

CONCENTRACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LITIO EN LOS SEDIMENTOS DEL FONDO DEL RÍO ANDALIÉN

*B. Fuentes Hermosilla*¹, *R. King St-Onge*², *E. González*³ y *D. Caamaño*⁴

RESUMEN:

Según la geoquímica, el litio (Li) es considerado como un elemento incompatible, cuya concentración generalmente aumenta con la evolución de un sistema magmático (ej. un granito debería tener mucho más litio que un basalto). Las principales fuentes de litio son: salares en cuencas cerradas, rocas pegmatitas y granitos, arcillas enriquecidas en litio, entre otras. En conjunto con el Al y Fe, el litio es uno de los elementos más utilizados para la normalización en estudios de contaminación de suelos y sedimentos. En un reciente estudio de Fondecyt de Tume *et al.* (2013-2015), se analizó el nivel de contaminación de suelos por metales pesados en Talcahuano, pero el uso del Li como elemento normalizador resultó inconcluso debido a varios factores, incluyendo una distribución anormal y concentraciones anómalas. El objetivo de esta investigación es determinar si las altas concentraciones de Li obtenida por Tume *et al.* (2013-2015) en el sector de la desembocadura del río Andalién proviene de la evolución magmática de la Cordillera de la Costa y consecuente transporte de sedimentos o es producto de la intervención humana en el sector. Se realizó un muestreo de sedimentos y rocas a lo largo del río, lo que permitió caracterizar, clasificar y determinar la concentración de este elemento.

Del muestreo de sedimentos realizados en este estudio, el rango de concentraciones de litio a lo largo del río Andalién es de [0.46 – 39.29] ppm. No se registraron altos valores en el sector de la desembocadura, como fue sugerido por el proyecto de Tume *et al.* (2013-2015).

Los resultados obtenidos en esta investigación, permiten establecer un intervalo de concentración entre 6.31 y 8.04 ppm, que pueden ser usados como valor background de litio en futuros estudios de contaminación de suelos, en zonas de Concepción y Talcahuano.

PALABRAS CLAVES: Litio; Sedimentos; Río Andalién.

ABSTRACT:

Geochemistry considers lithium (Li) as an incompatible element, whose concentration generally increases with the evolution of a magmatic system (e.i. a granite should contain more lithium than a basalt). The main sources of lithium are: salt flats in closed basins, pegmatitic rocks and granites, clays enriched in lithium, among others. Along with Al and Fe, lithium is one of the most used elements for normalization in soil and sediment contamination studies. In a recent Fondecyt study by Tume *et al.* (2013-2015), analyzed the level of soil contamination by heavy metals in Talcahuano, but the use of Li as a normalizing element was inconclusive due to several factors, including an atypical distribution and anomalous concentrations. The objective of this investigation is to determine if the high concentrations of Li obtained by Tume *et al.* (2013-2015) in the delta of the Andalién River comes from the magmatic evolution of the Cordillera de la Costa and consequent sediment transport or is the product of human intervention in the sector. Sediments and rocks were sampled along the length of the river, which allowed to characterize, classify and determine the concentration of this element.

Results of sediment sampling performed in this study, the range of lithium concentrations along the length of the Andalién river is [0.46 – 39.29] ppm. No high values were recorded in the area of the delta of the river, as was suggested by Tume *et al.* (2013-2015).

The results obtained in this investigation, it was possible to establish a concentration interval between 6.31 and 8.04 ppm, which can be used as a lithium background value in future soil contamination studies, in areas of Concepción and Talcahuano.

KEYWORDS: Lithium, Sediments; Andalién River.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, bfuentes@ing.ucsc.cl

² Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, rking@ucsc.cl

³ Facultad de Ciencias, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, eligonza@ucsc.cl

⁴ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, dcaamano@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

El litio (Li) es un elemento traza perteneciente al grupo 1 de la tabla periódica. Se encuentra en la corteza terrestre en concentraciones de 65 partes por millón (ppm) (Wedepohl, 1978). No se encuentra en estado puro, sino combinado en forma de sales o en rocas. Según Donoso *et al.* (2017), existen 6 fuentes principales de litio (Figura 1): un 58% se encuentra en los salares en cuencas cerradas, 26% en rocas pegmatitas y granitos, 7% en arcillas enriquecidas en litio, 3% en salmueras de yacimientos petroleros, 3% en salmueras geotermales y un 3% se encuentra en zeolitas enriquecidas con litio.

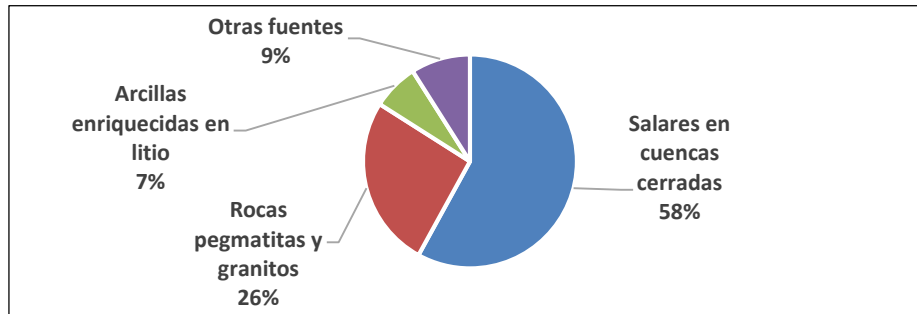


Figura 1: Principales fuentes de litio en el mundo (Donoso *et al.*, 2017).

El litio es un elemento metálico litófilo, es decir, ocurre predominantemente en minerales silicatos y debido a sus bajas concentraciones, está presente como elemento que sustituye al Potasio (K), Sodio (Na) y Magnesio (Mg) en muchos minerales comunes (aproximadamente 145 especies mineralógicas). Algunos minerales de Li más conocidos, por su valor económico, son el espodumeno, lepidolita, petalita, hectorita, jadarita, amblygonita y eucryptita. Durante procesos magmáticos, el Li puede reemplazar Mg^{2+} y Fe^{2+} , en piroxeno, anfíbol, biotitas, etc. (Ure y Berrow, 1982). Pueden también sustituir al Mg y Al en micas y cloritas, pero su baja carga y radio iónico pequeño limitan su capacidad para competir por los sitios hasta las últimas etapas del fraccionamiento (Salminen, 2006). Desde el punto de vista geoquímico, el litio es considerado como un elemento incompatible cuya concentración generalmente aumenta con la evolución de los sistemas magmáticos, por lo que por ejemplo, un granito debería tener mucho más litio que un basalto.

El litio se encuentra exclusivamente en el medio natural en forma iónica univalente libre (Li^+). A pesar de la estabilidad del ion Li^+ (aq), este es relativamente inmóvil (Salminen, 2006). Este elemento puede ser liberado, especialmente en ambientes de bajo pH, por la meteorización de minerales ígneos primarios y minerales secundarios de arcilla (Lyons y Welch, 1997). La adsorción de litio en arcillas y materia orgánica es importante (Rubio *et al.*, 2000).

Los suelos se pueden definir como una combinación de 4 componentes: 50% de su volumen consiste en roca desintegrada y descompuesta (materia mineral) y de humus (materia orgánica), mientras que el otro 50% consiste en espacios porosos entre las partículas sólidas donde circula aire y agua distribuida intersticialmente entre sus granos (Tarbuck *et al.*, 2005). Además, un suelo se puede formar de manera in situ denominándose suelos residuales. Para los suelos transportados, las fuerzas erosivas, en especial el agua y el viento, mueven los componentes del suelo de un lugar a otro. Estas partículas viajan pendiente abajo hacia los lagos, lagunas, ríos, etc., en donde son conocidas como sedimentos. Se considera que estos son un almacén altamente concentrado de metales, debido a su baja solubilidad en ecosistemas acuáticos, lo que hace que se unan con el material de suspensión y facilita la incorporación de los elementos trazas al sedimento (Rubio *et al.*, 2000).

La ocurrencia natural de metales o elementos trazas en el medio ambiente complica las evaluaciones de los suelos potencialmente contaminados, debido a que no es posible inferir automáticamente qué cantidades mensurables de estos elementos provienen de enriquecimientos antropogénicos o fuentes naturales (ej. background). Varios investigadores han recurrido a técnicas de normalización para tener en cuenta las variaciones naturales y proporcionar valores de fondo (background) con la cual evaluar el enriquecimiento de los elementos. Estos normalizadores incluyen el tamaño de los granos (Ackerman *et al.*, 1983, Horowitz y Elrick 1987), el carbono orgánico total (Windom *et al.*, 1989, Daskalakis y O'Connor 1995), hierro (Trefry *et al.*, 1985, Daskalakis y O'Connor 1995, Morse *et al.*, 1993), aluminio (Hanson *et al.*, 1993, Schropp *et al.*,

1990, Bertine y Goldberg 1977), litio (Loring 1990), elementos de tierras raras (Olmez *et al.*, 1991) y trazadores radioisotópicos (Finney y Huh 1989 Goldberg *et al.*, 1979).

En estudios de contaminación de suelos y sedimentos, el litio es uno de los elementos más utilizado como elemento conservativo para normalizar las concentraciones de los metales pesados y otros elementos trazas (Rubio *et al.*, 2000; Prego *et al.*, 2008; Aloupi y Agelidis, 2001). En un estudio reciente sobre la contaminación de los suelos urbanos de la ciudad puerto de Talcahuano, Chile (Tume *et al.*, proyecto Fondecyt #1130366 - 2013-2015), analizó el uso de litio como normalizador para evaluar y distinguir el aporte antrópico de los valores naturales (background). Al final, no fue posible utilizar el Li como elemento normalizador y conservador debido a una distribución anormal y concentraciones muy elevadas en algunos sectores, sobre todo en el sector donde desemboca el río Andalién (Vergara, 2016).

