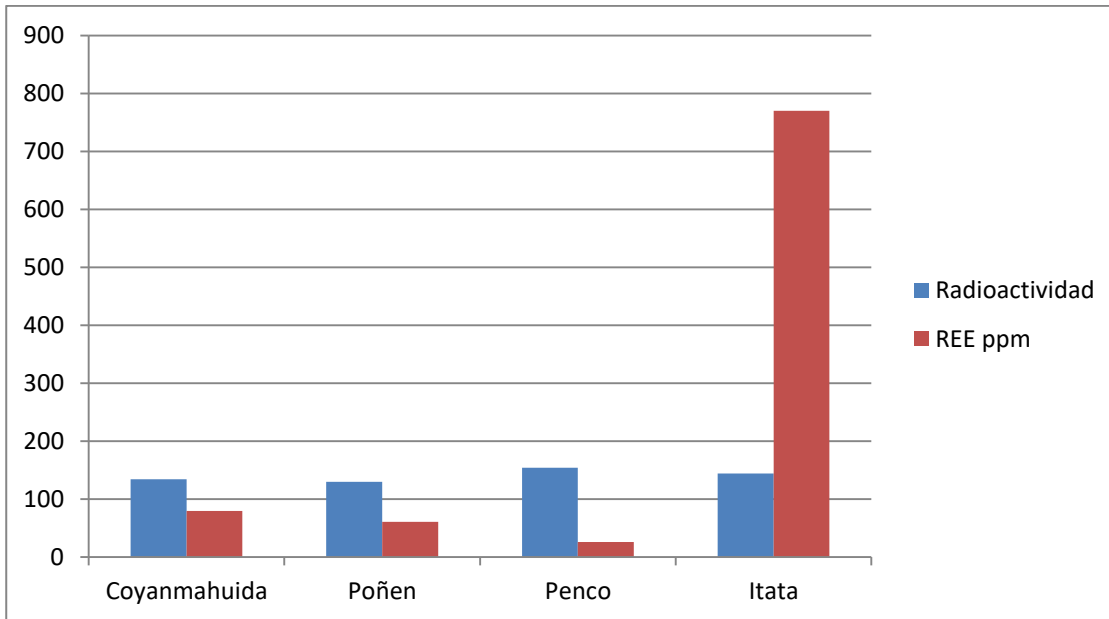


Figura 6. Relación de los promedios de radioactividad (azul) con promedios de concentración de REE en cada una de las zonas muestreadas.

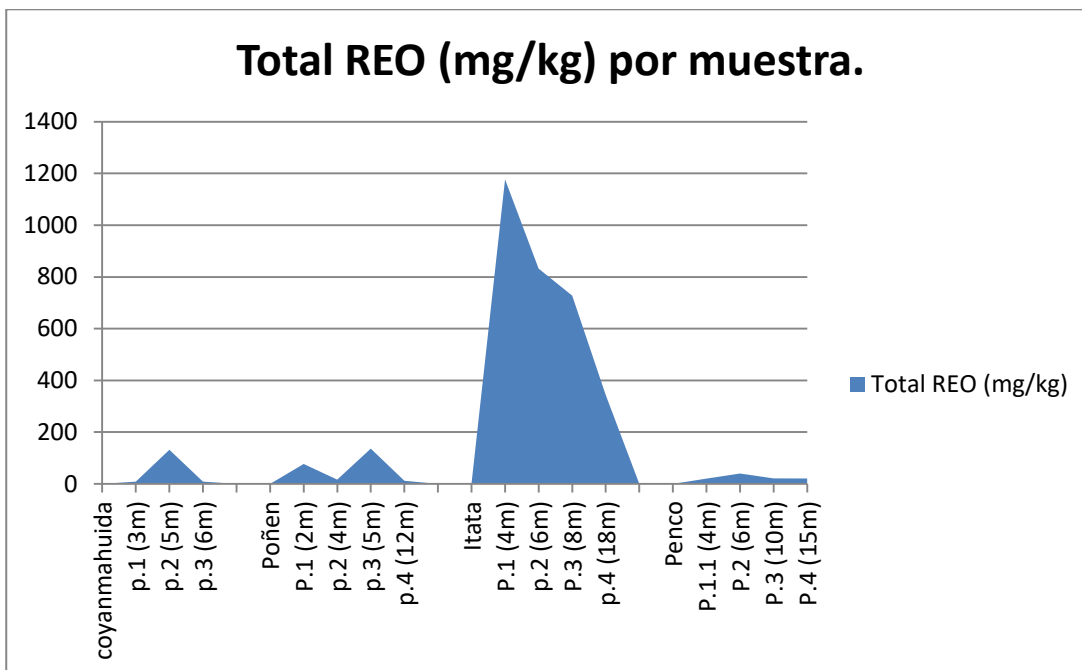


Figura 7. Concentración de contenidos totales de REE en ppm por muestras

CONCLUSIONES

Los resultados del análisis de titulación química arrojan concentraciones de REE que varían entre los 8,7 y 1176,8 ppm. En el sector de Itata se obtuvieron las concentraciones más altas de contenidos de tierras raras.