Antes de Tume *et al.* (2013-2015), no existían mayores estudios de la distribución y concentración de litio en Concepción y alrededores, tanto en rocas como en suelos. Teniendo en cuenta que, en estudios ambientales, el litio se cree que proceden principalmente de fuentes naturales con el mínimo de contribución antropogénica (González, 2018, comunicado personal).

El objetivo de esta investigación es determinar si las altas concentraciones de Li obtenidas por Tume *et al.* (2013-2015) en el sector de la desembocadura del río Andalién provienen de la evolución magmática de la Cordillera de la Costa, llegando a dicho punto por el transporte de sedimentos o es producto de la intervención humana en el sector.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Área de estudio

El río Andalién se encuentra en la VIII región del Biobío y es el de mayor importancia en el interfluvio Itata-Bío Bío. Nace de la unión de los esteros Poñén, que viene del norte, y Curapalihue, que viene del sur (Figura 2). Tiene una longitud de 42 km y desemboca al norte del río Bío Bío, en la Bahía de Concepción. El río Andalién corresponde a un sistema hidrográfico de régimen estrictamente pluvial, de quinto orden, con crecidas en invierno, de caudal promedio anual de $14.3 \text{ m}^3/\text{s}$; y caudales mínimos de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ en periodo estival y máximos entre 700 y $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ en épocas de grandes crecidas (Jaque, 2008). Los principales tributarios que aportan caudal al río Andalién son los esteros Poñén, Curapalihue y Nonguén.



Figura 2: Mapa del área de estudio (rectángulo naranja) que demuestra el trayecto del río Andalién desde su origen en la Cordillera de la Costa hasta su desembocadura en la Bahía de Concepción.

La cuenca del río Andalién tiene una red hidrográfica densa de tipo dendrítico abierto (Figura 3). Se encuentra bajo la influencia de un bioclima mediterráneo y presenta al menos dos meses consecutivos de período estival, donde la precipitación tiende a ser mayor al oeste de la Cordillera de la Costa. Abarca una zona de 780 km^2 y se ubica entre los $36^\circ 42'$ y los $36^\circ 56'$ de Latitud Sur y entre los $72^\circ 36'$ y los $73^\circ 04'$ de Longitud Oeste (Jaque, 2008).

En julio del año 2006 hubo un evento pluviométrico que se asocia a un sistema frontal de gran intensidad, el que afectó a toda la zona centro sur, centrándose los mayores impactos en la VIII Región. Precipitaron 400 mm en 48 horas detonando anegamientos, procesos de remoción en masa en las laderas de los cerros e inundaciones vinculadas a los desbordes de los ríos Bío Bío, Andalién, estero Nonguén y cursos de aguas artificiales (Vidal y Martel, 2007). Con respecto al río Andalién, las grandes precipitaciones provocaron que los cauces naturales alcanzaran grandes magnitudes de caudal, desbordándose e inundando gran parte de sectores urbanos de la zona nor-oriente de Concepción comprendiendo el sector Collao, y las poblaciones Huáscar, Los Lirios, Valle Nonguén y Palomares dejando a más de 100.000 habitantes, patrimonios públicos y privados destrozados. Entre los factores que explican la ocurrencia de inundaciones se distinguen: la topografía (áreas ribereñas cuya altitud es inferior a 8 m.s.n.m., asentadas sobre la llanura de inundación del estero Nonguén y río Andalién), características geomorfológicas, influencia antrópica en las riberas del río y factores externos como la intensidad de lluvia, entre otras. Como consecuencia de este evento, el ministro de obras públicas (MOP) declaró de emergencia la ejecución de diversos estudios y obras para dicha región, donde un par de años más tarde se da inicio a las obras “DISEÑO DE OBRAS FLUVIALES RÍO ANDALIÉN, ESTEROS NONGUÉN Y PALOMARES, VIII REGIÓN DEL BÍO BÍO” (Vidal y Martel, 2007).

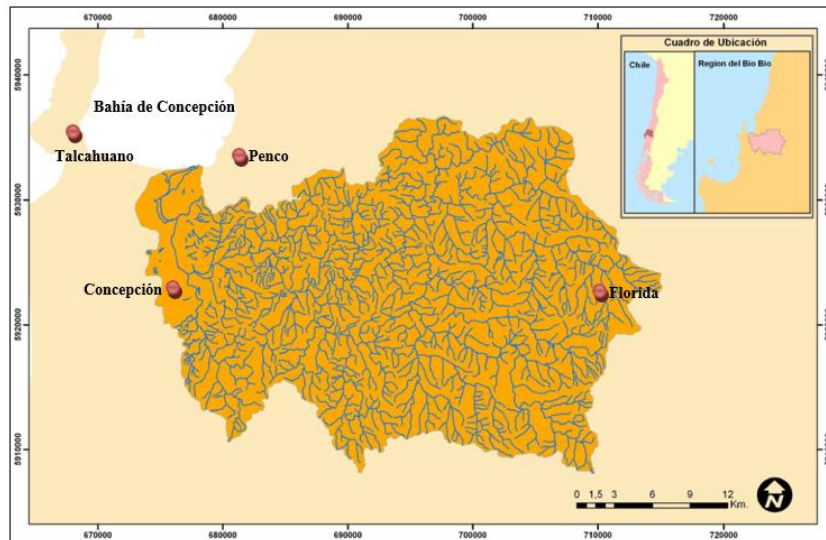


Figura 3: Cuenca del río Andalién con una red hidrográfica densa tipo dentríptico abierto. (Modificado de Jaque, 2008).

2.1. Geología

La cuenca del río Andalién se ubica en la unidad denominada Cordillera de la Costa, predominantemente en la vertiente occidental de este macizo. Esta se compone por rocas intrusivas graníticas y metamórficas paleozoicas, cuya evolución ha sido controlada por la tectónica de bloques. Presenta una intensa meteorización de las rocas intrusivas que provoca la formación de un espeso manto meteorizado denominado “maicillo”. Según cálculos presentados por Börgel (1983) más del 60 % de la cordillera costera está afectada por erosión de intensidad moderada a muy severa.

La geología de la cuenca posee diversas formaciones rocosas que comprende el basamento metamórfico, los intrusivos graníticos de edad Paleozoica, rocas sedimentarias Terciarias de las formaciones Quiriquina (Cretácica) y Curanilahue (Eoceno inferior) y depósitos fluviales-aluviales no consolidados recientes (Figura 4). Aquí se pueden encontrar relieves de erosión como cordones y plataformas, además de relieves de acumulación como valles, terrazas fluviales, llanuras hidromorfas, cordones litorales, marismas y dunas (Jaque, 2008).

Las rocas metamórficas de edad Paleozoica son la denominada Serie Oriental (PzSE) ubicada al Suroeste de la cuenca (Figura 4), cubriendo parte de la cabecera de la subcuenca del Estero Nonguén. La litología corresponde a esquistos, filitas, gneises y metaareniscas.

Los intrusivos graníticos (Pzg), también de la edad Paleozoica, está integrado por un complejo plutónico, cuya composición varía entre tonalita y granodiorita, con una mineralogía de cuarzo, feldespatos, biotita, moscovita y hornblenda (Creixell, 2001). Este complejo granítico cubre más del 85% de la superficie de la cuenca, desde su cabecera en las cercanías de Florida, hasta su contacto con la llanura del Andalién (Figura 4).

En la cuenca se ubican zonas pegmatíticas, destacando la pegmatita Poñén, descrito por Jil (2014), que se encuentra cerca del nacimiento del río Andalién, en el Estero Poñén. El término pegmatita es una denominación netamente textural y no composicional que permite describir a rocas intrusivas, cuyos cristales son mayores a 1 cm. La pegmatita de Poñén, está compuesta principalmente por cuarzo, feldespato sódico y potásico, moscovita, biotita y granate (Jil, 2014). Basado en el comportamiento incompatible del litio en sistemas graníticos, la pegmatita de Poñén podría ser una fuente importante de litio que aportaría al río Andalién.

A la fecha, existen pocos estudios sobre el cuerpo de pegmatita y ningún análisis geoquímico publicado. Jil (2014), realizó una descripción geológica y mineralógica de los sectores de Poñén, Parque Coyanmahuida y Vertientes.

La Formación Quiriquina (Kq) (Figura 4), comprende una secuencia sedimentaria transgresiva marina-litoral del Cretácico, con abundante contenido fosilífero. Se distribuye en una delgada franja costera de la provincia de Concepción y está compuesta por areniscas, conglomerados, lutitas, calizas extraclásticas y oolíticas (Gajardo, 1981). Se puede encontrar distribuida entre las localidades de Lirquén y Cocholgue sobreyaciendo a las rocas metamórficas del Basamento Metamórfico, de forma discordante con las rocas del Basamento Cristalino, en la localidad de Concepción (Cerros La Pólvora, Chacabuco y Lo Galindo) y al oeste de Dichato sobreyaciendo a las rocas graníticas del Batolito Costero y en la Isla Quiriquina. En Concepción, la secuencia de la Formación Quiriquina, consiste en un conglomerado basal compuesto por clastos centimétricos de rocas graníticas, sobreyaciendo a estas una secuencia de areniscas pardas de grano fino. Esta secuencia posee un nivel de concreciones fosilíferas con forma esféricas a ovoidal y sobre las areniscas pardas se encuentran 20 m. de areniscas finas verdes (Quezada, 1996).

La Formación Curanilahue (Eocc), se distribuye de forma continua por la bahía de Concepción, en Cosmitos, Cerro Las Monjas y las Lomas de San Andrés (Figura 4). La formación ocurre de forma concordante sobre la Formación Quiriquina y está compuesta por sedimentos continentales con mantos de carbón y algunas intercalaciones marinas. En algunos sectores, los estratos de esta formación yacen discordantes sobre las rocas ígneas y metamórficas del Paleozoico (Chotín, 1979). En Concepción aflora como una secuencia de areniscas amarillas y grises, limonitas y algunos centímetros de carbón (Quezada, 1996).

Los depósitos modernos, son sedimentos constituidos por arenas de playa, dunas costeras y barras de flechas que afloran en las planicies litorales paralelas a la Cordillera de la Costa (Figura 4). También son depósitos modernos de los sedimentos fluviales superficiales que se distribuyen en riberas, llanuras, desembocaduras de ríos y esteros (Figura 4). Los depósitos litorales de origen marino que consisten en gravas y arenas uniformes, de textura madura y tamaño del grano medio a grueso, de color blanquecino, castaño a gris oscuro, con clastos angulosos a muy redondeados y mineralógicamente compuesto por magnetita, fragmentos de basaltos, plagioclasas (arenas del Bío Bío) (Jil, 2014). La arena del Bío Bío, es el suelo de fundación de la ciudad de Concepción depositadas por los ríos Laja y Bío Bío, originadas de la erupción del volcán Antuco, alcanzando espesores de hasta 160 metros. La existencia de los depósitos de arenas en la ciudad, se explica por el hecho de que el río Bío Bío desembocaba en la Bahía de Concepción y posteriormente en la Bahía de San Vicente, conformando un extenso delta y depositando las arenas a su paso, donde se asienta la actual ciudad de Concepción. En la medida que el río cambiaba de curso, dirigiéndose al golfo de Arauco (donde se encuentra su actual desembocadura), se fueron depositando materiales más finos sobre todo entre el Cerro Chepe y el Aeropuerto Carriel Sur (Quezada, 1996).

Los depósitos fluviales del río Andalién se encuentran localizados en las riberas de este (Figura 4), están compuesto principalmente por areniscas y conglomerados; cuarzosas, feldespáticas y micáceas, originadas por la erosión de material granítico (Quezada, 1996). Tienen una disposición subhorizontal y sobreyacen en discordancia angular y de erosión, a las rocas clásticas de las formaciones Quiriquina y Curanilahue.

Los depósitos coluviales inconsolidados, son originados por movimientos de remoción en masa pasados y recientes. Éstos fenómenos afectaron principalmente al material granítico meteorizado (maicillo), debido a su menor estabilidad, lo que se evidencia en la mayor proporción de ese material en estos depósitos (Quezada, 1996).

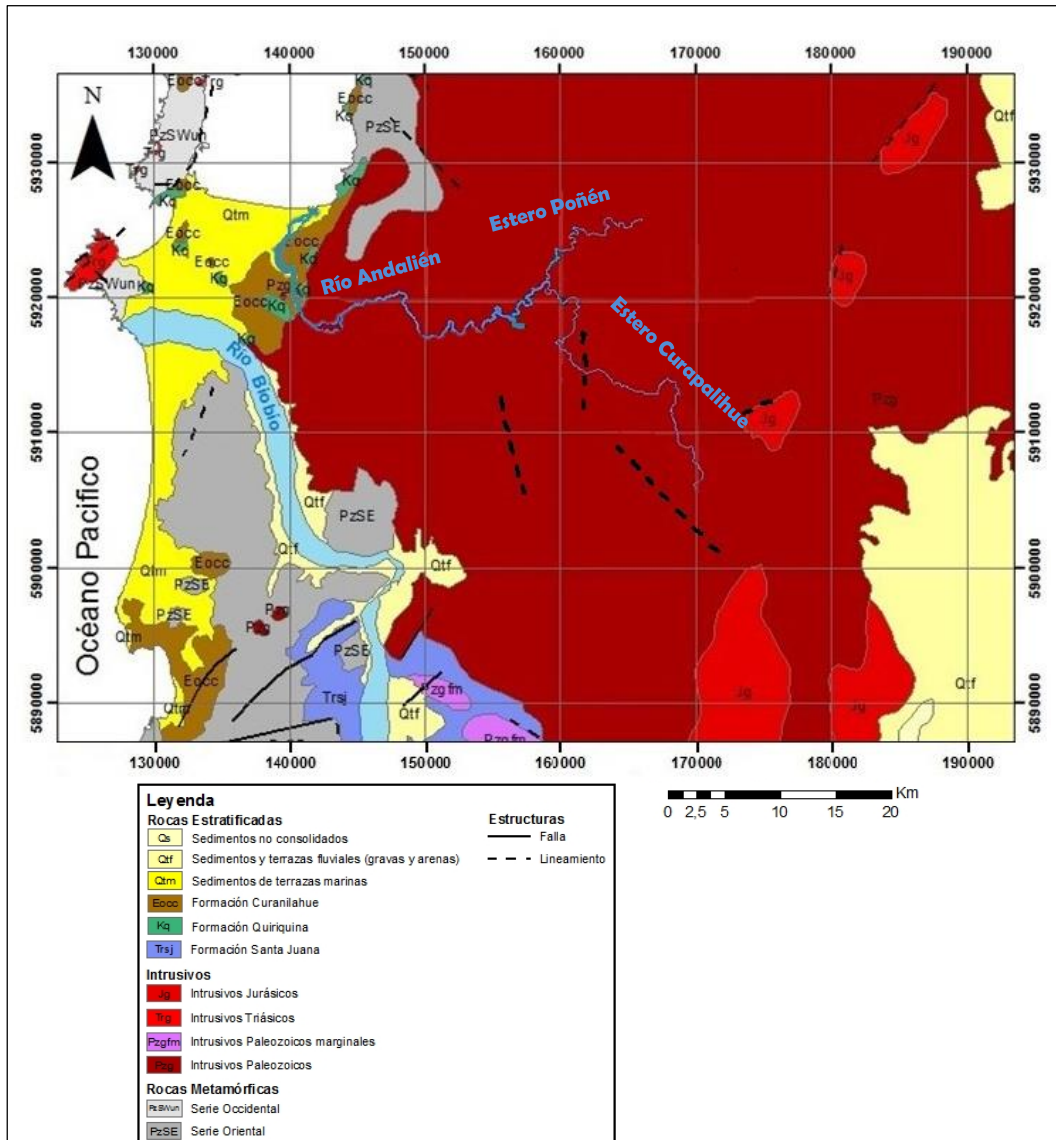


Figura 4: Mapa geológico de Concepción y alrededores. (Modificado de Jil, 2014)

3. METODOLOGÍA

3.1. Trabajo preliminar

En esta etapa se analizó la base de datos del proyecto Fondecyt #1130366 de Tume *et al.* (2013-2015), ya que este estudio motivó la realización de esta investigación. Luego, se realizó la recopilación de material bibliográfico, se hizo una revisión de imágenes satelitales del área de estudio con el fin de definir rutas y puntos de accesos para realizar el muestreo.

3.2. Trabajo en Terreno

Durante 4 salidas de terreno en las fechas 17, 18, 25 y 26 de octubre del año 2017, se realizó un muestreo a lo largo del río Andalién, desde su nacimiento hasta su desembocadura en la Bahía de Concepción. Se extrajeron 21 muestras representativas de sedimentos del fondo del río y 6 muestras de rocas inalteradas,

alrededor o cercanas a este. Cada punto fue georreferenciado con un GPS. En la Figura 5, se muestran los puntos de muestreo a lo largo del río.

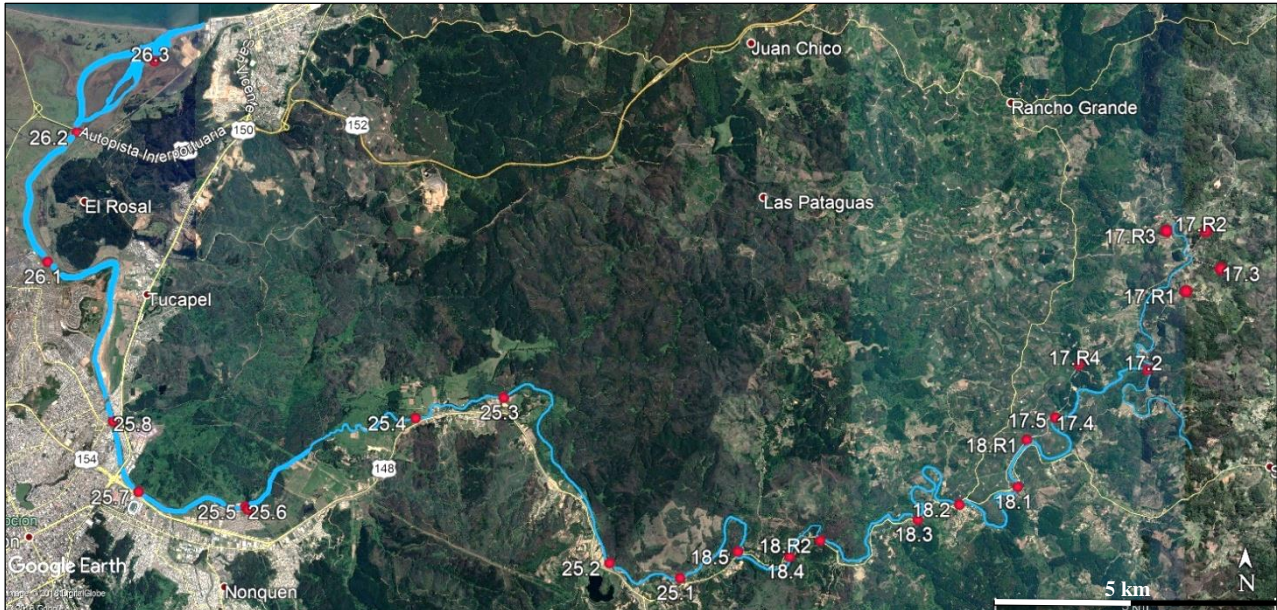


Figura 5: Área de estudio y distribución de puntos de muestreo. Los puntos rojos corresponden a cada muestra extraída con su respectivo código de identificación. Los códigos que incluyen la letra “R”, corresponden a las muestras de rocas.