Las pegmatitas ubicadas en las zonas de Poñen y Coyanmahuida, aunque presentan elevadas concentraciones de REE, medidas en análisis litogeoquímicos en estudios anteriores, estas no se encuentran presentes en los suelos meteorizados provenientes desde la misma roca.

No es posible determinar una clara relación entre la cantidad de radioactividad de los suelos con sus cantidades de REE, aunque se observa que en las muestras donde se presentan mayores concentraciones de REE también se encuentran elevadas concentraciones de radioactividad, eso sí, estos valores no sobresalen mayormente del promedio.

Las medidas de radioactividad en litogeoquímica en pegmatitas es de gran ayuda en la investigación de minerales que contienen REE, que presentan contenidos escasos de Th y U. Sin embargo en suelos no presentan grandes variaciones tanto en saprolito en torno a pegmatitas (promedio de 130 y 135 cuentas por segundo), comparados a los suelos de Itata y Penco (promedios algo más altos de 144 y 154). Con equipos más sensibles esto puede ser de ayuda en la prospección.

Las muestras de suelo relacionadas con Penco y Itata, son de granulometría mucho más fina, teniendo una mayor participación de partículas arcillosas en relación a los suelos in-situ de pegmatitas que son de granulometría más gruesa y menos arcillosa.

Se observa una relación entre las mayores concentraciones de REE por sector y profundidades medias-bajas, pudiéndose observar que en el total de los lugares muestreados las mayores concentraciones de REE se observaron entre los 4 y 6 metros de profundidad.

En cierta medida los promedios de radioactividad son mayores en los Sectores de Penco e Itata que los sectores de Poñen y Coyanmahuida, esto podría deberse a la granulometría de las partículas, que al ser de menor tamaño y presentar mayores cantidades de arcilla podrían retener mayores concentraciones de elementos de radioactividad como torio, uranio y en consecuencia de tierras raras. Esto considerando que en muestras de rocas, especialmente de pegmatita, los minerales que contienen tierras raras generalmente portan también uranio y torio en la mineralogía que los pueden contener. Por ejemplo cuando se tiene los minerales contenedores de tierras raras como Xenotima, Monacita, Eucenita también comprenden minerales radioactivos como el silicato de torio torita, y de uranio Uraninita, Cofinita.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer en estas líneas la ayuda de muchas personas e instituciones que me han apoyado durante el proceso de investigación y redacción de este trabajo. En primer lugar, quisiera agradecer a mis padres Jaime y Patricia, que me han ayudado y apoyado en toda mi vida, a mi profesores guía, Santiago Collao y Matilde Basso, por haberme orientado en todos los momentos que necesite sus consejos, a las personas que apoyaron de una u otra forma a la realización de esta tesis, especialmente, Manuel Silva, Claudio Opazo, Constanza Urzua, Aníbal Vilches y mi familia y amigos.

También quisiera destacar el apoyo de Instituciones, mi alma mater Universidad Católica de la Santísima Concepción, el centro científico CIMES y finalmente la Universidad de Concepción y en específico la Facultad de Metalurgia, DIMET por haberme apoyado en el área metalúrgica de este investigación.

BIBLIOGRAFÍA

- CARTES, N. 2004. Petrografía y Ambiente de Depositación de las Metapelitas Paleozoicas con Huellas Fósiles, entre Tomé y Lirquén, VII Región del Biobío, Chile. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento. Ciencias de la Tierra (Inédito): 115 pp. Concepción.
- COLLAO, S. & ALFARO, G. 2000. Paleozoic Massive Sulphide Orebodies of the Nahuelbuta and Queule Mountains, South-Central Chile: Results of Geobarometry and Sulphur Isotope Studies. VMS Deposits of Latin America. Sherlock, R. & Logan, M.A.V. Geological Association of Canada. Special Publication Volume 2: 629-641.
- COLLAO, S.; GONZÁLEZ, L.; FLORES, G. 2009. Mineralización de uranio en afloramiento pegmatítico, Región del Biobío, Chile. Actas S 11-007. CD, 4 p. XII Congreso Geológico Chileno. Santiago, Chile.
- COLLAO, S.; CORREA, K.; GONZÁLEZ, L.; VELÁSQUEZ, R. 2012. Inclusiones fluidas en las pegmatitas uraníferas de Poñén, Región del Biobío, Chile. XIII Congreso Geológico Chileno – Antofagasta 2012.
- COLLAO, S.; GONZALES, L.; HERNANDEZ, L.; JIL, D. 2015. Mineralogía y Anomalías Geoquímicas de U, Th y Tierras Raras, en Pegmatita de Coyanmahuida, VIII Región, Chile.
- CHARRIER, R.; PINTO, L. & RODRÍGUEZ, M.P. 2007. Tectonostratigraphic Evolution of the Andean Orogen in Chile. The Geology of Chile. (Moreno, T.; Gibbons, W. editors). The Geological Society: 21-114. London.
- CREIXELL, C. 2001. Petrología y Geotermobarometría de las Rocas Intrusivas de la Cordillera de la Costa entre los 36°30' S y 38°00' S. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 149 pp., Concepción.
- DAHLKAMP, F.J. 1993. Uranium Ore Deposits. Springer-Verlag.: 470 pp. Germany.
- GAJARDO, A. & ALFARO, G. 1980. Mapa Metalogénico de la Región del Biobío, Chile, escala 1:250.000. Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile: 34 pp. Santiago.
- GAJARDO, A. 1981. Hoja Concepción-Chillan, Mapas Geológicos Preliminares de Chile, escala 1:250.000. Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile (Inédito). N°4: 56 pp. Santiago.
- GLODNY, J.; LOHRMANN, J.; ECHTLER, H.; GRÄFE, K.; SEIFERT, W.; COLLAO, S. & FIGUEROA, O. 2005. Internal Dynamics of a Paleoacretionary Wedge: Insights from Combined Isotope Tectonochronology and Sandbox Modelling of the South-Central Chilean Forearc. *Earth and Planetary Science Letters*. N° 231: 23-39
- HERVÉ, F. 1977. Petrology of Crystalline Basement of the Nahuelbuta Mountains, South Central Chile. An Comparative Studies on the Geology on the Circumpacific Orogenic Belts in Japan-Chile. *Japan Society for the Promotion of Science*: 1-51.
- HERVÉ, F.; FAUNDEZ, V.; CALDERÓN, M.; MASSONE, H.J. & WILLNER, A.P. 2007. Metamorphic and Plutonic Basement Complexes. The Geology of Chile. Moreno, T.; Gibbons, W. The Geological Society: 5-19. London.