Las muestras de sedimentos fueron extraídas con una draga Van Veen de acero inoxidable, capaz de extraer muestras superficiales de sedimentos en el fondo de cuerpos de agua de hasta 25 cm de profundidad, incluso bajo la influencia de corrientes (Figura 6 a, b). Luego de extraer la cantidad de material deseado, el equipo fue limpiado para evitar contaminación cruzada. Las muestras fueron guardadas en bolsas de poliuretano, debidamente registradas, para luego ser transportadas al laboratorio (Figura 6 c y d).

Se logró obtener seis muestras de rocas cercanas al río, siendo 3 de estas el resultado del muestreo realizado en la pegmatita de Poñen (17.R1, 17.R2 y 17.R3) y el resto, son muestras de intrusivos graníticos (maicillo). El muestreo y análisis de las rocas se realizó debido al posible aporte que pudieran tener al río por efecto de la meteorización y erosión. Al igual que las muestras de sedimentos, estas fueron georreferenciados por GPS y guardadas en bolsas de poliuretano para el transporte al laboratorio.



Figura 6: Secuencia de muestreo realizado en terreno (Coordenadas UTM: 695187 E – 5927766 S). a) posicionamiento de la draga, b) extracción de muestra, c) guardado de las muestras en bolsas de poliuretano y d) muestra lista para transporte.

3.3. Trabajo de laboratorio

3.3.1. Caracterización física

Las muestras de sedimentos se secaron por 24 horas en el horno del laboratorio de GeoMateriales de la UCSC a una temperatura de 95°C. Una vez secas y antes de realizar cualquier análisis, se pasaron por el tamiz 3/8'' para poder eliminar cualquier material que pudiera alterar los análisis, como madera, basura, pasto, etc. Luego, se realizaron ensayos de granulometría utilizando el método de análisis mecánico mediante tamices de abertura y numeración. Se consideró el uso de los tamices N° 4, 8, 20, 40, 60, 100 y 200. Esto se hace con el fin de obtener la distribución del tamaño de partículas, representado a través de la curva granulométrica de cada muestra, lo que además permite determinar el contenido, en porcentaje, de finos y la respectiva clasificación de muestras.

A las muestras de rocas y sedimentos se les realizó una descripción petrográfica visual y una inspección al microscopio lupa trinocular con cámara 8MGPXL LED marca Leica, para determinar su clasificación. Además, se registraron imágenes de alta resolución y aumento con una cámara fotográfica adaptada para macrografía. Para el análisis químico de rocas, se lavaron y limpiaron muestras representativas con el fin de quitar cualquier material contaminante.

3.3.2. Determinación de litio en sedimentos y muestras de rocas

Se tamizó en seco a través del tamiz #8 una pequeña porción de muestra representativa y se apartaron muestras de 1 gr. de material que paso por este tamiz, el que se molió con mortero de ágata hasta que quedara como una consistencia de polvo. En el caso de las muestras de rocas, se apartó una muestra representativa y se molió directamente en el mortero. Luego, las muestras pulverizadas se volvieron a tamizar por la malla #200 para eliminar segmentos mal destruidos.

Se pesaron 500 mg de muestra que se colocaron en un tubo de digestión de teflón semi cubierto para evitar la volatilización. Se agregaron 21 mL de ácido clorhídrico 30% Suprapur (HCl) y 7 mL de ácido nítrico 65% Suprapur (HNO₃), ambos de alta pureza. Se calentaron gradualmente en el digestor, marca SCP SCIENCE modelo DigiPREP Jr, en el laboratorio de la Facultad de Ciencias de la UCSC, mediante una rampa de 60°C durante 30 minutos, 80°C durante 5 minutos, 110°C durante 3 minutos y finalmente 130°C; todo el proceso se realizó bajo campana (Figura 7). Luego, se dejó enfriar a temperatura ambiente y se llevaron a un matraz de aforo 25 mL, aforando con agua Milli Q, para después almacenarlos en tubos centrifugas para evitar interferencias de matriz (material en suspensión) en el análisis.



Figura 7: Digestión de las muestras con ácidos en el digestor, marca SCP SCIENCE modelo DigiPREP Jr. Facultad de Ciencias, UCSC.

Para cuantificar la concentración de litio se utilizó una curva de calibrado con una solución de 25 ppm de litio aplicado a la técnica de Espectrofotometría de Absorción Atómica de doble haz a la llama, modelo 240 AA ubicada en la Facultad de Ciencias de la UCSC (Figura 8). Este equipo mide, a través de una absorción muy pequeña, la absorbancia media de las muestras procesadas por la digestión previamente especificada.



Figura 8: Equipo de espectrofotometría de absorción atómica, modelo 240 AA. Facultad de Ciencias, UCSC.

Para verificar que los resultados obtenidos son confiables (porcentaje de error), se realizó el mismo procedimiento mencionado anteriormente, a una muestra certificada tipo “Sand”, con la diferencia que al terminar la digestión se filtró con papel Whatman 42.

4. RESULTADOS E INTERPRETACIONES

4.1. Caracterización física de los sedimentos.

En un análisis de granulometría, el coeficiente de uniformidad (C_u) (Ecuación 1) es una medida de graduación o uniformidad de los sedimentos y el coeficiente de curvatura (C_c) (Ecuación 2), es un dato complementario para definir la uniformidad de la curva (Badillo y Rodríguez, 2005), lo que se obtienen mediante las siguientes expresiones:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \quad (2)$$

Donde $D_{10,30,60}$ es el diámetro por el que pasa el 10%, 30% y 60% del material, respectivamente.

La comparación global de las curvas granulométricas de todas las muestras analizadas, permitió observar la presencia de 3 grupos de curvas, las que se diferencian entonces según sus coeficientes de uniformidad y curvatura. Por lo anterior, se decidió obtener valores promedios de estos para cada uno de los grupos y no valores globales, pues esto último no entregaría información verídica ni representativa de los análisis.

Así, los valores promedios para cada grupo se muestran en la Tabla 1, donde las curvas granulométricas de los grupos 1, 2 y 3 se representan en las Figuras 9, 10 y 11, respectivamente.

Tabla 1: Coeficientes de curvatura (C_c) y uniformidad (C_u) promedios.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
C_u	3.52	2.48	6.03
C_c	1.07	0.95	0.81

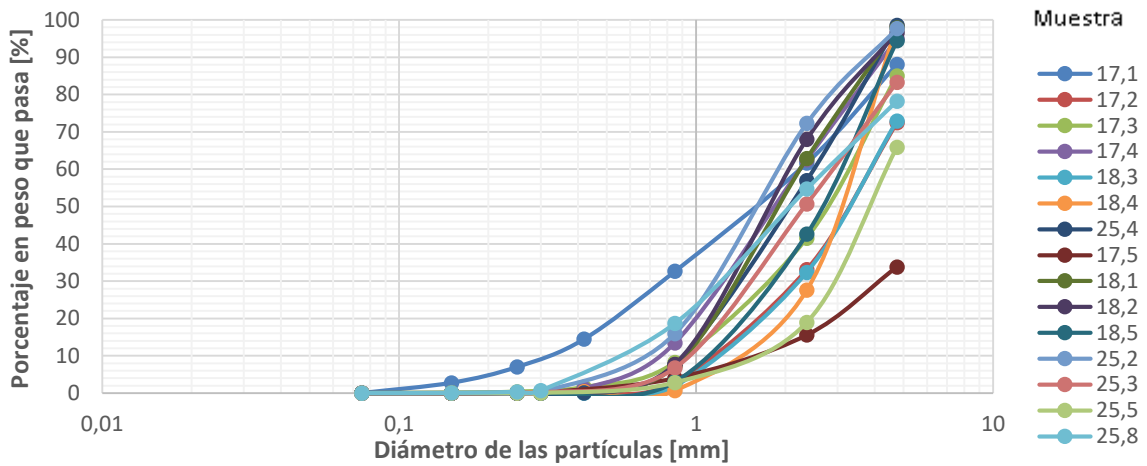


Figura 9: Curva granulométrica de 15 muestras de sedimentos.

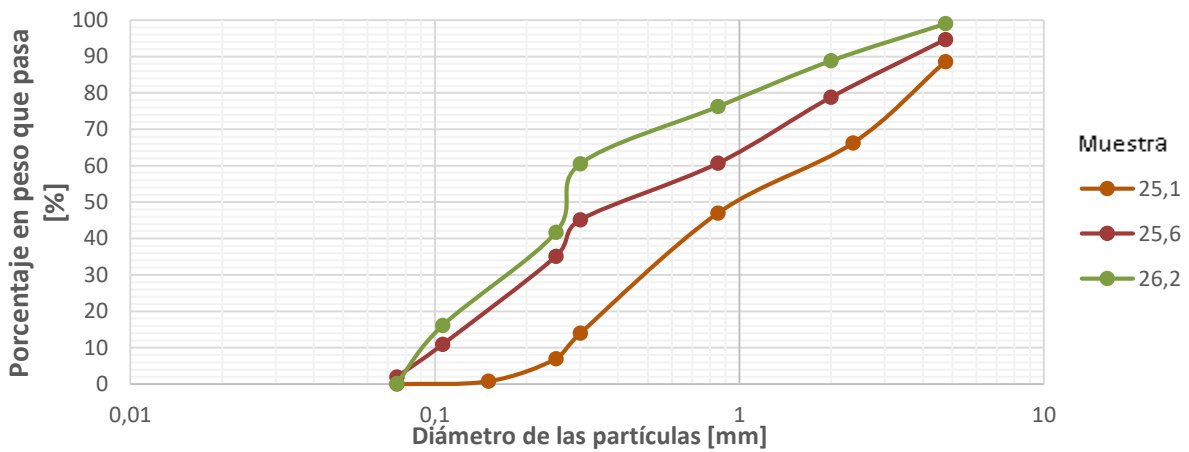


Figura 10: Curva granulométrica de las muestras 25.1, 25.6, 26.2.

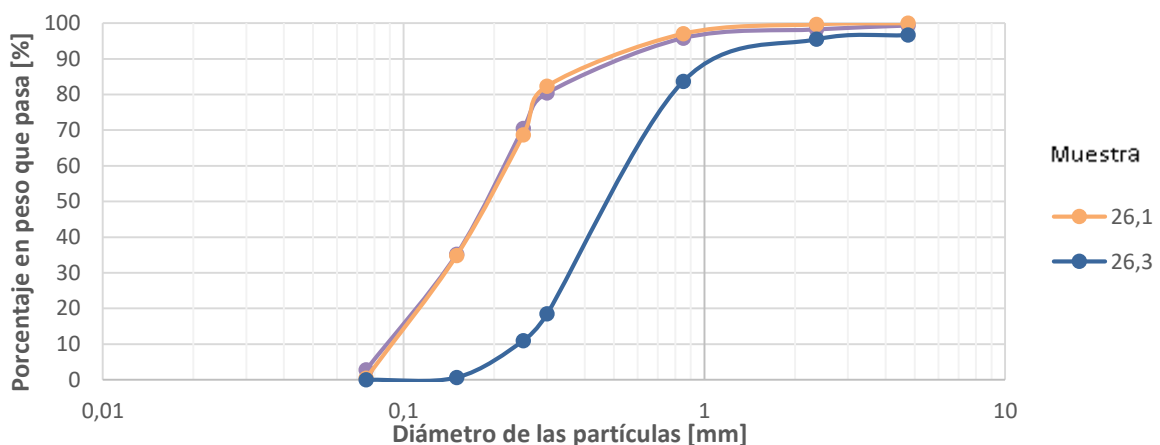


Figura 11: Curva granulométrica de las muestras 25.7, 26.1 y 26.3

En base a los coeficientes de uniformidad y curvatura de la Tabla 1 y de las curvas granulométricas anteriores, se puede deducir que la Figura 9 posee curvas cóncavas y representa materiales bien graduados, esto es, que contienen partículas de diversos tamaños, lo que permite rellenar de mejor manera los espacios vacíos. Por otra parte, la Figura 10 muestra la granulometría de suelos muy uniformes, con curvas casi rectas que denotan un contenido en porcentaje de partículas semi-uniforme (sin dominio de material fino ni

grueso). Finalmente, en la Figura 11 se observan suelos bien graduados, con curvas convexas, lo que describe suelos con mayor acumulación en porcentaje de finos.

Clasificando las muestras de acuerdo a su granulometría y textura, se tiene que un 76% de las muestras son arenas con gravas y pocos finos, 10% son arenas limosas y 14% de las muestras son arcillas.

El contenido (en porcentaje) de finos se obtiene luego de lavar las muestras, y se hace con la finalidad de eliminar todo el material menor a 0,075 mm de diámetro, usando como filtro la malla N°200. Luego del lavado, se vuelve a secar en el horno y pesar; la diferencia de ese peso con respecto al peso de la muestra inicial, corresponde a la cantidad de material fino. Para calcular el porcentaje de finos (o pérdida en lavado), se utiliza la ecuación 3:

$$\%P = \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} \cdot 100 (\%) \quad (3)$$

Donde M_1 es el peso seco del material antes de lavar y M_2 es el peso seco después de lavar.

El análisis para cada muestra permite obtener la concentración de finos en cada punto de muestreo, resumen que se representa en la Tabla 2.

Tabla 2: Contenido en porcentaje de finos en sedimentos.

Código de Muestra	Porcentaje de finos (%)
17.1	11,34
17.2	0,67
17.3	0,47
17.4	1,41
17.5	0,88
18.1	0,28
18.2	0,30
18.3	1,19
18.4	0,52
18.5	0,21
25.1	5,07
25.2	0,48
25.3	0,24
25.4	0,16
25.5	17,40
25.6	56,56
25.7	30,35
25.8	0,06
26.1	75,26
26.2	57,95
26.3	2,12

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) cubre los suelos gruesos y finos, separando a ambos por el tamizado a través de la malla 200 (0.075 mm). Las partículas gruesas no atraviesan dicha malla y las finas sí. Un suelo se considera grueso si más del 50% de sus partículas son gruesas en peso, y fino, si más de la mitad de sus partículas en peso, son finas (Villalobos, 2016). Basado en lo anterior, se tienen 3 muestras finas y 18 muestras son consideradas gruesas.

4.2. Descripción de sedimentos y rocas

La distribución geográfica de los puntos de muestreo se determinó en función de 2 factores: obtener una distribución homogénea de puntos y la factibilidad técnica y de accesos para efectuar el muestreo en el punto deseado. Por lo anterior, se muestreó en zonas de alta velocidad de cauce (baja profundidad) y otras extraídas desde la ribera del río, las que por su ubicación, tienden a contener una mayor concentración de material fino. Estas últimas se concentran desde el sector de Valle Noble hasta la desembocadura, destacando 4

muestras: Estero Palomares (25.6), Sector Collao (25.7), Lomas de San Sebastián (26.1) y Puente Las Ballenas (26.2).

En general, las muestras extraídas aguas arriba del sector Valle Noble son bien graduadas, con granos subangulares de color claro, con coeficientes promedio de curvatura y uniformidad de 1.03 y 3.69 respectivamente, con bajo contenido de finos, y basado en su mineralogía originada por la erosión de material granítico, predominan minerales de cuarzo y feldespato. (Figura 12).



Figura 12: Muestra representativa de muestras extraídas aguas arriba de Valle Noble (Muestra 18.5, Coordenadas UTM: 687033 E – 5922762 S).

Por otra parte, en las muestras extraídas desde la ribera del río destaca más la presencia de minerales de micas (biotita y moscovita) y un contenido promedio de 3.44% de materia orgánica (MO), y en menor medida arcillas y feldespatos (Figura 13). La MO proviene de la gran cantidad de vegetación que existe en la orilla del río y que prolifera en épocas en el cual este alcanza sus niveles más bajos. Es necesario destacar, que en estos casos no era posible, por motivos de seguridad y factibilidad, un muestreo lo más próximo a la zona de alto caudal (como el primer sector) pero siempre se buscó extraer muestras lo más próximos a esta.



Figura 13: Muestra representativa extraída desde la ribera del río Andalién (Muestra 26.1, Coordenadas UTM: 674857 E – 5928154 S).

Las muestras de rocas, corresponden a 3 muestras de rocas intrusivas (maicillo) y 3 muestras extraídas de la pegmatita de Poñén. Las muestras de maicillo (Figura 14a), están compuestas principalmente por cuarzo, micas y feldespatos alterados, que le otorgan un color amarillento característico, tienen una textura inequigranular debido a la presencia de los grandes cristales de ortoclasa, dentro de una matriz compuesta por cuarzo y material de alteración: arcillas y óxidos de hierro. Mientras que las muestras de la pegmatita Poñén consiste en feldespatos, cuarzo, biotita y moscovita, ambos últimos de dimensiones centimétricas. La biotita es de color pardo a negro con una muy leve alteración a óxido de hierro (Figura 14b). Esta mineralogía mencionada concuerda con la presentada en el estudio de Jil (2014).

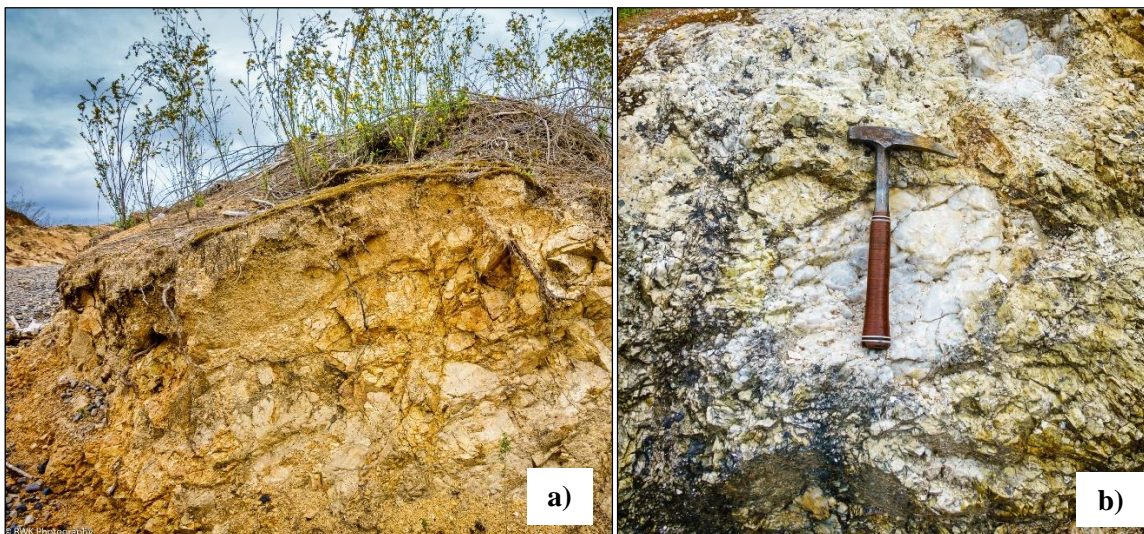


Figura 14: a) Afloramiento de rocas graníticas altamente meteorizadas (maicillo) (Coordenadas UTM: 693174 E - 5925935 S) b) Pegmatita de Poñén demostrando el tamaño centimétrico de los minerales (Coordenadas: 695130 m E – 5927778 m S).

4.3. Determinación de litio en muestras de sedimentos y rocas

Para poder calcular las concentraciones de Li en las muestras, se realizó la curva de calibración considerando 6 puntos con concentraciones variables, y se midió la absorbancia media a través del Espectrofotómetro de Absorción Atómica (Tabla 3 y Figura 15)

Tabla 3: Datos de concentración y absorbancia de la curva de calibración de Li.