- HERVÉ, F. 1988. Late Palaeozoic Subduction and Accretion in Southern Chile. *Episodes*. Vol. 11, N°. 3: 183-188.
- LAI, F; HUANG, LI; GAO, GUOHUA; YANG, R; XIAO, Y. 2018. Recovery of rare earth from ion-absorbed rare earth ore with MgSO₄-ascorbic acid compound leaching agent. *Journal of Rare Earths*: 521-527
- Leopoldo Gutierrez Briones, C. M. (2018). *Aseguramiento y control de calidad de proceso de desorción decuencial de arcillas de minera biolantánidos*. Concepción: Universidad de Concepción.
- MARTIN, M.; KATO, T.; RODRIGUEZ, C.; GODOY, E.; DUHART, P.; MCDONOUGH, M. & CAMPOS, A. 1999. Evolution of the Late Paleozoic Accretionary Complex and Overlying Forearc-Magmatic Arc, South Central Chile (38°-41°S): Constraints for the Tectonic Setting along the Southwestern Margin of Gondwana. *Tectonic*. Vol. 18. N° 4: 582-605.
- MCLEMORE, V.T; NORTH, R.M. & LEPPERT, S. 1988. REE, Niobium, and Thorium Districs and Ocurrance in New Mexico. *New Mexico Bureau of Mines and Mineral Resouces*. N° 324: 27 pp.
- SUAZO, H. 2005. Estudio Petrográfico, Mineralógico y Geoquímico de los Intrusivos Jurasicos de la Cordillera de la Costa VII Región del Maule y VIII Región del Bío-Bío. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción. Departamento de Ciencias de la Tierra (Inédito): 140 pp. Concepción.
- TUREKIAN, K.K. & WEDEPOHL, K.H. 1961. Distribution of the Elements in some Major Units of the Earth's Crust. *Geological Society of America Bulletin*. Vol. 72: 175-192.
- Universidad de Concepcion . (21 de Julio de 2016). *Noticias: Departamento Ciencias de la Tierra*. Obtenido de <http://www3.udec.cl/geologia/este-material-asi-como-todo-el-contenido-digital-texto-fotografias-audios-videos-y-logotipos-de-revista-capital-online-cuenta-con-derechos-de-propiedad-intelectual-de-no-existir-previa-autoriz/>
- VÁSQUEZ, P. 2001. Petrología y Geotermobarometría del Basamento Metamórfico de la Cordillera de la Costa entre los 36°30' S y 38°00' S. Memoria para optar al Título de Geólogo. Universidad de Concepción, Departamento Ciencias de la Tierra (Inédito): 170 pp., Concepción.
- VINOGRADOV, A.P. 1962. Average Contents of Chemical Elements in the Principal Types of Igneous Rocks of the Earth's Crust. *Geochemistry*. N°. 7: 641-664.
- WILLNER, A.P, 2005. Pressure–Temperature Evolution of a Late Palaeozoic Paired Metamorphic Belt in North–Central Chile (34°–35°30'S). *Journal of Petrology*.N°.46: 1805-1833.
- WILLNER, A.P.; THOMSON, S.; KRÖNER, A.; WARTHO, J.; WIJBRANS, J. & HERVÉ, F. 2005. Time Markers for the Evolution and Exhumation Histry of a Late Palaeozoic Paired Metamorphic Belt in North–Central Chile (34°-35°30'S). *Journal of Petrology*. Vol. 46, N°. 9: 1835-1858.