Concentración (mg/L)	Absorbancia media
0	-0,0007
0,1	0,0179
0,2	0,0359
0,5	0,0911
1	0,1923
2	0,3804

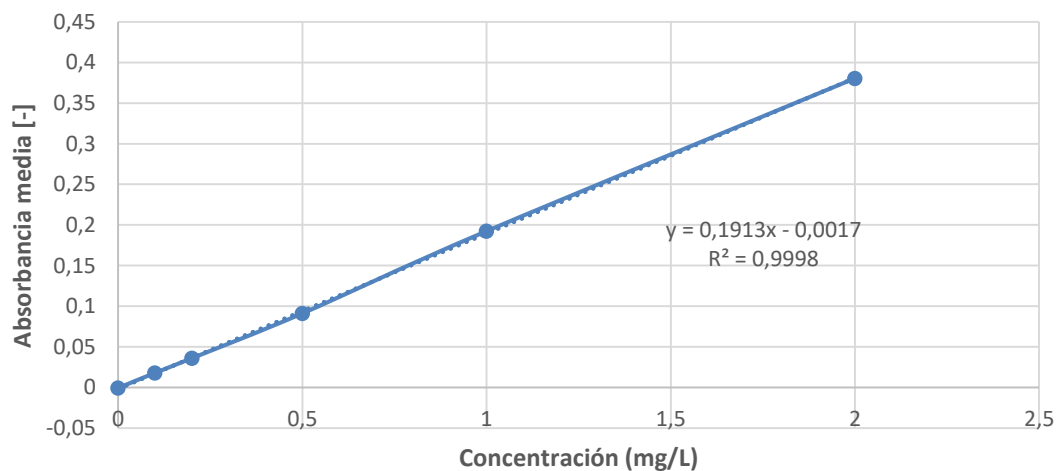


Figura 15: Gráfico curva de calibración.

De la figura, se extrae una correlación de 0,9998. Se analizaron las muestras de sedimento por el equipo de absorción atómica entregando la absorbancia media y junto con la ecuación de la recta, entregada por la figura anterior, se despeja la variable “X”, y se obtienen las concentraciones del litio (Tabla 4).

Tabla 4: Concentraciones litio de cada muestra. (LD= bajo del límite de detección)

Muestra	Masa (g)	Absorbancia media	Concentración de Li (mg/kg)
17.1	0,50	0,0093	2,87
17.2	0,54	0,0002	0,46
17.3	0,56	0,0084	2,34
17.4	0,54	0,0101	2,84
17.5	0,52	0,0010	0,68
17.R1	0,53	0,0142	3,92
17.R2	0,58	0,2907	1320,40
17.R3	0,51	-0,0035	<LD
17.R4	0,51	0,0020	0,95
18.1	0,53	0,0004	0,52
18.2	0,53	0,0058	1,84
18.3	0,51	0,0008	0,64
18.4	0,58	0,0096	2,53
18.5	0,59	0,0113	2,87
18.R1	0,50	0,0080	2,53
18.R2	0,58	0,0778	17,93
25.1	0,58	0,0289	6,85
25.2	0,55	0,0073	2,15
25.3	0,52	0,002	0,92
25.4	0,59	0,0107	2,73
25.5	0,59	0,0015	0,71
25.6	0,55	0,0617	15,02
25.7	0,55	0,1046	25,09
25.8	0,57	0,0028	1,03
26.1	0,55	0,1627	39,29
26.2	0,57	0,0538	12,77
26.3	0,50	0,0304	8,35

De la Tabla 4, se destacan la muestra 17.R2, que es un mineral de biotita, y 17.R3, que corresponde a un feldespato, ambas extraídas de la pegmatita de Poñén. La muestra de biotita tiene la mayor concentración (1.320 ppm). La muestra de feldespato tiene la concentración más baja (-0,47 ppm), menor al límite de detección del equipo (es decir, es menor a la concentración mínima que puede medir el equipo de manera confiable), y esto se puede deber a que, según el estudio realizado por Jil (2014), el feldespato se encuentra intercrecido con cuarzo con disposición cuneiforme. Además, cabe mencionar que las muestras 17.3 y la 25.6 fueron extraídas de los esteros Poñén y Palomares respectivamente.

La Tabla 5 expresa el valor experimental que se obtuvo a partir del análisis de la muestra certificada tipo "Sand", y se comparó con el valor certificado de referencia dando un error del 1%. Se considera un error aceptable, por lo que se concluye que los resultados de los análisis de las muestras están correctos y por ende son confiables.

Tabla 5: Determinación de litio en material de referencia certificado.

Metal	Valor experimental (mg/kg)	Valor certificado (mg/kg)	% Error
Litio	91,1	92,1 ± 12,2	1

4.4. Litio en los sedimentos finos

Según Lagos (2009), las arcillas ricas en litio se pueden dividir en dos tipos: aquellas en las que el litio forma parte de la estructura cristalina, como el caso del mineral de arcilla llamado hectorita; y más comúnmente en

las arcillas en las cuales el litio resulta de un enriquecimiento secundario. Por ende, la posibilidad de obtener mayores concentraciones de litio aumenta conforme lo haga la acumulación de partículas finas.

A fin de probar si existe una relación entre la concentración de litio y el contenido de finos en las muestras extraídas en el río Andalién, se realizó un gráfico de línea de tendencia entre estas dos variables (Figura 16).

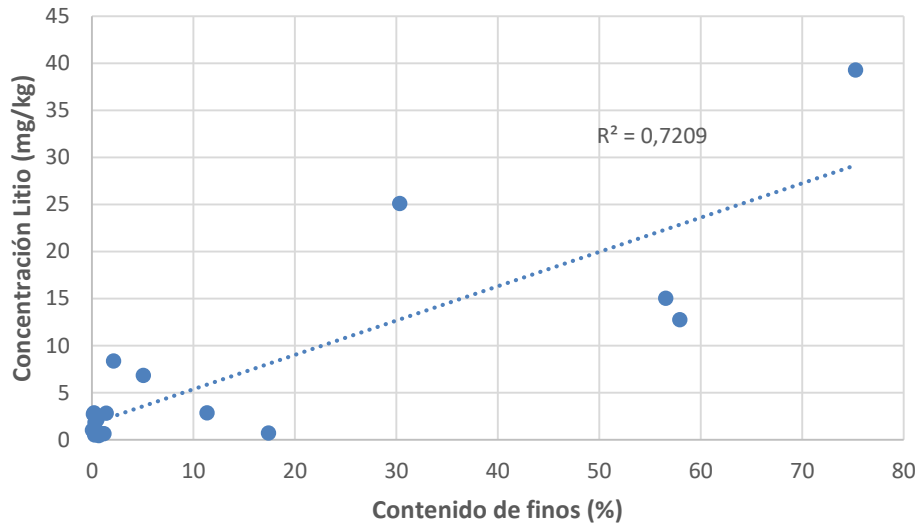


Figura 16: Línea de tendencia de la relación concentraciones y contenido de finos.

El análisis de la figura permite obtener una correlación de Pearson de 0.85 considerada buena, por lo que la concentración de litio estará en función del contenido de finos presentes en el substrato del lecho del río.

La Figura 17 grafica el contenido de finos (eje vertical izquierdo) y concentración de litio (eje vertical derecho) para cada muestra analizada, donde el eje horizontal representa la longitud del río, desde su inicio (km 42) hasta su desembocadura (km 0). Se observa una tendencia donde las concentraciones de litio aumentan en las muestras que contienen mayor contenido de finos, y por el contrario las concentraciones disminuyen cuando las muestras son de material grueso.

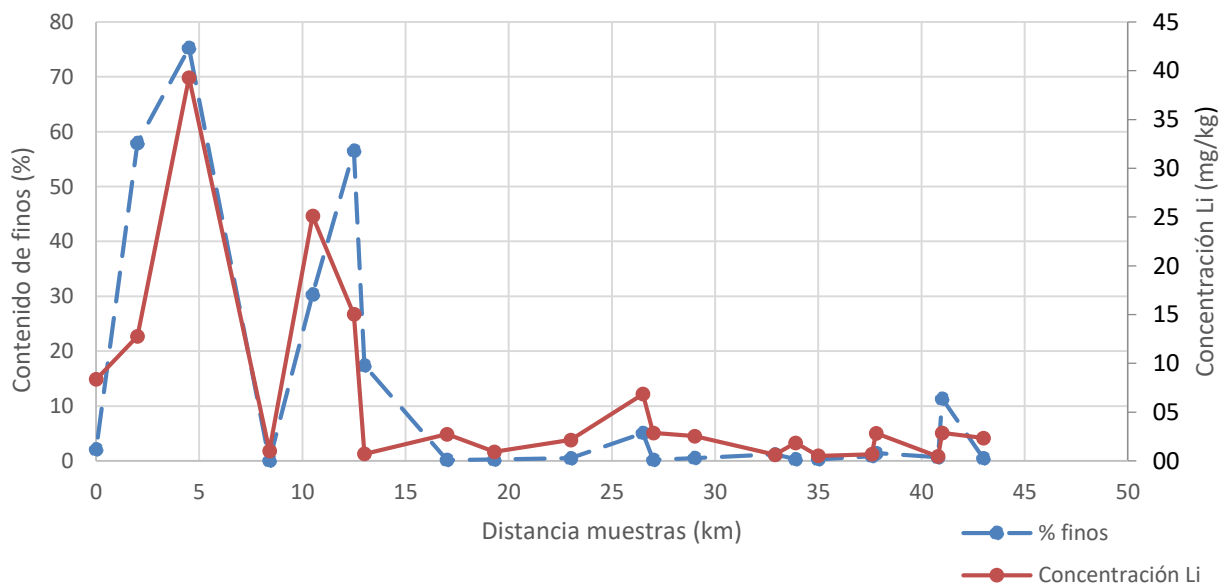


Figura 17: Relación entre las concentraciones de litio y el contenido de finos, en porcentaje, de las muestras de sedimentos.

Finalmente, se obtiene el mapa de distribución de concentraciones de litio a lo largo del río Andalién tanto de muestras de sedimentos como de rocas (Figura 18). Se puede apreciar que la distribución espacial de los puntos de muestreo desde el inicio del río hasta el ingreso a la autopista en dirección a Concepción (hasta el

punto 25.4 de la Figura 5) es homogénea y semi-equidistante. Sin embargo, desde ahí hasta la desembocadura, hubo complicaciones para encontrar puntos de accesos habilitados para la extracción de las muestras, por lo que no se pudo mantener el mismo nivel de representatividad espacial.

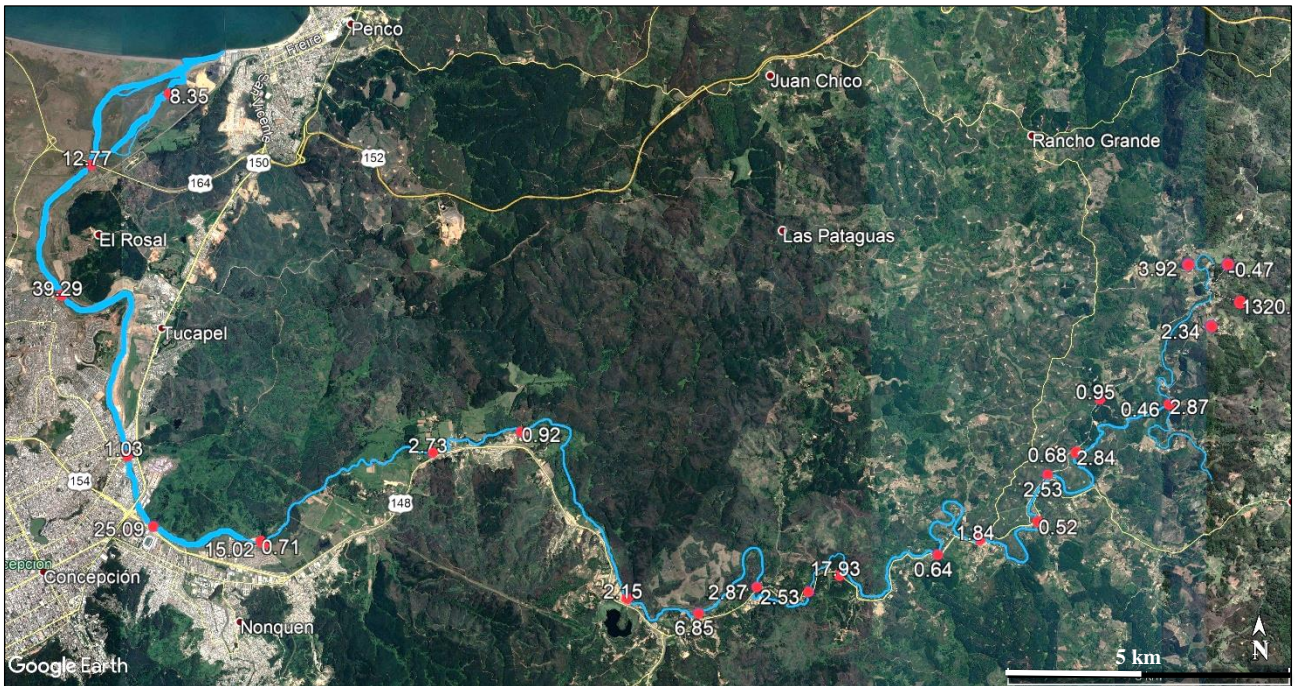


Figura 18: Distribución de las concentraciones de litio en los sedimentos del río Andalién.

4.5. Análisis comparativo.

Esta investigación nació a partir del proyecto Fondecyt #1130366, en el que no se pudo utilizar el litio como normalizador debido a concentraciones anómalas entre los suelos superficiales (Top Soil) y suelos profundos (Deep Soil) (Vergara, 2016). En este se analizaron los datos de concentración de litio a través del programa Kriging, que entrega una estimación de la tendencia, basado en datos reales, a través de un mapa de predicción del elemento (Figura 19).

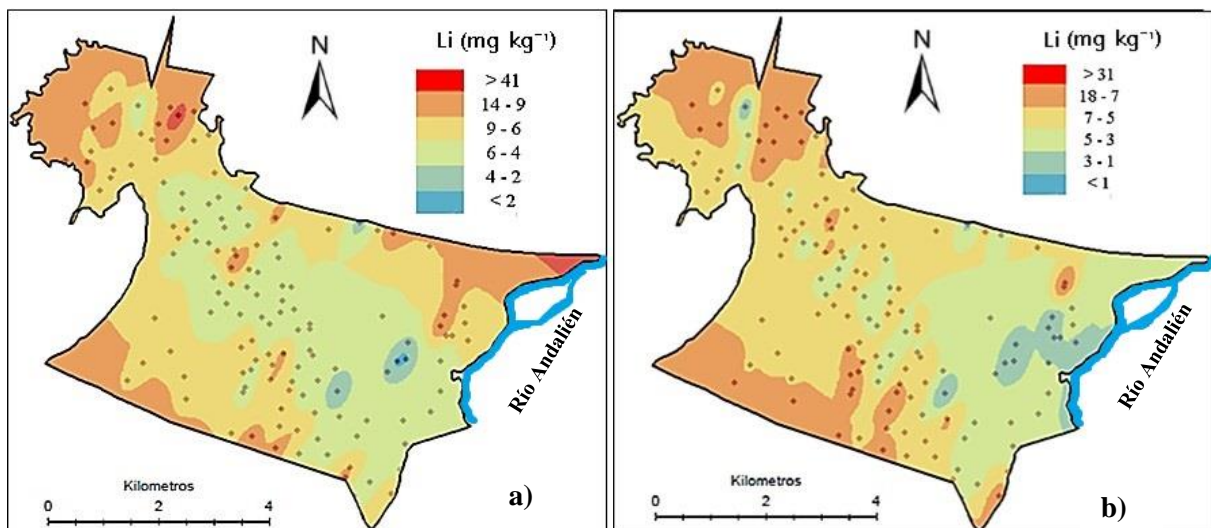


Figura 19: Mapa de predicción de distribución espacial del litio en a) Top Soil, b) Deep soil. (Álvarez, 2015).

Los resultados mostraron concentraciones que fueron consideradas como elevadas entre 9-14 ppm en la zona de San Vicente y en el sector norte de Talcahuano. Además, cerca del cerro Centinela y la desembocadura del río Andalién, las predicciones de concentración arrojaron valores que superan los 41 ppm (Figura 19) (Álvarez, 2015).

De acuerdo a los datos del muestreo entregados por Tume *et al.* (2013-2015), en general la distribución espacial del litio en los suelos es homogénea en sus 3 estratos, con algunas excepciones (Tabla 6), que se encuentran ubicadas en zonas comerciales y una en zona industrial. Se puede deducir que los altos valores de concentración de litio pueden ser producto de contaminación antrópica.

Tabla 6: Muestras con altas diferencias de concentraciones de litio entre estratos en Talcahuano.

Muestra	Top Soil (ppm)	Sub Soil (ppm)	Deep Soil (ppm)	Sector	Uso de suelo
321	15.18	11.19	2.97	Denavi Sur	En zona comercial
326	36.14	3.33	2.94	Villa Presidente Ríos	En zona Industrial
421	41.22	26.87	7.38	Cerca del cerro Centinela	En zona comercial
428	16.69	11.13	3.32	Autopista Interportuaria	En zona comercial
432	17.03	21.56	1.86	Autopista av. Jorge Alessandri Rodríguez	En zona comercial

En la Tabla 7, se presenta un resumen de parámetros estadísticos de los 3 estratos de los suelos analizados en Talcahuano y sus cercanías.

Tabla 7: Estadística descriptiva de litio para las muestras en los 3 estratos del área de Talcahuano (Álvarez, 2015).

Estrato	Mediana ppm	Media ppm	SD	Mín. ppm	Máx. ppm
Top Soil	7.07	8.04	5.19	1.48	41.22
Sub Soil	6.88	7.71	4.00	1.08	26.87
Deep Soil	5.37	6.89	5.13	0.72	31.15

La media o promedio de un conjunto finito de números es la suma de una serie de datos cuantitativos dividida entre el número de observaciones. Por otro lado, la desviación estándar es una medida de dispersión de las variables alrededor de la media; cuanto mayor sea la desviación mayor será la dispersión. En la Tabla 7, se puede apreciar que la desviación estándar con respecto a la media es muy cercana, es decir que la desviación estándar es muy grande, por lo tanto, la dispersión de los datos es alta, por lo que se puede deducir que la media no es representativa para la base de datos del proyecto Fondecyt.

La información sobre el valor de fondo de litio (background) en Concepción es muy poca, casi inexistente. Para obtener un valor de referencia que permitiera establecer un valor base de concentración en Concepción, se utilizó la media de los estratos top y deep soil obtenidos por Tume *et al.* (2013-2015), (8.04 mg/kg y 6.89 mg/kg, respectivamente) como valor background (Tabla 7). Se consideró solo estos 2 estratos pues el muestreo realizado en esta investigación fue superficial, lo que se asemeja más a los resultados top soil, pero también era necesario contar con resultados lo más parecidos a la concentración natural del litio (sin intervención antrópica), lo que podría obtenerse del muestreo en deep soil.

En la comparación entre los resultados de esta investigación con los de Tume *et al.* (2013-2015) indica que este último consideró una sobreestimación de concentraciones en el sector de la desembocadura, pues las predicciones del programa Kriging superaron los 41 ppm en el mismo punto en el que nuestras mediciones fueron de 8.35 ppm. Lo anterior puede ser a causa de una distancia considerable entre el punto de estimación y el punto de medición efectiva más cercano.

De acuerdo a los datos del muestreo de sedimentos realizados en esta investigación, se obtuvo una concentración media de 6.31 ppm del río Andalién. Este valor concuerda con los valores promedio que se determinaron del proyecto Fondecyt para los estratos top y deep soil (8.04 ppm y 6.89 ppm). Sin embargo, no se cuentan con suficiente información que permita obtener un valor background de las concentraciones de litio en la Talcahuano y/o río Andalién, por lo que de momento se podría considerar que el valor esperado de concentraciones de litio se encuentre dentro del intervalo formado por los valores medios obtenidos en este estudio y los de Tume *et al.* (2013-2015); esto es [6.31 - 8.04] ppm.

5. CONCLUSIONES

Los resultados de los análisis de sedimentos del río Andalién, muestran una concentración de litio que varía entre 0.46 y 39.29 ppm, desde su inicio hasta la desembocadura.

Entre el sector valle Nonguén y la desembocadura del río Andalién se obtuvieron las concentraciones más altas en las muestras de sedimentos, las que coinciden con las de mayor contenido de finos. Lo que indica cierta influencia del contenido de fino sobre las concentraciones de litio.

La concentración en la desembocadura y puntos cercanos no es alta y no se acerca a las magnitudes establecidas en los resultados del proyecto Fondecyt #1130366 de Tume *et al.* (2013-2015).

A pesar de que no se tengan datos suficientes para determinar un valor background, se podría considerar como tal los valores de concentraciones medias obtenidas en esta investigación y los de Tume *et al.* (2013-2015) que varía entre [6.31 – 8.04] ppm.

6. RECOMENDACIONES

- 1) Realizar como mínimo, un muestreo en las épocas de mayor y menor caudal, ya que la influencia de lluvia puede afectar la velocidad del caudal, variando las concentraciones de litio en el río. Asimismo, se recomienda considerar un mínimo de 3 muestras por punto (centro y riberas), incluso en sus zonas de inundaciones, ya que puede haber mayor concentración de Li en estas dos últimas que en el centro.
- 2) Realizar un muestreo completo en sus afluentes, ya que este estudio solo considera un muestreo preliminar en el estero Palomares y Poñén; ambos con concentraciones mayores que las obtenidas en el cauce del río Andalién.
- 3) Verificar mediante muestreo las concentraciones anómalas predichas por el programa Kriging, ya que estos pueden entregar resultados no representativos en base a los datos ingresados, lo que puede inducir a errores de interpretación.
- 4) Actualizar el mapa de concentración propuesto por Tume *et al.* (2013 – 2015), considerando las concentraciones obtenidas en este estudio.
- 5) Realizar una investigación sobre la influencia que tiene la materia orgánica en las concentraciones de litio, a través de un gráfico donde se pueda ver la tendencia de ambos y ver si están directamente relacionadas.

7. REFERENCIAS.

- Ackerman, F., Bergmann, M. y Schleichert, G.** (1983). "Monitoring heavy metals in coastal and estuarine sediments – a question of grain size <20 mm versus < 60 mm". *Environment and Technology Letters* 4: 317-328.
- Aloupi, M., Angelidis, M. O.** (2001). "Normalization to lithium for the assessment of metal contamination in coastal sediment cores from the Aegean Sea, Greece". *Marine Environmental Research*, 52, 1-12.
- Álvarez, M.** (2015). "Concentraciones y distribuciones de metales en suelos de la comuna de Talcahuano" (tesis pregrado). Universidad Católica de la Santísima Concepción. Concepción.
- Badillo, J. y Rodríguez, R.** (2005): "Mecánica de suelos I: Fundamentos de la Mecánica de Suelos", México, editorial Limusa, S.A.
- Bertine, K. y Goldberg, E.** (1977). "History of heavy metal pollution in southern California coastal zone – Repise". *Environmental Science and Technology* 11: 297-299.
- Börgel, J.** (1983). "Geomorfología y Geografía de Chile". Instituto Geográfico Militar (IGM): 373 pp. Santiago.
- Creixell, C.** (2001). "Petrología y geotermobarometría de las rocas intrusivas de la Cordillera de la Costa entre los 36°30' y 38°00' S" (memoria de pregrado). Universidad de Concepción, Concepción.
- Chotín, P.** (1979). "Geología de la Provincia de Concepción Área de Tomé: Escala 1:50.000". Proyecto CIC N° 88. Universidad de Concepción.
- Daskalakis, K. y O'Conner T.** (1995). "Normalization and elemental sediment contamination in the coastal United States". *Environmental Science and Technology* 29: 470-477.
- Donoso, F., Garay, V. y Cantallopts, J.** (2017). "Mercado internacional del litio y su potencial en Chile". Comisión Chilena del Cobre. Dirección de Estudios y Políticas Públicas.
- Ferraris, (1981).** "Hoja Concepción-Chillán, región del Bío Bío, Escala 1:250.000". Mapas geológicos preliminares de Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Finney, B. y Huh, C.** (1989). "History of metal pollution in the Southern California Bight: An update". *Environmental Science and Technology* 23: 294-303.
- Gajardo, A.** (1981). "Mapas Geológicos Preliminares de Chile. Hoja Concepción – Chillán". Inst. de Investigaciones Geológicas. 32 pp.
- Goldberg, E., Griffin, J., Hodge, V., Koide, M. y Windom, H.** (1979). "Pollution history of the Savannah River Estuary". *Environmental Science and Technology* 13: 588-594.
- Hanson, P., Evans, D., Colby, D. y Zdanowics, V.** (1993). "Assessment of elemental contamination in stuarine and coastal environments base don geochemical and statistical modeling of sediments". *Marine Environmental Research* 36:237-266.
- Horowitz, A. and K. Elrick.** (1987). "The relation of stream sediment surface area, grain size, and trace element chemistry". *Applied Geochemistry* 2:437-445.
- Ilabaca, P.** (1976). "Mapa Geomorfológico Concepción Talcahuano 1:20.000". Concepción.
- Jaque, E.** (2008). "Geomorfología de la cuenca del río Andalién, Chile". *Revista geográfica del Instituto Panamericano de Geografía e Historia*, N° 143. Enero 2008, pp. 97 – 116.
- Jil, D.** (2014). "Uranio, Torio, Itrio y Tierras Raras en pegmatitas paleozoicas, sector de Florida, Octava región, Chile" (memoria de pregrado). Universidad de Concepción, Concepción.
- Loring, D.** (1990). "Lithium – A new approach for granulometric normalization of trace metal data". *Marine Chemistry* 29:155-168.
- Lyons. W.B. y Welech, K. A.** (1997). "Lithium in waters of a polar desert". *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(20), 4309-4319.

- Morse, J., Presley, B., Taylor, R., Benoit, G. y Santschi, P.** (1993). "Trace metal chemistry of Galveston Bay: Water, sediments and biota". *Marine Environmental Research* 36:1-37.
- Olmez, I., Sholkovitz, E., Hermann, D. y Eganhouse, R.** (1991). "Rare earth elements in sediments off southern California: A new anthropogenic indicator". *Environmental Science and Technology* 25: 310-316.
- Prego, R., Belzunce, M., Cobelo A., Hélios-Rybicka, E.** (2008). "Metal particulado en el estuario del río Ulla: Estado de la contaminación y sus fuentes (Ría de Arosano de la península Ibérica)". *Ciencias Marinas* 34(3), 381-388.
- Quezada, J.** (1996). "Geología Urbana y Ambiental de la Ciudad de Concepción" (memoria de pregrado). Universidad de Concepción, Concepción.
- Rubio, B., Nombela, M. A. y Vilas, F.** (2000). "La contaminación por metales pesados en las Rías Baixas gallegas: nuevos valores de fondo para la Ría de Vigo (NO de España)". *Journal of Iberian Geology*, vol 26, pp. 121-149.
- Salminen, R.** (ed. 2006). "Geochemical Atlas of Europe. Part 1 Background Information, Methodology and Maps". ISBN 95-690-913-2 (electronic version).
- Schropp, S., G. Lewis, H. Windom, J. Ryan, F. Caldner, and L. Burney.** (1990). "Interpretation of metal concentrations in estuarine sediments of Florida using aluminum as a reference element". *Estuaries* 13: 227-235.
- Tarback, E. J., Lutgens F. K. y Tasa, D.** (2005). "Ciencias de la Tierra". Edit. Prentice Hall, edición 2005, trad. De 8ª ed.
- Trefry, J., Metz, S., Trocine, R. y Nelsen, T.** (1985). "A decline in lead transport by the Mississippi River". *Science* 230:439-441.
- Urre, A. M. y Berrow, M. L.,** (1982). "Environmental chemistry". *Spec. Period. Rep.*, 2, 94-204.
- Vergara, P.** (2016). "Determinación del índice de geoacumulación y factor de enriquecimiento, en suelos urbanos de Talcahuano" (tesis de pregrado). Universidad Católica de la Santísima Concepción. Concepción.
- Vidal, C. y Martel, S.** (2007). "Ciudad y riesgos naturales: Efecto del evento pluviométrico de Julio del 2006 en el Gran Concepción". *Revista Arquitecturas del Sur Universidad del Bío Bío*. V. 25 N° 33 (Octubre 2007): CIUDAD Y AGUA.
- Villalobos, F. A.** (2016). "Mecánica de suelos" (2nd edición), Concepción, Chile. Editorial UCSC.
- Wedepohl, K.H.** (1978). "Handbook of Geochemistry". Springer Verlag, Berlin.
- Windom, H., Schropp, S., Chalder, F., Ryan, J., Smith Jr., R., Burney, L., Lewis, F. y Rawlinson, C.** (1989). "Natural trace metal concentrations in estuarine and coastal marine sediments of the southeastern United States". *Environmental Science and Technology* 23:314-320.